

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 30579—2022

代替 GB/T 30579—2014

## 承压设备损伤模式识别

Damage modes identification for pressure equipments

2022-03-09 发布

2022-10-01 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 一般规定 .....	1
5 腐蚀减薄 .....	2
6 环境开裂.....	43
7 材质劣化.....	63
8 机械损伤.....	84
9 其他损伤 .....	100
附录 A (资料性) 承压设备损伤模式索引 .....	114
附录 B (资料性) 典型过程成套装置承压设备损伤分布图 .....	118
附录 C (资料性) 损伤模式识别推荐流程 .....	146
附录 D (资料性) 常用金属材料牌号 .....	149
参考文献.....	156

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 30579—2014《承压设备损伤模式识别》，与 GB/T 30579—2014 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 更改了一般规定中环境开裂的定义(见 4.2, 2014 年版的 3.1)；
- b) 更改了有机酸腐蚀的名称, 并增加了有关描述(见 5.8, 2014 年版的 4.8)；
- c) 增加了烟气露点腐蚀的主要影响因素和主要预防措施(见 5.18)；
- d) 增加了电偶腐蚀损伤模式(见 5.26)；
- e) 增加了含盐水腐蚀损伤模式(见 5.27)；
- f) 增加了含氧工艺水腐蚀损伤模式(见 5.28)；
- g) 增加了浓差电池腐蚀损伤模式(见 5.29)；
- h) 增加了乙醇应力腐蚀开裂损伤模式(见 6.14)；
- i) 增加了硫酸盐应力腐蚀开裂损伤模式(见 6.15)；
- j) 增加了氢氟酸应力腐蚀开裂损伤模式(见 6.16)；
- k) 增加了再热裂纹部分主要影响因素、易发生的装置或设备和主要预防措施(见 7.13)；
- l) 增加了金属热老化损伤模式(见 7.16)；
- m) 增加了热疲劳(含热棘轮)的检测或监测方法, 并修改了主要影响因素(见 8.2, 2014 年版的 7.2)；
- n) 增加了冲刷的损伤形态、受影响的材料和检测或监测方法(见 8.6)；
- o) 增加了蠕变的检测或监测方法(见 8.10)；
- p) 更改了应变时效损伤模式的相关描述(见 8.11, 2014 年版的 7.11)；
- q) 增加了高含氧气体促发的燃烧、爆炸损伤模式(见 9.10)；
- r) 更改了典型过程成套装置承压设备损伤分布图中的部分损伤模式(见附录 B, 2014 年版的附录 B)；
- s) 增加了煤气化装置、减粘装置损伤分布图(见图 B.23~图 B.27)；
- t) 增加了损伤模式识别推荐流程(见附录 C)；
- u) 更改了常用金属材料牌号中的标准号(见附录 D, 2014 年版的附录 C)；
- v) 更改了蒙乃尔合金 400、C276 等部分材料的名称与牌号(见附录 D, 2014 年版的附录 C)。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、合肥通用机械研究院有限公司、北京航空航天大学、华东理工大学、中国石油化工股份有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、中国石油化工股份有限公司北京燕山分公司、中国石油化工股份有限公司洛阳分公司、中国石油克拉玛依石化分公司、国家能源投资集团有限责任公司。

本文件主要起草人：贾国栋、史进、艾志斌、张峥、轩福贞、陈学东、王建军、王辉、韩志远、缪春生、刘小辉、顾望平、邵珊珊、赵保成、谢国山、梁永智、穆澎淘、叶国庆、陈涛、李光海、陈炜、曹怀祥、臧庆安、王卫泽、郭伟灿、曹遯炜、胡久韶。

本文件于 2014 年首次发布，本次为第一次修订。

# 承压设备损伤模式识别

## 1 范围

本文件给出了承压设备主要损伤模式识别的损伤描述及损伤机理、损伤形态、受影响的材料、主要影响因素、易发生的装置或设备、主要预防措施、检测或监测方法、相关或伴随的其他损伤等。

本文件适用于承压设备损伤模式识别。

本文件不适用于承压设备密封失效、安全连锁装置失效、压力泄放装置失效。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 35013 承压设备合于使用评价

NB/T 10068 含稳定化元素不锈钢管道焊后热处理规范

## 3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

## 4 一般规定

4.1 本文件所述的损伤是指承压设备在外部机械载荷、介质环境、热载荷等单独或共同作用下，造成的材料性能下降、结构不连续或承载能力下降。

4.2 本文件将损伤模式分为以下类别：腐蚀减薄、环境开裂、材质劣化、机械损伤，尚未归入上述损伤类别的列入其他损伤，承压设备损伤模式索引见附录 A。各损伤类别划分如下。

- a) 腐蚀减薄：在腐蚀性介质作用下金属发生质量损失造成的壁厚减薄。
- b) 环境开裂：在服役环境作用下材料发生的开裂。环境开裂主要包括应力腐蚀开裂，以及氢渗入引起的氢鼓包和氢致开裂。
- c) 材质劣化：由于服役环境作用下材料微观组织、力学/耐腐蚀性能发生了退化。
- d) 机械损伤：材料在机械载荷或热载荷作用下，发生的承载能力下降。
- e) 其他损伤：未归入上述四类情形的损伤模式。

4.3 损伤个例之间存在差异性，有时不能完全与本文件中描述的典型损伤相吻合，当存在多种损伤或损伤耦合时，需要识别出主导损伤或损伤的耦合效应。

4.4 本文件从损伤描述及损伤机理、损伤形态、受影响的材料、主要影响因素、易发生的装置和设备、主要预防措施、检测或监测方法、相关或伴随的其他损伤共 8 个方面进行了描述。典型过程成套装置承压设备损伤分布图见附录 B。

4.5 从事损伤模式识别的人员或团队应具有材料学、腐蚀与防护、化工工艺、力学、监检测等相关基础

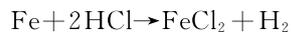
知识,具有承压设备(如容器、管道、锅炉、储罐等)设计、制造、安装、检验等相关专业知识,以及丰富的在役承压设备运行、检修的经验,能按照本文件提供的典型情况,结合损伤案例的个体特征,进行合理的分析和判断。损伤模式识别推荐流程见附录 C,常用金属材料牌号见附录 D。

## 5 腐蚀减薄

### 5.1 盐酸腐蚀

#### 5.1.1 损伤描述及损伤机理

金属与盐酸接触时发生的全面或局部腐蚀:



注:本文件中所有化学式中的金属一般以 Fe 作为代表给出。

#### 5.1.2 损伤形态

碳钢和低合金钢发生盐酸腐蚀时可表现为均匀腐蚀,介质局部浓缩或露点腐蚀时表现为局部腐蚀或沉积物下腐蚀。300 系列不锈钢和 400 系列不锈钢发生盐酸腐蚀时可表现为点蚀,形成直径为毫米级的蚀坑,甚至可发展为穿透性蚀孔。

#### 5.1.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢。

#### 5.1.4 主要影响因素

盐酸腐蚀的主要影响因素为:

- a) 盐酸浓度:随盐酸浓度升高,腐蚀速率增大;在热交换器和管道中的氯化铵盐或盐酸胺盐沉积物易从工艺物料或注入的洗涤水中吸收水分,在沉积物下可水解形成酸性溶液,水溶液的 pH 值低于 4.5 时对碳钢和低合金钢的腐蚀性较强;
- b) 温度:随温度升高,腐蚀速率增大;
- c) 合金成分:300 系列不锈钢和 400 系列不锈钢耐盐酸腐蚀能力差,钛(钛合金)和镍(镍基合金)耐盐酸腐蚀,尤其在温度不高的稀盐酸中耐腐蚀性能强;
- d) 催化或钝化剂:氧化剂(氧气、铁离子和铜离子)存在时,会加速镍基合金的腐蚀;在氧化性介质环境中,钛具有优良的耐盐酸腐蚀能力。

#### 5.1.5 易发生的装置或设备

炼油厂中的盐酸腐蚀多与露点腐蚀有关,即在蒸馏塔、分馏塔或汽提塔塔顶工艺物料中,含水和氯化氢的气相发生冷凝,最初析出的液滴酸性很强(pH 值低),腐蚀速率很高。易发生的装置或设备如下。

- a) 常减压装置:
  - 1) 常压塔塔顶系统中,塔顶油气冷却形成含盐酸的冷凝液,pH 值较低,可对管道和热交换器(包括壳体、管束和管箱)造成快速腐蚀;
  - 2) 减压塔顶真空喷射器和冷凝设备也会发生盐酸腐蚀。
- b) 加氢装置:
  - 1) 原料烃或循环氢中的有机氯化物进入装置内,反应生成盐酸;

- 2) 当氨和氯化氢同时存在时,装置中许多部位,如进料/反应产物热交换器的反应产物侧等,均可形成氯化铵盐,这些氯化铵盐也可能在反应产物系统的水相中聚集浓缩,详见 5.19;
  - 3) 氯化氢也可能随着工艺流穿过分馏单元,在注水点及其下游发生严重的酸露点腐蚀。
- c) 催化重整装置:
- 1) 催化剂中被置换出来的氯化物会反应形成盐酸,流向反应产物系统、再生系统、稳定塔、脱丁烷塔和进料/预加热热交换器;
  - 2) 含氯化氢的蒸汽流经气分装置分馏工段,引发混合点腐蚀或酸露点腐蚀。
- d) 聚丙烯(聚乙烯)装置:催化剂中含有氯化物,如三氯化钛,在聚丙烯的聚合工艺中,与水蒸气或水接触的设备和管道。

### 5.1.6 主要预防措施

盐酸腐蚀的主要预防措施为:

- a) 常减压装置:控制初馏塔进料中的氯化物含量,使塔顶回流罐液体中的氯化物含量不超过 $20 \times 10^{-6}$ ;改善材质适应性,可将碳钢升级为镍基合金或钛;注水稀释急冷塔顶工艺物料,降低盐酸浓度;按 pH 值情况在脱盐装置下游注入适量苛性碱,控制碱液温度、浓度和注入量,避免进料预热系统的碱应力腐蚀开裂和积垢;将缓蚀剂(氨、中和胺和成膜胺等)注入常压塔塔顶操作温度在露点以上的管道;
- b) 加氢装置:降低上游装置中氯化物盐、盐酸胺盐的夹带量;降低氢气中盐酸夹带量,可安装专用洗涤器或保护床;易发生盐酸腐蚀的部位采用耐蚀镍基合金;
- c) 催化重整装置:采用与上述加氢装置相同的措施;降低进料中的水和/或含氧物质,减少催化剂中氯化物脱除量;采用加装特殊吸附剂的脱氯设备。

### 5.1.7 检测或监测方法

盐酸腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 对于均匀腐蚀,检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定;对于点蚀坑或蚀孔,检测方法一般为目视检测,必要时可借助内窥镜进行观察;
- b) 腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时,可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像检测查找减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定;
- c) 介质的 pH 值、铁离子含量、氯化物含量的测定和监控;
- d) 设置腐蚀探针、腐蚀挂片或壁厚监测系统实时监控腐蚀速率。

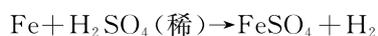
### 5.1.8 相关或伴随的其他损伤

氯化铵腐蚀、氯化物应力腐蚀开裂。

## 5.2 硫酸腐蚀

### 5.2.1 损伤描述及损伤机理

金属与硫酸接触时发生的腐蚀:



### 5.2.2 损伤形态

硫酸腐蚀的损伤形态为:

- a) 稀硫酸引起的金属腐蚀多为均匀腐蚀或点蚀,若腐蚀速率高且流速快,不会形成锈皮;碳钢焊缝热影响区会发生快速腐蚀,在焊接接头部位形成沟槽;
- b) 储罐及铁路罐车等低流速区或滞留区会形成氢槽;
- c) 硫酸能腐蚀焊缝的夹杂。

### 5.2.3 受影响的材料

按耐腐蚀性从弱到强排列:碳钢、316L 不锈钢、904L 不锈钢、铁镍基合金 20、高硅铸铁、高镍铸铁、哈氏合金 B-2 和哈氏合金 C276。

### 5.2.4 主要影响因素

硫酸腐蚀的主要影响因素为:

- a) 酸浓度:对于碳钢,硫酸浓度低于 70%(质量分数)时,腐蚀速率随浓度增高而减小;浓度在 70%~85%范围区间时,腐蚀速率随浓度增高而增大;浓度在 85%~98%范围区间时,腐蚀速率随浓度增高而减小;浓度在 98%~100%范围区间时,腐蚀速率随浓度增高而增大;对于发烟硫酸,腐蚀速率随浓度增高而减小;
- b) 流速:流速超过 0.6 m/s 时,碳钢腐蚀速率较大;
- c) 温度:硫酸浓度一定时,随温度升高,腐蚀速率增大;浓硫酸与水混合时产生热量,混合点温度升高导致腐蚀速率增大;
- d) 合金成分:碳钢、316L 不锈钢、904L 不锈钢、铁镍基合金 20、高硅铸铁、高镍铸铁、哈氏合金 B-2 和哈氏合金 C276(按耐腐蚀性从弱到强排列);
- e) 腐蚀杂质:存在氧化剂时腐蚀速率增大。

### 5.2.5 易发生的装置或设备

易发生硫酸腐蚀的装置或设备为:

- a) 废水处理装置可能发生硫酸腐蚀;
- b) 硫酸烷基化系统易受硫酸腐蚀,如反应器流出物管道、再沸器、脱异丁烷塔塔顶系统和苛性碱处理工段;
- c) 硫酸通常在分馏塔和再沸器的底部蓄积,使该部位硫酸变浓,腐蚀性较强。

### 5.2.6 主要预防措施

硫酸腐蚀的主要预防措施为:

- a) 使用铁镍基合金 20、904L 不锈钢、哈氏合金 C276 等材料时,可在表面形成一层保护性硫酸铁膜,抵抗稀硫酸腐蚀;
- b) 根据硫酸的实际浓度、流速和温度等选择对应等级的材质;
- c) 注入适量苛性碱中和酸值。

### 5.2.7 检测或监测方法

发生硫酸腐蚀的检测或检测方法为:

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定,重点应关注高温和湍流部位;
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时,可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定;
- c) 介质的 pH 值、铁离子含量测定和监控;

d) 设置腐蚀探针、腐蚀挂片,或在线壁厚监测系统实时监控腐蚀速率。

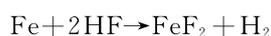
### 5.2.8 相关或伴随的其他损伤

无。

## 5.3 氢氟酸腐蚀

### 5.3.1 损伤描述及损伤机理

金属与氢氟酸接触时发生的腐蚀:



### 5.3.2 损伤形态

氢氟酸腐蚀的损伤形态为:

- a) 碳钢腐蚀表现为局部区域减薄,可能会形成明显的氟化亚铁垢皮;
- b) 蒙乃尔合金 400 发生腐蚀时为均匀腐蚀减薄,但不会产生明显的氟化亚铁垢皮;
- c) 腐蚀发生时也可能伴随氢脆、氢鼓包和/或氢致开裂以及应力导向氢致开裂,详见 6.8;如未消除应力的蒙乃尔合金 400 在接触含氧的氟化氢潮湿蒸汽时,容易发生氢氟酸应力腐蚀开裂,见 6.16。

### 5.3.3 受影响的材料

易发生氢氟酸腐蚀的材料为:

- a) 碳钢、铜镍合金、蒙乃尔合金 400、哈氏合金 C276;
- b) 低合金钢、300 系列不锈钢和 400 系列不锈钢对氢氟酸腐蚀和/或开裂敏感,一般不能用于氢氟酸使用环境。

### 5.3.4 主要影响因素

氢氟酸腐蚀的主要影响因素为:

- a) 流速:碳钢在无水的浓氢氟酸中形成一层保护性的氟化物垢皮,在高流速或强紊流作用下垢皮被破坏,使腐蚀速率增大;
- b) 浓度:水的存在会破坏氟化物垢皮的稳定性,并将其转变为非保护性垢皮;根据实验室测定的结果,低流速或滞流状态下,温度在 21 °C ~ 38 °C 范围内,氢氟酸浓度不超过 35% 时,碳钢的腐蚀速率随氢氟酸浓度增高而增大;浓度超过 35% 后,碳钢的腐蚀速率随氢氟酸浓度增高而减小;
- c) 温度:根据实验室在滞流状态的无水氢氟酸中 100 h 内测定的数据,在 60 °C ~ 188 °C 温度范围内碳钢在液态无水氢氟酸中的腐蚀速率随温度升高而增大,在 188 °C ~ 200 °C 温度范围内碳钢在液态无水氢氟酸中的腐蚀速率随温度升高而减小,温度超过 200 °C 时碳钢在气态无水氢氟酸中的腐蚀速率随温度升高而增大;
- d) 碳钢中残留的铜、镍、铬元素可加速氢氟酸腐蚀;
- e) 介质受到氧污染时会增大碳钢的腐蚀速率。

### 5.3.5 易发生的装置或设备

易发生氢氟酸腐蚀的装置或设备为:

- a) 氢氟酸烷基化装置:储运氢氟酸的承压设备,以及含 HF 的火炬气管道,氢氟酸烷基化装置中氢氟酸介质的含水量一般在 1%~3%,且操作温度低于 66 °C,除氢氟酸再蒸馏塔、再生塔和除酸用中和容器应局部或全部采用蒙乃尔合金 400 外,其他承压设备均可采用碳钢材质;
- b) 高腐蚀速率的常见部位:操作温度高于 66 °C 的管道和设备,包括泄压阀入口、小口径放气口和排气口的盲管段,以及位于异构体汽提塔、脱丙烷塔、氢氟酸汽提塔、丙烷汽提塔塔顶部位的管道和热交换器、酸汽化器等。

### 5.3.6 主要预防措施

氢氟酸腐蚀的主要预防措施为:

- a) 监测操作温度超过 66 °C 的碳钢管道和设备的壁厚。如已发生严重减薄,不能满足使用要求,可提高材料等级,采用蒙乃尔合金 400。整体或复合层采用蒙乃尔合金 400 材料,还可避免氢鼓包、氢致开裂或应力导向氢致开裂的问题,详见 6.8。蒙乃尔合金 400 也无法满足要求的部件应采用哈氏合金 C276,详见 6.16。
- b) 控制进料中水、氧和其他腐蚀杂质,并严格控制循环酸的含水量。
- c) 控制碳钢中残存的铜、镍、铬三种元素总含量不超过 0.20%(质量分数)。

### 5.3.7 检测或监测方法

氢氟酸腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定;
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时,可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定。

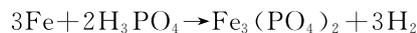
### 5.3.8 相关或伴随的其他损伤

氢氟酸致氢应力开裂。

## 5.4 磷酸腐蚀

### 5.4.1 损伤描述及损伤机理

金属与磷酸接触时发生的腐蚀:



### 5.4.2 损伤形态

碳钢发生磷酸腐蚀时多呈局部腐蚀或点蚀。

### 5.4.3 受影响的材料

按耐腐蚀能力从弱到强排列为:碳钢、304L 不锈钢、316L 不锈钢和铁镍基合金 20。

### 5.4.4 主要影响因素

磷酸腐蚀的主要影响因素为:

- a) 酸浓度:若不存在自由态水,固体磷酸(如含磷酸催化剂)不具有腐蚀性;
- b) 温度:随着温度升高,腐蚀速率增大;
- c) 氯化物杂质可促进磷酸腐蚀;

d) 大部分腐蚀发生于停机时的水洗作业中。

#### 5.4.5 易发生的装置或设备

易发生磷酸腐蚀的装置或设备为：

- a) 聚合装置：水与催化剂混合的管道和设备；
- b) 易发于介质流动低速区或流动死角，例如管道集合管、盲管、釜式再沸器底部和热交换器局部熔透焊缝等，在这些部位有足够的滞留时间使酸滴沉降或聚集。

#### 5.4.6 主要预防措施

磷酸腐蚀的主要预防措施为：

- a) 选材：在水分无法完全脱除的部位，选择耐腐蚀能力强的材质；
- b) 温度：当温度不超过 49 ℃，304 L 不锈钢在浓度为 100%（质量分数）的磷酸中亦具有很好的耐腐蚀性能；温度在 49 ℃～107 ℃范围内时宜用 316 L 不锈钢；
- c) 浓度：在沸点温度下，当磷酸浓度不超过 85%（质量分数）时，可选用 316L 不锈钢或铁镍基合金 20。

#### 5.4.7 检测或监测方法

磷酸腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定；
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时，可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位，并对减薄部位进行壁厚测定；
- c) 取样分析塔顶系统首个贮罐的水溶液中铁含量；
- d) 在塔顶冷凝器和再沸器的第一台排水器中设置电阻式腐蚀探针或腐蚀挂片，进行在线腐蚀速率监测。

#### 5.4.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 5.5 二氧化碳腐蚀

#### 5.5.1 损伤描述及损伤机理

金属在潮湿的二氧化碳环境（碳酸）中发生的腐蚀：



#### 5.5.2 损伤形态

二氧化碳腐蚀的损伤形态为：

- a) 形成液相的部位会发生腐蚀，二氧化碳从气相中冷凝出来的部位容易发生腐蚀；
- b) 腐蚀区域壁厚减薄，可能形成蚀坑或蚀孔；
- c) 在紊流区，碳钢发生腐蚀时可能形成较深的点蚀坑和沟槽；
- d) 腐蚀一般发生在紊流和液体冲击区域，有时也会发生在管道焊缝根部。

#### 5.5.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。



#### 5.5.4 主要影响因素

二氧化碳腐蚀的主要影响因素为：

- a) 二氧化碳分压：二氧化碳分压增高，pH 值下降，腐蚀性增强；
- b) 温度：温度未达到溶液中二氧化碳气体逸出温度前，随温度升高，腐蚀速率增大；
- c) 铬含量：若铬含量未达到 12% 以上，增加钢中铬含量不能明显提高耐腐蚀能力；
- d) 杂质：存在其他腐蚀杂质，并导致 pH 值下降时，腐蚀速率增大；氧气浓度大于  $10 \times 10^{-9}$  会导致腐蚀加剧；
- e) 流态：高流速和湍流会导致局部腐蚀加剧。

#### 5.5.5 易发生的装置或设备

易发生二氧化碳腐蚀的装置或设备为：

- a) 所有锅炉给水和蒸汽冷凝系统；
- b) 制氢装置：在变换器排出气系统中，当排出气流温度降至露点（大约 149 °C）以下时，腐蚀比较常见，根据已知检测结果，腐蚀速率可高达 25.4 mm/年；
- c) 二氧化碳脱除装置：再生器顶部系统；
- d) 空分装置：压缩空气经冷却后的低点凝液部位；
- e) 煤气化装置：粗合成气系统；
- f) 油/气田集输的油气管道。

#### 5.5.6 主要预防措施

二氧化碳腐蚀的主要预防措施为：

- a) 缓蚀剂：在蒸汽冷凝水系统中加入缓蚀剂；
- b) pH 值：液相的 pH 值提高到 6.0 以上可有效降低蒸汽冷凝水系统的腐蚀速率；
- c) 选材：300 系列不锈钢可有效抵抗二氧化碳腐蚀，能用于产生二氧化碳和脱除二氧化碳设备，同时应注意避免 300 系列不锈钢在现场焊接施工可能造成的敏化。400 系列不锈钢和双相不锈钢也具有良好的耐腐蚀性。

#### 5.5.7 检测或监测方法

二氧化碳腐蚀的检测方法为：

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定，焊缝的腐蚀则应通过目视检测和焊缝尺进行检测；
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时，可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位，并对减薄部位进行壁厚测定；
- c) 腐蚀发生时可能沿着管道底部表面（如果存在分离的水相时）、管道顶部表面（预计湿气系统中存在凝结时），以及弯头和三通紊流区，这些部位应重点检测；
- d) 水质监测分析（pH、Fe 离子等），以确定操作工况的变化。

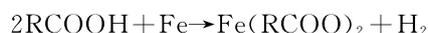
#### 5.5.8 相关或伴随的其他损伤

锅炉冷凝水腐蚀、碳酸盐应力腐蚀开裂。

## 5.6 环烷酸腐蚀

### 5.6.1 损伤描述及损伤机理

在 177 °C ~ 427 °C 温度范围内,环烷酸对金属材料的腐蚀:



### 5.6.2 损伤形态

环烷酸腐蚀的损伤形态为:

- a) 高流速区可形成局部腐蚀,如孔蚀、带锐缘的沟槽;
- b) 低流速凝结区,碳钢、低合金钢和铁素体不锈钢的腐蚀表现为均匀腐蚀或点蚀。

### 5.6.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢和镍基合金。按耐环烷酸腐蚀能力由弱到强大致顺序排列:碳钢、1.25Cr-0.5Mo、2.25Cr-0.5Mo、5Cr-0.5Mo、12Cr、9Cr-1Mo、304L 不锈钢、321 不锈钢、347 不锈钢、316 不锈钢、317 不锈钢、6%的钼合金、因科耐尔合金 625、哈氏合金 C276。

### 5.6.4 主要影响因素

环烷酸腐蚀的主要影响因素为:

- a) 酸值:腐蚀速率随烃相酸值增加而增大,酸值通常用中和值或总酸值表征;原油中不同环烷酸其腐蚀性不同,腐蚀速率与总酸值的关系不能完全对应,由实际介质成分决定;
- b) 温度:当烃相介质的使用温度在 218 °C ~ 400 °C 范围内,腐蚀较为常见,且随着温度升高,腐蚀速率增大;
- c) 硫含量:烃相中的硫可能与钢材反应生成硫化亚铁保护膜,从而减缓环烷酸的腐蚀;
- d) 流速:随流速升高,腐蚀速率增大;
- e) 相态:两相流(气相和液相)、湍流区、蒸馏塔的气相露点部位腐蚀严重;
- f) 材料:合金中钼元素可以提高耐蚀性,钼元素含量下限为 2.5%(质量分数),具体钼元素含量可根据原油及物料中的总酸值确定。

### 5.6.5 易发生的装置或设备

易发生环烷酸腐蚀的装置或设备为:

- a) 常减压装置加热炉炉管、常压和减压转油线、减底油管道、常压蜡油回路、减压重蜡油回路(有时减压轻蜡油回路也会出现),一次加工原料为高酸原油的延迟焦化装置焦化轻蜡油回路和焦化重蜡油回路中可能发生环烷酸腐蚀;
- b) 管道高流速、湍流、流向改变的部位,如阀门、弯头、三通、减压器位置,以及泵内构件、设备和管道焊缝、热偶套管等流场受到扰动的部位;
- c) 常压塔、减压塔内构件在闪蒸段、填料和高酸物流凝结或高速液滴冲击的部位易发生腐蚀;
- d) 常减压装置的下游装置中注氢点之前的热烃物料系统。

### 5.6.6 主要预防措施

环烷酸腐蚀的主要预防措施为:

- a) 掺炼:原设计不耐环烷酸腐蚀的装置或系统部件,原料油混合掺炼,降低酸值或适当提高硫

含量；

- b) 选材:使用钼元素含量高的合金来提高耐蚀性,严重腐蚀时宜采用 317L 不锈钢；
- c) 缓蚀剂:选用合适的缓蚀剂。

#### 5.6.7 检测或监测方法

环烷酸腐蚀的检测方法为：

- a) 监测工艺条件:原油和侧线物流中的酸值监测,确定酸在不同馏分中的分布；
- b) 测厚:采用目视检测+超声波测厚,确定壁厚变化情况；
- c) 射线检测:射线成像检测可有效检出局部腐蚀区域；
- d) 腐蚀监测:设置电阻腐蚀探针、腐蚀挂片或在线壁厚监测系统；
- e) 腐蚀产物监测:检测物流中的铁、镍元素含量来评估系统的腐蚀程度；
- f) 氢通量监测:使用氢探针、氢通量检测仪监测氢通量；
- g) 流场分析,确定管道系统高流速或湍流部位。

#### 5.6.8 相关或伴随的其他损伤

高温硫化物腐蚀(无氢气环境)。

### 5.7 苯酚腐蚀

#### 5.7.1 损伤描述及损伤机理

金属与苯酚(石碳酸)接触时发生的腐蚀。

#### 5.7.2 损伤形态

苯酚腐蚀的损伤形态为：

- a) 碳钢发生苯酚腐蚀时可表现为均匀腐蚀或局部腐蚀；
- b) 存在流体冲刷时多引起局部腐蚀。

#### 5.7.3 受影响的材料

按耐腐蚀性增强的顺序:碳钢、304L 不锈钢、316L 不锈钢和哈氏合金 C276。

#### 5.7.4 主要影响因素

苯酚腐蚀的主要影响因素为：

- a) 温度:低于 121 °C 时腐蚀速率较小,碳钢、304L 不锈钢在 232 °C 以上的苯酚环境中腐蚀速率较大；
- b) 浓度:稀苯酚溶液(质量分数为 5%~15%的苯酚溶液)对冷凝干燥器腐蚀性较强；
- c) 材质:按材料耐苯酚蚀性从弱到强为碳钢、硬度较低的奥氏体不锈钢(如 304L、316L 等)、哈氏合金 C276；
- d) 流速:介质高流速可促进局部腐蚀。

#### 5.7.5 易发生的装置或设备

易发生苯酚腐蚀的装置或设备为：

- a) 润滑油装置中的苯酚提取设施；

- b) 苯酚丙酮装置的苯酚塔再沸器和废苯酚回收工段；
- c) 双酚 A 装置的苯酚回收塔再沸器、苯酚提纯塔再沸器。

### 5.7.6 主要预防措施

苯酚腐蚀的主要预防措施为：

- a) 流速：在苯酚回收工段应将苯酚介质流速控制在 9 m/s 以下；
- b) 温度：保持苯酚回收塔塔顶温度高于露点温度，至少应高出 17 ℃；
- c) 选材：316L 不锈钢可用于处理含酚水的干燥塔、苯酚闪蒸塔和各种热交换器壳体以及分离设备的顶部；萃取炉中的管子和集箱应为 316L 不锈钢，对于 316L 不锈钢不能满足耐蚀要求的场合，如介质流速较高时宜用哈氏合金 C276。

### 5.7.7 检测或监测方法

苯酚腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定；
- b) 采用奥氏体不锈钢时，若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时，可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位，并对减薄部位进行壁厚测定；
- c) 设置腐蚀探针或腐蚀挂片监控实时腐蚀速率。

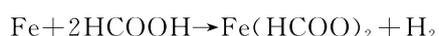
### 5.7.8 相关或伴随的其他损伤

无。

## 5.8 低分子有机酸腐蚀

### 5.8.1 损伤描述及损伤机理

金属与低分子有机酸(如甲酸、乙酸、乙二酸、苯甲酸等，不含本文件中单独列明的环烷酸等其他有机酸)接触时发生的均匀腐蚀或局部腐蚀。以甲酸为例，腐蚀过程为：



### 5.8.2 损伤形态

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢发生甲酸腐蚀、乙酸腐蚀或乙二酸腐蚀时可表现为均匀腐蚀，介质局部浓缩或露点腐蚀时表现为局部腐蚀或沉积物下腐蚀。

### 5.8.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系奥氏体不锈钢、400 系铁素体不锈钢。

### 5.8.4 主要影响因素

低分子有机酸腐蚀的主要影响因素如下。

- a) 酸类型：不同有机酸，在浓度相同的情况下，一级电离常数越高，酸性越强。常见的低分子有机酸中，一级电离常数从高到低依次排序为乙二酸(草酸)、邻苯二甲酸、水杨酸、柠檬酸、甲酸、乳酸、苯甲酸、乙酸、丙酸。
- b) 浓度或 pH 值：一般情况下，低浓度有机酸随着酸浓度升高(即 pH 值降低)，腐蚀速率增大。甲酸浓度在 50%(质量分数)左右时腐蚀性最强，浓度降低或升高都会减缓腐蚀。低分子有机

酸可溶于烃中并在接触水相时被水相萃取,形成局部高浓度酸液。

- c) 温度:随温度升高,腐蚀速率增大。
- d) 合金成分:按耐蚀性从弱到强排序碳钢、低合金钢、300系奥氏体不锈钢/400系铁素体不锈钢、双相不锈钢。钛和钛合金、镍和镍合金均对有机酸有较好的耐腐蚀能力。
- e) 杂质元素:氧及氧化剂(包括具有氧化作用的金属高价离子),氯、溴、碘等卤族元素和其他强酸根离子(如 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 等)对低分子有机酸腐蚀有促进作用,如不锈钢在含溴醋酸环境下腐蚀非常严重。

### 5.8.5 易发生的装置或设备

炼油装置中的低分子有机酸腐蚀一般由环烷酸分解或工艺添加剂加入的有机酸(如甲酸、乙酸、丙酸和丁酸)引发,比如常减压装置蒸馏塔的塔顶系统。化工装置的产品、中间体及其副产品中如果含有低分子有机酸,如乙酸、苯甲酸等,也容易引发腐蚀。对于某特定的有机酸来说,腐蚀一般多发生在直接输送该有机酸的物料系统,或输送可能生成该有机酸的其他物料系统中。

甲酸腐蚀易发生的装置或设备如下:

- a) 甲醇装置:甲醇合成塔后含甲酸的物料系统;
- b) 二甲醚装置:甲醇原料系统,尤其是温度较高的部位;
- c) 聚甲醛装置:三聚提浓塔前后含甲酸的物料系统;
- d) 煤化工装置:煤气化装置汽提塔塔顶冷凝换热器及其相连管道,煤液化装置重质蜡分离罐、重质油分离器和轻质油油水分离器;
- e) 其他输送或储存甲醇、甲醛或甲酸的设备及管道系统,温度越高的部位腐蚀越明显。

乙酸装置易发生的装置或设备如下:

- a) 醋酸装置:醋酸合成系统、分离系统,尤其是温度较高的部位,以及醋酸储运系统;
- b) 乙酸乙酯装置:反应系统和醋酸回收系统,尤其是温度较高的部位;
- c) 氯乙酸装置:反应系统和醋酸回收系统;
- d) 精对苯二甲酸装置:乙酸回收系统;
- e) 其他输送或储存乙醇、乙醛或乙酸的设备及管道系统,温度越高的部位腐蚀越明显。

乙二酸装置易发生的装置或设备如下:

- a) 乙二醇装置:乙二醇储运系统;
- b) 草酸装置:反应系统和草酸分离系统;
- c) 其他输送或储存乙二醇、乙二酸的设备及管道系统。

苯甲酸装置易发生的装置或设备如下:

- a) 苯甲酸装置:氧化反应器及其出口管道、氧化塔;
- b) 苯甲醛装置:甲苯生产苯甲醛过程中产生副产品苯甲酸的设备及管道;
- c) 其他输送或储存苯甲醛、苯甲酸的设备及管道系统。

其他典型装置或设备:

- a) 精对苯二甲酸(PTA)装置:工艺物料中有含溴醋酸的容器和管道,包括反应器、结晶器及反应器进出物料换热器;
- b) 芳烃抽提装置:溶剂(环丁砜)再生塔、塔底再沸系统的换热器和管道;
- c) 甲基叔丁基醚(MTBE)装置:催化反应及下游工艺的设备。

### 5.8.6 主要预防措施

低分子有机酸腐蚀的主要预防措施为:

- a) 选材:采用含钼奥氏体不锈钢、镍基合金或钛,也可采用衬四氟乙烯的复合钢材,或者设置陶瓷衬里等;
- b) 加中和剂:炼油装置可添加中和剂来降低介质中有机酸含量,但中和剂添加需要适量,避免引起其他损伤;
- c) 工艺优化:输送醛、醇、醚等有机物的设备和管道应避免因系统密封问题混入空气,造成有机酸浓度升高。

### 5.8.7 检测或监测方法

低分子有机酸腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定;
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时,可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定;
- c) 介质的 pH 值测定和监控;
- d) 设置腐蚀探针、腐蚀挂片或在线壁厚监测系统监控腐蚀速率。

### 5.8.8 相关或伴随的其他损伤

湿硫化氢破坏。

## 5.9 高温氧化

### 5.9.1 损伤描述及损伤机理

高温下金属与氧气发生反应生成金属氧化物的过程:

- a) 在高温下,氧气和金属反应生成氧化物膜;
- b) 通常发生在加热炉和锅炉燃烧的含氧环境中。

### 5.9.2 损伤形态

高温氧化的损伤形态为:

- a) 多数合金,包括碳钢和低合金钢,氧化发生后在金属表面生成氧化物膜,造成金属均匀减薄;
- b) 300 系列不锈钢和镍基合金在高温氧化作用下易形成暗色的氧化物薄膜。

### 5.9.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢和镍基合金。

### 5.9.4 主要影响因素

高温氧化的主要影响因素为:

- a) 温度:碳钢随温度升高腐蚀加剧,538 °C 以上时碳钢的氧化腐蚀严重;
- b) 合金成分:铬元素可形成保护性氧化物膜,故钢和其他合金的耐蚀性通常取决于材料的铬元素含量,300 系列不锈钢在 816 °C 以下有良好的耐蚀性。

### 5.9.5 易发生的装置或设备

加热炉、锅炉和其他火焰加热设备等高温环境中运行的设备,尤其是在温度超过 538 °C 的设备和管道中。

### 5.9.6 主要预防措施

高温氧化的主要预防措施为：

- a) 材质选用：使用温度大于 538 ℃时，材料不宜选择碳钢。通过材质升级可减缓高温氧化。铬是影响耐氧化能力的主要合金元素。硅和铝等其他合金元素也有同样效果，但因其对力学性能不利，添加量应控制。用于加热炉支架、烧嘴喷口和燃烧设备部件的特殊合金常添加这些元素。
- b) 保护层：敷设耐氧化的表面保护层。

### 5.9.7 检测或监测方法

高温氧化的检测或监测方法为：

- a) 监测工艺条件：温度监测，如使用炉管表面热电偶和/或红外热成像仪对温度进行监测，防止运行超温；
- b) 厚度测量：超声波测厚。

### 5.9.8 相关或伴随的其他损伤

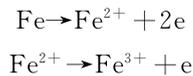
无。

## 5.10 大气腐蚀(无隔热层)

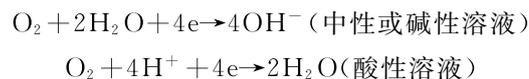
### 5.10.1 损伤描述及损伤机理

未敷设隔热层等覆盖层的金属在大气中发生的腐蚀。

阳极反应：



阴极反应：



### 5.10.2 损伤形态

大气腐蚀(无隔热层)的损伤形态为：

- a) 碳钢和低合金钢发生腐蚀时主要表现为均匀腐蚀或局部腐蚀；
- b) 纯铜在发生大气腐蚀时易在金属表面生成绿色腐蚀产物；
- c) 铝、镁和钛等金属因新鲜金属与大气接触后可在表面生成一层氧化膜，并失去表面金属光泽。

### 5.10.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢，铝、铜等有色金属及其合金。

### 5.10.4 主要影响因素

大气腐蚀(无隔热层)的主要影响因素为：

- a) 大气成分：含有氯离子的海洋大气、潮湿工业大气或含有强烈污染的环境大气易发生该腐蚀，常见污染物有硫氧化物、氮氧化物、氯化物等；

- b) 湿度:干燥的大气腐蚀能力很弱,而湿度较大的大气环境,尤其是容易凝结水滴的大气环境腐蚀能力较强,以碳钢为例,当空气中相对湿度超过 60%时,碳钢腐蚀速率按指数关系增大,而空气相对湿度低于 50%,腐蚀速率则较低;
- c) 温度:材料表面温度宜高出环境露点温度至少 3℃以上,否则易在材料表面形成冷凝水造成腐蚀。

#### 5.10.5 易发生的装置或设备

所有在大气环境中使用的无隔热层设备,特别是存在任何下列情况时:

- a) 操作温度低于环境温度,容易在表面凝结水汽;
- b) 油漆等防腐涂层破损;
- c) 长期停用或闲置,但没有正确封存;
- d) 露天使用,或者下雨时容易淋湿;
- e) 异种金属连接的部位,如铜与铝非绝缘连接处、碳钢/低合金钢与不锈钢连接处;
- f) 位于高湿度区域内,如常年雨水充沛的地区,或者装置冷却塔的下风向区、蒸汽排放口附近、喷淋系统、酸蒸汽或喷水加速冷却区附近;
- g) 位于高盐高湿度区域内,如海边、盐湖地区、盐化工和煤化工装置附近。

#### 5.10.6 主要预防措施

大气腐蚀(无隔热层)的主要预防措施为:

- a) 防腐涂层:可使用有机、无机涂层和金属镀层;
- b) 选材:可选用耐候钢、不锈钢(氯离子含量高的大气环境中,如湿热沿海地区应尽量避免使用),或者在材料冶炼过程中加入铬、镍等元素改善材料耐腐蚀性能,添加铜、磷元素虽然可起到减缓大气腐蚀的作用,但会对承压壳体性能产生不良影响;
- c) 控制湿度:一般认为湿度在 50%以下腐蚀速率较低,湿度在 30%以下腐蚀速率极低;
- d) 环境保护:增强大气环境保护,减少大气中的污染物含量。

#### 5.10.7 检测或监测方法

大气腐蚀(无隔热层)的检测或监测方法为:

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定;
- b) 超声波自动扫查或导波法可对架空管道或无支撑部位容器壁进行检测。

#### 5.10.8 相关或伴随的其他损伤

大气腐蚀(有隔热层)。

### 5.11 大气腐蚀(有隔热层)

#### 5.11.1 损伤描述及损伤机理

敷设隔热层等覆盖层的金属在覆盖层下发生的腐蚀,又称层下腐蚀。

#### 5.11.2 损伤形态

大气腐蚀(有隔热层)的损伤形态为:

- a) 碳钢和低合金钢发生腐蚀时主要表现为覆盖层下局部腐蚀,将碳钢和低合金钢的隔热材料拆

除后,隔热层下腐蚀常形成覆盖在腐蚀部件表面的片状疏松锈皮;

- b) 300 系列不锈钢、400 系列不锈钢及双相不锈钢会产生点蚀和局部腐蚀,对于 300 系列不锈钢,尤其隔热材料为老旧硅酸盐(含氯化物),还可能发生氯化物应力腐蚀开裂,在 80 °C~150 °C 范围内时尤为明显,而双相不锈钢对此开裂敏感性较低;
- c) 在一些局部腐蚀的情况中,腐蚀呈现为痂状点蚀(常见于油漆或涂层系统破损处);
- d) 隔热层和油漆或涂层明显发生了破损的部位经常伴有隔热层下腐蚀。

### 5.11.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、双相不锈钢。

### 5.11.4 主要影响因素

大气腐蚀(有隔热层)的主要影响因素为:

- a) 大气成分:在海洋环境或水汽充沛的地方,发生隔热层下腐蚀的温度上限还可能远远超过 121 °C;多雨、温暖和沿海地区的装置比干燥、寒冷和内陆地区的装置更容易发生隔热层下腐蚀;产生空气污染物,如氯化物(海洋环境,冷却塔飘落)或二氧化硫(烟囱排放物)的环境可能加速腐蚀;
- b) 结构和覆盖层质量:结构设计和/或安装不良形成积水,将会加速隔热层下腐蚀;如果覆盖层防护不严密,覆盖层的间隙处或破损处容易渗水,水的来源比较广泛,可能来自雨水、冷却水塔的喷淋、蒸汽伴热管泄漏冷凝等;吸湿(虹吸)的隔热材料可能会面临隔热层下腐蚀问题;从隔热层渗出的杂质,如氯化物、硅酸盐等,会加速损伤;
- c) 温度:若隔热层内蓄积的水分在使用温度下很难蒸发,隔热层就会长时间处于潮湿状态,对承压设备金属造成腐蚀;在水露点以下运行的设备容易在金属表面结露,形成潮湿环境,增加腐蚀可能性;当金属温度没有超过水快速蒸发的温度点时,随温度升高,腐蚀速率增大;当钢材温度在 100 °C~121 °C 时,腐蚀可能非常严重;
- d) 运行:冷热循环运行或间歇使用可能加速腐蚀。

### 5.11.5 易发生的装置或设备

所有在大气环境中使用的有隔热层设备,特别是存在任何下列情况时:

- a) 操作温度低于环境温度,容易吸湿而使隔热层受潮,如液氨、低温乙烯、低温丙烯的容器和管道;
- b) 隔热层破损或质量差,容易渗入水分或湿气,而操作温度又在环境温度和较高温度之间,或在环境温度和较低温度之间波动、循环;
- c) 隔热层下油漆等防腐涂层破损;
- d) 长期停用或闲置,但没有正确封存;
- e) 露天使用,或者下雨时容易淋湿;
- f) 异种金属连接的部位,如铜与铝非绝缘连接处、碳钢/低合金钢与不锈钢连接处;
- g) 位于高湿度区域内,如常年雨水充沛的地区,或者装置冷却塔的下风向区、蒸汽排放口附近、喷淋系统、酸蒸汽或喷水加速冷却区附近;
- h) 位于高盐高湿度区域内,如海边、盐湖地区、盐化工和煤化工装置附近;
- i) 靠近蒸汽伴热泄漏的部位;
- j) 隔热层结构不连续处,如隔热层末端、设有穿透隔热层的作业孔(定点测厚处或其他用途的可

拆卸式保温窗)、穿过隔热层直接焊接在设备上的结构件(扶梯、平台支架,以及吊耳、接管)部位;

k) 管道竖直段底部与水平段相连的部位。

#### 5.11.6 主要预防措施

大气腐蚀(有隔热层)的主要预防措施为:

- a) 防腐涂层:可使用有机、无机涂层和金属镀层,尤其对于发生隔热层下大气腐蚀的 300 系列不锈钢管道增加涂层防护;
- b) 选材:可选用耐候钢、不锈钢(氯离子含量高的大气环境中尽量少用),或者在材料冶炼过程中加入铬、镍等元素改善材料耐腐蚀性能,添加铜、磷元素虽然可起到减缓大气腐蚀的作用,但对承压壳体性能产生不良影响;
- c) 控制覆盖层质量:一般认为覆盖层良好的情况下几乎不会发生层下腐蚀,对于覆盖层破损的部位应及时进行修复;
- d) 300 系列不锈钢应采用低氯隔热层,降低氯化物应力腐蚀开裂可能性;
- e) 环境保护:增强大气环境保护,减少大气中的污染物含量;
- f) 操作温度:如果工艺允许,使用温度尽量避开层下腐蚀敏感温度区间。

#### 5.11.7 检测或监测方法

大气腐蚀(有隔热层)的检测或监测方法为:

- a) 检测方法一般为覆盖层目视检测和覆盖层破损部位进行壁厚测定;
- b) 导波法可对未拆除覆盖层部位进行一定条件下的截面腐蚀减薄量检测;
- c) 可采用脉冲涡流对不拆除隔热层的管道进行壁厚测量;
- d) 红外热成像检测设备或管道的隔热层完好状况。

#### 5.11.8 相关或伴随的其他损伤

大气腐蚀、氯化物应力腐蚀开裂、高温氧化腐蚀。

### 5.12 冷却水腐蚀

#### 5.12.1 损伤描述及损伤机理



冷却水中由溶解盐、气体、有机化合物或微生物活动引起的碳钢和其他金属的腐蚀。

#### 5.12.2 损伤形态

冷却水腐蚀的损伤形态为:

- a) 冷却水中存在溶解氧时,冷却水对碳钢的腐蚀多为均匀腐蚀;
- b) 若冷却水腐蚀以垢下腐蚀、缝隙腐蚀、电偶腐蚀或微生物腐蚀为主时,多表现为局部腐蚀;
- c) 冷却水在管嘴的出入口或管道入口处易形成冲蚀或磨损,形成波纹状或光滑腐蚀;
- d) 在电阻焊制设备或管道的焊缝区域,冷却水腐蚀多沿焊缝熔合线形成腐蚀沟槽。

#### 5.12.3 受影响的材料

碳钢、所有不锈钢、铜、铝、钛和镍基合金。

#### 5.12.4 主要影响因素

冷却水腐蚀的主要影响因素为：

- a) 温度：冷却水出口温度和/或工艺物料侧入口温度的升高会增加腐蚀速度和结垢倾向；工艺物料侧的温度高于 60 ℃时，新鲜水存在结垢倾向，工艺物料侧温度继续升高或冷却水入口温度升高时，这一倾向更明显；半咸水或盐水/海水出口温度高于 46 ℃时会结垢严重，超过 80 ℃后腐蚀逐渐下降；
- b) 氧含量：随冷却水含氧量升高，碳钢腐蚀速率增大；
- c) 结垢：垢层可由矿物沉淀(硬的)、淤泥、悬浮的有机材料、腐蚀产物、氧化皮、海水和微生物生长形成，造成垢下腐蚀；
- d) 流速：流速足够高时可减少结垢，并冲出沉积物，但不能过高以致引发冲刷腐蚀，流速的限制取决于管道材质和水质；低流速时通常腐蚀严重，流速低于 1 m/s 容易导致结垢、沉积，在冷却水用于凝结器或冷却器的壳程时，介质流动死区或滞流区部位腐蚀加剧，比管程腐蚀严重；
- e) 水质：300 系列不锈钢在新鲜水、半咸水、盐水/海水系统中可产生点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂；铜/锌合金在新鲜水、半咸水、盐水/海水系统会发生脱锌腐蚀；铜/锌合金在含氨或铵化物的冷却水中会发生应力腐蚀开裂；电阻焊接制造的碳钢设备，其焊缝或热影响区在新鲜水、半咸水中会发生严重腐蚀；
- f) 钛和其他阳极材料连接可能发生严重的钛氢化，温度高于 82 ℃较为常见，低温也偶有发生。

#### 5.12.5 易发生的装置或设备

所有水冷热交换器和冷却塔设备。

#### 5.12.6 主要预防措施

冷却水腐蚀的主要预防措施为：

- a) 系统改进：系统设计改进、运行优化和进行化学处理来防护，如冷换设备设计时冷却水走管程以尽量减少滞流区；
- b) 温度：入口设计温度不宜高于 57 ℃；
- c) 流速：流速应有最小流速和最大流速范围限制，尤其是使用盐水/海水时；
- d) 材质选用：选用耐蚀性好的材质，尤其对于在高含氯、低流速、高温度和/或水处理不当的冷却水系统中运行的换热设备，同时应注意避免电偶腐蚀；
- e) 清洗：对换热管内外表面进行定期清洗。

#### 5.12.7 检测或监测方法

冷却水腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 水质监测：对 pH 值、氧含量、回用比、残存药剂量、微生物活性、冷却水出口温度、工艺物料泄漏情况或污染程度进行监测；
- b) 换热性能测算：定期测算热交换器换热性能，掌握结垢和沉积状况；
- c) 流速监测：用超声波流速仪检测冷却水流速；
- d) 采用涡流检测、漏磁检测、导波检测或内旋转检测系统对热交换器管束进行检查；
- e) 取样分析：对有代表性的管子进行取样，剖管分析。

### 5.12.8 相关或伴随的其他损伤

微生物腐蚀、氯化物应力腐蚀开裂。

## 5.13 土壤腐蚀

### 5.13.1 损伤描述及损伤机理

金属接触到土壤时发生的腐蚀。

### 5.13.2 损伤形态

土壤腐蚀多表现为以点蚀为主的局部腐蚀,腐蚀的严重程度取决于局部的土壤条件和设备金属表面环境条件的变化。

### 5.13.3 受影响的材料

碳钢、铸铁、球墨铸铁、低合金钢。

### 5.13.4 主要影响因素

土壤腐蚀的主要影响因素为:

- a) 土壤电阻率:电阻率大的土壤对金属的腐蚀性较低;
- b) 水分含量:水分含量大的土壤往往腐蚀性较强;
- c) 溶解盐浓度:溶解盐浓度大的土壤对金属的腐蚀性较强;
- d) 酸度:酸度大的土壤对金属的腐蚀性较强;
- e) 温度:随金属温度升高,土壤腐蚀性增强;
- f) 位置:土壤和空气的界面区域湿度和氧气有利于土壤腐蚀的发生;
- g) 保护层:保护层良好的部位腐蚀情况轻微,保护层破损处或效果较差的位置腐蚀情况较严重;
- h) 阴极保护:保护良好的部位腐蚀情况轻微,保护效果较差的位置腐蚀情况较严重;
- i) 其他:土壤多样性、杂散电流、微生物、氧浓差电池腐蚀等。

### 5.13.5 易发生的装置或设备

易发生土壤腐蚀的装置或设备为:

- a) 埋设于地下并与土壤直接接触的设备;
- b) 埋设于地上,但设备的底部或其他某部位与土壤直接接触的设备;
- c) 埋地或半埋地管道;
- d) 设立在地面上且有一部分与土壤相连的金属支撑结构。

### 5.13.6 主要预防措施

土壤腐蚀的主要预防措施为:

- a) 采用特殊回填填料或回填方式,改善设备周围的土壤条件,可减少碳钢的土壤腐蚀;
- b) 保护层:保持保护层的质量;
- c) 阴极保护:设置有效的阴极保护设施。

### 5.13.7 检测或监测方法

土壤腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 参比电极法：宜用结构附近的专用参比电极（电阻压降误差校正）测量结构对土壤的电位；
- b) 耐压试验：验证经受腐蚀后结构的强度；
- c) 导波检测：可用于埋地或半埋地管道检测；
- d) 自动内检测：对满足检测条件的管道可采用自动内检测仪进行腐蚀检测；
- e) 弱磁检测：采用被动式弱磁检测技术进行腐蚀检测。

### 5.13.8 相关或伴随的其他损伤

无。

## 5.14 微生物腐蚀

### 5.14.1 损伤描述及损伤机理

细菌、藻类或真菌之类的活性有机物造成的腐蚀，多与团簇状或泥泞状有机物有关。常见微生物有硫酸盐还原菌（SRB）、铁氧化菌（IOB）、锰氧化菌（MnOB）、硫氧化细菌、铁还原细菌、酸生产菌（APB）和胞外聚合物生产菌（EPB）。

### 5.14.2 损伤形态

微生物腐蚀的损伤形态为：

- a) 微生物腐蚀通常表现为局部垢下腐蚀或微生物簇团处腐蚀；
- b) 碳钢的微生物腐蚀通常为杯状点蚀，不锈钢的微生物腐蚀通常为表面蚀坑。

### 5.14.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢、铝、铜和镍基合金。

### 5.14.4 主要影响因素

微生物腐蚀的主要影响因素为：

- a) 水分：微生物腐蚀通常发生在水溶液或有水存在的环境中，尤其是在允许或促进微生物生长的滞流或低流速区域；
- b) 环境：微生物可在苛刻环境中生存和繁殖，典型情况有缺氧、缺光或黑暗、高盐度、pH 值在 0~12.0、温度在 -17 ℃~113 ℃；未对环境采取控制措施时，即使只是少量微生物混入，经过增殖扩散，亦可产生强腐蚀性；
- c) 养分：不同微生物生长所需养分不同，而碳、氮、磷是基本元素。养分可以是无机物，如硫、氨、硫化氢，也可以是有机物，如烃、有机酸等。承压设备发生工艺物料内漏时，如热交换器管束泄漏，烃或硫化氢等杂质的混入可加剧某些微生物的腐蚀。

### 5.14.5 易发生的装置或设备

易发生微生物腐蚀的装置或设备为：

- a) 热交换器、储罐底部水相，低流速或介质流动死角的管道、与土壤接触的管道等；
- b) 水压试验时排水后未及时吹干的设备，或露天放置且无保护措施的设备；

- c) 水质处理不良的冷却水储罐和水冷热交换器；
- d) 消防水系统。

#### 5.14.6 主要预防措施

微生物腐蚀的主要预防措施为：

- a) 杀菌剂：采用杀菌剂持续处理，典型杀菌剂有氯、溴、臭氧、紫外线或专用化学剂；
- b) 流速：限制最低流速，减少低流速或滞流区；
- c) 水分：水压试验后尽快清空、吹干并防止湿气进入，非存水系统应保持干燥清洁；
- d) 保护设施：对地下结构进行包覆和阴极保护，储罐的内表面刷涂料；
- e) 清理：清理有机物可使用刮除、高速水流清洗、化学清洗和微生物处理等方式。

#### 5.14.7 检测或监测方法

微生物腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 水质监测：监测杀菌剂残余量、微生物数量，以及目视检测腐蚀状况；
- b) 专用探针：监测结垢程度，结垢可能会先于或与微生物腐蚀同时进行；
- c) 热交换器负荷监测：热交换器负荷能力降低表明可能存在结垢和微生物腐蚀；
- d) 气味监测：污水气味异常表明可能存在微生物腐蚀。

#### 5.14.8 相关或伴随的其他损伤

冷却水腐蚀。

### 5.15 锅炉冷凝水腐蚀

#### 5.15.1 损伤描述及损伤机理

锅炉系统和蒸汽冷凝水回水管道上发生的均匀腐蚀和点蚀，多与溶解的氧气、二氧化碳有关。

#### 5.15.2 损伤形态

锅炉冷凝水腐蚀的损伤形态为：

- a) 除氧系统工作不正常时，很少的氧气就可引发锅炉冷凝水腐蚀，多表现为点蚀，呈溃疡状，在金属表面形成黄褐色或砖红色的腐蚀产物鼓包，直径从 1 mm~30 mm 不等，由各种腐蚀产物组成，腐蚀产物去除后，可见金属表面的腐蚀坑；
- b) 冷凝水回水系统的腐蚀多由二氧化碳引起，腐蚀后管壁形成平滑凹槽。

#### 5.15.3 受影响的材料

主要为碳钢，以及一些低合金钢、300 系列不锈钢和铜合金。

#### 5.15.4 主要影响因素

锅炉冷凝水腐蚀的主要影响因素为：

- a) 关键因素为溶解的气体浓度(氧气和二氧化碳)、pH 值、温度、给水水质和给水处理专用系统；
- b) 生成连续的四氧化三铁保护层并保持完好，足以实现对锅炉的腐蚀防护；
- c) 用来除结垢和沉淀的化学处理，应与专用水设施和锅炉给水处理系统的除氧剂相匹配；
- d) 铜锌合金应避免接触有联氨、中和胺或含氮化合物的锅炉冷凝水。

### 5.15.5 易发生的装置或设备

锅炉外部处理系统、除氧设备、给水管道、泵、冷凝水回水系统,以及级间加热器、省煤器或蒸汽发生系统的水侧和受火侧。

### 5.15.6 主要预防措施

锅炉冷凝水腐蚀的主要预防措施为:

- a) 除氧处理:在进行机械除氧的同时,根据系统压力情况进行化学药剂(如催化亚硫酸钠或联氨)除氧,可减少系统含氧量;残存除氧剂被夹带进入蒸汽发生系统,可除去脱氧器下游混入的氧气;
- b) 缓蚀剂:采用结垢或沉积物控制,或者四氧化三铁保护层防护的处理方案,如果不能降低冷凝水回流系统的二氧化碳,可能就需要添加胺类缓蚀剂。

### 5.15.7 检测或监测方法

锅炉冷凝水腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 水质监测:水质监测是常用的有效方法,监测参数包括 pH 值、导电率、氯含量、残留杀菌剂,以及用来检测泄漏的有机固体悬浮颗粒总量;
- b) 操作程序:根据经验制定合理的工作程序,可在复杂的锅炉水和冷凝水系统中查找即将出现或已出现爆管及冷凝水泄漏的部位;
- c) 表面检测:在停车状态下湿荧光磁粉检测可有效检测出除氧器发生的开裂。

### 5.15.8 相关或伴随的其他损伤

二氧化碳腐蚀、腐蚀疲劳、冲蚀、冲刷。

## 5.16 碱腐蚀

### 5.16.1 损伤描述及损伤机理

苛性碱或碱性盐引起的局部腐蚀,多在蒸发浓缩或高传热条件下发生。有时因碱性物质或碱液浓度不同,也可能发生均匀腐蚀。

### 5.16.2 损伤形态

碱腐蚀的损伤形态为:

- a) 多表现为局部腐蚀,如锅炉管的腐蚀沟槽或隔热垢层下的局部腐蚀,可能同时出现应力腐蚀开裂;
- b) 腐蚀坑可能因充满沉积物,损伤被遮盖,在可疑区域进行检测时可能需要使用灵敏仪器;
- c) 水气界面介质浓缩区域会形成局部沟槽,立管可形成一个环形槽,水平或倾斜管会在管道顶端或两侧形成纵向槽;
- d) 温度高于 79 °C 的高浓度碱液可引起碳钢的均匀腐蚀,温度达到 93 °C 时腐蚀速率非常大。

### 5.16.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢。

#### 5.16.4 主要影响因素

碱腐蚀的主要影响因素为：

- a) 苛性碱(氢氧化钠或氢氧化钾)浓度越高,腐蚀越严重;多数情况下工艺物料中碱液浓度很低,但如果存在蒸发、沉积、分离等浓缩过程,可形成局部高浓度;
- b) 碱的主要来源有中和或反应用工艺注碱、锅炉水加入的低浓度碱、锅炉水软化器再生期间因疏忽而混入的碱、冷凝器或工艺设备泄漏而混入工艺流体的碱、中和和脱除硫化物而注入的苛性碱液。

#### 5.16.5 易发生的装置或设备

易发生碱腐蚀的装置或设备为：

- a) 锅炉和蒸汽发生器(包括热交换器);
- b) 常减压装置原油进料的注碱部位可能会出现苛性碱浓缩情况,如注入的碱不能和油气有效混合,会加剧常减压装置预热器热交换器、加热炉炉管和转油线的局部腐蚀;
- c) 乙烯裂解装置:压缩系统的注碱管道、碱洗塔三段碱洗段;
- d) 使用碱进行产品脱硫的装置。

#### 5.16.6 主要预防措施

碱腐蚀的主要预防措施为：

- a) 设计:蒸汽发生设备设计时进行优化,如减少游离苛性碱的量、注入足量的水、控制加热炉的热负荷以减少炉管的过热,或减少进入凝汽器的碱盐量;设计时还应考虑使注入的碱能和其他介质进行有效混合,避免碱在器壁高温部位发生浓缩;
- b) 选材:66℃以上的高浓度苛性碱液环境避免采用碳钢和300系列不锈钢,可选择蒙乃尔合金400等镍基合金。

#### 5.16.7 检测或监测方法

碱腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 超声波测厚:超声波测厚可有效检测均匀腐蚀,目视检测和超声波测厚可有效检测局部腐蚀;对于管道和无法内检的容器,可进行超声波自动扫查和射线成像检测;
- b) 注入点监测:对注入点下游进行腐蚀监测,如定点测厚、导波检测和射线成像检测;
- c) 蒸汽发生器可用内窥镜进行目视检测。

#### 5.16.8 相关或伴随的其他损伤

蒸汽阻滞、碱应力腐蚀开裂。

### 5.17 燃灰腐蚀



#### 5.17.1 损伤描述及损伤机理

燃油或燃煤中的杂质(主要为硫、钠、钾和/或钒),在加热炉、锅炉、燃气涡轮的金属表面沉积和熔化,生成的熔渣溶解了表面的氧化物膜,使膜下新鲜金属裸露出来,和氧气反应再次生成氧化铁等氧化物,如此反复,加速材料在高温下的损耗。

### 5.17.2 损伤形态

燃灰腐蚀的损伤形态为：

- a) 燃油的燃灰腐蚀表现为结渣处的严重金属损耗，金属腐蚀速率可达 2.5 mm/年～25 mm/年；
- b) 使用燃油的过热器和再热器沉积燃灰至少可分为两层：附着在部件上的沉积物最为重要，在室温下呈暗灰色或黑色的外观；熔融态硫酸盐将腐蚀产物烧结并覆盖在表面，形成黏着力很强的玻璃状硬垢；去除燃灰沉积物后，金属基体表面呈鳄鱼皮状，腐蚀浅槽纵横交错；
- c) 使用燃煤时燃灰层的玻璃状硬垢层和基体金属间可见明显的平滑界面；
- d) 水冷壁开裂以环向为主，轴向相对少些，整体表现为环向凹槽；
- e) 熔融灰团形成时，只能维持住一定重量的灰分。重量过大时，熔渣会脱落，使一段无遮挡的光管暴露在燃烧室的热流下。水冷壁温度会发生跃升，估计幅度可达 38 ℃，形成类似于热疲劳的开裂；蒸汽冷却管的机理也类似，只是温度跃升小一些，因此热疲劳损伤也轻微一些；过热器和再热器的鳄鱼皮状斑纹和燃煤锅炉水冷壁的环向开裂也类似。

### 5.17.3 受影响的材料

易发生燃灰腐蚀的材料为：

- a) 所有加热炉和锅炉的常用材料；
- b) 50Cr-50Ni 系列合金耐蚀能力强。

### 5.17.4 主要影响因素

燃灰腐蚀的主要影响因素为：

- a) 温度：金属温度超过盐的熔化温度时腐蚀才会发生，温度最高的部位腐蚀最严重；
- b) 合金成分：腐蚀速率因合金成分不同而变化，镍基耐蚀合金耐蚀能力强；
- c) 熔渣类型：燃油燃料的燃灰中熔渣是五氧化二钒和氧化钠的混合物，或五氧化二钒和硫酸钠的混合物，熔点约 538 ℃；燃煤的燃灰对过热器和再热器的腐蚀是硫酸铁钠和硫酸铁钾熔渣造成的，熔点在 544 ℃～610 ℃；水冷壁的燃灰腐蚀是焦硫酸钠和焦硫酸钾的混合熔渣造成的，熔点温度约 371 ℃；气相中一氧化碳、硫化氢、氢气含量较高，以及未燃烧的煤粉都会形成还原性条件，腐蚀加速，腐蚀速率是氧化性条件中的 2 倍～5 倍；
- d) 管子（尤其是奥氏体合金材质）表面的渗碳，会降低耐腐蚀性，加速金属的损耗。

### 5.17.5 易发生的装置或设备

易发生燃灰腐蚀的装置或设备为：

- a) 所有使用含杂质（指含硫、钠、钾和/或钒）燃油或燃煤的加热炉或燃气轮机，以及使用含钒和钠杂质的燃油或渣油加热炉容易发生腐蚀；如果燃油中没有钒，燃油锅炉发生燃灰腐蚀的可能性很小；
- b) 加热炉金属表面温度低于熔渣熔点时不会发生腐蚀，但加热炉炉管的吊管架和支架因使用温度高，可能发生严重的燃灰腐蚀；
- c) 燃气透平机改用燃油驱动时，叶片可能发生燃灰腐蚀；
- d) 加热炉炉管产生结焦时，操作人员可能会增加热通量，使炉管部件温度升高，可能引起燃灰腐蚀；
- e) 过热器和再热器中熔盐的熔点达 538 ℃甚至更高，任何金属壁温比这些硫酸盐熔点更高的装

置都可能会发生腐蚀；

- f) 乙烯裂解装置裂解与急冷系统的裂解部分：裂解炉对流段及辐射段炉管；
- g) 水冷壁温度低于 371 ℃时(对应于蒸汽压力约 12.4 MPa)，腐蚀程度最轻。

#### 5.17.6 主要预防措施

燃灰腐蚀的主要预防措施为：

- a) 燃料改性：使用杂质含量低的燃料，或进行掺混，可减缓燃灰腐蚀；
- b) 设计优化：燃烧器合理设计，减少火焰冲击和局部过热等可能产生高温的状况；
- c) 工艺改进：燃烧时保持氧气过量，实现燃料充分燃烧，或向燃料中注入特殊的添加剂，提高炉渣熔点，并降低沉积物黏附在金属表面或熔解保护性氧化物膜的可能性；降低设备使用温度，使温度最高的部位也不超过熔渣的熔点；
- d) 选材：管道吊管架和支架等容易产生高温的部件，可以改用 50%Cr-50%Ni 合金，如合金 657，但可能需要同时对吊管架的设计进行更改，以改善 50%Cr-50%Ni 合金低应力脆断的问题。

#### 5.17.7 检测或监测方法

燃灰腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 目视检测：检查燃灰腐蚀的最有效方法，挂渣明显的部位金属损耗可能也非常严重；
- b) 壁厚测定：先喷砂处理去除黏附力强的玻璃状硬垢，然后用超声波检测来测量厚度损失；
- c) 金相检查和沉积物分析技术可用于确定是否发生了燃灰腐蚀。

#### 5.17.8 相关或伴随的其他损伤

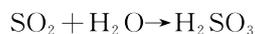
热疲劳。

### 5.18 烟气露点腐蚀

#### 5.18.1 损伤描述及损伤机理

燃料燃烧时燃料中的硫、氮和氯类物质形成二氧化硫、三氧化硫、氮氧化物和氯化氢，低温(露点及以下)遇水蒸气形成酸，对金属造成腐蚀。腐蚀介质的形成过程如下：

烟气中的硫、氮或氯——→SO<sub>2</sub>(SO<sub>3</sub>)、NO<sub>x</sub> 或 HCl



#### 5.18.2 损伤形态

烟气露点腐蚀的损伤形态为：

- a) 烟气露点腐蚀是亚硫酸腐蚀、硫酸腐蚀、硝酸腐蚀、盐酸腐蚀等酸性介质腐蚀的某一种或几种腐蚀共同作用的综合结果；
- b) 空气预热器、省煤器或其他碳钢或低合金钢部件发生烟气露点腐蚀时会形成宽而浅的蚀坑，具体形态取决于酸液凝结方式；
- c) 对于余热锅炉中的 300 系列不锈钢制给水加热器，可能发生表面的应力腐蚀开裂，裂纹整体外观呈“发丝”状。

### 5.18.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢。

### 5.18.4 主要影响因素

烟气露点腐蚀的主要影响因素为：

- a) 燃料杂质：燃料中的杂质(硫、氮及氯化物)含量越高，形成的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{HCl}$  和  $\text{NO}_x$  等物质越多，腐蚀的可能性越大，腐蚀程度可能越严重；
- b) 温度：与烟气接触的的金属表面温度若低于该烟气环境的露点温度，就可能发生腐蚀；硫酸露点与烟气中三氧化硫浓度有关，大约为  $138\text{ }^\circ\text{C}$ ；氯化氢露点温度与氯化氢浓度有关，大约为  $54\text{ }^\circ\text{C}$ ；
- c) 灰垢：烟灰中的金属氧化物如  $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  等物质，可催化  $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$  的转化反应，提高烟气露点，加速腐蚀；
- d) 过剩空气系数：过剩空气系数越高，燃烧生成的  $\text{SO}_3$  含量越高。

### 5.18.5 易发生的装置或设备

易发生烟气露点腐蚀的装置或设备为：

- a) 使用含硫燃料的加热炉或锅炉，在省煤器和烟道中都可能发生硫致烟气露点腐蚀；
- b) 余热锅炉进水温度低于氯化氢露点温度时，300 系列不锈钢制给水加热器可能在烟气侧发生氯化物应力腐蚀开裂；
- c) 燃气轮机的气相含氯时，如使用氯基除菌剂的冷却塔漂沫物可能被吹进燃气轮机系统，余热回收设备的 300 系列不锈钢制给水加热器可能发生氯致烟气露点腐蚀，导致余热回收设备的给水加热器损坏；
- d) 空气预热器、催化裂化装置再生器及附属设备的烟道等温度较低处。

### 5.18.6 主要预防措施

烟气露点腐蚀的主要预防措施为：

- a) 选材：采用 ND 钢(09CrCuSb)等耐酸性腐蚀钢，环境中含有氯化物时，余热锅炉的给水加热器避免使用 300 系列不锈钢，空气预热器可使用有机硅等耐蚀材料；
- b) 控制温度：测量烟气的实际露点温度，尽量保持锅炉和加热炉的金属壁温高于实际露点温度；
- c) 控制燃料中硫、氮和氯化氢含量，或进行脱硫脱硝处理；
- d) 涂层：设置致密的耐蚀金属涂层；
- e) 燃油锅炉进行水洗除灰作业时，如果仅用水进行最终清洗可能不能中和掉酸性盐，可以在最终清洗的水中加入碳酸钠中和酸性灰分；
- f) 运行负荷：应尽量避免余热锅炉在低负荷、较低温度下长时间运行。

### 5.18.7 检测或监测方法

烟气露点腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 超声波测厚可检测省煤器管子的壁厚减薄速率；
- b) 目视检测可以发现金属的腐蚀减薄，外设翅片的管子，往往翅片腐蚀情况更明显；
- c) 渗透检测可发现 300 系列不锈钢的应力腐蚀开裂。

### 5.18.8 相关或伴随的其他损伤

盐酸腐蚀、氯化物应力腐蚀开裂。

## 5.19 氯化铵腐蚀

### 5.19.1 损伤描述及损伤机理

氯化铵(或氯化铵盐)在一定温度下结晶成垢,盐垢极易吸湿潮解,引起均匀腐蚀或局部腐蚀,其中以无自由态水部位的点蚀最为常见。

### 5.19.2 损伤形态

氯化铵腐蚀的损伤形态为:

- a) 腐蚀部位多存在白色、绿色或褐色盐状沉积物,若停车时进行水洗或吹扫,会除去这些沉积物,等到目视检测时沉积物可能已不明显;
- b) 垢层下腐蚀通常为局部腐蚀,如点蚀;
- c) 腐蚀速率可能极高。

### 5.19.3 受影响的材料

按耐腐蚀性增加的顺序:碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、蒙乃尔合金 400、双相不锈钢、因科镍合金 800 和因科镍合金 825、因科耐尔合金 625 和哈氏合金 C276,以及钛。

### 5.19.4 主要影响因素

氯化铵腐蚀的主要影响因素为:

- a) 材质:见 5.19.3 的材料耐腐蚀性排序;
- b) 成垢(结晶)程度:高温物料冷却时氯化铵盐会析出成垢(结晶),其程度取决于氯化铵浓度和温度,即使温度远远超过水的露点温度,如 205 °C 时,也会腐蚀管道和设备;
- c) 水分:氯化铵盐易吸湿潮解,少量水即可造成严重腐蚀,最大腐蚀速率可超过 2.5 mm/年;当氯化铵在高于水露点温度下析出时,可能需要注入洗涤水以溶解氯化铵盐;氯化铵盐也具有很强的水溶性和腐蚀性,在与水混合时形成酸性溶液,某些中和胺与氯化物发生反应形成具有类似作用的盐酸胺盐;
- d) 温度:随温度升高,腐蚀速率增大。

### 5.19.5 易发生的装置或设备

易发生氯化铵腐蚀的装置或设备为:

- a) 常压塔塔顶系统:常压塔塔顶、塔内上部塔盘、塔顶管道及热交换器可能会积垢,发生垢下腐蚀;由于氯化铵和/或盐酸胺盐从气相凝结出来,沉积物可能出现在低流量区;塔顶循环回流物料含有氯化铵或盐酸胺盐时可能会发生腐蚀;
- b) 加氢装置:反应器流出物中氯化铵结垢,发生垢下腐蚀;若热交换器发生结垢或换热效率下降,可能需要用水冲洗;
- c) 催化重整装置:反应器流出物和循环氢系统会发生氯化铵垢下腐蚀;
- d) 流化床催化裂化装置和焦化装置:分馏塔塔顶和塔顶回流系统会发生氯化铵垢下腐蚀。

### 5.19.6 主要预防措施

耐点蚀的合金同样具有较好的耐氯化铵腐蚀性能,但即使是耐点蚀性最强的镍基合金和钛合金,也可能在氯化铵盐环境中发生点蚀。

- a) 常减压装置:电脱盐和/或向脱盐后的原油中注苛性碱,降低常压塔进料中的氯化物含量,以氯化铵盐或盐酸胺盐进行控制;对常压塔顶管道注水冲洗沉积盐;注入成膜胺型缓蚀剂缓解腐蚀。
- b) 加氢装置:降低反应器原料烃中的氯化物含量;控制补充氢中的氯化物含量;向反应产物流出系统连续或间断注水,冲走氯化铵沉积物。
- c) 催化重整:反应产物进行脱氯处理;或注水冲洗,但注水系统应精确设计;塔顶的部分设备可注入中和胺或成膜胺型缓蚀剂缓解腐蚀。

### 5.19.7 检测或监测方法

氯化铵腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 氯化铵盐垢下腐蚀通常为局部腐蚀,难以检测;
- b) 壁厚测定:射线成像或超声波检测确定壁厚减薄;
- c) 监测进料和排放废水中氨和氯化物含量,可能需要通过工艺模拟来确定浓度和露点温度;若已计算出氯化铵盐沉积温度,为使金属壁温始终保持在氯化铵盐沉积温度之上,温度监测和控制可能会比较有效;
- d) 监测热交换器的压力降和热效率,压力降异常增大或换热效率明显降低时,常可发现已产生了氯化铵盐沉积垢层;
- e) 腐蚀挂片或探针,由于氯化铵盐需要沉积在探针表面才可有效监测腐蚀,故该方法有可能有用。

### 5.19.8 相关或伴随的其他损伤

盐酸腐蚀。



## 5.20 胺腐蚀

### 5.20.1 损伤描述及损伤机理

胺处理工艺中碳钢发生的均匀腐蚀和/或局部腐蚀,胺腐蚀并非胺本身直接产生腐蚀,而是由胺液中溶解的酸性气体(二氧化碳和硫化氢)、胺降解产物、耐热胺盐(HSAS)和其他腐蚀性杂质引起的。

### 5.20.2 损伤形态

胺腐蚀的损伤形态为:

- a) 碳钢和低合金钢发生胺腐蚀时可表现为均匀腐蚀或局部腐蚀,沉积物处表现为垢下腐蚀;
- b) 介质流速较低时,多为均匀腐蚀,介质流速高并伴有紊流时,多为局部腐蚀。

### 5.20.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

### 5.20.4 主要影响因素

胺腐蚀的主要影响因素为:

- a) 介质:介质对碳钢和低合金钢的侵蚀性从大到小的次序为单乙醇胺(MEA)、二甘醇胺(DGA)、二异丙胺(DIPA)、二乙醇胺(DEA)和甲基二乙醇胺(MDEA);
- b) 胺浓度:贫胺溶液导电性差和/或 pH 值高,一般没有腐蚀性,胺液中耐热胺盐(HSAS)浓度超过 2%(质量分数)时,腐蚀速率显著增大,其程度取决于耐热胺盐浓度;
- c) 杂质:氨、硫化氢和氰化氢等杂质会加速腐蚀,多发生于再生塔塔顶冷凝器、出口管道,以及回流管道、阀和泵处;
- d) 温度:随温度升高,腐蚀速率增大,特别是富胺环境中;若压力降足够大,温度高于 104 °C 左右时酸性气体可能会发生闪蒸,产生严重局部腐蚀;
- e) 流速:低流速区一般呈均匀腐蚀,高流速并存在强紊流时会造成局部腐蚀。

#### 5.20.5 易发生的装置或设备

易发生胺腐蚀的装置或设备为:

- a) 各类胺处理系统,如炼油厂中用于脱除硫化氢、二氧化碳或硫醇的胺处理系统,在常减压装置、焦化装置、流化床催化裂化装置、重整加氢装置、加氢裂化装置和尾气处理装置中常可见到这些胺处理系统;
- b) 再生塔塔底再沸器和再生器,尤其是胺液温度最高且介质紊流最强的区域,可发生严重腐蚀;
- c) 贫胺/富胺溶液热交换器的富胺侧、高温贫胺管道、高温富胺管道、胺液泵,以及回收设备是腐蚀易发区域。

#### 5.20.6 主要预防措施

胺腐蚀的主要预防措施为:

- a) 处理量:用于吸收酸性气体的胺处理系统应控制合适的处理量,避免胺液中腐蚀性杂质浓度过高;
- b) 温度:控制再沸器的温度和流量,并控制再生塔塔顶温度,避免胺在高温下发生降解产生腐蚀性产物;
- c) 压力:控制高温部位的局部压力降,降低闪蒸程度;
- d) 材质:无法避免闪蒸时应采用 300 系列不锈钢或其他耐蚀合金,在吸收塔和汽提塔中,宜采用 410 不锈钢塔盘和内件;
- e) 耐热胺盐浓度:控制耐热胺盐的浓度在可接受的范围内,可有效降低胺液腐蚀能力;防止氧气窜入也会减少耐热盐的形成,胺的储罐和物料缓冲罐应充装惰性气体进行保护;
- f) 设计和操作:如果设计合理,操作正确,大多数部件都可使用碳钢材质,但设计存在缺陷,或操作不当,以及介质中有杂质时会产生腐蚀,例如过滤和工艺控制可除去胺液中的固体颗粒和烃组分,富胺液中固体颗粒过滤效果比贫胺液更佳;
- g) 流速:碳钢材质输送的富胺液速度不宜超过 1.8 m/s,输送贫胺液可放宽至 6 m/s;
- h) 缓蚀剂:可添加合适的缓蚀剂,以控制胺腐蚀。

#### 5.20.7 检测或监测方法

胺腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 检测方法一般为设备内部的目视检测和腐蚀部位壁厚测定;
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时,可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定;

- c) 腐蚀探针或挂片:监控实时腐蚀速率,尤其是温度较高的部位,如再沸器进料管道和回流管道、高温贫胺/富胺管道、汽提塔塔顶冷凝器的管道。

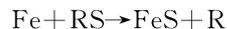
#### 5.20.8 相关或伴随的其他损伤

胺应力腐蚀开裂。

#### 5.21 高温硫化物腐蚀(无氢气环境)

##### 5.21.1 损伤描述及损伤机理

碳钢或其他合金在高温下与硫化物反应发生的腐蚀:



##### 5.21.2 损伤形态

高温硫化物腐蚀(无氢气环境)的损伤形态为:

- a) 多为均匀腐蚀,有时表现为局部腐蚀,高流速部位会形成冲蚀;
- b) 腐蚀发生后部件表面多覆盖有硫化物膜,有的膜很厚,有的很薄,厚度跟材质、流体腐蚀性、流速和是否有杂质有关。

##### 5.21.3 受影响的材料

易发生高温硫化物腐蚀(无氢气环境)的材料为:

- a) 所有铁基材料,包括碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢;
- b) 镍基合金会不同程度地发生硫化物腐蚀,腐蚀速率取决于材料成分,尤其是铬含量;
- c) 和碳钢相比,铜合金发生硫化物腐蚀的起始温度更低。

##### 5.21.4 主要影响因素

高温硫化物腐蚀(无氢气环境)的主要影响因素为:

- a) 合金元素:耐硫化物腐蚀性能,取决于反应产生的硫化物膜保护能力。一般而言,钢材和镍基合金随铬元素含量升高,耐硫化物腐蚀能力增强。300 系列不锈钢,如 304、316、321 和 347,在多数炼油工艺中耐高温硫化物腐蚀能力较强。镍基合金与不锈钢相似,铬含量相近的镍基合金其抗硫化物能力也相似。
- b) 温度:通常在铁基合金温度超过 260 °C 时开始发生高温硫化物腐蚀,温度越高,腐蚀越快。
- c) 硫含量:原油、煤和其他烃类物料都含有不同浓度的硫,总硫含量也是指不同的含硫化合物中硫的总和。由于物料中的硫腐蚀是指在高温下能够发生热分解产生硫化氢的硫化物和其他活性硫化物引起的腐蚀,考虑到一些硫化物相对更容易反应生成硫化氢,故介质的腐蚀能力与其总硫含量不完全对应。
- d) 腐蚀产物膜:反应产生的硫化物保护膜可以提供不同程度的防护效果,保护膜的防护能力除受合金成分影响外,还跟介质腐蚀性有关。

##### 5.21.5 易发生的装置或设备

易发生高温硫化物腐蚀(无氢气环境)的装置或设备为:

- a) 处理含硫物料的高温设备和高温管道,在常减压装置、流化床催化裂化装置、焦化装置、加氢裂化装置和加氢精制装置中较常见;

- b) 与含硫气体接触的锅炉和高温设备；
- c) 使用油、气、焦炭和多数其他燃料的加热炉，腐蚀程度取决于燃料中的含硫量；
- d) 乙烯裂解装置：裂解与急冷系统中裂解部分的原料进料预热段及裂解炉对流段炉管、急冷部分的减粘塔釜及塔釜裂解燃料油出口管道，以及急冷部分的汽油分馏塔釜燃料油部分回流、部分去燃料油汽提塔、部分去裂解气急冷器流程，包括汽油分馏塔釜、燃料油汽提塔进料、热交换器管程，及与上述流程相连的管道。

#### 5.21.6 主要预防措施

高温硫化物腐蚀(无氢气环境)的主要预防措施为：

- a) 材质升级：提高材料中铬的含量，如整体采用 300 系列不锈钢或 400 系列不锈钢，或者也可以选用以这些不锈钢为衬里的复合钢板；
- b) 低合金钢渗铝：可降低硫化腐蚀速率，减少产生的硫化物膜，但防护不够彻底。加氢反应器中 300 系列不锈钢催化剂支撑网也可进行类似的处理以延长使用寿命。

#### 5.21.7 检测或监测方法

高温硫化物腐蚀(无氢气环境)的检测或监测方法为：

- a) 监测工艺条件：温度和/或硫含量变化，其中炉管的温度监测既可使用表面热电偶，也可以使用红外热成像；
- b) 测厚：条件允许的情况下采用超声波测厚，注意壁厚变化；
- c) 射线检测：射线成像可有效检出局部腐蚀区域；
- d) 材质复验：对在硫化物腐蚀环境中使用的合金，应设置可追溯的材料标识，用于复验和核对其合金成分，防止出现混用。

#### 5.21.8 相关或伴随的其他损伤

高温硫化物腐蚀(氢气环境)。

### 5.22 高温硫化物腐蚀(氢气环境)

#### 5.22.1 损伤描述及损伤机理

碳钢或低合金钢等在高温且临氢条件下与硫化物反应发生的腐蚀，即氢的存在加速了高温硫化物腐蚀，又称高温硫化氢/氢气腐蚀。

#### 5.22.2 损伤形态

高温硫化物腐蚀(氢气环境)的损伤形态为：

- a) 通常表现为均匀腐蚀，同时生成硫化亚铁锈皮，厚度约为被腐蚀金属厚度的 5 倍，并可能形成多层锈皮结构；
- b) 金属表面的锈皮黏合牢固，且有灰色光泽，易被误认为是没有发生腐蚀的金属基体。

#### 5.22.3 受影响的材料

按耐蚀性递增的顺序排列：碳钢、低合金钢、400 系列不锈钢、300 系列不锈钢。

#### 5.22.4 主要影响因素

高温硫化物腐蚀(氢气环境)的主要影响因素为：

- a) 温度:通常在铁基合金温度超过 260 °C 时开始发生高温硫化物腐蚀,随温度升高,腐蚀速率增大;
- b) 合金元素:一般而言,铬含量越高,合金耐硫化物腐蚀能力越强,当铬含量未达到 7%~9%(质量分数)时,即使增加铬含量,材料耐腐蚀性提高也不明显;铬含量相近的不锈钢其耐腐蚀能力相近,镍基合金同样如此;
- c) 氢分压:氢分压较高时,腐蚀速率比无氢环境下的硫化物腐蚀速率大得多;
- d) 硫化氢分压:随硫化氢分压的增高,腐蚀速率增大;
- e) 与石脑油脱硫装置相比,煤油脱硫装置和加氢裂化装置的腐蚀更严重,腐蚀速率几乎可达前者的 2 倍。

#### 5.22.5 易发生的装置或设备

易发生高温硫化物腐蚀(氢气环境)的装置或设备为:

- a) 接触含高温氢气/硫化氢介质的设备和管道中易发生这种腐蚀,如脱硫装置、加氢精制装置和加氢裂化装置等所有炼油厂的加氢装置;
- b) 注氢点下游腐蚀明显加剧;
- c) 乙烯裂解装置:裂解与急冷系统中急冷部分的急冷锅炉的管程出口—急冷器—汽油分馏塔进料及流程相连管道、减粘塔顶至汽油分馏塔流程。

#### 5.22.6 主要预防措施

高温硫化物腐蚀(氢气环境)的主要预防措施为:

- a) 使用铬含量高的合金可降低腐蚀程度,300 系列不锈钢如 304L、316L、321 和 347 等,使用中未超温时耐蚀能力较强;
- b) 优化工艺,降低氢分压。

#### 5.22.7 检测或监测方法

高温硫化物腐蚀(氢气环境)的检测或监测方法为:

- a) 监测工艺条件:现场测量并确认实际金属壁温有无超过设计温度,以及定期进行工艺模拟计算以确认硫化氢含量有无明显升高;
- b) 测厚:条件允许的情况下采用目视检测、超声波测厚和射线成像检测壁厚变化。

#### 5.22.8 相关或伴随的其他损伤

高温硫化物腐蚀(无氢气环境)。

### 5.23 酸性水腐蚀(碱式酸性水)

#### 5.23.1 损伤描述及损伤机理

金属材料在存在硫氢化铵(NH<sub>4</sub>HS)的酸性水中发生的腐蚀:



#### 5.23.2 损伤形态

酸性水腐蚀(碱式酸性水)的损伤形态为:

- a) 介质流动方向发生改变的部位,或硫氢化铵浓度超过 2%(质量分数)的紊流区,易形成严重局

部腐蚀；

- b) 介质注水不足以溶解析出的硫化铵时,低流速区可能出现结垢,发生垢下局部腐蚀;热交换器管束发生结垢时,还可能出现堵塞和换热效率降低等情况;
- c) 硫化铵会迅速腐蚀海军黄铜和其他铜合金。

### 5.23.3 受影响的材料

易发生酸性水腐蚀(碱式酸性水)的材料为:

- a) 碳钢耐酸性水腐蚀(碱式酸性水)能力较弱;
- b) 300 系列不锈钢、双相不锈钢、铝合金和镍基合金具有较强的耐腐蚀性,具体腐蚀速率与硫化铵浓度、流速有关。

### 5.23.4 主要影响因素

酸性水腐蚀(碱式酸性水)的主要影响因素为:

- a) pH 值:pH 值接近中性时腐蚀性较低;
- b) 浓度:随着硫化铵浓度升高,腐蚀速率增大;硫化铵浓度低于 2%(质量分数)时,几乎无腐蚀性;浓度超过 2%(质量分数)时,腐蚀性越来越强;
- c) 流速:随着硫化铵流速加快,腐蚀速率增大;低流速区易发生硫化铵结垢,并出现垢下腐蚀,而高流速区,尤其是出现紊流时,易发生冲蚀;
- d) 紊流状态:紊流区易发生腐蚀;
- e) 温度:温度低于 66 °C 时,加氢反应器、流化床催化裂化装置反应器和焦化炉反应产物的气相中可能会析出硫化铵,如果没有注水冲洗掉,就会引起积垢和堵塞;
- f) 杂质:注入加氢反应器反应产物出料系统的洗涤水中,如果含有氧元素和铁元素可导致腐蚀加剧和积垢增多;氰化物存在时,也会破坏硫化物保护膜,导致腐蚀严重;
- g) 合金成分:碳钢耐腐蚀能力较差,300 系列不锈钢、双相不锈钢、铝合金和镍基合金具有较强的耐腐蚀性。

### 5.23.5 易发生的装置或设备

易发生酸性水腐蚀(碱式酸性水)的装置或设备为:

- a) 加氢装置:加氢反应器反应产物出料的温度降到 49 °C~66 °C 范围内时,硫化铵会从气相中析出,析出后可能造成积垢和/或冲蚀的部位主要有空气冷却器联管箱、进出口管道以及管束;反应器反应产物分离器的进出口管道、酸性水排尿管(尤其是控制阀下游位置要注意闪蒸引起的严重冲蚀);高压分离器的气相管道;汽提塔塔顶有酸性水的部位;
- b) 流化床催化裂化装置:硫化铵浓度通常小于 2%(质量分数),但在流速高和/或存在氰化物时,保护性硫化物膜被破坏,从而促进腐蚀;
- c) 酸性水汽提塔:硫化铵浓度高以及可能存在氰化物的部位,如汽提塔塔顶管道、冷凝器、回流罐和回流管道;
- d) 胺处理装置:再生塔塔顶设备和回流管道可能会出现高浓度的硫化铵;
- e) 延迟焦化装置:分馏塔下游的气体提浓装置可能会出现高浓度的硫化铵;
- f) 乙烯裂解装置裂解与急冷系统:汽油分馏塔塔顶裂解气至急冷水塔进料流程,包括汽油分馏塔塔顶、急冷水塔进料(注氨)。

### 5.23.6 主要预防措施

酸性水腐蚀(碱式酸性水)的主要预防措施为:

- a) 优化设计:空冷器的进出物流采用对称结构,保持物料压力平衡;
- b) 浓度监控:硫化铵浓度超过 2%(质量分数)以上,尤其是达到 8%(质量分数)或更高时,应对介质流速进行分析,确定腐蚀倾向,硫化铵浓度一般不应超过 8%(质量分数),否则碳钢腐蚀严重;
- c) 流速:材质采用碳钢的设备和管道,介质流速宜保持在 3 m/s~6 m/s 范围内,流速超过 6 m/s 时,应根据硫化铵浓度选用耐蚀合金,如因科镍合金 825、双相不锈钢等;
- d) 注水:正确设计并注入适量低氧洗涤水,稀释硫化铵,水量应充足以确保稀释效果,注水喷嘴应注意合金成分及规范操作;
- e) 选材:钛或哈氏合金 C276 已用于建造酸性水汽提装置中的塔顶冷凝器,存在冲蚀的部位不应使用铝制热交换器管。

### 5.23.7 检测或监测方法

酸性水腐蚀(碱式酸性水)的检测或监测方法为:

- a) 筛选腐蚀区:取样和计算硫化铵含量,由工艺工程师和材料或腐蚀工程师提供数据,用以确定腐蚀敏感区;
- b) 厚度监测:对腐蚀敏感区,尤其是高流速和低流速部位、高浓度硫化铵的控制阀下游部位经常进行超声波检测、导波检测或射线成像检测;
- c) 钢制空冷器管:内旋转检测系统检测、远场涡流检测和漏磁检测;
- d) 非磁性空冷器管:涡流检测;
- e) 注水监控:注水设施的规范操作和流量监控。

### 5.23.8 相关或伴随的其他损伤

冲蚀、冲刷。

## 5.24 酸性水腐蚀(酸式酸性水)

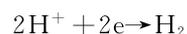
### 5.24.1 损伤描述及损伤机理

含有硫化氢且 pH 值介于 4.5~7.0 的酸性水引起的金属腐蚀,介质中也可能含有二氧化碳。

阳极反应:



阴极反应:



### 5.24.2 损伤形态

酸性水腐蚀(酸式酸性水)的损伤形态为:

- a) 酸式酸性水腐蚀一般为均匀腐蚀,有氧存在时易发生局部腐蚀或沉积垢下局部腐蚀,含有二氧化碳的环境还可能同时出现碳酸盐应力腐蚀;
- b) 300 系列不锈钢易发生点蚀,还可能出现缝隙腐蚀,以及氯化物应力腐蚀开裂。

### 5.24.3 受影响的材料

易发生酸性水腐蚀(酸式酸性水)的材料为:

- a) 碳钢耐酸性水腐蚀能力较低;
- b) 300 系列不锈钢、铜合金和镍基合金对酸性水腐蚀不敏感。

### 5.24.4 主要影响因素

酸性水腐蚀(酸式酸性水)的主要影响因素为:

- a) 硫化氢浓度:随酸性水中硫化氢浓度的升高,腐蚀速率增大。酸性水中硫化氢浓度取决于气相中硫化氢分压、温度和 pH 值,在一定的压力下,酸性水中的硫化氢浓度随温度升高而降低。
- b) pH 值:硫化氢浓度增加会降低溶液的 pH 值,最低可达 4.5,形成较强的酸性环境,腐蚀明显。pH 值高于 4.5 时,可能会形成硫化亚铁保护膜,减小腐蚀速率;但有些时候则可能形成一层多孔的硫化物厚膜,不仅不能减小均匀腐蚀速率,甚至会促进垢下点蚀。
- c) 杂质:氯化氢和二氧化碳会降低 pH 值,即酸性变强,氨会使 pH 值升高且可能形成碱式酸性水腐蚀。空气或氧化剂的存在可能会增加腐蚀作用,常形成点蚀或垢下腐蚀。
- d) 流速:高流速冲刷易使硫化亚铁保护膜被破坏,腐蚀速率增大。

### 5.24.5 易发生的装置或设备

易发生酸性水腐蚀(酸式酸性水)的装置或设备:

- a) 流化床催化裂化装置和焦化装置的气体分馏系统中塔顶硫化氢含量高、氨含量低的部位;
- b) 乙烯裂解装置裂解与急冷系统的急冷部分:急冷水塔顶裂解气至压缩部分的裂解气压缩机入口流程,包括急冷水塔顶及相连管道;汽油分馏塔塔顶裂解气至急冷水塔进料流程,包括汽油分馏塔塔顶、急冷水塔进料(未注氨时);
- c) 乙烯裂解装置压缩系统:裂解气自急冷水塔顶至裂解气压缩机 1~4 段流程,包括 1~4 段间分离罐顶部、热交换器壳程、碱洗塔进料及相连管道;裂解气压缩机 1~4 段分离罐底部冷凝的裂解汽油至汽油汽提塔流程,包括 1~4 段间分离罐底部、汽油汽提塔进料及相连管道;裂解气压缩机 1~4 段分离罐底部冷凝的冷凝水至急冷水塔流程,包括 1~4 段间分离罐底部、急冷水塔进料及相连管道;汽油汽提塔顶轻烃返回压缩机入口流程,包括汽油汽提塔顶及相连管道;汽油汽提塔釜裂解汽油部分回流,部分送出界区流程,包括汽油汽提塔釜、热交换器管程或壳程及相连管道。

### 5.24.6 主要预防措施

酸性水腐蚀(酸式酸性水)的主要预防措施为:

- a) 温度低于 60 °C 可用 300 系列不锈钢,且基本不用考虑氯化物应力腐蚀开裂问题;
- b) 铜合金和镍基合金一般不易发生酸式酸性水腐蚀,但当存在氨时,铜合金易发生腐蚀。

### 5.24.7 检测或监测方法

酸性水腐蚀(酸式酸性水)的检测或监测方法为:

- a) 壁厚测定:碳钢腐蚀一般为均匀腐蚀,在高流速或湍流区域会发生局部腐蚀,尤其在水汽凝结的部位,可采用超声波检测或射线成像检测确定减薄状况;
- b) 工艺防腐和腐蚀监测:应定期对塔顶贮罐中水抽样进行 pH 值监测;
- c) 探针或挂片:设置探针或挂片,监测腐蚀程度。

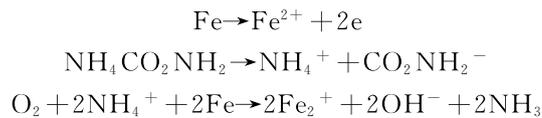
#### 5.24.8 相关或伴随的其他损伤

湿硫化氢破坏、碳酸盐应力腐蚀开裂。

#### 5.25 甲铵腐蚀

##### 5.25.1 损伤描述及损伤机理

金属与尿素合成过程中的中间产物甲铵接触时发生的腐蚀。甲铵根据其受氧气保护的不同程度可以分为钝化腐蚀、活化腐蚀和过氧腐蚀：



##### 5.25.2 损伤形态

甲铵对碳钢和低合金钢具有强烈的腐蚀作用，在较短时间内可以腐蚀穿透金属器壁。甲铵对不锈钢的腐蚀形态可分为晶界优先型均匀腐蚀、晶间腐蚀、选择性腐蚀和刀口腐蚀。对于接触尿素熔融物的整个不锈钢表面都存在发生均匀腐蚀的现象，但根据晶粒本体明显腐蚀的同时，晶界有侵蚀沟，晶界与晶粒相比又较为优先。选择性腐蚀是指相、组织、夹杂物等的优先溶解腐蚀。刀口腐蚀主要发生在含有稳定化元素（如 Ti、Nb）的不锈钢焊缝熔合线处，是选择性腐蚀的一种特殊形式。

##### 5.25.3 受影响的材料

按耐蚀能力递增顺序排列：碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢。

##### 5.25.4 主要影响因素

甲铵腐蚀的主要影响因素为：

- 氧浓度：介质中的氧浓度合适时可以缓解甲铵对不锈钢的腐蚀，氧浓度过高或过低都会加剧腐蚀；
- 流速：流速越快，腐蚀速率较大；
- 合金含量：按耐蚀能力递增顺序排列为碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢。

##### 5.25.5 易发生的装置或设备

尿素装置：尿素装置中的高压段，包括尿素合成塔、甲铵冷凝器等。

##### 5.25.6 主要预防措施

甲铵腐蚀的主要预防措施为：

- 采用尿素级不锈钢（如 316L mod），控制碳含量；
- 在介质中通入适量氧气来抑制甲铵的腐蚀。

##### 5.25.7 检测或监测方法

检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定。

##### 5.25.8 相关或伴随的其他损伤

无。

## 5.26 电偶腐蚀

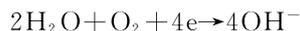
### 5.26.1 损伤描述及损伤机理

金属表面与导电介质接触,因电化学作用而产生的腐蚀。

阳极反应:



阴极反应:



### 5.26.2 损伤形态



多发生在电解质液中两种材料非绝缘连接处,损伤形态与材料组合、电解质流体导电性和阳极/阴极相对暴露面积等有关,阳极材料可能发生局部腐蚀或均匀腐蚀,常形成蚀坑、蚀孔、沟槽或裂缝等。

### 5.26.3 受影响的材料

除贵金属外的所有材料。

### 5.26.4 主要影响因素

电偶腐蚀的主要影响因素为:

- a) 介质:介质应为电解质流体,可传导电流;
- b) 材料组合:两种不同的材料,均与同一个电解质流体接触,材料的电极电位差值越大,电偶腐蚀越严重;
- c) 导电回路:阳极材料和阴极材料之间可发生电荷移动;
- d) 相对暴露面积:阳极材料在同一个电解质流体暴露面积相对阴极越小,腐蚀速率越快;
- e) 表面状态:单一材料当自身表面状态存在涂层、钝化膜、结垢等电化学差异时即可构成电偶腐蚀。

### 5.26.5 易发生的装置或设备

电偶腐蚀易发生的装置或设备为:

- a) 电偶腐蚀可发生在任何电解质流体中存在电气连接的不同材料间;
- b) 使用不同材质制造的设备、设备钝化膜或涂层发生破损处、埋地管道、江河或海洋中的管道等。

### 5.26.6 主要预防措施

电偶腐蚀的主要预防措施为:

- a) 设计:优化设计,避免形成电偶腐蚀的材料组合,选择同一材料或电极电位相近的材料,或者采用电绝缘的方法使不同材料间不能形成电气闭合回路;
- b) 相对暴露面积:增大阳极/阴极相对暴露面积,减缓阳极的腐蚀速率;
- c) 涂层:为阳极材料与电解质流体接触面设置涂层或钝化膜;
- d) 阴极保护:外部设置合理的保护电极。

### 5.26.7 检测或监测方法

电偶腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 电偶腐蚀可能造成均匀减薄或在不同材料连接处及材料不连续处局部腐蚀,前者一般表现为壁厚减薄,检测方法为宏观检查+腐蚀部位壁厚测定;后者一般表现为点蚀坑、蚀孔、沟槽或裂缝,检测方法为宏观检查;
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时,可用超声波自动扫查、导波检测或断面射线扫描法查找局部减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定;
- c) 定期测量阴极保护装置。

#### 5.26.8 相关或伴随的其他损伤

土壤腐蚀。

### 5.27 含盐水腐蚀

#### 5.27.1 损伤描述及损伤机理

含有溶解盐(通常是氯化物或其他卤化物盐)的水溶液,可造成设备表面局部或大范围点蚀。含盐水腐蚀常与其他腐蚀(如电偶腐蚀、微生物腐蚀)同时出现。

不锈钢在氯化物盐水中发生腐蚀时,钝化层被氯化物破坏的部位会形成点蚀坑,随着氯化物在电泳作用下向坑内迁移,水解产生的酸性物质降低坑中溶液 pH 值,形成自催化,加速腐蚀。缝隙部位也容易产生这样的自催化腐蚀过程。类似的过程也会发生在裂缝中。此外,其他阴离子如硝酸盐、硫酸盐也会在腐蚀坑和缝隙中水解并降低 pH 值,但这些阴离子的流动性比氯化物小,因此其影响不太明显。

#### 5.27.2 损伤形态

碳钢在含盐水环境下的常见损伤形态如下。

- a) 在有氧腐蚀条件下受到氯化物(或其他阴离子)的促进作用时,碳钢腐蚀部位常常结垢严重,还可能出现局部垢瘤。将垢层去除后,可观察到宽大的凹坑,腐蚀速率可达 0.3 mm/年。
- b) 在硫酸盐还原菌(SRB)的作用下,碳钢管道顶部或底部可能出现严重的点蚀、沟槽。
- c) 碳钢的焊缝和热影响区有时会比母材更先发生腐蚀。

不锈钢氯化物盐水环境中发生腐蚀时,常形成分散的深点蚀坑,在发生缝隙腐蚀时也能观察到这样的损伤形态。如果在敏感温度范围内,还可能同时出现氯化物应力腐蚀开裂。

#### 5.27.3 受影响的材料

易发生含盐水腐蚀的材料如下。

- a) 含盐水腐蚀环境中,碳钢是最常见的材料,其他低合金钢和不锈钢在含盐水中也可能会发生腐蚀。铝合金对含盐水腐蚀较为敏感,而 Ni-Cr-Mo 合金在含盐水中的耐腐蚀性能较好。
- b) 铜合金通常比不锈钢、碳钢更耐含盐水点蚀,但保护膜的可靠性会受到溶液中硫化物、氨等其他杂质的影响。
- c) 特殊合金的耐含盐水腐蚀能力会受到其他并发损伤模式的影响,含盐水中的某些成分可加剧有氧腐蚀、垢下腐蚀时,往往也促进含盐水的腐蚀。
- d) 纤维增强塑料管道可免受含盐水腐蚀的影响。

#### 5.27.4 主要影响因素

含盐水腐蚀的主要影响因素如下。

- a) 温度:腐蚀速率随温度升高而增大。

- b) 氧浓度:腐蚀速率随着氧浓度升高而增大。
- c) pH 值:pH 值降低,溶液腐蚀性增强,腐蚀速率一般也会随之增大。pH 值降低会破坏钝化膜的稳定性,导致不锈钢点蚀和缝隙腐蚀速率增大。
- d) 盐浓度:腐蚀速率随溶液中盐浓度的升高而增大。对于不锈钢和敏感合金,在卤化物浓度较高的溶液中,金属的临界点蚀温度和临界缝隙腐蚀温度均会降低。
- e) 盐类型:含盐酸盐的水溶液是最常见含盐水腐蚀环境,溴化物等其他卤化物水溶液也会引起类似腐蚀。盐酸盐、硫酸盐和硝酸盐均会向有氧腐蚀的坑中迁移,水解后形成酸性离子并降低局部 pH 值,加速碳钢的有氧腐蚀。
- f) 流速:介质高速流动会引起冲蚀,溶液中存在颗粒物尤为明显,但介质流速过慢而呈滞流状态时,也容易引起结垢,加剧垢下腐蚀。铜合金、碳钢的耐冲蚀能力比不锈钢要低一些。
- g) 化学成分:N 和 Mo 可显著提高不锈钢的耐点蚀能力,可用耐点蚀当量系数(PRE)来定量估算不锈钢和 Fe-Ni-Cr 高合金的耐氯化物点蚀和缝隙腐蚀能力,推荐按  $PRE = Cr + 3.3 \times (Mo + 0.5 \times W) + 16 \times N$  计算(各元素均按实际质量分数),在海水中使用的金属一般建议 PRE 不低于 40。但由于氯化物在腐蚀过程中的自催化作用,PRE 较高的不锈钢其点蚀速率可比 PRE 较低的碳钢要高得多。
- h) 杂质:
  - 1) 溶液中的氯气浓度超过  $0.5 \times 10^{-6}$  时(如经杀菌处理的海水系统),会增大碳钢、不锈钢在滞流和非滞流海水中的腐蚀速率;
  - 2) 含有硫的化合物会降低铜基合金表面保护膜钝化作用,影响铜基合金的耐蚀性;
  - 3) 硫化氢在含盐水中电离产生酸,加速腐蚀,与钢材反应后会在管道表面形成疏松多孔的硫化物积垢,但该垢层无保护作用。

#### 5.27.5 易发生的装置或设备

含盐水腐蚀易发生的装置或设备如下。

- a) 原油常减压装置脱盐和脱盐废水系统。
- b) 污水处理系统。蓄水池之间的输送管道、盐水分离器的出口管道和间歇运行的管道是高腐蚀率的常见部位。
- c) 用于盐产品脱水的干燥器。
- d) 海水系统(如消防水)。
- e) 软化水设备的再生系统。

#### 5.27.6 主要预防措施

含盐水腐蚀的主要预防措施如下。

- a) 除氧:查明溶解氧的来源并采取有效的除氧措施。脱盐设备的冲洗水应使用除氧水,采用真空法除氧、化学除氧等水处理方式,以及设计改进均可有效增加除氧效果,如焦亚硫酸钠是一种有效的化学除氧剂。对露天或敞开式蓄水池的进、出口处采取密闭措施,防止氧气混入。检查含盐水系统泵出口和脱盐设备出口物料的  $O_2$  含量。
- b) 工艺:热交换器应在合理的工艺条件范围(温度、流速等)内使用,防止含盐水蒸发或积垢。
- c) 杂质:在可能发生微生物腐蚀的含盐水中,控制盐水中的 Cl 含量(对于碳钢设备,应小于  $0.5 \times 10^{-6}$ ;对于双相不锈钢,应在  $0.7 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$  范围内;对于铜-镍合金,应小于  $5 \times 10^{-6}$ ),监测硫酸盐还原菌情况。硫酸盐还原菌的监测位置一般选择河流、水渠或水池的出入口。

- d) 材质:升级为耐腐蚀性更强的合金(如镍铬钼合金)或非金属材料(如玻璃钢或聚氯乙烯)。
- e) 涂层:在碳钢设备内表面设置环氧酚醛和煤焦油环氧等涂层,或采用内衬聚丙烯的钢管,但应同时注意保持涂层的完整性,防止气孔附近产生电偶腐蚀。

#### 5.27.7 检测或监测方法

含盐水腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 超声检测(包括超声自动扫查)可从外部进行厚度测量,管道尺寸合适的部位可使用射线检测;
- b) 超声导波检测可用于长管段的筛查,确定重点区域,但对单个的点蚀可能不敏感;
- c) 设置腐蚀挂片或电阻探针,确定短期、长期腐蚀速率;
- d) 监测溶解氧的含量;
- e) 设置传感器对厚度进行实时在线监测。

#### 5.27.8 相关或伴随的其他损伤

微生物腐蚀、冲蚀、氯化物应力腐蚀开裂、冷却水腐蚀、电偶腐蚀、含氧工艺水腐蚀。

### 5.28 含氧工艺水腐蚀

#### 5.28.1 损伤描述及损伤机理

炼油装置中的工艺水含氧时,介质腐蚀性显著增强,温度较低时往往更明显。

#### 5.28.2 损伤形态

被含氧工艺水润湿的表面,在发生腐蚀后常形成大面积的点蚀坑,低温低流速区可产生局部点蚀坑。流速大于 3 m/s 的区域,腐蚀产物  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  剥落的部位局部腐蚀加剧,常见于弯头背弯处,以及可能发生湍流的部位(如阀门出口处)。

#### 5.28.3 受影响的材料

碳钢及低合金钢。

#### 5.28.4 主要影响因素

含氧工艺水腐蚀的主要影响因素为:

- a) 氧溶解度和含量:极微量氧气(浓度约  $20 \times 10^{-9}$ )即可使腐蚀速率显著增大。气相中的氧气分压升高(如空气混入而使气相氧气浓度升高),则水相中的氧气浓度会相应升高。气相压力升高,可使氧气溶解度上升,从而增强腐蚀性。氧气会促进  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  及其他铁氧化物的形成,积垢因此增多。
- b) 温度:较低温度的工艺介质中往往更容易形成液态水,低温也有利于氧的溶解,增强腐蚀性。随着温度升高,氧在水中的溶解度降低,从而抵消了温度对腐蚀速率的促进作用。
- c) 高流速及湍流:高流速(大于 3 m/s)、湍流均会阻碍氧化铁保护膜的生成,加速新鲜金属表面的腐蚀。

#### 5.28.5 易发生的装置或设备

含氧工艺水腐蚀易发生的装置或设备为:

- a) 原油减压蒸馏装置中,空气中的氧气可通过阀门填料、法兰、密封件不严密部位或其他腐蚀泄

漏部位,进入减压系统并引起含氧工艺水腐蚀,即使是极少量的氧气也会显著增大腐蚀速率,采用蒸汽喷射工艺的减压系统腐蚀速率最高。喷射器冷却器、酸性水系统、管道与热交换器壳程接口等蒸汽冷凝部位,易发生含氧工艺水腐蚀。

- b) 混入原油减压蒸馏系统的氧气,可能继续进入下游火炬气回收等轻烃处理装置,凡是可能积聚水的部位都可能发生含氧工艺水腐蚀,如压缩机入口管道的低处部位和分液罐的排水管道。
- c) 在管道系统的纯水相部位,含氧工艺水腐蚀常见于管道底部。存在两相流时,气相流速往往高于液相流速,腐蚀也更严重。
- d) 在只有冷凝水的潮湿环境中,含氧工艺水腐蚀常见于管道顶部的冷凝水处。在混有氧气的潮湿环境中,滞流或低流速的细接管可能会发生含氧工艺水腐蚀。水气界面不断通风,排水口穿出隔热层外形成散热源时,都容易加剧腐蚀。
- e) 含氧水腐蚀在冷却器中非常常见,管道错边、弯头、插入式接管和焊缝余高等引起湍流的任何区域都可能加剧腐蚀。

#### 5.28.6 主要预防措施

含氧工艺水腐蚀的主要预防措施为:

- a) 控制  $O_2$  含量是非曝气系统预防含氧水腐蚀的关键措施,阻止氧气混入即可明显降低腐蚀速率,否则腐蚀性会显著增强,当氧气浓度低于  $20 \times 10^{-9}$  时,碳钢和低合金钢就能满足使用要求;
- b) 原油常减压装置中注缓蚀剂时,应综合考虑,如无法防止减压系统泄漏而混入空气,则建议不要注入成膜胺类缓蚀剂;
- c) 对于非曝气系统,可用注入除氧剂以降低  $O_2$  浓度,对于已经采取有效防泄漏措施的减压系统,可以注入成膜胺类缓蚀剂;
- d) 容器内壁设置涂层,减缓含氧工艺水腐蚀。

#### 5.28.7 检测或监测方法

含氧工艺水腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 含氧水腐蚀通常为局部腐蚀,可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定,管道的直管段和管件部位都应进行检验;
- b) 重点应检验介质高流速部位、湍流部位以及滞流区域,如弯头、三通、异径管位置,以及喷射器、截止阀、减压阀、孔板流量计、插入式接管、泵出口等下游位置处,水气界面、管道顶部(预计湿气系统中存在凝结时),以及管道底部和细管部位(如果存在分离的水相或形成冷却条件时),也应进行检验;
- c) 固定位置安装的厚度监测系统,可实现在线实测监测。

#### 5.28.8 相关或伴随的其他损伤

冷却水腐蚀、锅炉冷凝水腐蚀、含盐水腐蚀。

### 5.29 浓差电池腐蚀

#### 5.29.1 损伤描述及损伤机理

同一金属部件的不同部位,若接触的腐蚀性介质浓度不一样时,可引发浓差电池腐蚀。

### 5.29.2 损伤形态

浓差电池腐蚀通常会形成表面点蚀或局部腐蚀坑。奥氏体不锈钢在缝隙部位发生氯化物浓差电池腐蚀时,常形成尖而深的狭窄沟槽。常见部位包括积垢下、缝隙内部、管道与支吊架的接触部位、埋地设备靠近地表的部位、管道被潮湿保温层覆盖的部位。

### 5.29.3 受影响的材料

一般情况下碳钢、低合金钢、不锈钢对浓差电池腐蚀比较敏感,而含 Cr 量高的铁素体不锈钢、超级奥氏体不锈钢、超级双相不锈钢、Ni-Cr-Mo 合金、钛及钛合金比较耐浓差电池腐蚀。

### 5.29.4 主要影响因素

浓差电池腐蚀的主要影响因素为:

- a) 介质浓度差:只有在腐蚀性的水溶液中,且存在局部浓度差异时才易形成腐蚀电池,加速金属材料腐蚀。
- b) 介质氧含量:通常被腐蚀部位与其他部位都存在氧浓度差(如土壤/空气界面处),初始的腐蚀反应会先将局部的氧消耗掉,而其他区域的氧浓度相对较高,形成了氧浓差电池,无氧或低氧区成为电池的阳极,容易先遭受腐蚀,氧浓度高的部位则成为电池的阴极,作用方式与电偶腐蚀有些相似。即使在没有空气或氧气的情况下,如果形成硫化物或氯化物浓差电池,也会加速垢下腐蚀,如管道低点和容器底部的垢下腐蚀。
- c) 自催化作用:300 系列不锈钢及其他类似合金发生点蚀时,点蚀坑内与坑外形成金属离子浓度差,会加速坑外氯离子向坑内迁移,导致坑内介质 pH 值下降,加剧坑内金属的腐蚀,金属离子浓度差加大,如此形成自催化作用,造成局部快速腐蚀。垢下或缝隙部分发生腐蚀时,也存在类似的自催化作用。
- d) 化学成分:不锈钢耐氯离子点蚀、垢下腐蚀、缝隙腐蚀的性能,与材料的 Cr、Mo 等元素含量有关,见 5.27.4。

### 5.29.5 易发生的装置或设备

浓差电池腐蚀易发生的装置或设备为:

- a) 介质存在局部氧或其他腐蚀性成分浓度差异的设备;
- b) 任何积垢(如垢皮、垢泥、垢盐等)部位,都可能发生垢下腐蚀;
- c) 设备的螺栓连接部位,如塔设备内的塔盘组件、换热器的折流板孔、法兰和垫片的密封面、阀门和仪表内的精密组件,都容易发生缝隙腐蚀;
- d) 半埋地或与土壤接触的管道可能发生土壤腐蚀,见 5.13;
- e) 涂层破损的设备;
- f) 架空设置的管道,若支撑部位防护不佳,容易发生大气腐蚀,见 5.10、5.11。

### 5.29.6 主要预防措施

浓差电池腐蚀的主要预防措施为:

- a) 材质:升级为耐腐蚀性更强的材料;
- b) 除垢:及时采取有效除垢(或防结垢)措施;
- c) 结构:优化管道设计,支撑部位采用全焊透接头等无缝隙结构,避免管道与支撑件之间的缝隙吸附水汽,产生结垢;

d) 涂层:对可能产生垢下或土壤腐蚀的设备,设置有效的防腐涂层,对破损部位及时修复。

### 5.29.7 检测或监测方法

浓差电池腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 宏观检查+超声波测厚,必要时测量凹坑深度;
- b) 超声波自动扫查、高频导波检测;
- c) 在腐蚀严重的部位设置在线壁厚监测系统;
- d) 通过压降或换热效率监测,判断换热器结垢状况,确定垢下腐蚀程度。

### 5.29.8 相关或伴随的其他损伤

氯化铵腐蚀、大气腐蚀(无隔热层)、大气腐蚀(有隔热层)、含盐水腐蚀、冷却水腐蚀、电偶腐蚀、微生物腐蚀、含氧工艺水腐蚀、土壤腐蚀、酸性水腐蚀。

## 6 环境开裂

### 6.1 氯化物应力腐蚀开裂

#### 6.1.1 损伤描述及损伤机理

处于氯化物水溶液环境中的 300 系列不锈钢或部分镍基合金在拉应力、温度和氯化物水溶液的共同作用下产生起源于表面的开裂。

#### 6.1.2 损伤形态

氯化物应力腐蚀开裂的损伤形态为:

- a) 裂纹起源于表面,无明显的腐蚀减薄;
- b) 裂纹多呈树枝状,有分叉;
- c) 裂纹一般穿晶扩展,但发生敏化的 300 系列不锈钢应力腐蚀断口也可能呈沿晶特征;
- d) 断口通常为脆性断口;
- e) 300 系列不锈钢焊缝组织通常会含有一些铁素体,形成双相组织结构,出现氯化物应力腐蚀开裂的可能性通常会小一些。

#### 6.1.3 受影响的材料

易发生氯化物应力腐蚀开裂的材料为:

- a) 300 系列不锈钢属敏感材料;
- b) 双相不锈钢的耐氯化物开裂能力比 300 系列不锈钢强;
- c) 镍基合金具有极强的耐氯化物应力腐蚀开裂能力。

#### 6.1.4 主要影响因素

氯化物应力腐蚀开裂的主要影响因素为:

- a) 温度:应力腐蚀开裂敏感性随温度的升高而升高,开裂时金属温度通常不低于 38 °C;
- b) 浓度:敏感性随氯化物浓度的升高而升高,但很多情况下氯离子会在局部浓缩,所以即使介质中氯化物含量很低,也可能发生应力腐蚀;
- c) 伴热或蒸发条件:如果存在伴热或蒸发条件将可能导致氯化物局部浓缩聚集,显著增加氯化物

应力腐蚀开裂敏感性,干-湿、水-汽交替的环境具有类似作用;

- d) pH 值:发生应力腐蚀开裂时 pH 值通常大于 2.0, pH 值低于此数值时多易发生均匀腐蚀; pH 值接近碱性区域时,应力腐蚀开裂可能性降低;
- e) 应力:应力(残余应力或外加应力)越大,开裂敏感性越高;高应力或冷加工构件,如膨胀节,开裂敏感性高;
- f) 选材:镍含量在 8%~12%时,开裂敏感性最大,镍含量高于 35%时具有较高的氯化物应力腐蚀抗力,镍含量高于 45%时,基本上不会发生氯化物应力腐蚀开裂;双相不锈钢比 300 系列不锈钢耐氯化物应力腐蚀能力更强,碳钢、低合金钢、400 系列不锈钢则对氯化物应力腐蚀开裂不敏感;
- g) 溶液中的溶解氧会加速氯化物应力腐蚀开裂,目前仍不能确定氧含量是否存在阈值,即当氧含量低于该阈值时就不会发生氯化物应力腐蚀开裂。

#### 6.1.5 易发生的装置或设备

易发生氯化物应力腐蚀开裂的装置或设备为:

- a) 所有由 300 系列不锈钢制成的管道及设备都对氯化物应力腐蚀敏感;
- b) 水冷器,以及常压塔顶冷凝器工艺介质侧;
- c) 加氢反应后物料储运的管道和设备,如果在停车后没有针对性清洗,开车或停车期间易发生开裂;
- d) 保温棉等隔热材料被水或其他液体浸泡后,可能会在材料外表面发生层下氯化物应力腐蚀开裂;
- e) 聚丙烯(聚乙烯)装置:催化剂中含有氯化物,如三氯化钛,在聚丙烯的聚合工艺中,在与水蒸气或水接触的 300 系列不锈钢制设备和管道;
- f) 锅炉排水管。

#### 6.1.6 主要预防措施

氯化物应力腐蚀开裂的主要预防措施为:

- a) 选材:使用耐氯化物应力腐蚀开裂能力较强的材料;
- b) 水质:当用水进行压力试验时,应使用氯含量低的水(至少应使氯离子含量小于  $25 \times 10^{-6}$ ),试验结束后应及时彻底烘干;
- c) 涂层:材料表面敷涂涂层,避免材料直接接触介质流体;
- d) 结构设计:结构设计时尽量避免导致氯化物集中或沉积的可能,尤其应避免介质流动死角或低流速区;
- e) 消除应力:对 300 系列不锈钢制作的部件宜进行固溶处理,对稳定化奥氏体不锈钢可进行稳定化处理以消除残余应力,但应注意热处理可能引起的敏化会增大材料的连多硫酸应力腐蚀开裂敏感性,也可能产生变形问题以及再热裂纹;
- f) 表面要求:降低材料表面粗糙度,防止机械划痕、擦伤和麻点坑等,减少氯化物积聚的可能性。

#### 6.1.7 检测或监测方法

氯化物应力腐蚀开裂的检测或监测方法为:

- a) 检测方法一般为材料表面目视检测和可疑部位渗透检测;
- b) 管道、热交换器管束和设备表面的检测可采用涡流检测法;

c) 极细微裂纹检测主要采用金相分析方法。

### 6.1.8 相关或伴随的其他损伤

碱应力腐蚀开裂、连多硫酸应力腐蚀开裂。

注：溴化物应力腐蚀开裂、碘化物应力腐蚀开裂可参照氯化物应力腐蚀开裂。

## 6.2 碳酸盐应力腐蚀开裂

### 6.2.1 损伤描述及损伤机理

接触碳酸盐溶液环境的碳钢和低合金钢,在拉应力作用下焊接接头附近的表面发生开裂,是碱应力腐蚀开裂的一种特殊情况。

### 6.2.2 损伤形态

碳酸盐应力腐蚀开裂的损伤形态为:

- a) 碳酸盐应力腐蚀开裂常见于焊接接头附近的母材,裂纹沿平行于焊缝的方向扩展,有时开裂也出现在焊缝金属和热影响区;
- b) 裂纹通常起源于焊接接头内形成局部应力集中的缺陷位置,裂纹细小并呈蜘蛛网状;
- c) 裂纹主要呈沿晶扩展,裂纹内一般会充满氧化物;
- d) 碳酸盐应力腐蚀开裂裂纹容易与硫化物应力腐蚀开裂或应力导向氢致开裂混淆,但碳酸盐应力腐蚀裂纹通常离焊趾更远,并形成多条平行的裂纹。

### 6.2.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

### 6.2.4 主要影响因素

碳酸盐应力腐蚀开裂的主要影响因素为:

- a) 应力:碳酸盐应力腐蚀开裂通常发生在未消除应力的焊接接头、冷加工区域,然而残余应力较低的部位也会发生碳酸盐应力腐蚀开裂;
- b) pH值和碳酸盐浓度:随pH值和碳酸盐浓度升高,开裂敏感性均升高,未消除应力的碳钢在pH值大于9.0且碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ )浓度大于 $100 \times 10^{-6}$ 时,或pH值在8.0~9.0,且碳酸根浓度( $\text{CO}_3^{2-}$ )大于 $400 \times 10^{-6}$ 时就可能发生碳酸盐应力腐蚀开裂;
- c) 如果物料含氰化物,开裂敏感性升高;
- d) 气体净化装置中二氧化碳浓度超过2%(质量分数)且温度高于93℃时可能会出现开裂;
- e) 若水溶液中硫化氢浓度大于或等于 $50 \times 10^{-6}$ 且pH值大于或等于7.6时,设备和管道可能发生碳酸盐应力腐蚀开裂。

### 6.2.5 易发生的装置或设备

易发生碳酸盐应力腐蚀开裂的装置或装备为:

- a) 催化裂化装置主分馏塔塔顶冷凝系统和回流系统、下游湿气压缩系统和上述工段排出酸性水的管道、设备;
- b) 制氢装置中碳酸钾、钾碱和二氧化碳脱除系统的设备、管道;
- c) 乙烯裂解装置:压缩系统中碱洗塔釜及塔釜碱液循环管道、塔釜废碱排出管道。

### 6.2.6 主要预防措施

碳酸盐应力腐蚀开裂的主要预防措施为：

- a) 焊接接头(包括补焊接头和内、外部构件焊接接头)进行焊后消应力热处理；
- b) 涂覆有效的阻隔涂层；
- c) 整体采用 300 系列不锈钢或采用 300 系列不锈钢衬里的复合材料,也可以采用镍基合金或其他耐蚀合金代替碳钢；
- d) 热碳酸盐系统在热处理或蒸汽吹扫前,应用水冲洗未焊后热处理的管道和设备；
- e) 制氢装置二氧化碳脱除单元的热碳酸盐系统,可用偏矾酸盐来防止开裂,但应注意缓蚀剂的用量和氧化变质情况。

### 6.2.7 检测或监测方法

碳酸盐应力腐蚀开裂的检测或监测方法为：

- a) 工艺条件的微小变化可引起偶然性的快速开裂,对这种情况下发生的开裂进行监测毫无意义,通常只能定期监测催化裂化装置酸性水中的 pH 值和碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ )浓度来确定开裂敏感性；
- b) 目视检测、磁粉检测、漏磁检测,不宜采用渗透检测；
- c) 超声波横波检测除可以检测是否存在裂纹,还可对裂纹自身高度进行测量；
- d) 声发射检测可用于监测裂纹活性,判断裂纹是否处于扩展状态。

### 6.2.8 相关或伴随的其他损伤

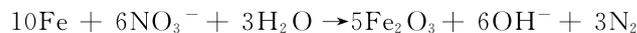
碱应力腐蚀开裂、胺应力腐蚀开裂。

## 6.3 硝酸盐应力腐蚀开裂

### 6.3.1 损伤描述及损伤机理

含有硝酸盐、硫化物及氮氧化物( $\text{NO}_x$ )的物料系统中,碳钢和低合金钢焊接接头区域,在拉应力作用下发生的开裂。

硝酸盐应力腐蚀开裂以阳极溶解为主,已有研究成果表明可能的腐蚀反应为：



该反应为电偶腐蚀过程,腐蚀环境促使阳极区材料迅速溶解,应力会破坏腐蚀产生的保护膜,加速损伤。

### 6.3.2 损伤形态

硝酸盐应力腐蚀开裂的损伤形态为：

- a) 硝酸盐应力腐蚀开裂多出现在焊接接头的焊缝金属和热影响区；
- b) 热影响区的裂纹多为纵向,焊缝金属的裂纹多为横向；
- c) 裂纹多呈沿晶扩展,裂纹内充满氧化物。

### 6.3.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

#### 6.3.4 主要影响因素

硝酸盐应力腐蚀开裂的主要影响因素为：

- a) 硝酸盐浓度：随溶液中硝酸盐浓度升高，应力腐蚀敏感性升高；
- b) 温度：金属壁温超过烟气露点温度时，就不会形成液体或液滴，也不会产生硝酸盐应力腐蚀开裂；
- c) 应力：随应力升高，应力腐蚀敏感性升高，通常影响催化裂化再生器开裂的应力主要来自焊接残余应力；
- d) 缓蚀剂：缓蚀剂可明显降低硝酸盐应力腐蚀开裂敏感性，延缓开裂；
- e) 合金元素：添加 Mo 元素可提高低合金钢抗硝酸盐应力腐蚀开裂的能力。

#### 6.3.5 易发生的装置或设备

易发生硝酸盐应力腐蚀开裂的装置或设备为：

- a) 催化裂化装置再生系统，特别是再生器壁温低于烟气露点温度的部位；
- b) 燃料氮含量高的烟气环境中使用的设备，如硫磺装置焚烧炉配烧氨时外壳易发生开裂。

#### 6.3.6 主要预防措施

硝酸盐应力腐蚀开裂的主要预防措施为：

- a) 选材：整体采用 300 系列不锈钢，或采用 300 系列不锈钢的复合钢板、镍基合金和其他耐蚀合金代替碳钢，或者选用含 Mo 量比较高的低合金钢；
- b) 控制金属壁温：将设备金属壁温保持在烟气露点温度以上；
- c) 热处理：焊接接头（包括补焊接头以及内、外部构件焊接接头）部位进行焊后热处理；
- d) 涂层或缓蚀剂：设置有效涂层，或添加适量缓蚀剂。

#### 6.3.7 检测或监测方法

磁粉检测、渗透检测、超声波横波检测、金相检测、硬度测定等。

#### 6.3.8 相关或伴随的其他损伤

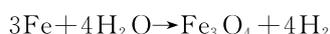
无。

### 6.4 碱应力腐蚀开裂

#### 6.4.1 损伤描述及损伤机理

与碱溶液接触的设备和管道表面发生的应力腐蚀开裂，多出现在未进行消除应力热处理的焊缝附近，它可在几小时或几天内穿透整个设备或管道的壁厚。

碳钢在高温下与水蒸气产生如下的化学反应：



在这个反应中，如存在氢氧化钠，可起催化作用，反应生成的四氧化三铁（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）覆盖在钢材表面，形成一层保护膜。局部拉应力过高时会破坏保护膜，在金属表面形成最初的腐蚀裂纹。氢氧化钠可在裂纹中富集，形成电偶腐蚀。裂纹尖端区域为阳极，裂纹周围的保护层为阴极，形成小阳极大阴极的结构，加上拉应力的作用，使裂纹迅速扩展，最终发生断裂。

#### 6.4.2 损伤形态

碱应力腐蚀开裂的损伤形态为：

- a) 碱应力腐蚀开裂通常出现在靠近焊缝的母材上,沿着与焊缝平行的方向扩展,也可能出现在焊缝和热影响区；
- b) 碱应力腐蚀开裂裂纹细小,多呈蜘蛛网状,起源于有局部应力集中的焊接缺陷处；
- c) 碳钢和低合金钢的开裂主要呈沿晶扩展,裂纹内常充满氧化物；
- d) 300 系列不锈钢的开裂主要呈穿晶型扩展,和氯化物应力腐蚀开裂裂纹形貌相似,难以区分。

#### 6.4.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢较为敏感,镍基合金耐碱应力腐蚀开裂能力较强。

#### 6.4.4 主要影响因素

碱应力腐蚀开裂的主要影响因素为：

- a) 浓度:碱浓度超过 5%(质量分数)时开裂就可能发生,随碱浓度升高,开裂敏感性升高,存在介质浓缩条件时(如:干湿交替、局部加热或高温蒸汽吹扫等),碱浓度达到  $50 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$  时就足以引发开裂；
- b) 温度:随温度继续升高,开裂敏感性增高；
- c) 残余应力:焊接或冷加工(如弯曲和成型)残余应力均可成为开裂的应力条件,通常应力要达到屈服应力时开裂才会发生；
- d) 伴热:工厂经验表明有伴热的管道,或未经焊后热处理的碳钢管道和设备蒸汽吹扫时开裂可能性较高。

#### 6.4.5 易发生的装置或设备

易发生碱应力腐蚀开裂装置或设备为：

- a) 苛性碱处理的设备和管道,包括脱硫化氢和脱硫醇装置,以及硫酸烷基化和氢氟酸烷基化装置中使用的碱中和设备,常减压装置的常压塔进料有时注入苛性碱来控制氯化物含量；
- b) 伴热设置不合理的设备和管道,以及加热盘管和其他传热设备可能发生开裂；
- c) 在苛性碱环境中使用,然后进行蒸汽吹扫的设备；
- d) 锅炉中锅炉给水过热,使锅炉管局部出现干湿交替,产生碱液浓缩的部位；
- e) 乙烯裂解装置中裂解与急冷系统:急冷水塔釜的急冷水回流流程,包括急冷水塔釜及相连管道;工艺水汽提塔塔釜工艺水部分回流、部分去稀释蒸汽发生系统的流程,包括工艺水汽提塔釜、蒸汽发生器底部、凝液分离罐底部、热交换器管程及流程中的管道。

#### 6.4.6 主要预防措施

碱应力腐蚀开裂的主要预防措施为：

- a) 合理选材；
- b) 消应力热处理；
- c) 未消应力热处理的碳钢管道和设备,不能直接进行蒸汽吹扫,应在蒸汽吹扫前水洗,如无法水洗就只能用低压蒸汽进行短时间吹扫；
- d) 常减压装置的高温原油预热流程的注碱系统,可通过优化设计,以及合理进行注入操作使碱与原油在到达预热段前充分混合；

- e) 尽可能不设伴热线,如设伴热线也不能间歇使用。

#### 6.4.7 检测或监测方法

碱应力腐蚀开裂的检测或监测方法为:

- 目视检测、磁粉检测、射线成像检测、涡流检测或漏磁检测等技术均可用以检测裂纹,检测前应对检测表面先进行清理;
- 裂纹中多充满积垢,不宜采用渗透检测;
- 可用超声波端点衍射技术等测量裂纹自身高度;
- 可用声发射检测技术监测裂纹是否会扩展。

#### 6.4.8 相关或伴随的其他损伤

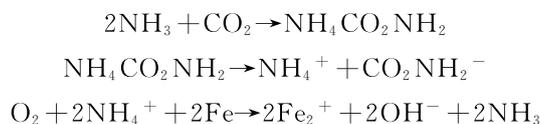
胺应力腐蚀开裂、碳酸盐应力腐蚀开裂。

### 6.5 氨应力腐蚀开裂

#### 6.5.1 损伤描述及损伤机理

碳钢和低合金钢在无水液氨中,或铜合金在氨水溶液和/或铵盐水溶液环境中发生的应力腐蚀开裂。

以碳钢为例,无水液氨对碳钢只产生很轻微的均匀腐蚀,但液氨储罐在充装、排料及检修过程中,容易受到空气的污染,空气中的氧和二氧化碳加速氨对碳钢的腐蚀,其反应如下:



反应中的氨基甲酸铵对碳钢有强烈的腐蚀作用,且焊缝处残余应力较高,可使钢材表面的钝化膜产生破裂,造成应力腐蚀开裂。

#### 6.5.2 损伤形态

氨应力腐蚀开裂的损伤形态为:

- 铜合金:多为表面开裂,裂纹穿晶或沿晶扩展,裂纹中存在浅蓝色腐蚀产物,热交换器管束表面有单一裂纹或有大量分支的裂纹;
- 碳钢:在液氨中使用的碳钢,如未进行热处理,焊缝金属和热影响区都可能发生开裂。

#### 6.5.3 受影响的材料

铜合金、碳钢。

#### 6.5.4 主要影响因素

氨应力腐蚀开裂的主要影响因素为:

对于铜合金:

- 残余应力:残余应力越大开裂敏感性越高;
- 合金成分:铜合金中锌含量影响开裂敏感性,当锌含量超过15%(质量分数)时尤其明显;
- 介质:只有在氨或铵盐的含水溶液中才会发生开裂;
- 溶解氧:应至少有微量的溶解氧;

e) pH 值应大于 8.5。

对于碳钢或低合金钢：

- a) 残余应力：残余应力越大开裂敏感性越高；
- b) 含水量：一般来说，含水量低于 0.005%（质量分数）或大于 0.2%（质量分数）时敏感性均较低；
- c) 温度：低于 -5℃ 时几乎不会发生；
- d) 杂质：介质中含有少量空气或氧即可增加开裂敏感性。

#### 6.5.5 易发生的装置或设备

易发生氨应力腐蚀开裂的装置或设备为：

- a) 热交换器的铜锌合金管束；
- b) 氨冷冻装置、一些润滑油炼制工艺中用于氨储运的碳钢或低合金钢制管道、储罐和其他设备。

#### 6.5.6 预防措施

氨应力腐蚀开裂的预防措施为：

- a) 铜合金：控制锌含量在 15%（质量分数）以下，选用耐氨应力腐蚀开裂能力强的铜合金、300 系列不锈钢和镍基合金；
- b) 在液氨蒸气环境中使用时，防止空气或氧气混入有时可防氨应力腐蚀开裂；
- c) 碳钢：进行焊后热处理，在氨中加入少量的水（质量分数大于 0.2%），控制焊接接头硬度不超过 HB 225（布氏硬度），防止空气或氧气混入液氨。

#### 6.5.7 检测或监测方法

氨应力腐蚀开裂的检测或监测方法为：

- a) 铜合金：可采用目视检测或涡流检测检测热交换器管束是否开裂，轧制部位应重点检测，监测 pH 值和氨含量；
- b) 碳钢或低合金钢设备和管道：内壁焊缝采用湿荧光磁粉检测、外壁采用超声波横波检测、外壁采用声发射检测。

#### 6.5.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 6.6 胺应力腐蚀开裂

#### 6.6.1 损伤描述及损伤机理

钢铁在拉伸应力和碱性有机胺溶液联合作用下发生的开裂，是碱应力腐蚀开裂的一种特殊形式。

#### 6.6.2 损伤形态

胺应力腐蚀开裂的损伤形态为：

- a) 裂纹起源于与胺液接触处的表面，多发生在设备和管道的焊接接头热影响区，焊缝和热影响区附近高应力区也可能发生；
- b) 热影响区发生的开裂通常平行于焊缝，在焊缝上发生的开裂既可能平行于焊缝，也可能垂直于焊缝；
- c) 表面裂纹的形貌和湿硫化氢破坏引发的开裂相似；

d) 胺应力腐蚀裂纹一般为沿晶型,有若干分支,在一些分支中充满氧化物。

### 6.6.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

### 6.6.4 主要影响因素

胺应力腐蚀开裂的主要影响因素为:

- a) 胺类型和浓度:胺应力腐蚀开裂在含有贫单乙醇胺和二乙醇胺的溶液中较为常见,在其他胺溶液中也可能会出现开裂。纯链烷醇胺溶液不会导致开裂,胺浓度低于5%(质量分数),尤其是低于2%(质量分数)时,不容易发生开裂;但如果存在局部浓缩或蒸汽吹扫时,该浓度阈值可能需进一步降低,有些情况下浓度阈值甚至控制为0.2%(质量分数)。
- b) 拉应力水平:应力水平越高,开裂的可能性越高。
- c) 温度:室温下可能发生开裂,温度升高,开裂可能性变高。

### 6.6.5 易发生的装置或设备

易发生胺应力腐蚀开裂的装置或设备为:

- a) 开裂主要发生在吸收和脱除酸性气(硫化氢和二氧化碳)装置或系统中;
- b) 在贫胺环境中所有未经焊后热处理的碳钢管道和设备,包括吸收塔、汽提塔、再生塔、热交换器,以及其他任何可能接触胺液的设备都存在一定的开裂可能性。

### 6.6.6 主要预防措施

胺应力腐蚀开裂的主要预防措施为:

- a) 对碳钢制设备或管道的所有焊接接头(包括焊接修补、内部和外部附件焊接接头)进行焊后热处理;
- b) 整体采用300系列不锈钢材料,或300系列不锈钢的复合钢板、蒙乃尔合金400或其他耐蚀合金代替碳钢;
- c) 在焊接、热处理或吹扫前,用水冲洗没有进行焊后热处理的碳钢设备和管道。

### 6.6.7 检测或监测方法

胺应力腐蚀开裂的检测或监测方法为:

- a) 磁粉检测和漏磁检测效果最佳,如果裂纹分叉极少,外部超声波横波检测可用来测量裂纹深度,声发射检测可用于监测裂纹扩展,并定位活性裂纹;
- b) 不宜采用渗透检测。

### 6.6.8 相关或伴随的其他损伤

碱应力腐蚀开裂、碳酸盐应力腐蚀开裂。

## 6.7 湿硫化氢破坏

### 6.7.1 损伤描述及损伤机理

在含水和硫化氢环境中碳钢和低合金钢所发生的损伤,包括氢鼓泡、氢致开裂、应力导向氢致开裂和硫化物应力腐蚀开裂4种形式:

- a) 氢鼓泡:金属表面硫化物腐蚀产生的氢原子扩散进入钢中,在钢中的不连续处(如夹杂物、裂隙等)聚集并结合生成氢分子,当氢分压超过临界值时会引发材料的局部变形,形成鼓泡;
- b) 氢致开裂:氢鼓泡在材料内部不同深度形成时,鼓泡长大导致相邻的鼓泡不断连接,形成台阶状裂纹;
- c) 应力导向氢致开裂:在焊接残余应力或其他应力作用下,氢致开裂裂纹沿厚度方向不断相连并形成穿透至表面的开裂;
- d) 硫化物应力腐蚀开裂:在拉应力及硫化物腐蚀介质的联合作用下,金属材料吸附氢原子造成的一种脆性开裂。

#### 6.7.2 损伤形态

湿硫化氢破坏的损伤形态为:

- a) 氢鼓泡:在钢材表面形成独立的小泡,小泡与小泡之间一般不会发生合并;
- b) 氢致开裂:在钢材内部形成与表面平行的台阶状裂纹,裂纹一般沿轧制方向扩展,不会扩展至钢的表面;
- c) 应力导向氢致开裂:一般发生在焊接接头的热影响区,由该部位母材上不同深度的氢致开裂裂纹沿厚度方向相连形成;
- d) 硫化物应力腐蚀开裂:在焊缝热影响区和高硬度区表面起裂,并沿厚度方向扩展。

#### 6.7.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

#### 6.7.4 主要影响因素

湿硫化氢破坏的主要影响因素为:

- a) pH 值:溶液的 pH 值小于 4.0,且溶解有硫化氢时易发生湿硫化氢破坏。此外溶液的 pH 值大于 7.6,且氰化氢浓度大于  $20 \times 10^{-6}$  并溶解有硫化氢时湿硫化氢破坏易发生。
- b) 硫化氢分压:溶液中溶解的硫化氢浓度大于  $50 \times 10^{-6}$  时湿硫化氢破坏容易发生,或潮湿气体中硫化氢气相分压大于 0.000 3 MPa 时,湿硫化氢破坏容易发生,且分压越大,敏感性越高。
- c) 温度:氢鼓泡、氢致开裂、应力导向氢致开裂损伤发生的温度范围为室温到 150 °C,有时可以更高,硫化物应力腐蚀开裂通常发生在 82 °C 以下。
- d) 硬度:硫化物应力腐蚀开裂与硬度相关,炼油厂常用的低强度碳钢应控制焊接接头硬度在 HB200(布氏硬度)以下。氢鼓泡、氢致开裂和应力导向氢致开裂损伤与钢铁硬度无关。
- e) 钢材纯净度:提高钢材纯净度能够提升钢材抗氢鼓泡、氢致开裂和应力导向氢致开裂的能力。
- f) 焊后热处理:焊后热处理可以有效地降低焊缝发生硫化物应力腐蚀开裂的可能性,对防止应力导向氢致开裂起到一定的减缓作用,但对氢鼓泡和氢致开裂不产生影响。
- g) 杂质:加氢装置的溶液中,如果硫氢化铵浓度超过 2%(质量分数),会增加氢鼓泡、氢致开裂和应力导向氢致开裂的敏感性。

#### 6.7.5 易发生的装置或设备

易发生湿硫化氢破坏的装置或设备为:

- a) 装置:常减压装置、加氢装置、流化床催化裂化装置、延迟焦化装置,制硫装置的轻油分馏系统和酸性水系统,乙烯裂解装置的压缩系统以及裂解与急冷系统的急冷部分等;

- b) 设备:湿硫化氢环境中使用且未采用抗氢致开裂钢制造的塔器、热交换器、分离器、分液罐、球罐、管道等。

#### 6.7.6 主要预防措施

湿硫化氢破坏的主要预防措施为:

- a) 选用合适的钢材或合金,或设置有机防护层;
- b) 用冲洗水来稀释氢氰酸浓度;
- c) 采用高纯净度的抗氢致开裂钢;
- d) 控制焊缝和热影响区的硬度不超过 HB200(布氏硬度);
- e) 焊接接头部位进行焊后消除应力热处理;
- f) 使用专用缓蚀剂。

#### 6.7.7 检测或监测方法

湿硫化氢破坏的检测或监测方法为:

- a) 应对工艺状况进行评估,确定最容易发生湿硫化氢损伤的设备和管道;应定期或必要时对自由态水进行现场取样,监测工艺状况,尤其是水洗处理期间或多硫化物注入阶段;
- b) 一般应优先并重点检查焊缝和接管;
- c) 目视检测可以发现裂纹,但用湿荧光磁粉、涡流检测、射线成像检测或交流漏磁等方法更有效,交流漏磁检测则不需要进行表面处理准备,渗透检测无法发现致密裂纹,不能作为主要检测方法;
- d) 外部超声波横波检测等超声检测方法也较常用,可有效测量体积型缺陷和裂纹尺寸,利用电阻特性变化来测定裂纹深度效果不佳;
- e) 打磨消除裂纹,或用碳弧气刨去除裂纹,都可确定裂纹深度;
- f) 声发射检测可用于监测裂纹活性。

#### 6.7.8 相关或伴随的其他损伤

氢脆、胺应力腐蚀开裂、碳酸盐应力腐蚀开裂。

### 6.8 氢氟酸致氢应力开裂

#### 6.8.1 损伤描述及损伤机理

碳钢和高强度低合金钢表面与氢氟酸水溶液接触发生腐蚀反应,产生的氢原子扩散进钢中,并在高应力区(焊缝和热影响区)集中造成的表面开裂。

#### 6.8.2 损伤形态

氢氟酸致氢应力开裂的损伤形态为:

- a) 裂纹多为沿晶型,且一般只能通过金相观察进行验证;
- b) 多在焊接接头附近产生不连续的裂纹。

#### 6.8.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

#### 6.8.4 主要影响因素

氢氟酸致氢应力开裂的主要影响因素为：

- a) 硬度：随着硬度增高，开裂敏感性增高，硬度高于 HB237(布氏硬度)的材料开裂敏感性高；
- b) 应力：随着部件承载应力值或残余拉应力值(冷加工或焊接)的增大，开裂敏感性增高。

#### 6.8.5 易发生的装置或设备

易发生氢氟酸致氢应力开裂的装置或设备为：

- a) 所有在氢氟酸溶液中使用，且硬度等级超出限定值的管道和设备；
- b) 高强度低合金钢制螺栓和压缩机部件，或螺栓施加过量扭矩时，可能发生氢氟酸致氢应力开裂。

#### 6.8.6 主要预防措施

氢氟酸致氢应力开裂的主要预防措施为：

- a) 进行焊后热处理，降低硬度和残余应力；
- b) 炼油行业所用的典型低强度碳钢，焊接接头的硬度应控制在 HB200(布氏硬度)以下；
- c) 使用碳当量小于 0.43 的碳钢；
- d) 合金衬里和非合金涂层可有效阻止氢向钢材内部渗透，防止开裂发生。

#### 6.8.7 检测或监测方法

湿荧光磁粉检测、金相检测、硬度测定。

#### 6.8.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 6.9 氢氟酸致氢应力开裂

#### 6.9.1 损伤描述及损伤机理

碳钢和高强度低合金钢与氢氟酸水溶液接触发生腐蚀反应，生成的氢原子被金属材料吸附并向内部扩散，在金属中高应力区(如焊接接头焊缝和热影响区的高硬度部位)聚集，造成开裂。

#### 6.9.2 损伤形态

同氢氟酸致氢应力开裂。

#### 6.9.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

#### 6.9.4 主要影响因素

氢氟酸致氢应力开裂的主要影响因素为：

- a) 硬度：随着硬度增高，开裂敏感性增高；
- b) 浓度：随着氢氟酸浓度升高，开裂敏感性也升高；
- c) 应力：随着结构承载应力值或残余拉应力值增大，开裂敏感性增高。

### 6.9.5 易发生的装置或设备

易发生氢氰酸致氢应力开裂的装置或设备为：

- a) 所有在氢氰酸中使用的高强度低合金钢制管道和设备；
- b) 高强度低合金钢制螺栓和压缩机部件,可能发生氢氰酸致氢应力开裂；
- c) 螺栓施加过量扭矩时会发生氢氰酸致氢应力开裂。

### 6.9.6 主要预防措施

氢氰酸致氢应力开裂的主要预防措施为：

- a) 进行焊后热处理,降低硬度和残余应力；
- b) 炼油行业所用典型低强度碳钢的硬度应控制在 HB200(布氏硬度)以下；
- c) 使用碳当量小于 0.43 的碳钢；
- d) 合金衬里和非合金涂层可有效阻止氢向钢材表面渗透,防止开裂发生。

### 6.9.7 检测或监测方法

湿荧光磁粉检测、硬度测定、金相检测。

### 6.9.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 6.10 氢脆

#### 6.10.1 损伤描述及损伤机理

制造、焊接或服役等过程中氢原子扩散进入高强度钢中,使其韧性下降,在残余应力及外部载荷的作用下发生的脆性断裂,是氢引起的滞后开裂。

#### 6.10.2 损伤形态

氢脆的损伤形态为：

- a) 氢脆引起的开裂以表面开裂为主,也可能发生在表面下；
- b) 氢脆发生在高残余应力或三向应力部位(缺口、拘束区)；
- c) 微观而言,与不含氢试样相比,氢致滞后开裂断口的韧性断裂区减小;宏观而言,有些材料可能会产生脆断面,但多数情况下并不明显；
- d) 强度较高的钢中氢脆裂纹一般沿晶扩展。

#### 6.10.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢和部分高强度镍基合金。

#### 6.10.4 主要影响因素

氢脆的主要影响因素为：

- a) 同时满足以下 3 个条件时氢脆易发生:钢或合金中的氢达到临界浓度,钢及合金的强度水平和组织对脆断敏感,残余应力和外加载荷共同作用造成的应力高于氢脆开裂的临界应力；
- b) 氢的来源:焊接、酸溶液清洗和酸洗、高温临氢环境渗入后又未能及时逸出的氢、湿硫化氢或氢

氟酸环境、电镀、阴极保护；

- c) 金属温度高于 82 °C 时,氢脆通常不会发生；
- d) 氢脆在静态载荷下对断裂韧性的影响较大,材料中渗入足量的氢且承受临界应力时,失效会迅速发生；
- e) 渗氢量取决于环境、表面化学反应和金属中存在的氢陷阱(如微观不连续、夹杂物、原始缺陷或裂纹)；
- f) 厚壁部件更容易发生氢脆；
- g) 随着材料强度升高,氢脆敏感性增大；
- h) 与同等强度的回火马氏体相比,未回火马氏体和珠光体材质更容易发生氢脆。

#### 6.10.5 易发生的装置或设备

易发生氢脆的装置或设备为：

- a) 催化裂化装置、加氢装置、胺处理装置、酸性水装置和氢氟酸烷基化装置中在湿硫化氢环境下服役的碳钢管道和容器；
- b) 采用高强度钢制造的球罐；
- c) 高强度钢制螺栓和弹簧十分容易发生氢脆,甚至在电镀过程中渗入的氢也会导致氢脆；
- d) 加氢装置和催化重整装置的铬钼制反应器、缓冲罐和热交换器壳体,尤其是焊接热影响区的硬度超过 HB235(布氏硬度)的部位。

#### 6.10.6 主要预防措施

氢脆的主要预防措施为：

- a) 选用低强度钢,或采用焊后热处理降低残余应力和硬度；
- b) 在焊接过程中,选用低氢焊材,并使用干电极和预热工艺,如果氢可能渗入金属,可在焊接前采用预热至 204 °C 或更高温度的方法把氢释放出来；
- c) 对在高温临氢环境下工作的设备和管道,停工时应先降压后降温,开工时应先升温后升压；
- d) 对设备和管道内部施加涂层、堆焊不锈钢或设置其他保护衬里。

#### 6.10.7 检测或监测方法

氢脆的检测或监测方法为：

- a) 磁粉检测或渗透检测可用于检查有无表面开裂；
- b) 超声波横波检测可用检查材料内部有无氢脆裂纹,也可用于从设备外壁检测内壁有无裂纹；
- c) 射线成像检测对氢脆裂纹有效性较差。

#### 6.10.8 相关或伴随的其他损伤

湿硫化氢破坏、氢氟酸致氢应力开裂。

#### 6.11 高温水应力腐蚀开裂

##### 6.11.1 损伤描述及损伤机理

高温水(大于 300 °C)环境中,尤其是偏酸性或碱性时,水的电离能力增强,在拉应力作用下金属构件高拘束区域发生的表面开裂,开裂过程与碱应力腐蚀开裂相似。

### 6.11.2 损伤形态

高温水应力腐蚀开裂的损伤形态为：

- a) 开裂易发生于酸性或碱性高温水溶液中焊接接头区域，尤其是硬度值高的部位；
- b) 厚壁容器易产生较大的焊接残余应力，可能发生高温水应力腐蚀开裂；
- c) 裂纹一般为穿晶型。

### 6.11.3 受影响的材料

300 系列不锈钢、镍基合金。

### 6.11.4 主要影响因素

高温水应力腐蚀开裂的主要影响因素为：

- a) 应力水平：多在高残余应力部位发生，如未进行焊后消应力热处理的焊接接头或冷加工的变形区域；
- b) pH 值：300 系列不锈钢在酸性和碱性溶液中的开裂敏感性较大，且酸性或碱性越强，开裂敏感性越大；
- c) 材料强度：材料强度等级越高，发生腐蚀开裂的敏感性越大；
- d) 材料组织：马氏体组织含量越多，发生腐蚀开裂的敏感性越大；
- e) 溶解氧：存在溶解氧时会增大开裂敏感性；
- f) 温度：随温度升高，开裂敏感性升高。

### 6.11.5 易发生的装置或设备

易发生高温水应力腐蚀开裂的装置或设备为：

- a) 核电站一回路的设备和管道；
- b) 电站锅炉中面临高温水环境的低合金高强钢制设备或管道。

### 6.11.6 主要预防措施

高温水应力腐蚀开裂的主要预防措施为：

- a) 对焊接接头（包括修补焊接接头和内、外部构件焊接接头）进行焊后消除应力热处理；
- b) 对偏酸性或碱性的水进行中和，控制溶液 pH 值接近 7.0，可降低开裂敏感性；
- c) 选用强度等级较低的金属材料；
- d) 通过热处理等方法降低材料中马氏体组织含量。

### 6.11.7 检测或监测方法

高温水应力腐蚀开裂的检测或监测方法为：

- a) 监测水的 pH 值；
- b) 目视检测、磁粉检测、渗透检测、漏磁检测等；
- c) 超声波横波检测除可以检测是否存在裂纹，还可对裂纹自身高度进行测定；
- d) 声发射检测可以用于监测裂纹活性，确定裂纹是否会扩展。

### 6.11.8 相关或伴随的其他损伤

碱应力腐蚀开裂、碳酸盐应力腐蚀开裂。

## 6.12 连多硫酸应力腐蚀开裂

### 6.12.1 损伤描述及损伤机理

停工期间设备表面的硫化物腐蚀产物与空气和水反应生成连多硫酸( $H_2S_xO_6$ ,  $x=3\sim 6$ ),造成敏化的 300 系列不锈钢产生开裂(易发生在高应力区域或焊接接头热影响区),裂纹一般为沿晶扩展。这种开裂与 300 系列不锈钢在经历高温阶段时碳化铬在晶界析出,晶界附近的铬浓度减少,形成局部贫铬区有关。

### 6.12.2 损伤形态

易发生在 300 系列不锈钢的敏化区域,多为沿晶型开裂,开裂可能在短短几分钟或几小时内沿厚度方向迅速扩展,并穿透管道和部件。

### 6.12.3 受影响的材料

300 系列不锈钢、因科耐尔合金 600 或 600H、因科镍合金 800 或 800H。

### 6.12.4 主要影响因素

高温水应力腐蚀开裂的主要影响因素为:

- a) 当环境、材料和应力的共同作用满足条件时,就可能发生开裂:
  - 1) 环境:金属部件在硫化物环境中表面形成硫化物,硫化物与空气和水反应生成连多硫酸;
  - 2) 材料:材料处于敏化状态或为敏感性材料;
  - 3) 应力:存在残余应力或载荷引起的外加应力,大多数部件的残余应力通常就足以促成开裂。
- b) 敏化:受影响的金属在制造、焊接或高温使用环境中会产生敏化,在金属晶界上形成碳化铬,敏化程度取决于材料成分、受热历史等因素。一般敏化会在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 815\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围内发生。
- c) 碳含量:304 或 304H、316 或 316H 等常规碳含量的不锈钢,焊接接头热影响区对敏化尤其敏感。“L”级低碳牌号(碳含量小于 0.03%)的不锈钢则不太敏感,通常进行焊接也不会受到敏化影响。只要长期工作温度不超过  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,L 级牌号的 300 系列不锈钢就不会敏化。

### 6.12.5 易发生的装置或设备

易发生高温水应力腐蚀开裂的装置或设备为:

- a) 含硫环境中使用敏化合金的所有装置,损伤多见于热交换器管束、加热炉炉管和管道;
- b) 燃料为燃油、燃气、焦炭和大多数其他燃料的加热炉和高温设备,因燃料中硫含量可能受到不同程度的影响;
- c) 流化床催化裂化装置的冷却环、风室、滑阀、旋分器部件、波纹管膨胀节和管道;
- d) 加氢装置的加热炉炉管、进料/出料热交换器管束、波纹管膨胀节;
- e) 常减压装置和焦化装置的管道。

### 6.12.6 主要预防措施

高温水应力腐蚀开裂的主要预防措施为:

- a) 停工过程中或停工后立即用碱液或苏打粉溶液冲洗设备,以中和连多硫酸,或在停工期间用干燥的氮气,或者氮气和氨混合气进行保护,以防止接触空气;

- b) 加热炉保持燃烧室温度始终在露点温度以上,防止在加热炉管表面形成连多硫酸;
- c) 选用不易敏化的材质,如稳定化奥氏体不锈钢、低碳奥氏体不锈钢、双相不锈钢或镍基合金。

#### 6.12.7 检测或监测方法

渗透检测、金相检测。

#### 6.12.8 相关或伴随的其他损伤

敏化。

### 6.13 液体金属脆断

#### 6.13.1 损伤描述及损伤机理

某些熔融金属和特定固体合金材料接触时,液体金属吸附在固体金属材料表面后能促进固体材料位错的发生、增殖和运动,当位错发生和运动达到临界状态时,脆性微裂纹就在原裂纹顶端或在无位错区中形核并解理扩展。

#### 6.13.2 损伤形态

形成沿晶裂纹,裂纹内充满低熔点金属。

#### 6.13.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、镍基合金、铜合金、铝合金和钛合金。

#### 6.13.4 主要影响因素

液体金属脆断的主要影响因素为:

- a) 液体金属脆断发生在特定的金属与低熔点金属(如锌、汞、镉、铅、铜和锡)的组合中,如 300 系列不锈钢与锌、铜合金与汞、蒙乃尔合金 400 与汞、铝合金与汞、高强度钢与镉、高强度钢与铅;
- b) 敏感合金与熔化金属接触即可发生开裂,极少的低熔点金属就足以引起液体金属脆断;
- c) 拉伸应力控制裂纹生长速度,高拉伸应力可促进开裂,甚至造成敏感金属在和熔化金属接触后数秒内裂纹穿透壁厚;
- d) 受污染的金属表面长时接触液体金属可发生开裂;
- e) 低温下敏感金属和非液态低熔点金属接触一般不发生开裂,只有温度升高到低熔点合金的熔点后才会发生开裂。

#### 6.13.5 易发生的装置或设备

易发生液体金属脆断的装置或设备为:

- a) 任何有液体金属脆断配对存在的场合,典型情况有 300 系列不锈钢与液态锌、铜合金与液态汞、镍基合金与液态汞、铝合金与液态汞、高强度钢与液态镉或铅;
- b) 常压塔顶冷凝系统的黄铜、镍基合金、钛或铝制热交换器部件;
- c) 装置中使用液体汞的工艺仪表;
- d) 天然气工厂低温气体装置的铝制部件。

#### 6.13.6 主要预防措施

液体金属脆断的主要预防措施为:

- a) 采取隔离措施防止金属与低熔点金属接触；
- b) 选用非敏感匹配的材料组合；
- c) 降低服役温度至低熔点金属的熔点以下。

#### 6.13.7 检测或监测方法

目视检测、磁粉检测、渗透检测。

#### 6.13.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 6.14 乙醇应力腐蚀开裂

#### 6.14.1 损伤描述及损伤机理

与乙醇汽油或乙醇燃料接触的碳钢,如果同时受到拉应力的作用,其表面可能发生开裂。

#### 6.14.2 损伤形态

乙醇应力腐蚀开裂的损伤形态为:

- a) 乙醇应力腐蚀开裂多出现在焊接接头附近,裂纹与焊缝平行或垂直;
- b) 裂纹通常比较致密,裂隙中可能存在腐蚀产物;
- c) 裂纹多有分枝且以晶间开裂为主,但也有穿晶或混晶开裂。随着乙醇中氯化物含量的增加,开裂会从晶间开裂为主转变为穿晶与沿晶混合型开裂。

#### 6.14.3 受影响的材料

碳钢。

#### 6.14.4 主要影响因素

乙醇应力腐蚀开裂的主要影响因素为:

- a) 应力:外加载荷引起的高应力、局部冷作加工的残余应力,或构件的应力集中部位,均容易引发开裂。储罐充装或卸料引起的应力变化,会导致罐底或浮顶开裂;若乙醇中同时存在溶解氧时,会增加开裂敏感性。
- b) 介质:用于燃料的乙醇,如按照 GB/T 22030 生产的变性乙醇,可能会引起碳钢的应力腐蚀开裂。即使乙醇比例低至 20%(体积分数)的乙醇/汽油混合物,也可能引起开裂。在乙醇中加入缓蚀剂后,可以防止均匀腐蚀,对应力腐蚀开裂的影响尚不明确。
- c) 杂质:完全密闭环境下的乙醇通常不会引起应力腐蚀开裂。乙醇中如果存在溶解氧,或密闭不严,或通风、通氧的条件下均可能引起乙醇应力腐蚀开裂。乙醇中氯离子含量越高,发生开裂的可能性也越大。
- d) 含水量:含水量在 0.1%~4.5%(体积分数)范围内的乙醇应力腐蚀开裂敏感性最大。

#### 6.14.5 易发生的装置或设备

储运乙醇(包括变性乙醇)的碳钢储罐和管道。

#### 6.14.6 主要预防措施

乙醇应力腐蚀开裂的主要预防措施为:

- a) 降低应力:乙醇应力腐蚀开裂所需的应力强度门槛值高,焊后热处理、设计时避免局部高拉伸应力、减少制造时冷作加工、不采用搭接焊缝,均可有效降低乙醇应力腐蚀开裂的可能性;
- b) 增设涂层;
- c) 减少杂质:减少乙醇中的氯离子含量,减少乙醇中的溶解氧(如保持系统密封,不与空气、氧气或其他氧化剂接触)。

#### 6.14.7 检测或监测方法

乙醇应力腐蚀开裂的检测或监测方法为:

- a) 裂纹通常较为致密且裂隙中可能充满腐蚀产物,目视检测难以直接发现;
- b) 湿荧光磁粉检测比较有效,无法采用湿荧光磁粉检测时可用超声波横波检测;
- c) 交流式漏磁检测对表面预处理要求低,可用于焊缝热影响区快速检测。

#### 6.14.8 相关或伴随的其他损伤

碱应力腐蚀开裂。

### 6.15 硫酸盐应力腐蚀开裂

#### 6.15.1 损伤描述及损伤机理

长期与含硫酸盐的溶液接触后,铜合金表面会出现开裂。

#### 6.15.2 损伤形态

硫酸盐应力腐蚀开裂的损伤形态为:

- a) 热交换器管束的表面裂纹有些为单条,有些分枝多;
- b) 金相观察可发现裂纹为穿晶型,与氨应力腐蚀开裂难以区分;
- c) 管束的硫酸盐应力腐蚀开裂通常会造成长缓慢泄漏。

#### 6.15.3 受影响的材料

硫酸盐应力腐蚀开裂的受影响的材料为:

- a) 在含硫酸盐的溶液中,铜合金的应力腐蚀开裂敏感高,海军黄铜尤为明显;
- b) 铜镍合金(Cu90Ni10、Cu70Ni30)比较耐硫酸盐应力腐蚀开裂。

#### 6.15.4 主要影响因素

硫酸盐应力腐蚀开裂的主要影响因素为:

- a) 对开裂敏感的合金在硫酸盐和应力(残余应力就足够)的共同作用下,可能发生开裂;
- b) 工艺环境中应存在硫化物,或者生产工艺的化学反应过程会产生硫酸盐;
- c) 通常会同时存在低浓度的氨;
- d) 设备开裂过程可能非常漫长,有时长达10年~15年才会出现管束泄漏。

#### 6.15.5 易发生的装置或设备

易发生硫酸盐应力腐蚀开裂的装置或设备为:

- a) 硫酸盐应力腐蚀开裂常见于供水系统和热交换器管束;
- b) 常减压装置的常压塔顶馏分热交换器铜合金管束处会凝聚低浓度硫酸盐,可能造成应力腐蚀

开裂。

#### 6.15.6 主要预防措施

硫酸盐应力腐蚀开裂的主要预防措施为：

- a) 对开裂敏感的铜合金制热交换器管束,定期(如每 5 年)进行一次清洗;
- b) 选用耐硫酸盐应力腐蚀开裂能力强的合金,如 Cu90Ni10 和 Cu70Ni30;
- c) 选用非铜基合金。

#### 6.15.7 检测或监测方法

硫酸盐应力腐蚀开裂的检测或监测方法为：

- a) 对换热管开裂的检测,可选用涡流检测或目视检测方法;
- b) 管束开裂早期会形成浅表裂纹,可取样进行弯曲试验判断。

#### 6.15.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 6.16 氢氟酸应力腐蚀开裂

#### 6.16.1 损伤描述及损伤机理

在含氟化氢环境(有水或无水均可)和拉伸应力的共同作用下,镍基合金表面会发生应力腐蚀开裂。腐蚀产生的保护膜(CuF)被氧化剂(如运行或检修期间进入设备内的空气,或纯净气体中的空气杂质)氧化,得到的氟化铜(CuF<sub>2</sub>)是应力腐蚀开裂的主要原因。

#### 6.16.2 损伤形态

氢氟酸致镍基合金应力腐蚀开裂的损伤形态为：

- a) 产生绿色结垢晶状物 CuF<sub>2</sub>;
- b) 退火态的镍基合金材料出现晶间腐蚀及晶间开裂,未退火处理过的冷加工成形镍基合金材料出现穿晶开裂。

#### 6.16.3 受影响的材料

镍基合金氢氟酸应力腐蚀开裂的受影响材料为：

- a) 蒙乃尔合金 400(镍含量在敏感区范围内);
- b) 蒙乃尔合金 K-500(高强度、应变硬化状态下非常敏感);
- c) Ni-Cr-Mo 合金锻件和铸件材料:哈氏合金 C-22、哈氏合金 C-276、哈氏合金 C-2000、合金 59、因科耐尔合金 625 和因科耐尔合金 686 在氢氟酸环境中容易发生应力腐蚀开裂,有时也容易出现晶间腐蚀和晶间开裂。

#### 6.16.4 主要影响因素

氢氟酸致镍基合金应力腐蚀开裂的主要影响因素如下。

- a) 氧化剂:CuF 或者 HF 遇到氧化剂后,就容易引发镍基合金的应力腐蚀开裂。氧化剂主要来源于混入的空气中的氧气成分,氢氟酸储存、稀释和安全阀后集合管内使用的净化气体(如氮气、燃料气)中也可能含有较多的氧气杂质。

- b) 残余应力:如冷加工成形的管子、U形弯管和未经焊后处理的焊缝,都存在较高的残余应力。
- c) 硬度:蒙乃尔合金 K-500 在时效处理后硬度特别高。

#### 6.16.5 易发生的装置或设备

氢氟酸烷基化、氟塑化工等装置中镍合金制承压设备、内部构件、仪表、阀门部件(尤其是阀杆)和泵组件。

#### 6.16.6 主要预防措施

氢氟酸致镍基合金应力腐蚀开裂的主要预防措施为:

- a) 消除应力:消应力热处理既可防止冷加工成形件(如 U 形弯管)的应力腐蚀开裂,也可防止蒙乃尔合金 400 焊接接头的应力腐蚀开裂,热处理温度应不低于 705 °C,尽量不要使用蒙乃尔合金 400 或蒙乃尔合金 K-500 制作承压部件的连接螺栓;
- b) 硬度:蒙乃尔合金 K-500 部件的硬度应不超过 HRC30;
- c) 维护:设备准备通入空气之前,应彻底清除并中和游离的氟化氢;吹扫、排气过程应避免产生负压,防止空气混入;吹扫气体的氧含量应小于  $100 \times 10^{-6}$ ;
- d) 其他:设备内构件上使用的镍基合金螺栓,应为完全退火状态并限定扭矩。

#### 6.16.7 检测或监测方法

氢氟酸致镍基合金应力腐蚀开裂的检测或监测方法如下。

- a) 表面渗透检测可用于可疑部位的裂纹检测,例如宏观检查发现有绿色晶状物处。
- b) 气体吹扫过程中应始终监测其氧气含量。

#### 6.16.8 相关或伴随的其他损伤

脱金属腐蚀、液体金属脆断。

## 7 材质劣化

### 7.1 晶粒长大

#### 7.1.1 损伤描述及损伤机理

含奥氏体相的合金加热到一定温度以上时发生的晶粒尺寸增大过程。

#### 7.1.2 损伤形态

晶粒长大的损伤形态为:

- a) 材料由细小等轴晶粒变为粗大晶粒;
- b) 材料抗拉强度降低;
- c) 材料韧性降低;
- d) 材料抗蠕变能力下降。

#### 7.1.3 受影响的材料

碳钢、300 系列不锈钢、镍铬合金、其他含奥氏体相的合金。



#### 7.1.4 主要影响因素

晶粒长大的主要影响因素为：

- a) 温度：随温度升高，晶粒长大速率增大；
- b) 时间：保温时间延长，晶粒增大较明显；
- c) 材质：随碳含量增加，奥氏体晶粒长大的敏感性升高，材料中合金元素的原子、杂质以及弥散分布的第二相质点均可阻碍晶界合并，抑制晶粒长大；
- d) 微观组织：通常直径小于 2 μm 的晶粒不增长，直径大于 2 μm 的晶粒才会增长。

#### 7.1.5 易发生的装置或设备

采用敏感材料制造，且在高温环境中使用的所有设备。

#### 7.1.6 主要预防措施

晶粒长大的主要预防措施为：

- a) 材料中添加铝、钒、铈、钛、铌等可抑制晶粒长大的元素；
- b) 在热处理过程中严格控制加热温度和保温时间。

#### 7.1.7 检测或监测方法

晶粒长大的检测或监测方法为：

- a) 金相分析：观察奥氏体晶粒尺寸的变化；
- b) 拉伸性能测试。

#### 7.1.8 相关或伴随的其他损伤

过热。



### 7.2 渗氮

#### 7.2.1 损伤描述及损伤机理

金属与氮化物含量高的高温介质接触时，如氨或氰化物等，金属材料表面形成氮化物硬脆层的过程，如同时存在还原性条件时渗氮过程更加明显：



#### 7.2.2 损伤形态

渗氮的损伤形态为：

- a) 渗氮通常发生在材料表面，硬脆层多呈暗灰色；
- b) 渗氮末期材料表面硬度显著增大，多数情况下，容器或部件稍硬的表面层不会影响设备的机械完整性，但渗氮层的裂纹可能会延伸至母材中；
- c) 铬含量小于或等于 12%（质量分数）的低合金钢，在渗氮过程中表面硬脆层易发生开裂或剥落，且可能造成壁厚或体积增大；
- d) 操作温度高于 410 °C 时，金属的晶界处优先发生渗氮，引发微裂纹和脆化；
- e) 不锈钢通常在表面产生薄而脆的渗氮层，在热应力或机械应力作用下渗氮层易发生开裂或

剥落；

- f) 渗氮过程中形成的硬脆层多为针状铁氮化合物( $\text{Fe}_3\text{N}$  或  $\text{Fe}_4\text{N}$ )；
- g) 渗氮对材料耐腐蚀性可能有不利影响,且可能导致蠕变强度、室温力学性能(特别是韧性和延展性)、焊接性能降低。

### 7.2.3 受影响的材料

易发生渗氮的材料为：

- a) 碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢；
- b) 镍基合金耐渗氮能力强。

### 7.2.4 主要影响因素

渗氮的主要影响因素为：

- a) 介质成分:高浓度还原性氮化合物(氨或氰化物等)可促进渗氮,氮分压越高,渗氮越严重；
- b) 温度:温度应足够高,氮元素才能从化合物中分离出来,并向金属中扩散,一般在温度高于  $316\text{ }^\circ\text{C}$  时才会发生渗氮,温度高于  $482\text{ }^\circ\text{C}$  渗氮敏感性较高；
- c) 材质:镍元素含量  $30\%\sim 80\%$ (质量分数)的合金具有较好的耐渗氮性；
- d) 时间:在一定的渗氮环境中,时间越长,渗氮越严重。

### 7.2.5 易发生的装置或设备

易发生渗氮的装置或设备为：

- a) 水煤气发生炉、乙烯裂解装置及合成氨装置；
- b) 其他满足渗氮环境的高温设备。



### 7.2.6 主要预防措施

渗氮的主要预防措施为：

- a) 选择镍元素含量高(含镍质量分数  $30\%\sim 80\%$ )的耐渗氮合金；
- b) 改变工艺条件,降低氮分压或操作温度。

### 7.2.7 检测或监测方法

渗氮的检测或监测方法为：

- a) 目视检测,检测时需注意渗氮部件表面形貌可能仍较完好,掩盖了实际的损伤情况,应仔细甄别,并注意金属表面呈暗灰色的部位；
- b) 金相分析；
- c) 硬度测定,渗氮金属的硬度值一般为  $\text{HB}400\sim \text{HB}500$ (布氏硬度),甚至更高；
- d) 渗氮层具有磁性,对 300 系列不锈钢表面进行磁性状态检测,可判断是否存在渗氮层；
- e) 涡流检测；
- f) 渗氮末期可能形成表面裂纹,可采用渗透检测、射线成像检测及超声波横波检测。

### 7.2.8 相关或伴随的其他损伤

渗碳、金属粉化。

### 7.3 球化

#### 7.3.1 损伤描述及损伤机理

在高温(440 °C~760 °C)长期使用过程中,钢材中珠光体中渗碳体(碳化物)不稳定,其形态会由最初的层片状逐渐转变成球状,这一过程称为球化。球化过程中,珠光体中的片状渗碳体在高温下获得足够的能量后局部溶解,断开为若干细的点状渗碳体,弥散分布在奥氏体基体上,同时由于加热温度低、渗碳体溶解不完全,造成奥氏体成分极不均匀,以未溶解的碳化物质点或奥氏体富碳区新产生的碳化物为核心,形成细小而均匀的颗粒状碳化物,这些碳化物在钢材保温或缓冷过程中聚集长大,并向能量最低的球状渗碳体形态转化。另外一些低合金钢发生球化时,表现为钢材中细小、弥散分布的碳化物在高温下会聚集长大。钢材球化会使其抗拉强度和/或抗蠕变能力降低。

#### 7.3.2 损伤形态

球化的损伤形态为:

- a) 球化损伤部位一般外观无明显变化,可通过金相组织分析判断;
- b) 碳钢中片状碳化物形成球状碳化物;而铬含量 5%~9%的低合金钢中弥散的细小碳化物相聚,形成较大的球状碳化物;
- c) 材料因球化而强度降低的同时,延展性一般会增大,应力集中区域会发生变形;
- d) 球化引起的材料强度下降最大降幅可达 30%,但若无外加高应力,或球化部位不在应力集中区域,或没有其他损伤联合作用,也很少发生失效。

#### 7.3.3 受影响的材料

所有常用牌号的碳钢和低合金钢,包括 C-0.5Mo、1.25Cr-0.5Mo、2.25Cr-0.5Mo、2.25Cr-1Mo、3Cr-1Mo、5Cr-0.5 Mo 和 9Cr-1Mo 钢。

#### 7.3.4 主要影响因素

球化的主要影响因素为:

- a) 温度:随温度升高,球化加速,如 454 °C时发生球化需数年,552 °C时发生球化仅需几小时;
- b) 微观组织:退火钢的抗球化性能比正火钢强,粗晶粒钢的抗球化性能比细晶粒钢强,硅镇静钢的抗球化性能比铝镇静钢强。

#### 7.3.5 易发生的装置或设备

易发生球化的装置或设备为:

- a) 催化裂化装置、催化重整装置和焦化装置中的高温管道及设备,锅炉或加热炉炉管;
- b) 其他服役温度高于 454 °C的所有碳钢、低合金钢制管道和装备。

#### 7.3.6 主要预防措施

减少在高温环境中的保温或使用时间。

#### 7.3.7 检测或监测方法

球化的检测或监测方法为:

- a) 金相检测可辨别球化损伤;

b) 对材料进行抗拉强度测试和/或硬度测定,若数值较低则可能已出现球化。

### 7.3.8 相关或伴随的其他损伤

石墨化。

## 7.4 石墨化

### 7.4.1 损伤描述及损伤机理

长期在 427 °C ~ 596 °C 温度范围内使用的碳钢和 0.5Mo 钢,其碳化物分解生成石墨颗粒的过程。

### 7.4.2 损伤形态

石墨化的损伤形态为:

- a) 石墨化损伤宏观观察不易发现,仅可通过金相检测判定;
- b) 石墨化损伤末期会出现蠕变强度下降,包括微裂纹或微孔洞形成、表面及近表面开裂;
- c) 石墨化有两种常见类型:第一种是随机石墨化,球状石墨随机地分布在钢材各处,可使钢材室温下的抗拉强度降低,但不会降低材料抗蠕变能力;第二种则是球状石墨链状分布,或集中在局部区域的同一平面上,沿该平面可能发生脆性断裂,使材料承载能力明显降低,具有破坏性;
- d) 上述 c) 中的第二种石墨化又可分为焊缝热影响区石墨化和非焊接接头区石墨化:
  - 1) 焊缝热影响区石墨化多发于焊缝附近热影响区内的一个狭窄区域中,位于热影响区的低温边缘;多道焊焊接接头中这些区域互相重叠,可覆盖整个截面;这些热影响区的低温边缘处均会形成球状石墨,使脆弱的石墨带贯穿整个截面,根据形貌特征,热影响区内这种形成石墨的过程又称为眉毛状石墨化;
  - 2) 非焊接接头区石墨化是局部石墨化,有时它会沿着钢中局部屈服面发生。在冷加工或冷弯等产生明显的塑性变形后,变形区域会发生链状形态的石墨化。

### 7.4.3 受影响的材料

碳钢、0.5Mo 钢。

### 7.4.4 主要影响因素

石墨化的主要影响因素为:

- a) 温度:温度低于 427 °C 时,石墨化速率极慢;温度越高,石墨化速率越快;
- b) 应力:局部屈服和显著塑性变形的区域,易发生石墨化;
- c) 材质:有些牌号的钢材对石墨化比较敏感,如钼元素含量达到 1%(质量分数)的低合金钢已有石墨化的案例,添加 0.7%(质量分数)的铬元素可防止石墨化;
- d) 服役时间:石墨化程度可分为无、轻微、中等和严重 4 类。石墨化速率很难预测,工程使用经验表明温度高于 538 °C 时热影响区严重石墨化仅需 5 年,而 454 °C 时轻微石墨化需要 30 年~40 年。

### 7.4.5 易发生的装置或设备

易发生石墨化的装置或设备为:

- a) 催化裂化装置:热壁管道、反应器及直立废热锅炉底端管板密封焊;
- b) 粗珠光体钢制设备或管道石墨化倾向较大,而贝氏体钢制设备或管道石墨化倾向较小;

- c) 催化重整装置:低合金钢制造的反应器及中间加热炉;
- d) 延迟焦化装置:热壁管道、焦炭塔、焦化炉管;
- e) 乙烯裂解装置:裂解炉管;
- f) 服役温度在 441 °C ~ 552 °C 的省煤器管件、蒸汽管道及其他设备。

#### 7.4.6 主要预防措施

材料中添加铬元素,可防止石墨化。

#### 7.4.7 检测或监测方法

石墨化的检测或监测方法为:

- a) 石墨化损伤可能出现在壁厚中间的位置,故仅部分厚度取样检测可能会漏检,应截取全厚度试样进行金相分析;
- b) 石墨化末期因强度降低而产生的表面开裂或蠕变变形均难以检测。

#### 7.4.8 相关或伴随的其他损伤

球化、蠕变。

### 7.5 渗碳

#### 7.5.1 损伤描述及损伤机理

高温下金属材料与富碳材料或渗碳环境接触时,碳元素向金属材料内部扩散,产生金属碳化物脆性相的过程:



#### 7.5.2 损伤形态

渗碳的损伤形态为:

- a) 材料表面形成具有一定深度的渗碳层,碳钢和低合金钢的渗碳层硬而脆,冷却时可能开裂或剥离;
- b) 材料表面硬度增高,蠕变延性、常温力学性能(特别是韧性和延性)、焊接性能和耐腐蚀性能降低;
- c) 渗碳部位构件壁厚或体积可能增加;
- d) 渗碳后合金的铁磁性可能增加;
- e) 渗碳会形成金属碳化物,并消耗掉碳化物周围基体的组成元素。

#### 7.5.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢、不锈钢铸件、铁含量高的镍基合金(如因科耐尔合金 600 和因科镍合金 800)、铁铬镍耐热铸造合金(如 HK 或 HP 合金)。

#### 7.5.4 主要影响因素

渗碳的主要影响因素为:

- a) 发生渗碳应同时满足 3 个条件:在渗碳环境中使用或与含碳材料接触、足够高的温度使碳在金属内部可以扩散(通常大于 593 °C)、对渗碳敏感的材料;

- b) 温度:温度越高,渗碳速率越快;
- c) 渗碳层扩展的速率一般会越来越慢,最终趋于停止;
- d) 材质:提高铬、镍元素含量,可增加材料抗渗碳损伤的能力,300系列不锈钢铬、镍元素含量比碳钢、低合金钢高,抗渗碳能力强;
- e) 环境:高碳活性气相(如含烃、焦炭、一氧化碳、二氧化碳、甲烷或乙烷的气体)和氧势低(微量氧气或蒸汽)有利于渗碳损伤的发展。

#### 7.5.5 易发生的装置或设备

易发生渗碳的装置或设备为:

- a) 火焰加热炉是渗碳损伤最常见的设备,如催化重整装置加热炉炉管、延迟焦化装置加热炉炉管和其他采用蒸汽或空气除焦的加热炉;
- b) 沉积焦炭是渗碳过程的碳元素来源之一,当温度超出正常运行温度的脱焦周期内会加速渗碳;
- c) 乙烯裂解炉炉管和制氢转换炉炉管也会出现渗碳,烧焦周期内会发生明显的渗碳。

#### 7.5.6 主要预防措施

渗碳的主要预防措施为:

- a) 选择抗渗碳合金,如可形成表面稳定氧化膜或硫化膜的合金;
- b) 降低温度,或提高氧或硫分压,以降低碳活性。

#### 7.5.7 检测或监测方法

渗碳的检测或监测方法为:

- a) 初始渗碳阶段,可进行表面硬度测试、金相分析、涡流检测,条件允许时可进行破坏性取样分析;
- b) 对于投用前原始状态为顺磁性的合金(奥氏体合金),可检测磁导率的变化程度,但表面氧化物可能会对检测结果造成干扰;
- c) 渗碳末期会产生开裂,可采用射线成像检测、超声波横波检测、涡流检测等技术检测有无裂纹。

#### 7.5.8 相关或伴随的其他损伤

金属粉化。

### 7.6 脱碳

#### 7.6.1 损伤描述及损伤机理

热态下介质与金属中的碳发生反应,使合金表面失去碳,导致材料碳含量降低,材料的强度下降。金属接触高温环境、在某些高温气体环境中使用、热处理、火焰炙烤时会发生脱碳。

#### 7.6.2 损伤形态

脱碳的损伤形态为:

- a) 脱碳一般仅发生在金属表面,极端情况下可能发生穿透脱碳,脱碳后的合金出现软化现象;
- b) 脱碳层没有碳化物相,碳钢在完全脱碳后可变为纯铁;
- c) 室温抗拉强度和蠕变强度都可能降低,但浅层脱碳对部件的整体性能没有影响。但如果钢出现脱碳,说明已经过热,可能还存在其他损伤,如临氢环境下的高温氢腐蚀。

### 7.6.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

### 7.6.4 主要影响因素

脱碳的主要影响因素为：

- a) 介质活性：气相介质碳含量越低，钢材脱碳可能性越大；
- b) 温度和时间：温度越高，接触或使用时间越长，脱碳越严重。

### 7.6.5 易发生的装置或设备

易发生脱碳的装置或设备为：

- a) 加氢装置、催化重整装置中在高温临氢环境下服役的设备和管道；
- b) 高温下使用、进行热处理、火焰加热或热加工成型的设备和管道部件。

### 7.6.6 主要预防措施

脱碳的主要预防措施为：

- a) 控制气相介质的组成，尤其是化学成分；
- b) 选择碳化物较稳定的铬钼合金钢。



### 7.6.7 检测或监测方法

脱碳的检测或监测方法为：

- a) 金相分析；
- b) 硬度测试：脱碳会使材料发软，可通过硬度测试进行验证。

### 7.6.8 相关或伴随的其他损伤

高温氢腐蚀。

## 7.7 金属粉化

### 7.7.1 损伤描述及损伤机理

含碳和氢的工艺流体和/或渗碳气氛中发生的一种渗碳形式，会使局部点蚀加速，多在表面形成点蚀坑，坑内可能有炭灰或石墨粉。金属粉化的过程：

- a) 金属基体经渗碳已出现碳饱和；
- b) 金属碳化物在金属表面和晶界析出；
- c) 石墨从气相中沉积到表面金属碳化物上；
- d) 石墨和金属颗粒底下的金属碳化物发生分解；
- e) 表面的金属颗粒促进石墨进一步沉积。

### 7.7.2 损伤形态

金属粉化的损伤形态为：

- a) 低合金钢发生金属粉化后材料表面通常有大量腐蚀坑，有时也可能发生表面均匀腐蚀，腐蚀坑内或腐蚀面的腐蚀产物通常为金属颗粒和疏松碳粉的混合物，也可能为金属氧化物颗粒和碳

化物颗粒的混合物；

- b) 不锈钢和高合金钢发生金属粉化后通常形成局部腐蚀,可在表面观察到深而圆的腐蚀坑；
- c) 腐蚀产物底层的金属严重渗碳；
- d) 目前的研究结果显示高镍合金发生金属粉化时不会形成金属碳化物。

### 7.7.3 受影响的材料

低合金钢、300 系列不锈钢、镍基合金和耐热合金。目前还没有任何已知合金可以耐受所有条件下的金属粉化损伤。

### 7.7.4 主要影响因素

金属粉化的主要影响因素为：

- a) 介质成分:通常发生在还原性气体介质中(如氢气、甲烷、丙烷或一氧化碳),也可发生在氧化-还原交替环境；
- b) 温度:通常发生在 482 °C ~ 816 °C 温度范围,且随温度升高而加剧。

### 7.7.5 易发生的装置或设备

易发生金属粉化的装置或设备为：

- a) 发生表面渗碳的火焰加热炉炉管、热电偶套管及炉内构件；
- b) 催化重整装置加热管、焦化装置焦化炉、燃气轮机、甲醇转化炉出口管道、加氢裂化加热炉、加氢裂化反应器。

### 7.7.6 主要预防措施

金属粉化的主要预防措施为：

- a) 介质中添加硫元素(通常采用硫化氢)可预防金属粉化,但硫在一些工艺中对催化剂有毒性,添加硫化氢时需充分考虑各种不利因素；
- b) 合理选材:选择碳含量低且不易发生渗碳的材料；
- c) 对金属基体进行渗铝处理,有利于防止金属粉化。

### 7.7.7 检测或监测方法

金属粉化的检测或监测方法为：

- a) 导波检测加热炉炉管；
- b) 射线成像检测腐蚀坑和壁厚减薄；
- c) 内部目视检测；
- d) 水冷壁的出口如检测到金属颗粒,说明水冷壁上游已有部件发生金属粉化。

### 7.7.8 相关或伴随的其他损伤

渗碳。

## 7.8 相脆化

### 7.8.1 损伤描述及损伤机理

300 系列不锈钢和其他铬元素含量超过 17%(质量分数)的不锈钢材料,在 538 °C ~ 925 °C 温度范

围内保温一段时间或长期使用时,析出 $\sigma$ 相(金属间化合物)而导致材料变脆的过程。

### 7.8.2 损伤形态

$\sigma$ 相脆化的损伤形态为:

- a)  $\sigma$ 相脆化早期一般不明显,直至发生开裂,开裂多出现在焊接接头或拘束度高的区域;
- b) 铸态奥氏体不锈钢中可含大量铁素体相或 $\sigma$ 相( $\sigma$ 相质量分数高达40%),高温下其延展性很差;
- c) 与固溶处理过的材料相比, $\sigma$ 相脆化后的不锈钢拉伸及屈服强度稍有增加,硬度也略微增加,但塑性降低(伸长率和断面收缩率);
- d) 含 $\sigma$ 相的不锈钢在正常操作温度下通常仍可满足要求(含10% $\sigma$ 相的奥氏体不锈钢在649℃时夏比冲击韧性仍很高,延展性为100%,而室温下延展性降为零),但温度降低至大约260℃时,通过夏比冲击试验发现金属可能已完全丧失断裂韧性;
- e)  $\sigma$ 相脆化实际是一种组织变化,析出硬而脆的金属间化合物,脆化后的材料对晶间腐蚀更敏感。

### 7.8.3 受影响的材料

易发生 $\sigma$ 相脆化的材料为:

- a) 300系列不锈钢的锻件、焊接件及铸件,其中铸件包括HK合金铸件和HP合金铸件,由于铁素体含量高(10%~40%),很容易产生 $\sigma$ 相;
- b) 400系列不锈钢,以及铬元素含量超过17%(质量分数)的铁素体不锈钢和马氏体不锈钢也较敏感,例如430不锈钢和440不锈钢;
- c) 双相不锈钢。

### 7.8.4 主要影响因素

$\sigma$ 相脆化的主要影响因素为:

- a) 时间:即使是易发生 $\sigma$ 相脆化的合金,也只有高温环境中经历足够长的时间,才会发生 $\sigma$ 相脆化;
- b) 温度:铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、奥氏体不锈钢及双相不锈钢长期在538℃~925℃范围内使用可产生 $\sigma$ 相,在此温度范围内保温,或者冷却时经过该温度范围,都可能发生 $\sigma$ 相脆化,当温度低于韧脆转变温度时易发生脆断;
- c) 材质:奥氏体不锈钢和双向不锈钢焊接接头熔敷金属的铁素体中, $\sigma$ 相形成速度最快;奥氏体不锈钢的基体金属(奥氏体)中, $\sigma$ 相也能形成,但形成速度通常较慢, $\sigma$ 相可达10%~15%;铸态奥氏体不锈钢能产生更多的 $\sigma$ 相;使用经验表明奥氏体不锈钢在690℃进行焊后热处理时,几小时内便可产生 $\sigma$ 相,例如厚壁容器的不锈钢堆焊层或复合层;
- d) 高温下含 $\sigma$ 相的不锈钢锻件,即使其冲击韧性严重降低,但由于操作温度下延性良好,锻件仍可继续使用。

### 7.8.5 易发生的装置或设备

易发生 $\sigma$ 相脆化的装置或设备为:

- a) 催化裂化装置:再生器的不锈钢旋风分离器、不锈钢管道系统及不锈钢阀门;
- b) 不锈钢制热交换器的管子-管板焊接部位;

- c) 不锈钢加热炉炉管,如乙烯裂解装置的裂解炉辐射段炉管;
- d) 设置有奥氏体(或铁素体)不锈钢堆焊层或复合层,且需要进行焊后热处理的承压设备。

### 7.8.6 主要预防措施

$\sigma$ 相脆化的主要预防措施为:

- a) 添加合金元素,或避免材料在 $\sigma$ 相脆化温度范围内使用;
- b) 如含 $\sigma$ 相材料在室温下断裂韧性不足,停车时应先降低操作压力;
- c) 1 066 °C下固溶处理 4 h,奥氏体不锈钢中的 $\sigma$ 相发生溶解,然后快速水冷可形成单一奥氏体相,彻底消除 $\sigma$ 相,但大多数奥氏体不锈钢制设备无法进行固溶处理;
- d) 347 不锈钢中铁素体含量应控制在 5%~9%(质量分数),304 铁素体含量比 347 不锈钢略少,且焊材的铁素体含量应进行限制;
- e) 有不锈钢堆焊衬里的铬钼合金钢制部件,应限定加热到焊后热处理温度的升温时间。

### 7.8.7 检测或监测方法

$\sigma$ 相脆化的检测或监测方法为:

- a)  $\sigma$ 相脆化不易发现,可以进行金相分析,并取样进行冲击试验,可验证金相组织的变化;
- b) 渗透检测,检查表面是否存在宏观裂纹。

### 7.8.8 相关或伴随的其他损伤

无。

## 7.9 475 °C 脆化

### 7.9.1 损伤描述及损伤机理

含铁素体相的合金在 316 °C~540 °C 温度范围使用时,脆性金属间化合物析出,并逐渐累积,导致材料产生脆化,尤其在 475 °C 附近时脆化最为敏感。

### 7.9.2 损伤形态

475 °C 脆化的损伤形态为:

- a) 金相组织变化不明显,即使金相分析也不易识别;
- b) 材料硬度增高,韧性降低;
- c) 对发生 475 °C 脆化的在役设备试样进行弯曲和冲击试验,弯曲性能和冲击功均不合格。

### 7.9.3 受影响的材料

2205、2304 和 2507 等双相不锈钢,以及 400 系列不锈钢,如 405、409、410、410S、430 以及 446。含铁素体的 300 系列不锈钢锻件和铸件,尤其焊缝和堆焊层部位。

### 7.9.4 主要影响因素

475 °C 脆化的主要影响因素为:

- a) 温度:通常敏感材料在 371 °C~538 °C 温度范围内有脆化倾向,在 475 °C 时金属间脆性相极易析出,随时间逐步积累并引发损伤,操作温度高于或低于 475 °C 时脆化速率都会降低,例如 316 °C 时可能需要经过几千小时才会脆化;材料韧性在操作温度下变化不大,但在较低温度下

(装置开停车时)显著降低;若在更高温度下进行回火,或在转变温度范围内保持或冷却,均可导致材料脆化;

- b) 时间:在脆化温度范围内,停留时间越长,材料脆化倾向越大;
- c) 材质:降低铁素体相含量,有利于防止材料脆化;在脆化温度范围内,损伤敏感性随铁素体相含量增加而增大,且在韧脆转变温度下显著增大。

#### 7.9.5 易发生的装置或设备

易发生 475 °C 脆化的装置或设备为:

- a) 催化裂化装置、常减压装置、延迟焦化装置中高温容器不锈钢堆焊层或复合衬里,不锈钢制内件、分馏塔盘;
- b) 在脆化温度范围内使用的所有敏感材料制设备。长时间在 316 °C 以上使用的双相不锈钢换热管及其他部件。

#### 7.9.6 主要预防措施

475 °C 脆化的主要预防措施为:

- a) 选用铁素体含量低的合金、无铁素体合金,或避免敏感材料在脆化温度范围内服役;
- b) 改变合金成分,增加材料的抗脆化能力;
- c) 在 593 °C 或更高温度下进行消除脆化热处理,并快速冷却,但应注意到热处理后的设备若在原服役条件下再次服役,经消除脆化热处理后设备的脆化速率比第一次发生脆化的速率更快。

#### 7.9.7 检测或监测方法

475 °C 脆化的检测或监测方法为:

- a) 在服役设备上切取试样,进行冲击或弯曲测试;
- b) 大多数脆化部件在停车后、开车前低温(材料温度低于 93 °C)情况下易发生开裂,可采用目视检测、表面无损检测和声发射方法检测开裂情况;
- c) 硬度测定。

#### 7.9.8 相关或伴随的其他损伤

无。

#### 7.10 回火脆化

##### 7.10.1 损伤描述及损伤机理

低合金钢长期在 343 °C ~ 593 °C 范围内使用时,操作温度下材料韧性没有明显降低,但材料组织微观结构已变化,降低温度后(如停工检修期间)发生脆性开裂的过程。

##### 7.10.2 损伤形态

回火脆化的损伤形态为:

- a) 目视检测不易发现回火脆化损伤;
- b) 采用夏比 V 型缺口冲击试验测试,回火脆化材料的韧脆转变温度较非脆化材料升高。

##### 7.10.3 受影响的材料

易发生回火脆化的材料为:

- a) 铬钼钢,主要是 2.25Cr-1Mo 低合金钢(1972 年前制造的老一代 2.25Cr-1Mo 材料特别敏感), 3Cr-1Mo(程度稍轻)和高强度低合金 Cr-Mo-V 转子钢;
- b) C-0.5Mo 合金钢虽没有明显的回火脆化,但其他高温损伤也同样会促使其发生金相变化,材料韧性或高温塑性降低;
- c) 一些高强度低合金钢也特别敏感。

#### 7.10.4 主要影响因素

回火脆化的主要影响因素为:

- a) 材质:目前的研究表明控制锰、硫、磷、锡、铈和砷元素含量可降低回火脆性,同时还应兼顾材料的强度水平、热处理工艺和加工工艺性能;
- b) 温度:2.25Cr-1Mo 钢在 482 °C 时的回火脆化速率比 427 °C ~ 440 °C 时更快,但长期在 440 °C 使用时回火脆化引起的损伤可能更严重;
- c) 时间:设备回火脆化大多数在脆化温度范围服役数年后发生,在加工热处理阶段有时也会发生回火脆化;
- d) 环境:当存在临氢环境或裂纹类缺陷时会缩短回火脆化导致的设备失效时间;
- e) 位置:焊缝通常比母材更敏感,应作为评估的重点。

#### 7.10.5 易发生的装置或设备

易发生回火脆化的装置或设备为:

- a) 服役温度长期高于 343 °C 的各种低合金钢制装备;
- b) 加氢处理装置:反应器、热进料/出料热交换器及热高压分离器;
- c) 催化重整装置:反应器、热交换器;
- d) 催化裂化装置:反应器;
- e) 焦化和加氢裂化装置:如焦炭塔等;
- f) 乙烯裂解装置:甲烷化反应器、进出料热交换器管程及相连管道,一般发生在开停车阶段。

#### 7.10.6 主要预防措施

回火脆化的主要预防措施为:

- a) 在役设备应避免在材料回火脆化温度范围内服役。装置开车过程中,若设备温度低于最低升压温度时,操作压力应至少降至最大设计压力的 25%。已投用多年的早期钢材回火脆化敏感性高,最低升压温度为 171 °C;新型抗回火脆化钢材的最低升压温度可达 38 °C 或更低。采用焊补修复的部位应加热至 620 °C 并快速水冷,回火脆化会暂时逆转。
- b) 准备制造或已经在制的设备:选用磷、锡、铈和砷等杂质元素含量低的材质,进行适当的焊后处理,适当降低材料强度等级。
- c) 按工程经验可根据材料成分,按公式(1)计算母材金属的  $J$  因子:

$$J = (\omega_{Si} + \omega_{Mn}) \times (\omega_P + \omega_{Sn}) \times 10^4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $J$  ——  $J$  因子;
- $\omega_{Si}$  —— 材料成分中硅元素质量分数(%);
- $\omega_{Mn}$  —— 材料成分中锰元素质量分数(%);
- $\omega_P$  —— 材料成分中磷元素质量分数(%);



$\omega_{Sn}$  ——材料成分中锡元素质量分数(%)。

按公式(2)计算熔敷金属的 X 因子:

$$X = (10\omega_P + 5\omega_{Sb} + 4\omega_{Sn} + \omega_{As})/100 \dots\dots\dots(2)$$

式中:

X ——X 因子;

$\omega_P$  ——材料成分中磷元素质量分数( $10^{-6}$ );

$\omega_{Sb}$  ——材料成分中锑元素质量分数( $10^{-6}$ );

$\omega_{Sn}$  ——材料成分中锡元素质量分数( $10^{-6}$ );

$\omega_{As}$  ——材料成分中砷元素质量分数( $10^{-6}$ )。

对于 12Cr2Mo1R 钢的 J 因子和 X 因子最大值限定为 100 和 15。

d) 将 P 元素和 Sn 元素的质量分数之和限制在 0.01% 以下也可以降低回火脆化敏感性。

e) 用于制造厚壁装备或可能发生蠕变的设备,选用的新型低合金钢材料应在确定化学成分、韧性、强度、加工、焊接和热处理工艺时,充分考虑各种因素的影响。

### 7.10.7 检测或监测方法

回火脆化的检测或监测方法为:

a) 在反应器投用时放置同材质挂片,在使用过程中定期取出部分挂片,解剖后制样进行冲击试验,监测回火脆化状态;

b) 工艺过程严格遵守操作规定的要求,尤其应注意操作压力和温度的关联性,防止设备因回火脆化而开裂或破断。

### 7.10.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 7.11 辐照脆化

#### 7.11.1 损伤描述及损伤机理



金属材料在受到高能粒子辐照时,高能粒子和金属的点阵原子发生一系列碰撞,在金属内部产生大量的点缺陷和点阵扰动,在一定条件下不断扩散、聚集,或者转化成其他形式的缺陷,如碳化物析出、相变等,影响晶体中位错的运动,导致金属硬化,强度提高,韧性降低。

#### 7.11.2 损伤形态

辐照脆化的损伤形态为:

a) 材料的韧脆转变温度升高;

b) 材料硬度和抗拉强度增加,塑性和韧性降低;

c) 辐照损伤后材料具有稳定基体缺陷,如空位团、自间隙原子团及位错团等;

d) 辐照损伤后材料中的铜元素杂质以富铜原子团簇析出。

#### 7.11.3 受影响的材料

低合金钢、奥氏体不锈钢、镍基合金。

#### 7.11.4 主要影响因素

辐照脆化的主要影响因素为:

- a) 材质:铜、磷和镍元素含量越高,材料辐照脆化越快;
- b) 环境:快中子通量增加,可加速材料辐照脆化;
- c) 其他:辐照温度、微观结构等。

#### 7.11.5 易发生的装置或设备

反应堆压力容器及容器内部的环形锻件和焊件。

#### 7.11.6 主要预防措施

辐照脆化的主要预防措施为:

- a) 使用耐辐照脆化的材料;
- b) 降低材料中的铜、磷及镍元素的含量。

#### 7.11.7 检测或监测方法

辐照脆化的检测或监测方法为:

- a) 反应堆内放置辐照监测试样,定期取出部分试样,进行夏比 V 型冲击试验;
- b) 反应堆内表面采用内窥镜等可视方法进行检查;
- c) 对重点关注的控制棒驱动机构管座焊缝区域采用目视检查。

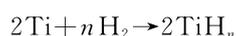
#### 7.11.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 7.12 钛氢化

#### 7.12.1 损伤描述及损伤机理

氢扩散到钛中,发生化学反应形成脆性氢化物相,导致材料延展性降低的过程:



#### 7.12.2 损伤形态

钛氢化的损伤形态为:

- a) 钛氢化损伤为金相组织发生变化,目视检查通常不易发现,可通过金相分析和力学性能测试检测;
- b) 在试验台上进行弯曲试验或压扁试验,通过损伤程度观察,判断脆化的程度:仅发生塑性变形属于未发生损伤或损伤轻微,发生脆性断裂或粉碎的说明损伤严重;
- c) 换热管变脆后外观可能完好无损,在管束取出过程中可能会因发生弯曲而开裂;
- d) 已发生损伤的管道材料,在重新轧制时易发生开裂;
- e) 直接用火焰加热的钛易产生钛氢化,尤其是焊接金属熔化区附近。

#### 7.12.3 受影响的材料

钛、钛合金。

#### 7.12.4 主要影响因素

钛氢化的主要影响因素为:

- a) 工艺条件:工艺介质的 pH 值小于 3.0,或 pH 大于 8.0,或 pH 值呈中性但硫化氢含量高,且操作温度高于 74 °C 时易发生钛氢化;
- b) 电流:比钛合金活性更高的材料,如碳钢、300 系列不锈钢等,与钛合金接触时因电化学作用易导致钛合金发生钛氢化;
- c) 时间:钛合金部件吸附氢一段时间后即开始发生脆化,一直持续到材料延性完全丧失;
- d) 腐蚀产物:制造过程中意外黏附在钛合金表面的铁锈,或工艺流体中从上游设备带入的铁锈和硫化亚铁等杂质,在一些介质环境中可能导致钛合金的钛氢化;
- e) 材质:纯钛和  $\alpha$ - $\beta$  钛合金中氢的溶解度为  $50 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ , $\beta$  钛合金中氢的溶解度为  $2\ 000 \times 10^{-6}$ ,当含氢量超出这个范围时易发生钛氢化。

#### 7.12.5 易发生的装置或设备

易发生钛氢化的装置或设备为:

- a) 含硫污水汽提装置和胺处理设备中的钛制冷凝器、换热管、管道,和其他操作温度高于 74 °C 的钛装备;
- b) 温度高于 177 °C 的氢气环境中服役的钛合金设备,尤其是干燥无氧的氢气环境中钛氢化易发生;
- c) 保护电位小于 -0.9 V(参比电极为饱和甘汞电极)的阴极保护设备。

#### 7.12.6 主要预防措施

钛氢化的主要预防措施为:

- a) 钛材不能用于还原性的氢化环境,如胺或含硫污水等;
- b) 在电化学接触可能形成钛氢化的部位,如应采用钛材或钛合金,应在钛材与非钛材部件之间进行绝缘处理。碱性含硫污水环境中,即使进行绝缘处理,也不能防止钛氢化。

#### 7.12.7 检测或监测方法

钛氢化的检测或监测方法为:

- a) 特殊涡流检测;
- b) 金相分析;
- c) 弯曲或压扁等力学性能测试。



#### 7.12.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 7.13 再热裂纹

#### 7.13.1 损伤描述及损伤机理

金属在焊后热处理或高温服役期间,高应力区发生应力消除或应力松弛,粗晶区应力集中区域的晶界滑移量超过该部位塑性变形能力而发生开裂。

#### 7.13.2 损伤形态

再热裂纹的损伤形态为:

- a) 再热裂纹为晶间开裂,发生表面开裂或内部开裂取决于设备的应力状态和几何结构,常见于厚

壁断面；

- b) 再热裂纹最常见于焊接接头热影响区的粗晶段。

### 7.13.3 受影响的材料

低合金钢、300 系列不锈钢、镍基合金(如因科镍合金 800H)。

### 7.13.4 主要影响因素

再热裂纹的主要影响因素为：

- a) 在高应力作用下再热裂纹才会产生,其常见于厚断面或高强材料中；
- b) 高温下材料塑性不足,不能满足应变要求时,易产生再热裂纹,再热裂纹在焊后热处理或高温服役条件下均能发生,一般表现为晶间开裂,变形很小(晶内微小沉淀颗粒使晶粒比晶界更强,并迫使晶界发生变形)或无明显变形；
- c) 大多情况下开裂均发生在焊接接头热影响区内,萌生于应力集中部位,并可能成为疲劳源；
- d) 300 系列不锈钢的消应力热处理或稳定化处理也可能导致再热裂纹,尤其是含 Ti、Nb 等稳定化元素的 321、347 厚壁不锈钢管道在稳定化处理期间易出现再热裂纹；
- e) 其他因素:金属成分、杂质元素、晶粒尺寸、焊缝金属与基体金属强度差、焊接与热处理条件。

### 7.13.5 易发生的装置或设备

易发生再热裂纹的装置或设备为：

- a) 厚壁管道、厚壁容器的接管焊接接头等高拘束区；
- b) 高强低合金钢制造的设备；
- c) 消应力热处理或稳定化处理的厚壁不锈钢管道。

### 7.13.6 主要预防措施

再热裂纹的主要预防措施为：

- a) 厚壁部件连接时,在焊接或焊后热处理阶段应充分预热,尽量减少约束；
- b) 采用细晶材料,或细化焊接热影响区的粗大晶粒；
- c) 尽量避免未焊透、未熔合、咬边、焊接裂纹、气孔及夹渣等焊接缺陷；
- d) 在设计和制造过程中,应尽量避免材料横截面急剧变化,如引起应力集中的小半径倒角等;长焊缝焊接时,应改善装配过程导致的不匹配性；
- e) 含稳定化元素不锈钢管道可按照 NB/T 10068 进行热处理。

### 7.13.7 检测或监测方法

再热裂纹的检测或监测方法为：

- a) 碳钢和低合金钢的表面裂纹,采用超声波横波检测和磁粉检测；
- b) 300 系列不锈钢和镍基合金的表面裂纹,采用超声波横波检测和渗透检测；
- c) 埋藏裂纹应采用超声波横波检测等检测方法。

### 7.13.8 相关或伴随的其他损伤

无。

## 7.14 脱金属腐蚀

### 7.14.1 损伤描述及损伤机理

多相合金表面组分的耐腐蚀性能不同,在腐蚀介质的作用下活性较大的组分被优先溶解或氧化,先发生损失,甚至脱除,较稳定的组分则残留下来,呈现多孔特征,导致材料密度降低。

### 7.14.2 损伤形态

脱金属腐蚀的损伤形态为:

- a) 脱金属腐蚀时,一些材料颜色会发生明显变化,或出现侵蚀形貌,跟合金材料性质有关,目视检测时不易发现;
- b) 脱金属腐蚀后的材料密度降低;
- c) 沿壁厚方既可能形成均匀的层状侵蚀,也可能形成局部的楔状腐蚀;
- d) 虽然原材料已发生彻底的脱合金腐蚀,但有时候部件尺寸或其他外观看不出有变化。

### 7.14.3 受影响的材料

铜合金(黄铜、青铜、锡青铜)、蒙乃尔合金 400 和铸铁。

### 7.14.4 主要影响因素

脱金属腐蚀的主要影响因素为:

- a) 材质:敏感材料在特定环境中易发生脱金属腐蚀;
- b) 操作条件:产生脱金属腐蚀的常见情况如表 1 所示。

表 1 脱金属腐蚀的合金和操作环境

合金	操作环境	被脱除元素
黄铜(锌元素含量大于 15%)*	大量水,尤其滞流状态的水	锌
灰铸铁	土壤、大量水	铁
铝青铜(铝元素含量大于 8%)	氢氟酸、含氯离子的酸、海水	铝
硅青铜	高温蒸汽和酸性物质	硅
锡青铜	热盐水或蒸汽	锡
铜镍合金	高热流密度、低流速水	镍
镍基合金	氢氟酸或其他酸	镍

\* 锌元素含量越高,脱锌程度越严重。

### 7.14.5 易发生的装置或设备

易发生脱金属腐蚀的装置或设备为:

- a) 地下铸铁管道;
- b) 盐水、海水、自来水、生活用水环境中使用的黄铜或铝铜换热管及管板;
- c) 锅炉给水管道系统的青铜泵、镍基合金滤网、黄铜压力表附件等。

#### 7.14.6 主要预防措施

脱金属腐蚀的主要预防措施为：

- a) 很难预测在某一工艺条件下脱金属腐蚀是否一定发生,设计人员应熟悉合金脱金属腐蚀敏感性和可能产生的后果,在材料选用时避免上述问题;
- b) 添加一定的合金元素,增强材料的耐腐蚀性能,如铜合金添加锡元素,海军黄铜添加极少量磷、锑、砷等元素,铝青铜通过热处理产生 $\alpha$ 和 $\beta$ 组织能防止脱铝;
- c) 对于发生脱金属腐蚀的在役部件,可改变工艺条件或材质升级来减缓或防止腐蚀;
- d) 设置阴极保护或敷设涂层。

#### 7.14.7 检测或监测方法

脱金属腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 目视检测观察腐蚀区域的颜色变化,去除表面的腐蚀产物后测定腐蚀深度,一般脱金属腐蚀后的黄铜呈淡红色(纯铜);脱石墨腐蚀后的铸铁呈炭灰色,可用小刀等锐器进行刻划检查;
- b) 金相分析;
- c) 硬度测定,材料硬度显著降低表明损伤可能已经比较严重;
- d) 可用声学方法(“金属声”减弱)和超声波衰减方法检测,但用超声波法测厚则不行;
- e) 发生脱金属腐蚀的部件在进行合于使用评价时应考虑脱金属部分的承载能力降低。

#### 7.14.8 相关或伴随的其他损伤

铸铁石墨化腐蚀。

### 7.15 敏化-晶间腐蚀

#### 7.15.1 损伤描述及损伤机理

敏化-晶间腐蚀的损伤机理如下。

- a) 敏化：
  - 1) 普通的 300 系列不锈钢(如 304、316)含碳量较高,属于非稳定态(即不含钛或铌等稳定化元素),室温时碳在奥氏体中的溶解度很小,约为 0.02%~0.03%,远低于不锈钢的实际含碳量,故过饱和的碳被固溶在奥氏体中,当温度超过 425 °C 并在 425 °C~815 °C 范围内停留一段时间时,过饱和的碳就不断地向奥氏体晶粒边界扩散,并和铬元素化合,在晶间形成碳化铬的化合物,如六碳化二十三铬( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ )等。铬在晶粒内扩散速度比沿晶界扩散的速度小,内部的铬来不及向晶界扩散,在晶间形成的碳化铬所需的铬主要来自晶界附近,使晶界附近的含铬量大为减少。
  - 2) 当晶界的铬质量分数低到小于 12%时,就形成所谓的“贫铬区”,贫铬区和晶粒本身存在电化学性能差异,使贫铬区(阳极)和处于钝化态的基体(阴极)之间建立起一个具有很大电位差的活化-钝化电池。贫铬区的小阳极和基体的大阴极构成腐蚀电池,在腐蚀介质作用下,贫铬区被快速腐蚀,晶界首先遭到破坏,晶粒间结合力显著减弱,力学性能恶化,机械强度大大降低,然而变形却不明显。这种碳化物在晶界上的析出导致贫铬一般称为敏化,可引起材料耐晶间腐蚀能力的下降。
  - 3) 对于含稳定化元素的奥氏体不锈钢,在其焊接接头区域经历多次加热和冷却循环,会在狭窄的特定区域内导致原本溶解在碳化钛(TiC)或碳化铌(NbC)中的碳元素析出,并与铬

元素结合,在晶间形成碳化铬的化合物,如六碳化二十三铬( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ )等,同样形成贫铬区,造成耐腐蚀能力下降。

- b) 晶间腐蚀:金属材料发生敏化后,在腐蚀介质中晶界因耐腐蚀能力较低而发生优先腐蚀;或未发生敏化的材料在特定的腐蚀介质中晶粒边界或晶界附近优先发生腐蚀,使晶粒之间丧失结合力的一种局部破坏过程。发生敏化的奥氏体不锈钢非常容易发生晶间腐蚀。

### 7.15.2 损伤形态

敏化-晶间腐蚀的损伤形态为:

- a) 发生敏化时,一般尺寸、外形无明显变化且不会发生塑性变形;发生晶间腐蚀时如果晶粒脱落不明显,目视检测不太容易发现损伤;
- b) 仅敏化区域可见腐蚀痕迹,如果敏化区间较窄,比如焊接时形成的敏化区,一般出现狭窄腐蚀沟或裂纹;
- c) 敏化部位可能仍保持着明亮的金属光泽,但塑性完全丧失,冷弯时易发生开裂,严重时出现脆断和金属晶粒脱落,落地时甚至没有金属碰撞声,如果已出现晶间腐蚀,有时会出现明显的晶粒脱落,使金属表面光泽黯淡,局部可能出现明显的减薄;
- d) 金相显微镜或扫描电镜下可观察到晶界明显变宽,多呈网状,严重时可观察到明显的晶粒脱落;
- e) 含稳定化元素的奥氏体不锈钢的焊接接头发生敏化和晶间腐蚀时,可在接头区域观察到独有的“刀状腐蚀”(或称刃状腐蚀);
- f) 敏化后的材料在腐蚀介质作用下易发生晶间腐蚀,在高拉伸应力区还常导致沿晶应力腐蚀开裂。

### 7.15.3 受影响的材料

300 系列不锈钢(不含钛或铌等稳定化元素,或含有稳定化元素但未经稳定化处理),有时镍基合金和铝合金也有类似情况。

### 7.15.4 主要影响因素

敏化-晶间腐蚀的主要影响因素为:

- a) 含碳量:含碳量越高,敏化敏感性越高,晶间碳化物析出倾向性越大,也越容易发生晶间腐蚀;
- b) 合金成分:加入钛、铌等能形成稳定碳化物( $\text{TiC}$  或  $\text{NbC}$ )的元素并进行稳定化处理,可降低敏化和晶间腐蚀敏感性;
- c) 热处理:加热到高温进行固溶处理,然后快速冷却(如水冷)形成单一奥氏体相可避免敏化,但现场施工一般不能满足固溶热处理的要求,故一般只用于制造工厂;
- d) 工艺条件:使用 300 系列不锈钢的工段将操作温度降低至  $425\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下可避免敏化发生。

### 7.15.5 易发生的装置或设备

易发生敏化-晶间腐蚀的装置或设备为:

- a) 高温下使用的催化裂化装置 300 系列不锈钢制设备;
- b) 煤气化装置的 300 系列不锈钢制变换气管道;
- c) 乙烯裂解装置裂解和急冷系统中操作温度在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的裂解炉对流段 300 系列不锈钢制过热蒸汽炉管和液态裂解原料炉管;

- d) 尿素装置的尿素合成塔不锈钢衬里；
- e) 其他采用焊接方法进行制造或安装，且未经固溶热处理的 300 系列不锈钢的设备和管道，如果材料为非低碳级的比较敏感；
- f) 发生  $\sigma$  相脆化的 300 系列不锈钢或 400 系列不锈钢制设备或衬里易发生晶间腐蚀（即未敏化也会发生晶间腐蚀）。

#### 7.15.6 主要预防措施

敏化-晶间腐蚀的主要预防措施为：

- a) 选用含碳量低的奥氏体不锈钢可以有效减少敏化的发生，如超低碳奥氏体不锈钢系列；
- b) 添加一定的合金元素，如钛、铌等形成稳定碳化物；
- c) 固溶热处理一般只应用于工厂在制的设备和管道，不推荐在施工现场进行；
- d) 调整钢中奥氏体形成元素与铁素体形成元素的比例，使其具有奥氏体+铁素体双相组织，这种双相组织不易产生晶界敏化；
- e) 对有晶间腐蚀倾向的铁素体不锈钢，在 700 °C ~ 800 °C 进行退火，但应注意可能同时引发其他损伤。

#### 7.15.7 检测或监测方法

敏化-晶间腐蚀的检测或监测方法为：

- a) 敏化一般无法直接观察到，敏化后的材料受介质作用发生腐蚀或开裂，则可能会直接观察到；
- b) 未敏化的材料发生晶间腐蚀时晶粒出现明显脱落，目视检查可观察到表面粗糙不平，甚至部位区域晶粒脱落形成明显的腐蚀带，否则一般难以通过目视检查辨别；
- c) 金相分析或扫描电镜观察；
- d) 对可能发生晶间腐蚀的部位，设置腐蚀挂片做定期测量金属损失量；
- e) 针对敏化过程中贫铬区材料的电磁学性能变化，利用涡流、铁素体含量（磁性法）、矫顽力等电磁方法进行快速检测筛选；
- f) 渗透检测。

#### 7.15.8 相关或伴随的其他损伤

无。

### 7.16 金属热老化

#### 7.16.1 损伤描述及损伤机理

双相钢或铸态奥氏体不锈钢在 280 °C 以上长期服役，材料组织发生变化，可能引起铁素体调幅分解，析出 G 相及碳化物，造成材料脆化。

#### 7.16.2 损伤形态

金属热老化的损伤形态为：

- a) 热老化过程中材料组织结构变化主要集中在铁素体相内；
- b) 经长期热老化后的材料，在冲击载荷下会发生脆性断裂。

#### 7.16.3 受影响的材料

奥氏体不锈钢、双相不锈钢。

#### 7.16.4 主要影响因素

金属热老化的主要影响因素为：

- a) 材料成分：含碳量较高（一般不小于 0.05%，质量分数）且不含 Mo 的铸造奥氏体不锈钢，或奥氏体不锈钢的焊缝，在热老化过程中还会发生  $M_{23}C_6$  在铁素体内或铁素体-奥氏体相界上的析出，加速金属热老化；
- b) 析出相：G 相、 $M_{23}C_6$ 、Nb(C,N) 在铁素体内或铁素体-奥氏体相界上的析出，均对金属热老化有促进作用；
- c) 服役时间：随着服役时间的延长，金属热老化加剧；
- d) 温度：通常情况下温度越高，脆化越严重。

#### 7.16.5 易发生的装置或设备

易发生金属热老化的装置或设备为：

- a) 核电压水堆反应堆冷却剂泵，主回路压力边界的重要不锈钢构件，如主管道直管与弯头、稳压器喷嘴、压力容器接管安全端焊缝、主泵壳、阀门等；
- b) 制氢装置：制氢转化炉炉管；
- c) 乙烯裂解装置：裂解炉辐射段炉管。

#### 7.16.6 主要预防措施

金属热老化的主要预防措施为：

- a) 选材：选用超低碳、含钼的铸造奥氏体不锈钢；
- b) 控制温度：服役过程中避免较长时间的超温运行，如双相不锈钢一般不得超过 280℃。

#### 7.16.7 检测或监测方法

金属热老化的检测或监测方法为：

- a) 直接测试法：在设备上取样进行冲击试验和/或显微硬度测试；
- b) 间接测试法：设置相同材质的挂片，定期取出一部分制样进行冲击试验和/或显微硬度测试；或者以与材料性能相关联的电化学参数测试法来确定热老化程度。

#### 7.16.8 相关或伴随的其他损伤

475℃脆化、 $\sigma$ 相脆化、蠕变。

### 8 机械损伤

#### 8.1 机械疲劳

##### 8.1.1 损伤描述及损伤机理

在循环机械载荷作用下，材料、零件或构件在一处或几处产生局部永久性累积损伤而产生裂纹的过程。经一定循环次数后，裂纹不断扩展，可能导致突然完全断裂。

损伤可分为 3 个阶段：

- a) 微观裂纹萌生：在循环机械载荷作用下，材料内部的不连续或不均匀处，以及表面或近表面区易形成高应力，在驻留滑移带、晶界和夹杂部位形成严重应力集中点引发微观裂纹的萌生；

- b) 宏观裂纹扩展:微观裂纹在应力作用下进一步扩展,发展成为宏观裂纹,宏观裂纹基本与主应力方向相垂直;
- c) 瞬时断裂:宏观裂纹扩大到使构件残存截面不足以承受外载荷时,就会在某一次循环载荷作用下突然断裂。

### 8.1.2 损伤形态

机械疲劳的损伤形态为:

- a) 对应 3 个阶段,在宏观断口上一般可分别观察到疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区 3 个特征区。疲劳源区通常面积较小,色泽光亮,由两个断裂面对磨造成;疲劳裂纹扩展区通常比较平整,间隙加载、应力较大改变或裂纹扩展受阻等过程多会在裂纹扩展前沿形成系列疲劳辉纹或海滩花样;瞬断区则具有静载断口的形貌,表面呈现出较粗糙的颗粒状。
- b) 在扫描和透射电子显微镜下可观察到机械疲劳断口的微观特征,典型特征为扩展区中每一应力循环所遗留的疲劳辉纹。

### 8.1.3 受影响的材料

所有金属材料。

### 8.1.4 主要影响因素

机械疲劳的主要影响因素为:

- a) 几何形状:机械疲劳损伤通常起始于周期载荷下几何形状不连续处的表面,构件设计时几何形状的选择具有较大的影响,易致机械疲劳的常见几何形状不连续处有槽口、开孔、焊接接头、缺陷、错边、腐蚀坑、螺纹根部缺口等;
- b) 冶金和显微结构:材料内部存在冶金和显微结构的不连续,如金属夹杂物、锻造缺陷、修磨后的焊接接头、工卡具划痕、机械磨损划痕和机械加工刀痕等位置,易产生机械疲劳损伤;
- c) 应力:碳钢、低合金钢和钛材在疲劳极限以下服役不会发生疲劳开裂,300 系列不锈钢、400 系列不锈钢、铝和多数其他非铁基合金没有疲劳极限,在循环机械载荷作用下最终发生疲劳断裂,与应力大小无关,故对这类材料多用给定应力下经一定循环次数后发生疲劳开裂的最大应力幅度作为其疲劳极限,循环次数一般取为  $10^6 \sim 10^7$ ;
- d) 热处理和微观组织:热处理可改善冶金和显微结构不连续,降低机械疲劳损伤的敏感性,如调质处理(淬火+回火)可提高碳钢和低合金钢的耐疲劳能力,一般来说细晶微观组织比粗晶微观组织耐疲劳性能好;
- e) 循环次数:碳钢、低合金钢和钛材在高于疲劳极限时,循环次数越大,疲劳损伤致失效可能性越高。

### 8.1.5 易发生的装置或设备

易发生机械疲劳的装置或设备为:

- a) 减压阀、流量调节阀附近的设备和管道;
- b) 需要间歇性使用的辅助或备用设备,如辅助锅炉;
- c) 水洗涤系统:温度周期性变化的设备,如急冷喷嘴;
- d) 离心泵和压缩机:出口和入口管道、缓冲罐的接管和焊接接头;
- e) 机械载荷循环变化的设备,如吸附器/塔;

- f) 其他可能引起共振的设备和管道。

### 8.1.6 主要预防措施

机械疲劳的主要预防措施为：

- a) 优化设计:避免结构不连续,增大边角/过渡角半径,并最大限度减少应力集中;
- b) 选材:设计选材时考虑循环机械载荷的作用,并给定设计疲劳寿命;
- c) 表面粗糙度:降低表面粗糙度,避免工卡具划痕或刀痕成为疲劳源;
- d) 冶金和显微结构:采用合理的热处理工艺和焊接工艺等减少材料内部冶金和显微结构不连续,去除机加工形成的卷边或毛刺,确保焊接接头良好组对或平滑过渡,并减少焊接等过程产生的可能成为起裂源的缺陷;
- e) 钢印:使用低应力钢印或采用其他不打钢印的标记方式。

### 8.1.7 检测或监测方法

机械疲劳的检测或监测方法为：

- a) 目视检测、渗透检测、磁粉检测、涡流检测等,目视检测小直径管,确定是否存在周期性明显振动或晃动,但发生高周疲劳时,开裂或振动情况通常难以察觉;
- b) 振动监测:运行状态下的振动监测有助于判断是否出现高周疲劳或共振情况。对旋转设备进行振动监测,以确定转轴是否处于平衡状态。

### 8.1.8 相关或伴随的其他损伤

振动疲劳。

## 8.2 热疲劳(含热棘轮)

### 8.2.1 损伤描述及损伤机理

热疲劳是温度变化致循环应力作用引发的损伤。温度变化导致零件截面上存在温度梯度,厚壁件尤为明显,在温度梯度最大处可能造成应力集中,应变最大处发生局部开裂,受温度变化引起的周期应力作用不断扩展。高温区间内材料内部组织结构发生变化,降低了材料抗疲劳能力,并促使材料表面和裂纹尖端氧化,甚至局部熔化,加速热疲劳破坏速率。

热棘轮效应是热疲劳的一种特殊形式,在热应力作用下,材料或结构可能会产生逐次递增的非弹性变形,经过一定循环周次后,棘轮变形不断累积,可能导致零件、构件发生永久变形而无法继续使用,或者是引起材料、零件、构件发生延性破坏,表现为一种整体失效。

### 8.2.2 损伤形态

热疲劳(含热棘轮)的损伤形态为：

- a) 热疲劳裂纹始发于受热表面热应变最大区域,一般有若干个疲劳裂纹源,裂纹垂直于应力方向从表面向壁厚深度方向发展,受热表面产生特有的龟裂裂纹,以单个或多个裂纹形式出现,裂纹通常既短且宽呈匕首状,分支少,穿晶型为主,裂隙多充满高温氧化物;
- b) 蒸汽发生器的截面厚度变化处多有应力集中,裂纹易在此类部位及角焊缝根部发生,因约束力产生弯矩的管子上吊钩根部容易起裂,裂纹向管子内扩展并成为环状裂纹;
- c) 吹灰器中的水可引起热疲劳龟裂,以周向裂纹为主,轴向裂纹为辅;
- d) 出现热棘轮效应时,先在局部出现塑性变形,变形不断累积并逐渐增大,对于大多数金属材料,

热棘轮效应的损伤形态表现为下述 3 个阶段,但有些金属的棘轮变形可能只经历前两个阶段,有个别金属甚至会发生塑性安定现象,即在一定的循环周次之后不再继续发生棘轮变形的累积:

- 1) 棘轮变形的减速阶段:在开始产生棘轮变形的最初阶段,发生在某些方向优先进行的晶粒内位错大量增殖,出现塑形变形,使棘轮变形迅速达到一个初始的变形量;随后这些晶粒内位错缠结和塞积,位错增殖率下降,导致棘轮变形的减速;
- 2) 棘轮变形的稳定发展阶段:伴随变形晶粒变形的增加,相邻晶粒由于变形协调,其一部分晶粒取向会转到易发生塑性变形的方向,导致塑性变形的扩散,在塑性变形扩散阶段,棘轮变形成稳定发展状态;
- 3) 棘轮变形加速阶段:塑性变形的晶粒发生塑性累积,在其晶界或表面造成塑性损伤,形成微裂纹,局部区域的损伤累积和微裂纹的长大累积达到一定程度后,宏观变形进入加速阶段,最终发生延性断裂。

### 8.2.3 受影响的材料

所有金属材料。

### 8.2.4 主要影响因素

热疲劳(含热棘轮)的主要影响因素为:

- a) 循环温差:温度变化幅度和频率;
- b) 应力及幅值:零件表面缺口、角焊缝等截面变化处的应力集中都可能成为裂纹萌生部位,随应力升高、应力幅值增大,失效时间缩短;
- c) 循环次数:失效时间随着循环次数的增加而缩短,设备的开车和停车会增加热疲劳损伤的可能性,一般温度变化范围超过大约达到  $110\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 165\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,裂纹就有可能发生;
- d) 温度:表面温度的快速变化,会在部件厚度上或沿着部件长度方向产生温度梯度,加快热疲劳损伤;此外环境温度越高,金属或合金的棘轮变形抗力越低;
- e) 热疲劳与材料导热性、比热等热力学性质有关,且与弹性模量、屈服极限等力学性能有关;
- f) 缺口(如焊脚)和锐角(如接管与容器壳体的连接处),以及其他应力集中部件都可能成为裂纹源;
- g) 热处理:适当的热处理工艺,可提高材料的构件抗棘轮变形的能力。

### 8.2.5 易发生的装置或设备

易发生热疲劳(含热棘轮)的装置或设备为:

- a) 冷、热流体的混合点,如冷凝水和蒸汽系统接触的部位、减温器或调温设备;
- b) 承受温度循环的承压设备,容易产生热棘轮效应,如快增殖反应堆的反应堆容器、压力管道,以及焦化装置的焦炭塔壳体、焦炭塔入口管道,压力容器的焊接喷嘴、减压阀等;
- c) 产蒸汽的过热器及再热器换热管之间的刚性连接件,以及被灰垢等填塞失去滑动能力成为刚性连接的滑动隔离块;
- d) 高温过热器或再热器中韧性较差的水冷壁管;
- e) 乙烯裂解装置的裂解炉管,以及急冷部分急冷锅炉集箱与换热管连接处;
- f) 用含冷凝水的蒸汽驱动吹灰器可能会造成热疲劳损伤,液态水对管子的快速冷却会加快热疲劳损伤,如使用水枪或水炮对水冷壁进行强制冷却。

### 8.2.6 主要预防措施

热疲劳(含热棘轮)的主要预防措施为:

- a) 优化设计:减少应力集中点和热循环次数、焊缝打磨平滑过渡、设备开车和停车时控制加热和冷却速度、减少不同材料连接部件之间的不均匀热膨胀、增加不均匀热膨胀区域结构柔性;对于可能产生棘轮效应的设备,尽量减少反向塑性变形产生,并最大限度地避免应力集中,并确定材料的棘轮边界,对特定构件选材时,判定材料在构件服役工况下是否满足棘轮边界要求,选择处于弹性、弹性安定或塑性安定范围内的材料;
- b) 蒸汽发生设备中避免使用刚性连接件,并保持滑动隔离块的滑动能力;
- c) 增设吹灰器吹灰循环启动阶段的冷凝水排水管路;
- d) 温差较大的冷热流体接触部位增设衬里或套管。

### 8.2.7 检测或监测方法

热疲劳(含热棘轮)的检测或监测方法为:

- a) 目视检测,观察结构是否发生明显变形,对于热棘轮效应,可采用激光全站仪、激光自动扫描三维成像等技术进行变形量测定;
- b) 尺寸测量,检查构件尺寸是否发生持续变化;
- c) 表面磁粉检测或渗透检测;
- d) 无法进行表面检测的,从另一侧进行超声横波检测;
- e) 采用特殊的超声波检测方法检测厚壁反应器的焊接接头。

### 8.2.8 相关或伴随的其他损伤

腐蚀疲劳。

## 8.3 振动疲劳

### 8.3.1 损伤描述及损伤机理

设备或构件在振动载荷、水锤或不稳定流体流动等动态载荷作用下,引起了交变载荷,产生疲劳开裂。

### 8.3.2 损伤形态

振动疲劳的损伤形态为:

- a) 高应力点或结构不连续处萌生裂纹;
- b) 耐火材料振动损伤时会导致耐火材料、锚固系统损伤,甚至引起设备表面温度异常升高。

### 8.3.3 受影响的材料

所有工程材料。

### 8.3.4 主要影响因素

振动疲劳的主要影响因素为:

- a) 振幅和振动频率:振动载荷频率与设备或部件固有频率相等或接近时,开裂可能性极大;
- b) 材质抗疲劳能力;

- c) 支撑不足、支撑过度或刚性连接时可能会发生振动,并在应力集中处或缺口部位起裂。

### 8.3.5 易发生的装置或设备

易发生振动疲劳的装置或设备为:

- a) 泵、压缩机的管道,或与泵、压缩机相连但固定不牢的承插焊缝及小直径管道;
- b) 旋转和往复设备周围的旁通细管以及回流细管;
- c) 与无支撑阀门或控制设备连接的分支细管;
- d) 高压降压力调节阀和蒸汽减压站;
- e) 热交换器管束中发生涡旋脱落时,可能会产生明显的损伤。

### 8.3.6 主要预防措施

振动疲劳的主要预防措施为:

- a) 优化设计:采用加强支撑和减振设施来消除或降低振动,在小口径接管上安装支撑板和加强筋板,取消不必要的接管和检测设施;控制阀和安全阀出口处的流体分离引发的振动,可通过调整接管尺寸和稳流措施降低振动程度;
- b) 当某一振动段被固支时,振动的影响就能消除。在安装固支件或减振器之前,首先应做专门研究分析,但通过移除振源来消除振动的方法不需要这个分析过程;
- c) 其他减少或消除振源,以及改变振源振动频率的方法。

### 8.3.7 检测或监测方法

振动疲劳的检测或监测方法为:

- a) 查找设备振动、管道振动、设备位移、水锤作用的部位;
- b) 检查是否有源自管道部件的明显振动声响,如控制阀和固支件部位;
- c) 在瞬变状态(如启动、关闭、异常运行等)期间进行外观检查,以确认有无发生短期振动;
- d) 使用专用监控设备来测量管道振动;
- e) 进行磁粉检测或渗透检测;
- f) 定期检查管道支架和弹簧吊架;
- g) 隔热层损坏部位可能发生过度振动。

### 8.3.8 相关或伴随的其他损伤

机械疲劳、耐火材料退化。

## 8.4 接触疲劳

### 8.4.1 损伤描述及损伤机理

材料、零件、构件在循环接触应力作用下,摩擦工件材料受法向载荷和切向载荷长期的反复连续作用,产生局部永久性损伤,经一定的循环次数后,接触表面损伤累积产生麻点,形成浅层或深层材料剥落,发生表面疲劳破坏。

### 8.4.2 损伤形态

接触表面多可见针状或痘状的凹坑,俗称麻点,有些凹坑很深,呈贝壳状,有疲劳辉纹的痕迹存在。在刚出现少数麻点时,设备一般仍可继续服役,但随着工作时间的延续,麻点剥落增多,范围扩大,磨损

加剧,附加冲击力增大,甚至引起断裂。

#### 8.4.3 受影响的材料

所有金属材料。

#### 8.4.4 主要影响因素

接触疲劳的主要影响因素为:

- a) 非金属夹杂物:接触面存在非金属夹杂物时,非金属夹杂物与基体金属的交界处产生应力集中,易发生接触疲劳;
- b) 载荷:载荷越大,接触疲劳越严重;
- c) 硬度:材料硬度高时塑性变形抗力强,接触时变形少,裂纹敏感性增强,易形成裂纹源。

#### 8.4.5 易发生的装置或设备

发生相对运动的接触面。

#### 8.4.6 主要预防措施

接触疲劳的主要预防措施为:

- a) 优化结构设计:避免使用过程中接触面发生应力集中或应力水平过高;
- b) 选材:选用非金属夹杂物含量低的材料,材料的含碳量或碳当量应控制在合理的范围,通过热处理等方法将材料硬度控制在合适的范围内;
- c) 焊后热处理:条件允许的情况下提高焊后热处理温度,降低残余应力。

#### 8.4.7 检测或监测方法

接触疲劳的检测或监测方法为:

- a) 目视检测接触面有无麻点或凹坑;
- b) 运行过程监测有无异常声响;
- c) 振动状态监测。

#### 8.4.8 相关或伴随的其他损伤

机械磨损。

### 8.5 机械磨损

#### 8.5.1 损伤描述及损伤机理

两相互接触的表面产生相对摩擦运动,接触点形成的粘着与滑溜不断相互交替,造成材料表面损伤的过程。

损伤可分为3个阶段:

- a) “跑合”阶段:零件表面加工后存在粗糙度,接触点处产生很高的接触应力,材料表面磨损速度也较快,随着机械继续运转,粗糙处凸峰被逐渐磨损,使摩擦表面的实际接触面逐渐增大,接触应力降低,磨损速度逐渐放缓;
- b) “稳定”磨损阶段:经“跑合”后,摩擦表面加工硬化,微观几何形状改变,从而建立了弹性接触界面,正常运转时,摩擦表面处于液体摩擦状态,只是在启动和停车过程中,才出现边界摩擦和半

干摩擦情况,磨损速度降低且基本稳定,磨损量与时间成正比,间隙缓慢增大;

- c) “急剧”磨损阶段:经过长时间“稳定”磨损,产生过大间隙,会产生冲击,润滑油膜有时会被破坏,磨损速度急剧增加,机械效率下降,精度降低,出现异常噪声和振动,最后发生故障停车。

### 8.5.2 损伤形态

零件表面形貌、成分、结构和性能等都随着时间的推移而发生变化,反复磨损作用使零件表面材料损失,后期磨损的渐进性又破坏了前期大部分的磨损特征。

### 8.5.3 受影响的材料

所有金属材料。

### 8.5.4 主要影响因素

接触疲劳的主要影响因素为:

- a) 硬度和韧性:硬度决定其表面抵抗变形的能力,但过高的硬度易使脆性增加,使材料表面产生磨粒状剥落;韧性则可防止磨粒的产生,提高其耐磨性能;
- b) 应力:应力越大,机械磨损越严重;
- c) 润滑:润滑对减少机件的磨损有着重要的作用,润滑不良时存在固-固摩擦,机件运行速度越快磨损越剧烈;润滑良好时即使速度很高,由于润滑油膜的存在仅形成液-固摩擦,磨损增加不明显;
- d) 温度:温度主要影响润滑油黏度及表面张力;
- e) 表面粗糙度:表面粗糙度直接影响耐磨损能力,表面粗糙度越低,磨损的可能性越小;
- f) 装配和安装质量对磨损影响较大,特别是配合间隙,既不应过大,也不应过小。

### 8.5.5 易发生的装置或设备

两个相互接触,且接触表面有相对运动的设备,如热交换器管束和折流板接触的部位、带运转构件的承压设备(搅拌反应器、搅拌混合器等)、螺纹锁紧环热交换器螺纹联接部位。

### 8.5.6 主要预防措施

接触疲劳的主要预防措施为:

- a) 改善摩擦副之间的接触状态,使用润滑剂在摩擦副表面形成润滑介质膜、表面吸附膜或表面反应膜,可以达到减轻磨损的目的;
- b) 选择适当的材料组合;
- c) 对摩擦副表面进行表面强化处理,提高耐磨性的效果显著;
- d) 降低摩擦副表面粗糙度,也可以减少磨损。

### 8.5.7 检测或监测方法

目视检测、称重测量、尺寸测量、声发射监控。

### 8.5.8 相关或伴随的其他损伤

无。

## 8.6 冲刷

### 8.6.1 损伤描述及损伤机理

固体、液体、气体或其任意之间组合发生冲击或相对运动,造成材料表面层机械剥落加速的过程。

### 8.6.2 损伤形态

冲刷可以在很短的时间内造成材料局部严重损失,典型情况有冲刷形成的坑、沟、锐槽、孔和波纹状形貌,且具有一定的方向性。管道输送的液体中含有颗粒物时,低速流动(即小于 1.5 m/s)导致固体颗粒沉降,造成管道底部的冲刷。

### 8.6.3 受影响的材料

所有金属、合金。对炼油装置来说,碳钢、铜合金材质较为明显。耐火材料可能也会受到影响。

### 8.6.4 主要影响因素

冲刷的主要影响因素为:

- a) 硬度:硬度低的合金易发生冲刷损伤,高流速时冲刷严重;硬度高的合金耐冲刷能力强;
- b) 流速:对于每种环境-材料组合,一般都会会有一个流速临界值,大于该临界值时流体冲击就会造成金属损失,在临界值以上流速越高金属损失越快,尤其是软质合金(如铜合金和铝合金)易受机械损伤,可能金属损失严重;
- c) 组分:介质组分的相态,夹带颗粒的尺寸、密度和硬度均影响冲刷能力。

### 8.6.5 易发生的装置或设备

易发生冲刷的装置或设备为:

- a) 输送流动介质的所有设备:管道系统多见于弯管、弯头、三通和异径管部位,以及调节阀和限流孔板的下游部位,设备系统的典型情况有泵、压缩机、发动机、叶轮、搅拌器、搅拌罐、热交换器管束、监测孔板、涡轮叶片、喷射器、出入口接管、刮片、切割片和防冲板等;
- b) 输送催化剂颗粒的气体和夹带颗粒的液体(如浆料)均可引起冲刷,炼油厂催化裂化装置反再系统的催化剂处理设备,如阀门、旋流器、管道、反应器和浆料管道均会因催化剂流动而发生冲刷,焦化装置的焦炭处理设备,上述系统中的泵、压缩机和旋转设备也会发生冲刷;
- c) 煤化工装置:煤粉输送系统及反应系统;
- d) 聚丙烯(聚乙烯)装置:挤压造粒后的粉态或颗粒输送管道;
- e) 精对苯二甲酸(PTA)装置:反应器及其后的浆料系统;
- f) 超高压聚乙烯装置:超高压管道;
- g) 采油装置泥浆输送管道系统,尤其是系统中的泵、压缩机和旋转设备。

### 8.6.6 主要预防措施

冲刷的主要预防措施为:

- a) 设计优化:选择合适的结构和尺寸,典型措施有增加管道直径降低介质流速,采用流线型弯头,增加冲刷部位壁厚等;
- b) 选材:采用耐蚀金属或合金降低介质腐蚀性,形成更致密的保护膜,采用硬度值高的材质,或增设耐磨衬里,或进行表面强化处理等;

- c) 防冲设施:旋风分离器及滑阀中采用耐冲防火材料效果良好,热交换器可设置防冲板,必要时可使用管形护套来减缓冲刷;
- d) 工艺改进:对液体介质进行气体分离,对气体介质进行旋风分离除去固体颗粒。

### 8.6.7 检测或监测方法

冲刷的检测或监测方法为:

- a) 超声检测:超声阵列可用于怀疑区域的扫查,包括沿流动方向、沿径向或其他湍流区等可能存在的冲刷的部位;随机放置的单个超声探头,如果没有落在冲刷部位,可能无法发现损伤;
- b) 红外检测:设备服役过程中检测耐火衬里的完好状态;
- c) 射线检测:剖面射线检测可用于检测冲刷区域,但可能无法确定实际剩余壁厚,可用超声检测方法对厚度进行进一步的测定;
- d) 超声导波技术:常用于直管段冲刷部位的筛查;
- e) 定点测厚;
- f) 流体成分分析:分析流体内固体颗粒的化学成分和颗粒尺寸,帮助确定承压设备系统内的冲刷情况;
- g) 采用流场仿真方法对可能的严重冲刷部位进行预测。

### 8.6.8 相关或伴随的其他损伤

冲蚀、汽蚀。

## 8.7 汽蚀

### 8.7.1 损伤描述及损伤机理

汽蚀是指无数微小气泡形成后又瞬间破灭,形成高度局部化的冲击力,由此造成金属损失。气泡可能来自液体汽化产生的气体、蒸汽、空气或其他液态介质中夹带的气体。

### 8.7.2 损伤形态

汽蚀通常看上去像边缘清晰的点蚀,在旋转部件中也可能形成锐槽,仅出现在流体低压区域。叶轮发生汽蚀时,局部表面可能出现斑痕和裂纹,甚至呈海绵状。

### 8.7.3 受影响的材料

纯铜、黄铜、铸铁、碳钢、低合金钢、300 系列不锈钢、400 系列不锈钢、镍基合金。

### 8.7.4 主要影响因素

汽蚀的主要影响因素为:

- a) 汽蚀余量:有效汽蚀余量低于必需汽蚀余量时,容易发生汽蚀;
- b) 温度:接近液体沸点运行时比较低温度下更易发生汽蚀;
- c) 固体或磨蚀性颗粒:流体中存在固体或磨蚀性颗粒并不是发生汽蚀的必要条件,但如果存在时会加速汽蚀损伤。

### 8.7.5 易发生的装置或设备

易发生汽蚀的装置或设备为:

- a) 泵出入口的连接管道、控制阀下游管道；
- b) 局部区域内压力快速变化的限流通道或其他紊流区易发生汽蚀，如热交换器管束、文丘里管。

#### 8.7.6 主要预防措施

汽蚀的主要预防措施为：

- a) 控制压力：保持液体绝对压力在蒸汽压力以上；
- b) 选材：使用硬质表面层或表面堆焊耐磨合金，使用更硬和/或更耐腐蚀的合金，但应注意固-液界面保护膜机械破裂会加速侵蚀，过硬的材料无法经受高的局部压力和破裂气泡的冲击作用；
- c) 使流动路径呈流线型以减少紊流、降低流速、去除夹带的空气、添加添加剂改变流体性质；
- d) 对于改变材料无法明显改善已知环境的汽蚀情况，一般需要进行机械调整，也可以改变设计或操作条件。

#### 8.7.7 检测或监测方法

汽蚀的检测或监测方法为：

- a) 发生汽蚀的部位有可能发出卵石撞击声；
- b) 监测流体的性质，对紊流区域进行声发射监控，检测声音特征频率；
- c) 可疑区域进行外观检查，设备内部超声波检测和射线成像监控壁厚损失。

#### 8.7.8 相关或伴随的其他损伤

冲蚀、冲刷。

### 8.8 过载

#### 8.8.1 损伤描述及损伤机理

外加载荷超过设备的承受极限，导致设备发生变形或破坏。如物料的流动性或其能量在承压设备内处于非平衡状态时，物料和/或能量在容器内发生聚集累加，造成承载压力超过设备最大允许工作压力，形成超压或负压过大，会发生变形、失稳或破裂。

对于超压一般可分为物理超压和化学反应超压。

引起物理超压原因有：

- a) 进料的速度远大于出料的速度，造成物料的突然积聚；
- b) 物料受热膨胀；
- c) 液化气体受热蒸发；
- d) 过热蒸汽温度超限；
- e) 瞬时压力脉动。

引起化学反应超压的原因有：

- a) 可燃气体燃爆；
- b) 粉尘燃爆；
- c) 放热化学反应失控；
- d) 化学反应产生的气体量远大于消耗的气体量。

#### 8.8.2 损伤形态

超压可使材料发生塑性变形、失稳，甚至导致容器的韧性破裂。

### 8.8.3 受影响的材料

所有金属材料。

### 8.8.4 主要影响因素

过载的主要影响因素为：

- a) 设备设计：设备设计的安全裕度过小，在设备运行状态不稳定时等情况下可能发生超压；
- b) 操作规程：操作规程应明确设备的弹性操作范围，避免操作失当引起的超压；
- c) 工艺设计：工艺设计应考虑高压系统窜入中、低压系统的可能性，并设置相应的安全连锁系统。工艺设计同样应考虑反应过程发生非受控化学反应的可能性，并避免采用此类生产工艺。

### 8.8.5 易发生的装置或设备

易发生过载的装置或设备为：

- a) 所有承压设备和管道，包括真空设备或操作工程中可能产生负压的设备，如常压储罐；
- b) 地质灾害、恶劣天气等易发地区的承压设备。

### 8.8.6 主要预防措施

过载的主要预防措施为：

- a) 避免操作失当造成的超压事故，对于压力来自外部压力源（如气体压缩机、蒸汽锅炉）的容器，超压多由操作失当引起，除应装设安全连锁装置外，还应严格执行操作规程的要求；通过减压阀降低压力后才进气的容器，要密切注意减压装置的工作情况，并装设灵敏可靠的安全泄压装置；
- b) 对于因设备内物料发生化学反应而产生超压的设备，应严格控制每次投料量及原料中杂质的含量，并设置防止投料超量的严密措施；
- c) 贮装液化气体的设备，应严格按照规定的充装量充装，并防止设备意外受热，这类设备如超量充装或意外受热，可因温度升高而发生超压；
- d) 贮装易于发生聚合反应并释放热量的烃类容器，应在物料中加入阻聚剂，并防止混入能促进聚合的杂质，且容器内物料贮存时间不宜过长；
- e) 增加设备设计的安全裕度，尤其注意设备所在地区发生地质灾害、恶劣天气的可能性；
- f) 改善设备服役环境，如风灾频发地区为关键设备建立抗强风塔架等。

### 8.8.7 检测或监测方法

过载的检测或监测方法为：

- a) 目视检测；
- b) 压力监测，设置超压自动泄放装置，并对可能发生超压的设备建立压力远程监控系统；
- c) 应变测试，对屈强比高，在超压状态下变形不明显的设备可进行应变测试，确定变形程度。

### 8.8.8 相关或伴随的其他损伤

低温脆断。

## 8.9 热冲击

### 8.9.1 损伤描述及损伤机理

金属材料受到急剧的加热或冷却时,局部温度发生剧烈的变化,其内部将产生较大温差,产生变形不协调形成高热应力,甚至可能超过材料的屈服极限,导致开裂或金属部件损坏。常见情况如温度较低的液体与温度相对较高的金属表面接触时,易发生热冲击。

### 8.9.2 损伤形态

热冲击引发的表面开裂多呈现为“发丝状”裂纹。

### 8.9.3 受影响的材料

所有金属材料。

### 8.9.4 主要影响因素

热冲击的主要影响因素为:

- a) 温差:剧烈升温或降温造成的温差越大,热冲击损伤可能性越大,如受火产生的高温,雨水喷淋带来的水淬冷却引起的低温变化,且用来防止因温度变化而产生膨胀或收缩变形的约束构件容易发生开裂,以及厚截面会产生很高的温度梯度;
- b) 热膨胀系数:不锈钢具有比碳钢和合金钢或镍基合金更高的热膨胀系数,经历同幅度的剧烈升温或降温时产生的应力可能更大,热冲击损伤的可能性也更高;
- c) 铸件的缺陷处在发生热冲击时易萌生裂纹,并沿厚度方向扩展。

### 8.9.5 易发生的装置或设备

易发生热冲击的装置或设备为:

- a) 任何装置中的高温设备和管道都可能发生热冲击,催化裂化装置、延迟焦化装置、催化重整装置和加氢装置中的高温管道和设备;
- b) 铸造成形的厚壁构件,尤其材质为高铬钢(如 12Cr)时;
- c) 延展性差的材料,如回火脆化后的铬钼钢;
- d) 停车时应快速冷却的高温服役设备;
- e) 事故状态下或灾害条件下的设备,如低温介质意外泄漏造成的附近设备快速冷却,火灾环境下附近被火焰炙烤的设备。

### 8.9.6 主要预防措施

热冲击的主要预防措施为:

- a) 稳定高温管道中流体状态,防止物料时断时续;
- b) 优化结构设计,减少局部应力集中;
- c) 安装隔热套管,防止低温流体冲击;
- d) 减少雨水或消防水对高温设备的直接喷淋;
- e) 检查高温运行设备和管道的冷流体注入点,确定是否存在潜在热冲击。

### 8.9.7 检测或监测方法

热冲击的检测或监测方法为:

- a) 热冲击损伤多发生在非常狭小的局部区域,难以定位;
- b) 采用表面磁粉检测或渗透检测,确定可能发生热冲击的部位是否已经开裂。

### 8.9.8 相关或伴随的其他损伤

热疲劳。

## 8.10 蠕变

### 8.10.1 损伤描述及损伤机理

在低于屈服应力的载荷作用下,高温设备或设备高温部分金属材料随时间推移缓慢发生塑性变形的过程称为蠕变,蠕变变形导致构件实际承载截面收缩,应力升高,并最终发生不同形式的断裂。蠕变一般可分为以下两类:

- a) 沿晶蠕变:常用高温金属材料(如耐热钢、高温合金等)蠕变的主要形式,在高温、低应力长时间作用下,晶界滑移和晶界扩散比较充分,孔洞、裂纹沿晶界形成和发展;
- b) 穿晶蠕变:高应力条件下,孔洞在晶粒中夹杂物处形成,随蠕变损伤的持续而长大、汇合。

### 8.10.2 损伤形态

蠕变的损伤形态为:

- a) 蠕变损伤的初始阶段一般无明显特征,但可通过扫描电子显微镜观察来识别。蠕变孔洞多在晶界处出现,在中后期形成微裂纹,然后形成宏观裂纹。
- b) 塑性较好的材料在发生应力断裂前可观察到明显的蠕变变形,而塑性较差的材料在发生应力断裂前无明显的蠕变变形。运行温度远高于蠕变温度阈值时,通常可观察到明显的鼓胀、伸长等变形,变形量主要取决于材质、温度与应力水平的三者组合。
- c) 承压设备中温度高、应力集中的部位易发生蠕变,尤其在三通、接管、缺陷和焊接接头等结构不连续处。

### 8.10.3 受影响的材料

所有金属材料。

### 8.10.4 主要影响因素

蠕变的主要影响因素为:

- a) 蠕变变形速率的主要影响因素为材料、应力和温度,损伤速率(或应变速率)对应力和温度比较敏感,比如合金使用温度升高 15℃,或应力升高 15%,可能使合金剩余寿命缩短一半以上;
- b) 温度:在蠕变阈值温度下,一般不发生蠕变变形;高于温度阈值时,蠕变损伤就可能发生;在阈值温度下服役的设备,即使裂纹尖端附近的应力较高,金属部件的寿命也几乎不受影响;
- c) 应力:应力水平越高,蠕变变形速率越大,断裂所需的时间越短;
- d) 蠕变韧性:蠕变韧性低的材料发生蠕变时变形小或没有明显变形。通常高抗拉强度的材料、焊接接头部位、粗晶材料的蠕变韧性较低,更可能发生应力断裂。

### 8.10.5 易发生的装置或设备

易发生蠕变的装置或设备为:

- a) 蠕变温度阈值以上运行的承压设备,如催化重整装置热壁反应器和加热炉炉管、加氢精制装置

加热炉炉管、加氢裂化装置加热炉炉管,催化裂化装置反应器、分馏塔和再生器内构件,乙烯裂解装置的裂解炉炉管,延迟焦化装置的焦化炉炉管和焦炭塔、高温烟气管道等;

- b) 异种钢焊接接头,其焊接接头热影响区和局部高应力区易发生蠕变,接管焊缝热影响区和催化重整反应器的高应力区,一些高温管道和催化重整反应器的长焊缝均可能出现低蠕变延展性失效;
- c) 高温运行的其他设备,如加热炉中的炉管、管座、管吊架,及锅炉主蒸汽管道、炉内构件都比较敏感。

#### 8.10.6 主要预防措施

蠕变的主要预防措施为:

- a) 优化设计:设计时充分考虑各种不利因素,选择合理的截面形式和开孔补强,降低局部高应力,并使过热点和局部过热情况减到最小;
- b) 材料合金成分:选用蠕变韧性余量大的材料,或添加合适的合金成分,并进行合适的焊后热处理提高材料蠕变韧性;
- c) 修复或更换:蠕变损伤不可逆,一旦检测到损伤或开裂,应进行寿命评价,发现严重损伤或裂纹时应修复或更换,采用焊接方法的宜选择较高的焊后热处理温度;
- d) 工艺优化:改进工艺运行参数或物料组份比,降低工艺运行温度至蠕变阈值以下,或减少设备局部过热情况,并减少结垢或沉积,对结垢和沉积物及时进行清除。

#### 8.10.7 检测或监测方法

蠕变的检测或监测方法为:

- a) 在役设备采用红外线监测方法观察有无过热,停车时对怀疑存在过热的部位和应力状态复杂的部位进行目视检测和厚度测量,发现存在明显变形时可进行表面磁粉检测或渗透检测确认是否开裂,必要时可通过金相检查来分析损伤程度,甚至可微损或破坏性取样试验,测试材料高温力学性能;
- b) 在蠕变温度阈值以上运行的铬钼合金制设备,或运行温度接近蠕变阈值设备的焊接接头,应对焊接接头进行目视检测,确认是否有鼓胀、鼓包、开裂、下垂和弧状弯曲,每隔一定周期(2年~4年)进行表面磁粉检测或渗透检测,运行周期较长(8年及以上)的设备补加超声波横波检测,制造时存在缺陷或进行过返修的部位应作为检测重点区域;
- c) 目视检测和变形测量:目视检测是否有鼓胀、鼓包、开裂、下垂和弧状弯曲,对大直径(直径不小于3.5 m)设备采用激光测距仪器检查是否有直径增大情况,对非大直径设备(直径小于3.5 m)用激光测距仪器、蠕变测量尺、量规检查是否有直径增大情况,或在表面设置标记点并测量标记间距有无增大;
- d) 在最可能发生壁厚减薄的地方测量壁厚;
- e) 自动检测机器人可用于关键部件和高风险区域的检测,但需要对检测结果进行评估。

#### 8.10.8 相关或伴随的其他损伤

再热裂纹。

#### 8.11 应变时效

##### 8.11.1 损伤描述及损伤机理

冷加工成形的钢在中等温度下(一般为150℃~350℃)使用一段时间后,材料晶格出现滑移层而

扭曲,产生塑性变形,或者在此温度范围内钢材加工成形、受载变形时,对固溶合金元素的溶解能力下降,呈现出饱和或过饱和状态,促使被溶物质扩散及析出,导致材料韧性及塑性下降,而强度和硬度提高。

### 8.11.2 损伤形态

无明显特征,发生应变时效脆化的钢材对缺陷的敏感性提高,严重时可在低应力作用下直接发生脆断。如允许取样,一般可通过冲击试验判断;金相分析可用于了解脆性裂纹的形成过程,但在断裂发生前一般无法确定是否属于应变时效损伤。

### 8.11.3 受影响的材料

碳钢及 C-0.5Mo 低合金钢。

### 8.11.4 主要影响因素

应变时效的主要影响因素为:

- a) 成分: N、C 元素含量较高的钢材对应变时效脆化更加敏感;
- b) 成形工艺: 轧制、弯曲等成形工艺的应变率、应变速率越大,产生应变时效脆化的可能性越大;
- c) 温度: 敏感温度范围为 150 °C ~ 350 °C;
- d) 应力: 敏感材料在冷加工变形后如未将残余应力消除,在敏感温度范围内易发生应变时效;
- e) 使用: 敏感材料的加载和升温顺序及幅度;
- f) 其他: 敏感材料的裂纹或缺口附近进行焊接作业,易引起应变时效脆化。

### 8.11.5 易发生的装置或设备

采用敏感材料制造,且未将加工残余应力消除的厚壁设备,或工作应力水平高并存在应力集中的设备。

### 8.11.6 主要预防措施

应变时效的主要预防措施为:

- a) 降低钢材的 N 元素含量(如质量分数小于 0.002% 或更低),添加适量的 Al 元素(大于 0.015%),并采用完全脱氧的炼钢工艺;
- b) 敏感材料避免在 150 °C ~ 350 °C 温度范围内加工成形,或冷成形后的敏感材料避免在 150 °C ~ 350 °C 温度范围内的使用;
- c) 对冷加工成形的设备或部件进行消除应力处理,对已发生应变时效脆化的材料可通过专用的热处理工艺恢复材料性能;
- d) 敏感材料焊接修复后应进行热处理恢复材料性能,并对热处理工艺进行评定;焊接修复后若不能进行热处理,可采用预堆边焊以尽量减少已脆化材料在拘束条件下的焊接影响;
- e) 在役的敏感材料制装备,尤其是老旧设备,停车时先降压后降温,开车时先升温后升压。

### 8.11.7 检测或监测方法

应变时效的检测或监测方法为:

- a) 取样测试: 取样进行夏比 V 型冲击试验,但该方法可能会影响设备的结构完整;
- b) 在线检测: 硬度测试等方法可用于材料发生大范围应变时效时的筛选(焊接引起的应变时效损伤除外),微损方法测试材料的韧性变化可用于判定材料脆化程度。

## 8.11.8 相关或伴随的其他损伤

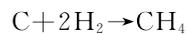
无。

## 9 其他损伤

## 9.1 高温氢腐蚀

## 9.1.1 损伤描述及损伤机理

碳钢和合金钢在高温临氢环境中,氢进入钢材中并与碳反应生成甲烷气体,甲烷进入晶界或夹杂界面的缝隙形成气泡,随气泡压力的增大,靠近钢材表面的气泡会发生形变而鼓凸成为甲烷鼓泡,相邻晶界内气泡会长大并连接形成裂纹,腐蚀部位的钢材同时出现脱碳:



## 9.1.2 损伤形态

高温氢腐蚀的损伤形态为:

- a) 氢腐蚀大致分为 3 个阶段:
  - 1) 孕育期——氢与碳反应会使钢材表面脱碳,若碳向表面扩散速度慢,脱碳就会向内部发展,在晶界,或夹杂界面的缝隙形成甲烷鼓包,可通过扫描电镜观察到鼓泡;
  - 2) 腐蚀期——快速发展期——鼓泡长大到某一临界点后沿晶界连接起来形成微裂纹,钢的体积膨胀,强度和塑性迅速下降,超声波测厚时可能会表现为异常“增厚”;
  - 3) 饱和期——在显微镜下观察试样,可看到脱碳和/或裂纹,有时现场金相分析也能观察到,裂纹彼此连接,钢材力学性能和体积变化渐趋停止;
- b) 碳钢的裂纹呈沿晶扩展,并靠近珠光体组织;
- c) 氢分子或甲烷在钢材中的夹层处聚集,形成的鼓包有些通过目视检查就能发现。

## 9.1.3 受影响的材料

碳钢、钼钢、铬钼钢等,按耐高温氢腐蚀能力递增排序:碳钢、C-0.5Mo、Mn-0.5Mo、1Cr-0.5Mo、1.25Cr-0.5Mo、2.25Cr-1Mo、2.25Cr-1Mo-V、3Cr-1Mo、5Cr-0.5Mo 及具有不同化学成分的类似钢。

## 9.1.4 主要影响因素

高温氢腐蚀的主要影响因素为:

- a) 温度:温度越高,氢腐蚀越严重;
- b) 氢分压:氢分压越高,氢腐蚀越严重;
- c) 材质:钢中碳含量越高,氢腐蚀越严重;
- d) 时间:从损伤开始发生到用合适的检测技术能发现的这段时间为孕育期,孕育期可能是极端苛刻工况下的几个小时或若干年;
- e) Nelson 曲线给出了常见钢材不发生氢腐蚀的温度/氢分压最高容限,选材时应参考该曲线。300 系列不锈钢,以及 5Cr、9Cr 和 12Cr 的合金钢,在炼油装置常见工况中很少发生高温氢腐蚀。

## 9.1.5 易发生的装置或设备

易发生高温氢腐蚀的装置或设备为:



- a) 合成氨装置:热电偶套管、触媒冷却管、转换器和设备衬里;
- b) 加氢精制(加氢脱硫)、加氢裂化、重整加氢等各种加氢装置,以及变压吸附式制氢装置及脱氧装置;
- c) 甲醇装置:变换反应器;
- d) 超高压蒸汽发生装置的锅炉管;
- e) 乙烯裂解装置:甲烷化反应器进出料温度高于 220 °C 的流程,包括甲烷化反应器、进出料热交换器管壳程及相连管道。

### 9.1.6 主要预防措施

高温氢腐蚀的主要预防措施为:

- a) 元素成分:添加铬、钼元素可以提高碳化物的稳定性,减少甲烷的产生,明显改善钢的耐氢腐蚀能力,其他能形成稳定碳化物的合金元素(如钒、钛等),添加后都能提高钢的耐氢腐蚀能力;
- b) 选材:设计时应参照 Nelson 曲线并在其基础上增加 14 °C ~ 28 °C 的安全裕度选择合适的材料;0.5Mo 钢的高温氢腐蚀损伤会出现在焊缝热影响区以及远离焊缝的母材上,新建造的设备不宜使用;
- c) 衬里:300 系列不锈钢衬里或 300 系列不锈钢复合板可用于临氢环境下耐硫化腐蚀能力不足的场所,堆焊层或复合衬里能降低基材的氢分压;
- d) 催化剂:采用可以降低反应温度的催化剂,减少温度的影响。

### 9.1.7 检测或监测方法

高温氢腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 焊缝区、热影响区及母材上都可能发生损伤,因此敏感材料的高温氢腐蚀监测极其困难,需重点检查衬里剥离的区域。
- b) 扫描电镜可检测出试样中高温氢腐蚀早期的鼓泡或孔洞,但很难区分高温氢腐蚀孔洞和蠕变孔洞。炼油厂中的一些低合金钢在运行环境里同时面临高温氢腐蚀和蠕变损伤,只有对损伤区域进行高级金相分析才能辨认出早期阶段的高温氢腐蚀。现场金相检验只能检测出靠近表面的微裂纹、开裂和脱碳,但多数设备制造期的热处理可能早已使设备表面形成了脱碳层。
- c) 声速比值和背散射相结合的超声检测方法,能非常容易地发现严重的开裂。
- d) 内表面目视检测如已发现鼓包,表明可能发生了高温氢腐蚀。但没有出现鼓包不代表没有发生高温氢腐蚀。
- e) 损伤末期阶段,在显微镜下观察试样,可看到脱碳和/或裂纹,有时现场金相分析也能观察到。湿荧光磁粉检测和射线成像检测等其他常规检测方法,在损伤末期已经形成开裂时还有一些检测效果,对于其他阶段的高温氢腐蚀则无效。
- f) 声发射检测的效果不详。

### 9.1.8 相关或伴随的其他损伤

脱碳。

## 9.2 腐蚀疲劳

### 9.2.1 损伤描述及损伤机理

材料在疲劳载荷和腐蚀介质联合作用下发生的破坏,交变应力作用下的应力腐蚀以及在含氢环境

中的疲劳都属于腐蚀疲劳。

### 9.2.2 损伤形态

腐蚀疲劳的损伤形态为：

- a) 疲劳断口呈现脆断特征，裂纹多穿晶，与应力腐蚀开裂的形态相近，起源可能有多处，但腐蚀疲劳裂纹的分叉不明显，常形成多条平行裂纹；
- b) 除过载引起最终断裂时产生塑性变形外，开裂过程中通常几乎没有一丝塑性变形；
- c) 循环锅炉的腐蚀疲劳损伤通常首先出现在支承连接件的水侧，裂纹可能呈环状，将支承连接件与水冷壁管之间焊缝包住；在横截面上，裂纹往往呈球茎状，带有许多凸尖，呈穿晶扩展，尖顶处有些钝圆，裂纹内充满了氧化物；
- d) 硫化环境中的腐蚀疲劳裂纹与循环锅炉水中的疲劳腐蚀裂纹有相似的外观，但裂隙中充满硫化物；
- e) 动设备的腐蚀疲劳裂纹大部分为穿晶型，极少有分叉。

### 9.2.3 受影响的材料

所有金属材料。

### 9.2.4 主要影响因素

腐蚀疲劳的主要影响因素为：

- a) 应力集中：在点蚀坑、缺口、表面缺陷、截面突变或角焊缝等应力集中部位易萌生裂纹；
- b) 周期应力：随热应力、振动或不均匀膨胀引起的周期应力增大，腐蚀疲劳敏感性增高；
- c) 与纯粹的机械疲劳不同，腐蚀疲劳不存在疲劳极限，与无腐蚀时材料的正常疲劳极限相比，腐蚀会在较小应力和较少循环周次时加速疲劳失效，并常引起多条平行裂纹同时扩展；
- d) 环境：任何能促进腐蚀或点蚀，以及任何能促进氢进入环境的因素，均能促进腐蚀疲劳；
- e) 材料：应综合考虑材料的耐疲劳性能和耐腐蚀性能。

### 9.2.5 易发生的装置或设备

易发生腐蚀疲劳的装置或设备为：

- a) 动设备：叶轮和泵轴之间的电偶腐蚀或其他腐蚀机理可能会使泵轴产生点蚀，点蚀部位会产生应力集中或应力梯度，可能引发开裂，大部分开裂为穿晶型，很少有分叉；
- b) 纸浆造纸、炼油、石油化工以及化石燃料业中的主脱气塔，在正常工作环境中使用且受焊接残余应力、加工应力及应力集中（如焊缝余高处、附件焊接部位）影响的部位都可能发生腐蚀疲劳；
- c) 循环锅炉：运行过程中可能会经历数百次冷启动，由于膨胀不均匀导致表面保护性三氧化二铁锈皮不断开裂剥离，促进腐蚀扩展。

### 9.2.6 主要预防措施

腐蚀疲劳的主要预防措施为：

- a) 动设备：利用涂层和/或缓蚀剂改变腐蚀性环境，减少电偶效应，或使用耐蚀性更强的材料；
- b) 脱气塔：控制给水和冷凝水化学成分，通过焊后热处理降低焊接残余应力和加工应力，将焊缝轮廓打磨光滑以降低焊缝余高；
- c) 循环锅炉：缓慢启动以减小膨胀应变的差异，监测锅炉水的化学成分，并始终只在锅炉水化学

成分已得到合理控制后再启动锅炉。

### 9.2.7 检测或监测方法

腐蚀疲劳的检测或监测方法为：

- a) 动设备：超声检测、磁粉检测；
- b) 脱气塔：内壁湿荧光磁粉检测，但非常致密的裂纹难以检测；
- c) 循环锅炉：损伤的早期迹象通常为支承连接件处水冷壁管上冷侧上的针孔泄漏，用超声检测或电磁超声技术来检查锅炉内的高应力区；
- d) 对可能会发生开裂的薄壳高应力区重点检测，尤其是支撑件部位的拐角处。

### 9.2.8 相关或伴随的其他损伤

机械疲劳、振动疲劳。

## 9.3 冲蚀

### 9.3.1 损伤描述及损伤机理

冲蚀是指腐蚀产物因流体冲刷而离开表面，暴露的新鲜金属表面在冲刷和腐蚀的反复作用下发生的损伤，冲刷流体可分为单相流、两相流或多相流。

### 9.3.2 损伤形态

冲蚀可以在很短的时间内造成局部严重腐蚀，形成蚀坑、凹槽、犁沟和凹谷状形貌，且具有一定的方向性。

### 9.3.3 受影响的材料

所有金属、合金和耐火材料。

### 9.3.4 主要影响因素

冲蚀的主要影响因素为：

- a) 介质：强腐蚀性介质会降低表面保护膜稳定性，使冲蚀敏感性增大，不同腐蚀介质的腐蚀速率或对耐冲刷层的破坏能力不一样，发生失效的时间也差别较大，冲蚀造成的损伤通常要远高于冲刷。介质的流速和流态（如湍流），夹带颗粒的尺寸、硬度和密度、冲击角度都对冲蚀有影响。
- b) 材质：提高材料的硬度一般能提高材料耐冲刷性能，但在腐蚀占主导的冲蚀损伤中，应优先考虑材料的耐腐蚀性能。

### 9.3.5 易发生的装置或设备

易发生冲蚀的装置或设备为：

- a) 输送流动腐蚀性介质的所有设备，多见于腐蚀环境下的管道系统，尤其是弯管、弯头、三通和异径管部位，以及减压阀和截止阀的下游管道系统；而对于设备系统，常见如泵、风机、螺旋桨叶、叶轮、搅拌器、搅拌釜、热交换器管束、测量装置孔口、透平叶片、接管、风道和烟道、刮料器、切刀及防冲板等；
- b) 流化床催化裂化装置反再系统中催化剂处理设备（阀门、旋分器、管道和反应器）和输送管道因

催化剂流动而发生损伤,延迟焦化装置和流化床焦化装置中除焦系统,以及炼油厂其他会发生磨损的泵、压缩机及动设备也会发生损伤;

- c) 加氢反应器出料管道可能发生硫化铵冲蚀,金属损失量取决于硫化铵浓度、速度及合金的耐腐蚀能力;
- d) 常减压装置原油中的环烷酸可对容器和管道产生的冲蚀,冲蚀程度取决于流体温度、速度、硫含量及总酸值水平。

### 9.3.6 主要预防措施

冲蚀的主要预防措施为:

- a) 设计优化:以冲刷为主的场合,所有可缓解冲刷的措施均可考虑,如设计形状和几何结构改进,增加管道直径以降低介质流速,采用流线型弯头,增加冲蚀部位壁厚,设置易更换的防冲板等;
- b) 选材:以腐蚀为主导损伤的场合,仅仅提高金属的硬度,耐冲蚀能力不一定能得到明显提升,可采用耐蚀金属或合金,降低介质的腐蚀性,例如除气、注入冷凝剂或添加缓蚀剂,以冲刷为主导损伤的场合,可采用硬度值高的材质,或增设耐磨衬里,或进行表面强化处理等;
- c) 热交换器设置防冲板,必要时使用管形护套来减缓冲蚀;
- d) 面临环烷酸冲蚀环境时,选用钼元素含量高的合金。

### 9.3.7 检测或监测方法

冲蚀的检测或监测方法为:

- a) 壁厚测定:对高流速部位或怀疑部位采用超声检测或射线成像进行壁厚测定;
- b) 探针或挂片:采用在线电阻探针或使用专门的冲蚀试块进行腐蚀监测;
- c) 红外检测:设备服役过程中检测耐火衬里有无减薄等损坏。

### 9.3.8 相关或伴随的其他损伤

冲刷、汽蚀。

## 9.4 蒸汽阻滞

### 9.4.1 损伤描述及损伤机理

蒸汽发生设备运行过程中燃料不断消耗,使水冷壁或产汽管内产生稳定的蒸汽。热能流经管壁使管道内壁表面产生不连续的蒸汽泡,即泡核沸腾,流体流动时将气泡带走。当热量传递受到干扰失去平衡时,比如热通量过大或水侧流速过低,单个气泡会连结形成蒸汽膜(即形成蒸汽阻滞)。一旦蒸汽膜形成,管道因短期过热,通常几分钟内就会发生快速破裂。

### 9.4.2 损伤形态

瞬时高温失效的部位通常会出现一个爆破开裂缺口,断口边缘呈刀刃状。由于失效时发生严重的塑性变形,材料的晶粒会被极度拉长。

### 9.4.3 受影响的材料

碳钢、低合金钢。

### 9.4.4 主要影响因素

蒸汽阻滞的主要影响因素为:

- a) 流体流量:流体流量降低时(例如针孔泄漏会降低蒸汽回路流量),容易引发蒸汽阻滞损伤;
- b) 热通量:火焰方向有误或烧嘴受损时,形成火焰冲击,产生的热通量会超过蒸汽产生管的负荷;
- c) 流动阻力:在水侧如存在阻碍流体流动的情况(例如夹渣掉落形成的管道表面凹陷会增加流动阻力),可能导致局部温度升高并达到蒸汽阻滞的条件。

#### 9.4.5 易发生的装置或设备

易发生蒸汽阻滞的装置或设备为:

- a) 所有蒸汽发生装置,包括燃料锅炉、制硫装置中的废热锅炉;
- b) 加氢重整及流化床催化裂化装置的过热器和再热器在装置开车时如冷凝水阻碍蒸汽流动,容易发生蒸汽阻滞。

#### 9.4.6 主要预防措施

蒸汽阻滞的主要预防措施为:

- a) 烧嘴管理得当可减少火焰冲击情况的发生;
- b) 优化锅炉给水设施,防止流体流动受阻;
- c) 如目视检查管道有鼓胀应及时处理。

#### 9.4.7 检测或监测方法

蒸汽阻滞的检测或监测方法为:

- a) 目视检测;
- b) 检查烧嘴有无变形或受损;
- c) 蒸汽流量监控。

#### 9.4.8 相关或伴随的其他损伤

蒸汽阻滞与短期过热的特征非常相似,出现蒸汽阻滞时可能会伴有碱腐蚀(碱槽)。

### 9.5 低温脆断

#### 9.5.1 损伤描述及损伤机理

金属材料在温度降低至临界值(一般为其韧脆转变温度)以下时,在应力的作用下几乎不发生塑性变形就突然发生的快速断裂。

#### 9.5.2 损伤形态

低温脆断的损伤形态为:

- a) 裂纹多平直、无分叉,几乎没有塑性变形,裂纹周围无剪切唇或局部颈缩;
- b) 断口主要呈解理特征,伴随少量沿晶,几乎没有韧窝。

#### 9.5.3 受影响的材料

易发生脆性断裂的主要有碳钢和低合金钢,尤其是老旧钢材。铁素体不锈钢和马氏体不锈钢也比较敏感。

#### 9.5.4 主要影响因素

低温脆断的主要影响因素为:

- a) 下述 3 个因素组合能满足临界条件时,脆性断裂就会发生:
  - 1) 材料断裂韧性;
  - 2) 缺陷尺寸、形状和应力集中;
  - 3) 缺陷位置残余应力和外加应力;
- b) 随脆性相比例增大,脆性断裂可能性增大;
- c) 材料纯净度、晶粒尺寸对韧性和抗脆性断裂能力有明显影响;
- d) 厚壁材料的高拘束度状态会增加裂纹尖端的三轴应力,抗脆性断裂能力较低;
- e) 温度低于韧脆转变温度时,材料韧性会迅速下降,易发生脆性断裂。

#### 9.5.5 易发生的装置或设备

易发生低温脆断的装置或设备为:

- a) 甲烷、乙烷或乙烯、丙烷或丙烯及丁烯等轻质烃加工装置发生自冷情况时也可能引起脆性断裂,这样的情况可能会出现在烷基化装置、烯烃装置及聚合装置(如聚乙烯和聚丙烯)、乙烯裂解装置(如分离系统中的脱甲烷塔)中,半球形或球形轻烃贮罐对脆断比较敏感;
- b) 大多数装置的运行温度都比较高,因此低温脆断主要发生在开车、停车期间,装置中的任何厚壁设备都需要注意低温脆断的问题;
- c) 常温下或寒冷天气进行水压试验或气密性试验时,因应力高而韧性差,尤其要注意脆性断裂问题。

#### 9.5.6 主要预防措施

低温脆断的主要预防措施为:

- a) 优化设计:设计时应考虑可能发生的低温状态或工况(包括工艺波动和自冷情况),限定材料化学成分,通过热处理工艺降低低温脆断的敏感性,并通过冲击试验进行验证;
- b) 如果应力、材料韧性及缺陷尺寸三者的组合满足高敏感性条件,应依据 GB/T 35013 等标准进行合于使用评价,以确定是否能继续按原参数使用或降压使用;
- c) 控制操作压力和操作温度,开、停车时如不影响工艺,应采用停车时“先降压后降温”、开车“先升温后升压”的工艺,并限定最小升压温度;
- d) 在役设备停车时加强对高应力部位的检验;
- e) 制造期间未进行焊后热处理的在役容器,在经过焊接修复或改造后可进行焊后热处理;
- f) 在用设备进行水压试验时应控制介质温度,一般在设备材料韧脆转变温度的基础上增加一定的温度余量。

#### 9.5.7 检测或监测方法

低温脆断的检测或监测方法为:

- a) 检验通常无法减缓脆性断裂;
- b) 易发生脆断的容器主要应检查已存在的缺陷,尤其是高应力部位的表面无损检测(如磁粉检测和渗透检测)以及埋藏缺陷的超声检测,条件允许的情况优选衍射时差法超声检测(TOFD)技术。

#### 9.5.8 相关或伴随的其他损伤

回火脆化、应变时效、475 °C 脆化、钛氢化、 $\sigma$  相脆化。

## 9.6 过热

### 9.6.1 损伤描述及损伤机理

设备在运行过程中,由于冷却条件恶化等因素,壁温在短时间内快速上升,使钢材的屈服强度急剧下降,在相对较低的应力作用下发生永久变形。

### 9.6.2 损伤形态

过热的损伤形态为:

- a) 局部鼓胀、伸长等明显变形;
- b) 壁厚减薄;
- c) 因损伤导致失效而产生的破裂口呈张开的“鱼嘴”状。

### 9.6.3 受影响的材料

所有燃烧器管子建造用材、普通建材。

### 9.6.4 主要影响因素

过热的主要影响因素为:

- a) 温度:火焰冲击、局部受热、设备局部导热或冷却能力下降等因素会使壁温超过设计温度;
- b) 应力:损伤程度随介质压力或外加载荷的增加而增大,但高温下即使是处于低应力状态,鼓胀变形也可能非常明显;
- c) 腐蚀:腐蚀引起的壁厚减薄可导致应力升高,失效时间缩短。

### 9.6.5 易发生的装置或设备

易发生过热的装置或设备为:

- a) 所有锅炉和燃烧器管都很容易出现过热;
- b) 常减压装置、加氢裂化装置及延迟焦化装置加热炉炉管,存在结焦倾向,易发生局部过热;
- c) 冷壁加氢反应器强制冷却供氢量不足或分布不均时,反应器床层及器壁可能发生局部飞温;
- d) 流化床催化裂化装置、制硫装置及其他装置中有耐火衬里的设备,在耐火材料损坏或过度燃烧时易导致局部过热;
- e) 乙烯裂解装置:裂解炉辐射段炉管,以及乙炔加氢反应器、丙炔或丙二烯加氢反应器(再生工况)。

### 9.6.6 主要预防措施

过热的主要预防措施为:

- a) 监测温度:使局部可能达到的最高温度不超过设计温度,如在冷壁加氢反应器中安装床层热电偶,温度升高时快速注入冷氢,避免局部飞温;
- b) 对燃烧器烧嘴进行良好的维护管理,控制积灰以减少局部过热;
- c) 优化火焰燃烧器结构,使火焰分布更均匀;
- d) 对耐火衬里进行定期维护、保养和更换,保持耐火材料的良好性能。

### 9.6.7 检测或监测方法

过热的检测或监测方法为:

- a) 目视检测、管道红外热成像检测,以及管壁热电偶监测都是燃烧器温度监测的常用方法;
- b) 有耐火衬里的设备使用变色漆和定期红外热成像检测过热情况,停机期间检查耐火材料是否有损坏;
- c) 对反应器床层热电偶和反应器器壁热电偶进行良好的维护,并对检测结果进行监控。

#### 9.6.8 相关或伴随的其他损伤

蠕变。

### 9.7 耐火材料退化

#### 9.7.1 损伤描述及损伤机理

隔热和耐冲刷的耐火材料受到机械损伤,以及氧化、硫化和其他高温损伤的影响,耐火材料出现开裂、剥落或冲蚀,或裸露于湿气中而引起材料软化或均匀退化。

#### 9.7.2 损伤形态

耐火材料退化的损伤形态为:

- a) 可能会出现严重开裂、剥落或剥离,或裸露于湿气中发生软化或均匀退化;
- b) 耐火材料层下可能会析出焦炭沉积物,加速耐火材料的开裂和退化;
- c) 冲蚀环境中使用的耐火材料可能会被冲走或减薄,使耐火材料锚固系统裸露出来。

#### 9.7.3 受影响的材料

耐火材料,包括陶瓷纤维隔热材料、浇注耐火材料、耐火砖和塑性耐火材料。

#### 9.7.4 主要影响因素

耐火材料退化的主要影响因素为:

- a) 耐火材料性能:选用能耐腐蚀、耐热冲击和热膨胀的耐火材料,根据耐磨损和冲刷的需求决定耐火材料的类型和密度;
- b) 锚固材料:选用与母材热膨胀系数相匹配的锚固材料,高温环境中使用的锚固材料应能耐高温氧化,燃烧器和烟气环境中的锚固件应能耐亚硫酸的腐蚀;
- c) 使用维护:定期干燥、养护的时间和操作规程应符合耐火材料制造商的要求;
- d) 耐火材料的固定杆和填充物应能适应工艺环境。

#### 9.7.5 易发生的装置或设备

易发生耐火材料退化的装置或设备为:

- a) 流化床催化裂化装置反应-再生系统的容器、管道、旋分设备、滑阀及内部构件,催化重整冷壁反应器,合成氨装置的气化炉,废热锅炉,制硫装置的热反应器,流化床工艺的焦炭塔;
- b) 使用耐火材料的锅炉燃烧室和烟囱。

#### 9.7.6 主要预防措施

选择合适的耐火材料、锚固件、填充物,并按照规范设计和安装。

#### 9.7.7 检测或监测方法

耐火材料退化的检测或监测方法为:

- a) 运行期间使用红外热像仪监测冷壁设备的高温部位,判断耐火材料的损伤程度;
- b) 停车期间进行耐火材料的目视检测。

### 9.7.8 相关或伴随的其他损伤

高温氧化腐蚀、高温硫化物腐蚀(无氢气环境)、烟气露点腐蚀。

## 9.8 铸铁石墨化腐蚀

### 9.8.1 损伤描述及损伤机理

铸铁的铁基体被腐蚀,形成多孔石墨和金属腐蚀产物的一种脱合金腐蚀形式。

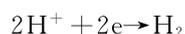
阳极反应:



阴极反应:



或



### 9.8.2 损伤形态

铸铁石墨化腐蚀的损伤形态为:

- a) 可发生大面积的均匀腐蚀,也可能只在局部区域发生;
- b) 即使整个壁厚都已彻底损伤,目视检测时损伤可能并不明显;
- c) 腐蚀部位留下的多孔结构材料,其强度、硬度、韧性和密度均降低,可用锐器轻易凿刻;
- d) 球墨铸铁和可锻铸铁在发生腐蚀后往往会破碎成粉末。

### 9.8.3 受影响的材料

灰铸铁受影响最大,但球墨铸铁和可锻铸铁也会发生石墨化腐蚀。白口铸铁不含游离态石墨,不会发生这种损伤。

### 9.8.4 主要影响因素

铸铁石墨化腐蚀的主要影响因素为:

- a) 时间:铸铁与腐蚀介质的接触时间越长,腐蚀越严重;
- b) 温度:潮湿或有水的环境中发生石墨化腐蚀的温度通常低于 93 ℃;
- c) pH 值:pH 值降低,腐蚀可能更严重,高浓度硫酸盐溶液滞流期间易发生腐蚀;
- d) 介质特性:通常只有满足特殊微观组织——环境组合时,才会发生铸铁的石墨化腐蚀。铁基体为阳极,石墨为阴极,铁基体优先腐蚀,保护了石墨阴极,这个电偶腐蚀过程还可能会影响到邻近的部件。

### 9.8.5 易发生的装置或设备

石墨腐蚀可在软化水、盐水、井水、稀酸条件下发生,地下管道以及锅炉给水设备也可能发生石墨腐蚀,例如给水管、泵(包括泵叶轮)、阀门和地下铸铁管,消防水系统尤其容易发生损伤。

### 9.8.6 主要预防措施

铸铁石墨化腐蚀的主要预防措施为:

- a) 内部石墨化腐蚀:设置防腐涂层和/或水泥衬里;
- b) 外部石墨化腐蚀:腐蚀性严重的土壤中,可在外侧设置防腐涂层或阴极保护。

#### 9.8.7 检测或监测方法

铸铁石墨化腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 在给定环境或使用条件下,常常很难预测是否会发生石墨化腐蚀,了解铸铁材料的特性,分析其敏感性非常必要;
- b) 硬度测定:选择有代表性的部位进行硬度测定;
- c) 常规的超声波检测不是检测石墨化腐蚀的有效方法;
- d) 声学技术(“金属声”减弱)和超声波衰减检测有一定的有效性。

#### 9.8.8 相关或伴随的其他损伤

石墨化腐蚀是铸铁发生的一种脱合金腐蚀形式,与高温下碳化物分解产生的石墨化损伤完全不同。

### 9.9 微动腐蚀

#### 9.9.1 损伤描述及损伤机理

两个接触表面之间发生极小振幅(微米量级)的相对运动形成微动,在腐蚀性介质环境下的微动即微动腐蚀。微动破坏了金属表面氧化膜,裸露出来的新鲜金属被迅速氧化,磨损和氧化反复进行,造成腐蚀加速。金属表面接触受压还可能产生冷焊或熔化,随后的相对运动会使金属颗粒脱落,并迅速氧化。

#### 9.9.2 损伤形态

微动腐蚀一般发生在往复运动的表面,腐蚀产物可导致两部件咬死,或使接触面超过容许公差,甚至产生局部沟槽、波纹、圆孔和山谷形蚀坑,通常具有一定的方向性。

#### 9.9.3 受影响的材料

表面低硬度的金属。

#### 9.9.4 主要影响因素

微动腐蚀的主要影响因素为:

- a) 载荷:载荷越大,往复的周期越短,腐蚀越严重;
- b) 硬度:随表面硬度降低,微动腐蚀速率增大;
- c) 介质:介质腐蚀能力强时,微动腐蚀加剧;
- d) 腐蚀产物膜:腐蚀产物膜在微动时越容易脱落,腐蚀速率越大。

#### 9.9.5 易发生的装置或设备

热交换器管束和折流板接触部位、折流板和壳体接触部位、搅拌轴和接管接触部位。

#### 9.9.6 主要预防措施

微动腐蚀的主要预防措施为:

- a) 润滑剂:接触表面涂润滑油脂、石墨等润滑剂;

- b) 选材:选用硬质合金等高硬度材质;
- c) 表面处理:接触部位进行磷化处理、渗铝、渗锌、喷丸处理或冷加工,或爆炸喷涂及等离子喷涂碳化钨-钴、碳化铬-镍铬涂层;
- d) 阴极保护:采用牺牲阳极等方法减缓接触部位电偶腐蚀倾向;
- e) 降低表面粗糙度:降低接触部位加工制造时的表面粗糙度。

### 9.9.7 检测或监测方法

微动腐蚀的检测或监测方法为:

- a) 检测方法一般为目视检测和腐蚀部位壁厚测定;
- b) 若腐蚀发生在内壁而只能从外部检测时,可用超声波自动扫查、导波检测或射线成像查找减薄部位,并对减薄部位进行壁厚测定;
- c) 腐蚀产物的收集和分析;
- d) 远场涡流检测或漏磁检测。

### 9.9.8 相关或伴随的其他损伤

腐蚀疲劳、机械磨损。

### 9.10 高含氧气体促发的燃烧、爆炸

#### 9.10.1 损伤描述及损伤机理

在空气中不可燃的金属,在高含氧气体环境中(氧气体积分数大于 25%)可能成为可燃物,一旦温度达到燃点或形成点火条件就会发生燃烧,甚至引起火灾、爆炸。液氧环境下的燃烧和爆炸一般比高含氧气体更剧烈。

#### 9.10.2 损伤形态

高含氧气体促发的燃烧、爆炸的损伤形态为:

- a) 小型零部件(如阀座)燃烧可能只造成极小范围的影响,而没有引燃更多其他材料,外观甚至无明显异常,但其功能已受损或完全丧失,拆解维修或更换时才能被发现;
- b) 若管道外壁面异常灼烫或新出现了回火色,其内部可能已发生了燃烧,重点应关注管道低洼处等屑垢聚集部位有无发生阴燃或燃烧;
- c) 金属等材料在高含氧气体中发生燃烧或爆炸,使温度升高,而材料强度等性能下降,承压壳体可能因此发生破裂,燃烧剧烈时可造成结构损坏。

#### 9.10.3 受影响的材料

易发生高含氧气体促发的燃烧、爆炸的材料为:

- a) 压力大于或等于 0.1 MPa 的低压氧气中,碳钢和低合金钢即可能发生燃烧;在高压氧气环境中,碳钢和低合金钢材质需要采取特殊的防护措施;
- b) 压力小于 1.38 MPa 的氧气中,奥氏体不锈钢一般很难着火,比较耐燃;
- c) 铜合金(铜含量大于 55%)和镍基合金(镍含量大于 50%)在高含氧气体中非常耐燃,蒙乃尔合金 400 则特别耐燃,选材时均可按“不可燃”选用;
- d) 铝材在高含氧气体着火时燃烧迅速,释放出大量热量,破坏性强,因此铝材可用于制作氧气瓶,但一般不可用于制作氧气管道;

- e) 塑料、橡胶和润滑油等有机物在高含氧气体中极易着火,严禁接触或使用;
- f) 钛合金在高含氧气体燃点较低,在 7 kPa 的低压氧气中可持续燃烧,释放出大量热量,因此禁止使用。

#### 9.10.4 主要影响因素

高含氧气体促发的燃烧、爆炸的主要影响因素为:

- a) 高含氧气体中材料着火和燃烧的主要影响因素有气体压力、氧含量、流动速率、材料厚度、结构、洁净度、温度和湿度;
- b) 夹带有固体颗粒的高含氧气体在高速流动时,因固体颗粒与材料表面的摩擦、撞击容易使材料局部温度升高或产生火星而着火燃烧,影响高含氧气体系统的安全运行;
- c) 系统洁净度比较关键,安装或检修时混入高含氧气体系统的金属颗粒或有机物(如油和油脂)等,在系统开车时容易着火,可能会引起大范围的火灾,甚至破坏整个系统;
- d) 材料可燃性与温度有关,温度升高后点火和稳定燃烧所需的能量就会降低,目前各相关规范标准中给出的金属材料燃点,均在气体相对静止的环境中测定,接近金属和合金的熔点,但在实际投料运行的高含氧气体系统中,即使是在室温或更低温度下,因固体颗粒撞击和摩擦等作用,金属材料也会着火燃烧;
- e) 高含氧气体中氧气所占的比例越大、分压越高,越容易引发燃烧、爆炸;
- f) 干燥的氧气对金属无腐蚀性。

#### 9.10.5 易发生的装置或设备

易发生高含氧气体促发的燃烧、爆炸的装置或设备为:

- a) 任何使用或产生高含氧气体(包括纯氧气)的装置,如空气分离装置、硫磺回收装置(SRU)、流化床催化裂化装置(FCCU)、煤气化装置和煤制氢装置(部分氧化法,即 POX);
- b) 所有工业生产用到的氧气输送系统,尤其是氧气管道的弯头、三通、阀门和其他存在严重湍流、颗粒物撞击的区域,以及氧气过滤器等;
- c) 与高含氧气体接触的非金属(如阀座、密封件等所用非金属),比金属更容易着火;
- d) 使用或维护不当的氧舱;
- e) 液氧系统一般在深冷条件下运行,但其一旦泄漏可迅速气化扩散,容易引发燃烧、爆炸。

#### 9.10.6 主要预防措施

高含氧气体促发的燃烧、爆炸的主要预防措施为:

- a) 系统:
  - 1) 保持系统洁净。检测和检修后进行有效清洁最为有效。为防异物混入氧气系统,非必要情况时不得拆开氧气系统进行目视检测或其他检验。
  - 2) 尽量降低系统压力、温度、流速,并保持其稳定。系统压力尽量避免突然变化,防止盲端绝热压缩升温等引起的着火燃烧。绝热压缩引起的温度升高可点燃塑料和橡胶,但一般不能直接点燃金属;不过阀座、密封圈、非金属软管等若被点燃,产生的热量就可进一步使金属材料着火燃烧。系统改造时,若需提高氧气系统的压力、温度或流速,应先进行详细的评估论证。
  - 3) 系统操作:系统开车时应尽量减少人工开关阀门等作业,并保持足够的安全间距。氧舱使用和维护时应严格遵守相关规范和标准的要求,特别要注意防止进氧气舱的人员携带火

种或电子产品、穿戴不防静电的衣物或首饰。

- b) 流速:保持氧气流速在规定的范围内,且应考虑压力和流动状态(直接撞击、非直接撞击)的影响,氧气的设计流速应进一步降低,如不超过 30 m/s。
- c) 选材:确保维修更换的构件适用于高含氧气体环境。铜合金(铜含量大于 55%)、镍基合金(镍含量大于 50%)、蒙乃尔合金 400 均可按“不可燃”选用,也适用于有湍流和颗粒物冲击的场合,如阀门和仪表。氧气系统禁止使用有机塑料制品。
- d) 其他:尽量不用润滑油,必须使用时只用耐氧润滑油。液氧系统发现泄漏时应及时停车检查和维修。

#### 9.10.7 检测或监测方法

高含氧气体促发的燃烧、爆炸的检测或监测方法为:

- a) 在高含氧气体的特定环境下,金属会突发火灾或爆炸,很难事先予以检验;
- b) 监测氧气湿度,防止腐蚀产物的影响;
- c) 设备外壁异常灼烫,或者阀门/其他非金属构件出现故障时(如阀门无法彻底关闭),可能已发生了局部区域的燃烧,可采用红外热像仪等进行非接触式在线监测;
- d) 黑光灯可用于检查是否存在有机物杂质。

#### 9.10.8 相关或伴随的其他损伤

过热、高温氧化。

附 录 A  
(资料性)  
承压设备损伤模式索引

表 A.1~表 A.5 分别给出了损伤模式的索引,以及本文件附录 B 中对应的标引序号。

表 A.1 腐蚀减薄

序号	损伤模式	本文件章条号	本文件附录 B 中对应的标引序号
1	盐酸腐蚀	5.1	⑨
2	硫酸腐蚀	5.2	⑩
3	氢氟酸腐蚀	5.3	⑪
4	磷酸腐蚀	5.4	⑫
5	二氧化碳腐蚀	5.5	⑬
6	环烷酸腐蚀	5.6	⑭
7	苯酚腐蚀	5.7	⑮
8	低分子有机酸腐蚀	5.8	⑯
9	高温氧化	5.9	⑰
10	大气腐蚀(无隔热层)	5.10	无此项
11	大气腐蚀(有隔热层)	5.11	⑱
12	冷却水腐蚀	5.12	⑲
13	土壤腐蚀	5.13	⑳
14	微生物腐蚀	5.14	㉑
15	锅炉冷凝水腐蚀	5.15	㉒
16	碱腐蚀	5.16	㉓
17	煤灰腐蚀	5.17	㉔
18	烟气露点腐蚀	5.18	㉕
19	氯化铵腐蚀	5.19	㉖
20	胺腐蚀	5.20	㉗
21	高温硫化物腐蚀(无氢气环境)	5.21	①
22	高温硫化物腐蚀(氢气环境)	5.22	②
23	酸性水腐蚀(碱式酸性水)	5.23	③
24	酸性水腐蚀(酸式酸性水)	5.24	④
25	甲铵腐蚀	5.25	⑤
26	电偶腐蚀	5.26	⑥

表 A.1 腐蚀减薄（续）

序号	损伤模式	本文件章条号	本文件附录 B 中对应的标引序号
27	含盐水腐蚀	5.27	⑥7
28	含氧工艺水腐蚀	5.28	无此项
29	浓差电池腐蚀	5.29	无此项

表 A.2 环境开裂

序号	损伤模式	本文件章条号	本文件附录 B 中对应的标引序号
1	氯化物应力腐蚀开裂	6.1	②3
2	碳酸盐应力腐蚀开裂	6.2	②1
3	硝酸盐应力腐蚀开裂	6.3	⑥5
4	碱应力腐蚀开裂	6.4	①8
5	氨应力腐蚀开裂	6.5	④8
6	胺应力腐蚀开裂	6.6	②2
7	湿硫化氢破坏	6.7	②
8	氢氟酸致氢应力开裂	6.8	④0
9	氢氰酸致氢应力开裂	6.9	无此项
10	氢脆	6.10	②5
11	高温水应力腐蚀开裂	6.11	无此项
12	连多硫酸应力腐蚀开裂	6.12	⑤
13	液体金属脆断	6.13	⑤2
14	乙醇应力腐蚀开裂	6.14	无此项
15	硫酸盐应力腐蚀开裂	6.15	无此项
16	氢氟酸应力腐蚀开裂	6.16	无此项

表 A.3 材质劣化

序号	损伤模式	本文件章条号	本文件附录 B 中对应的标引序号
1	晶粒长大	7.1	无此项
2	渗氮	7.2	⑤5
3	球化	7.3	④4
4	石墨化	7.4	①5
5	渗碳	7.5	②4

表 A.3 材质劣化（续）

序号	损伤模式	本文件章条号	本文件附录 B 中对应的标引序号
6	脱碳	7.6	⑰
7	金属粉化	7.7	⑤⑨
8	$\sigma$ 相脆化	7.8	⑳
9	475℃脆化	7.9	㉓
10	回火脆化	7.10	⑰
11	辐照脆化	7.11	无此项
12	钛氢化	7.12	⑤⑦
13	再热裂纹	7.13	⑤⑤
14	脱金属腐蚀	7.14	④①
15	敏化-晶间腐蚀	7.15	⑥⑦
16	金属热老化	7.16	⑦①

表 A.4 机械损伤

序号	损伤模式	本文件章条号	本文件附录 B 中对应的标引序号
1	机械疲劳	8.1	⑤④
2	热疲劳	8.2	⑫
3	振动疲劳	8.3	⑤⑤
4	接触疲劳	8.4	无此项
5	机械磨损	8.5	无此项
6	冲刷	8.6	⑥⑥
7	汽蚀	8.7	⑳
8	过载	8.8	无此项
9	热冲击	8.9	㉔
10	蠕变	8.10	③
11	应变时效	8.11	⑥⑩

表 A.5 其他损伤

序号	损伤模式	本文件章条号	本文件附录 B 中对应的标引序号
1	高温氢腐蚀	9.1	⑩
2	腐蚀疲劳	9.2	④③

表 A.5 其他损伤（续）

序号	损伤模式	本文件条款号	本文件附录 B 中对应的标引序号
3	冲蚀	9.3	㉓
4	蒸汽阻滞	9.4	㉔
5	低温脆断	9.5	㉕
6	过热	9.6	㉖
7	耐火材料退化	9.7	㉗
8	铸铁石墨化腐蚀	9.8	㉘
9	微动腐蚀	9.9	无此项
10	高含氧气体促发的燃烧、爆炸	9.10	无此项

附 录 B

(资料性)

典型过程成套装置承压设备损伤分布图

图 B.1~图 B.27 分别给出了典型过程成套装置承压设备损伤分布情况,图中标引序号所代表损伤与本文件各损伤的对应关系见附录 A。





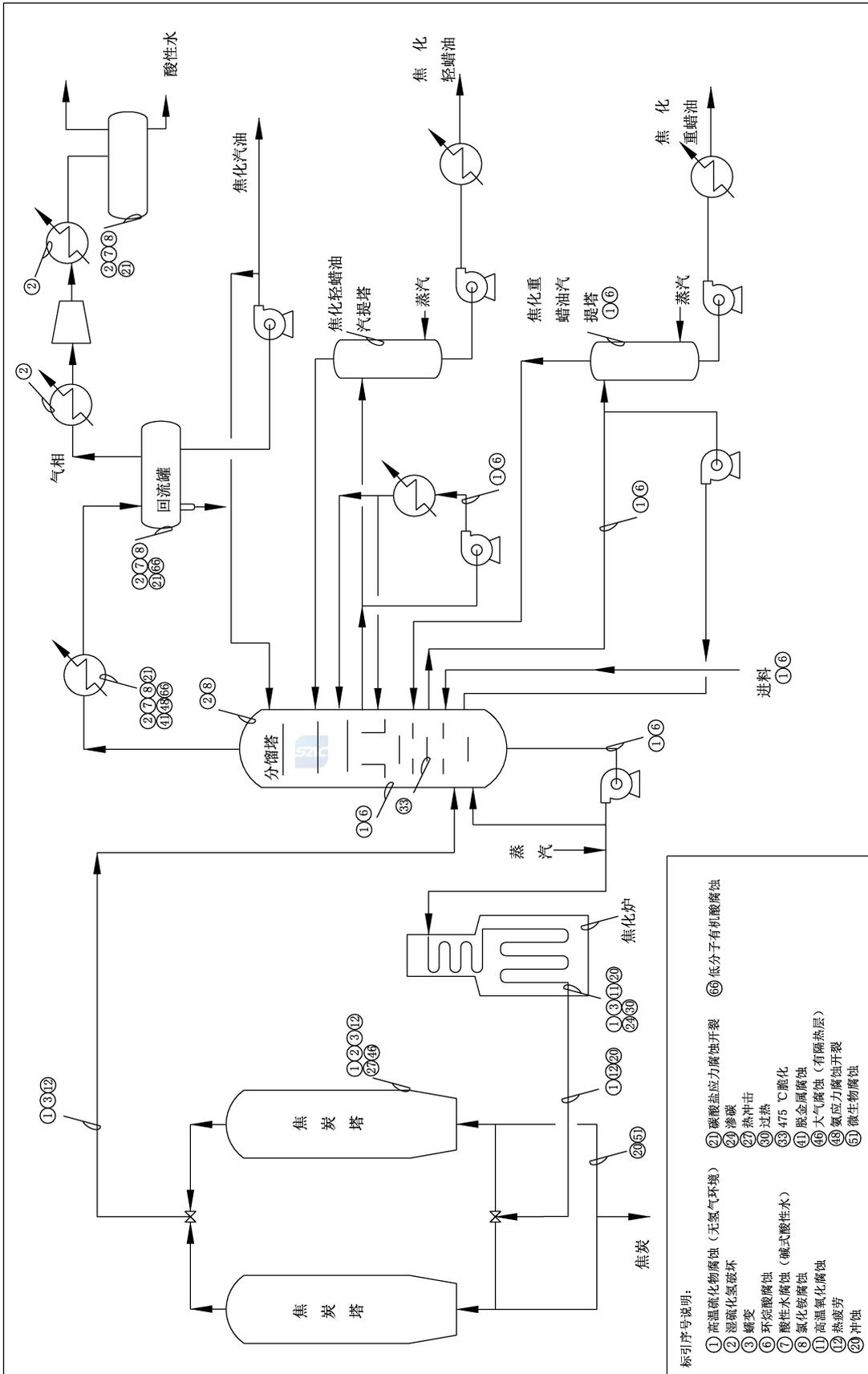


图 B.2 延迟焦化装置



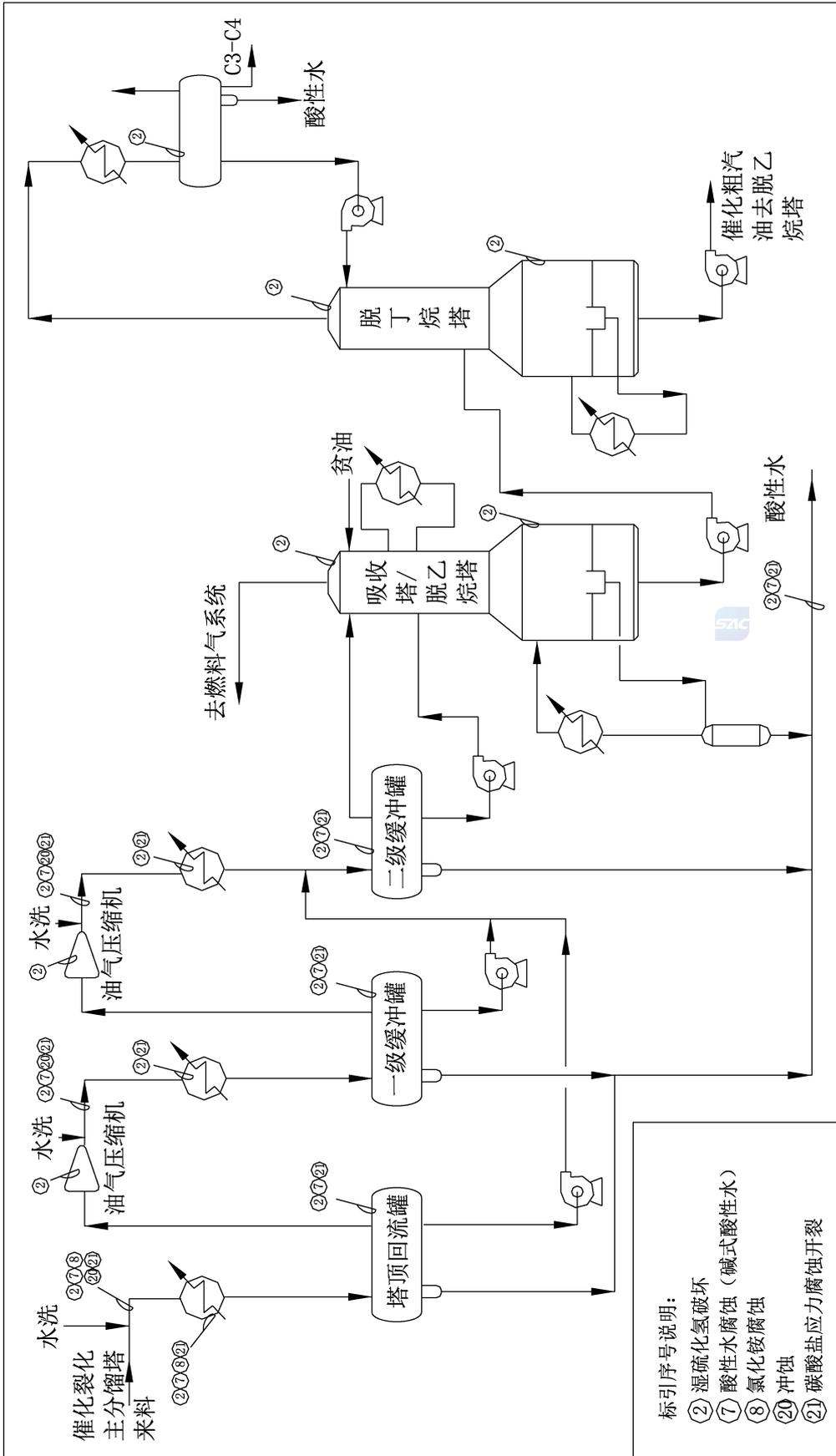


图 B.4 催化裂化轻油回收装置

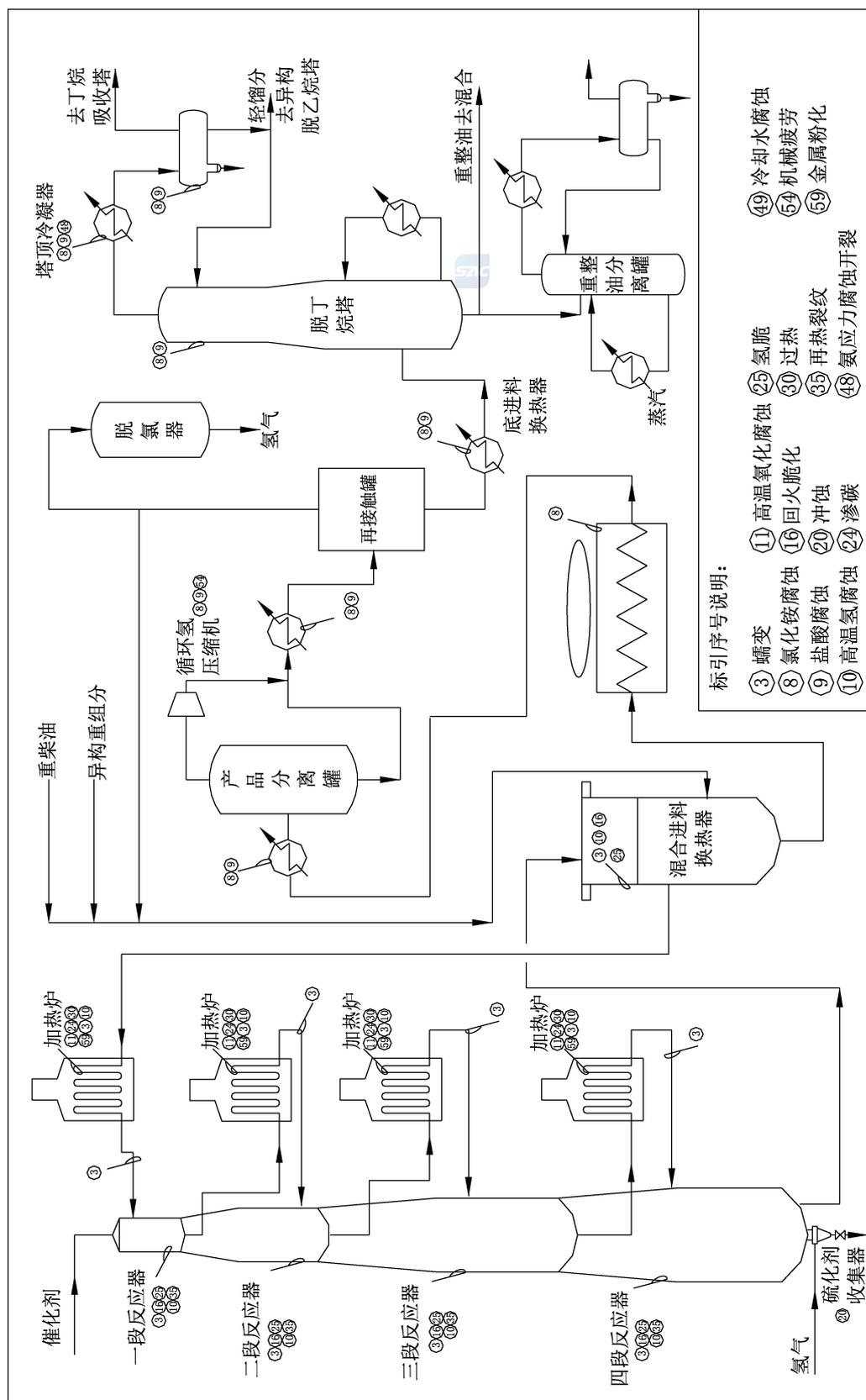


图 B.5 连续催化重整装置





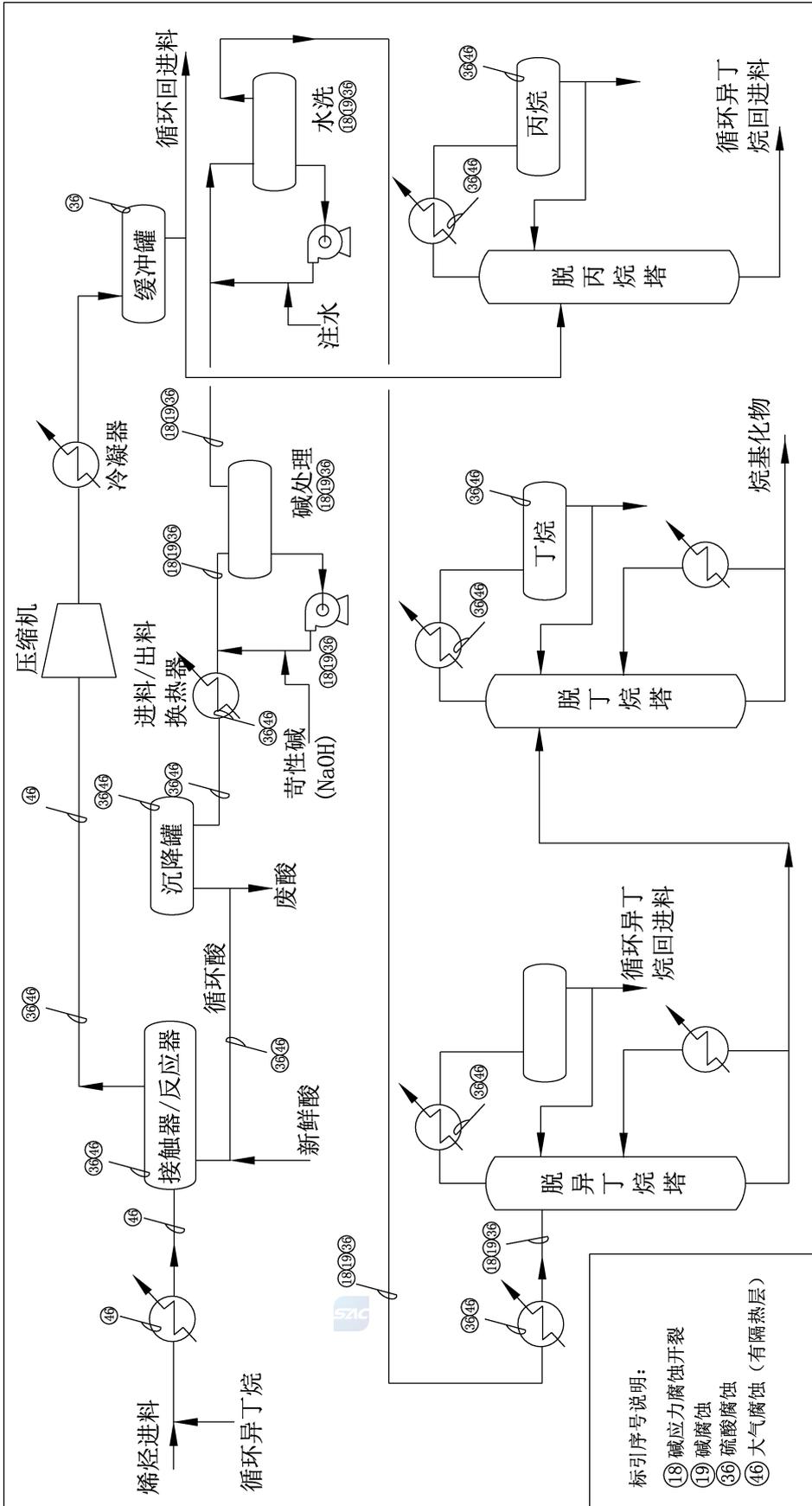


图 B.8 硫酸烷基化装置

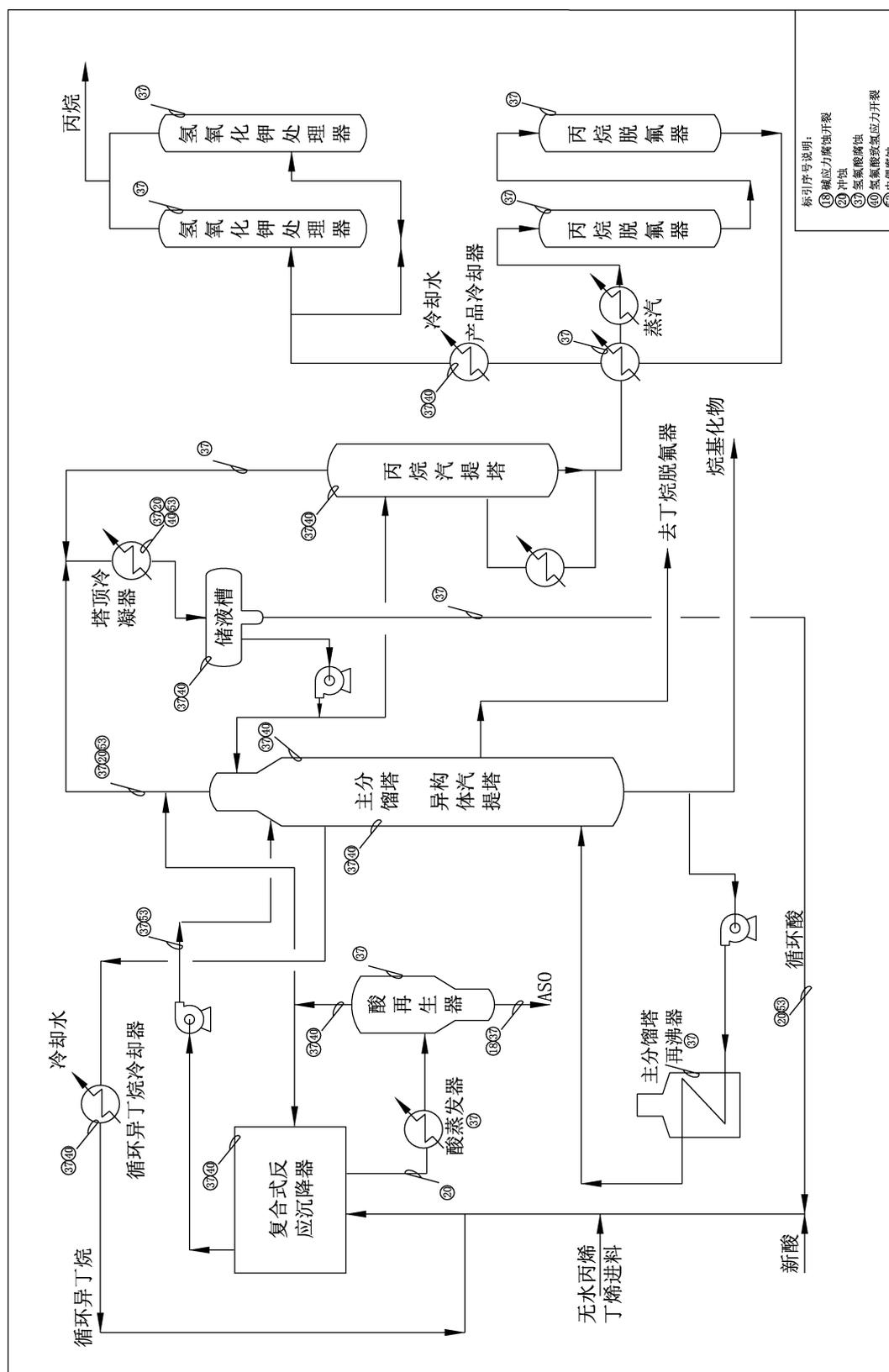


图 B.9 氢氟酸烷基化装置

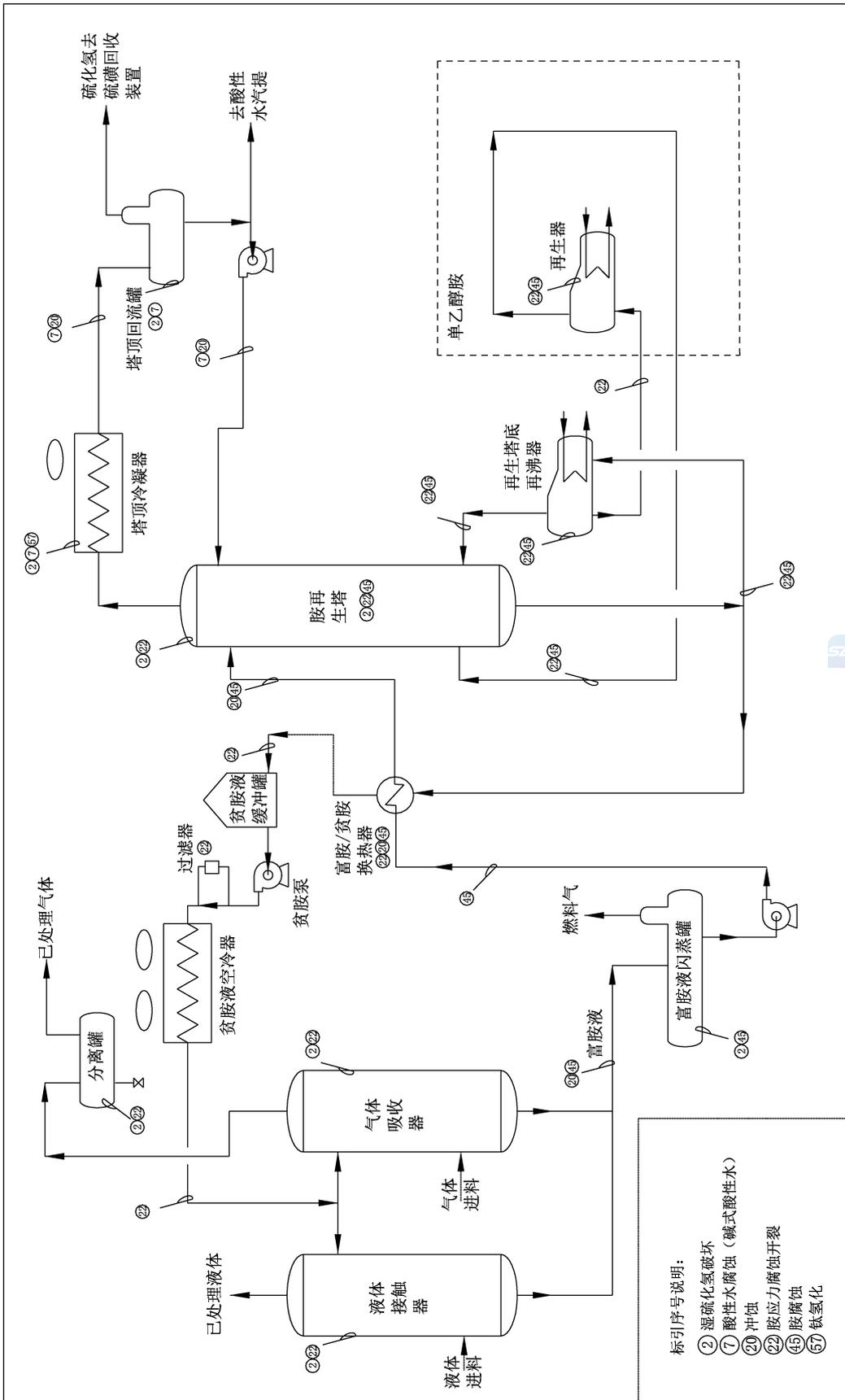


图 B.10 胺处理装置



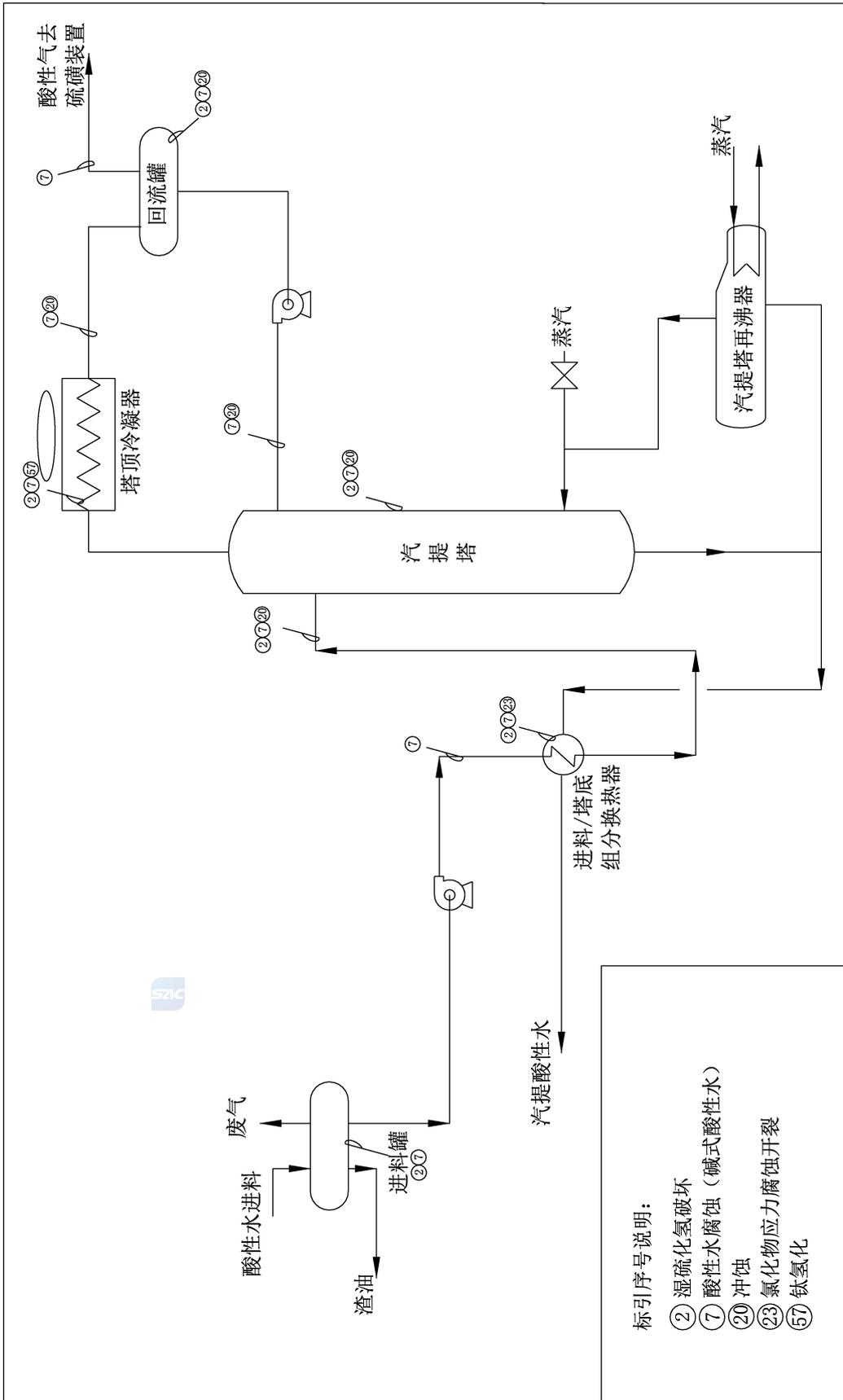


图 B.12 酸性水汽提装置

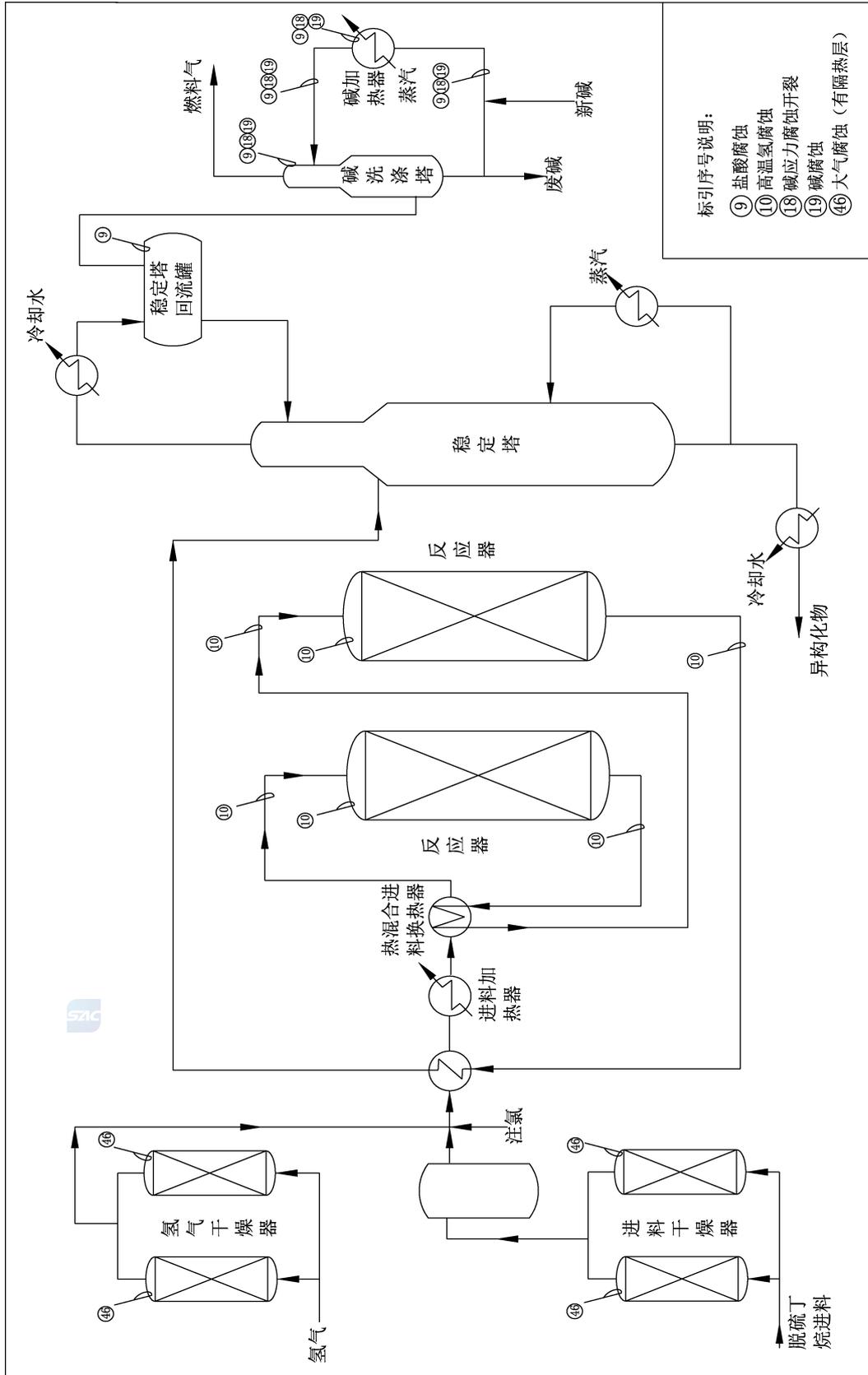


图 B.13 异构化装置



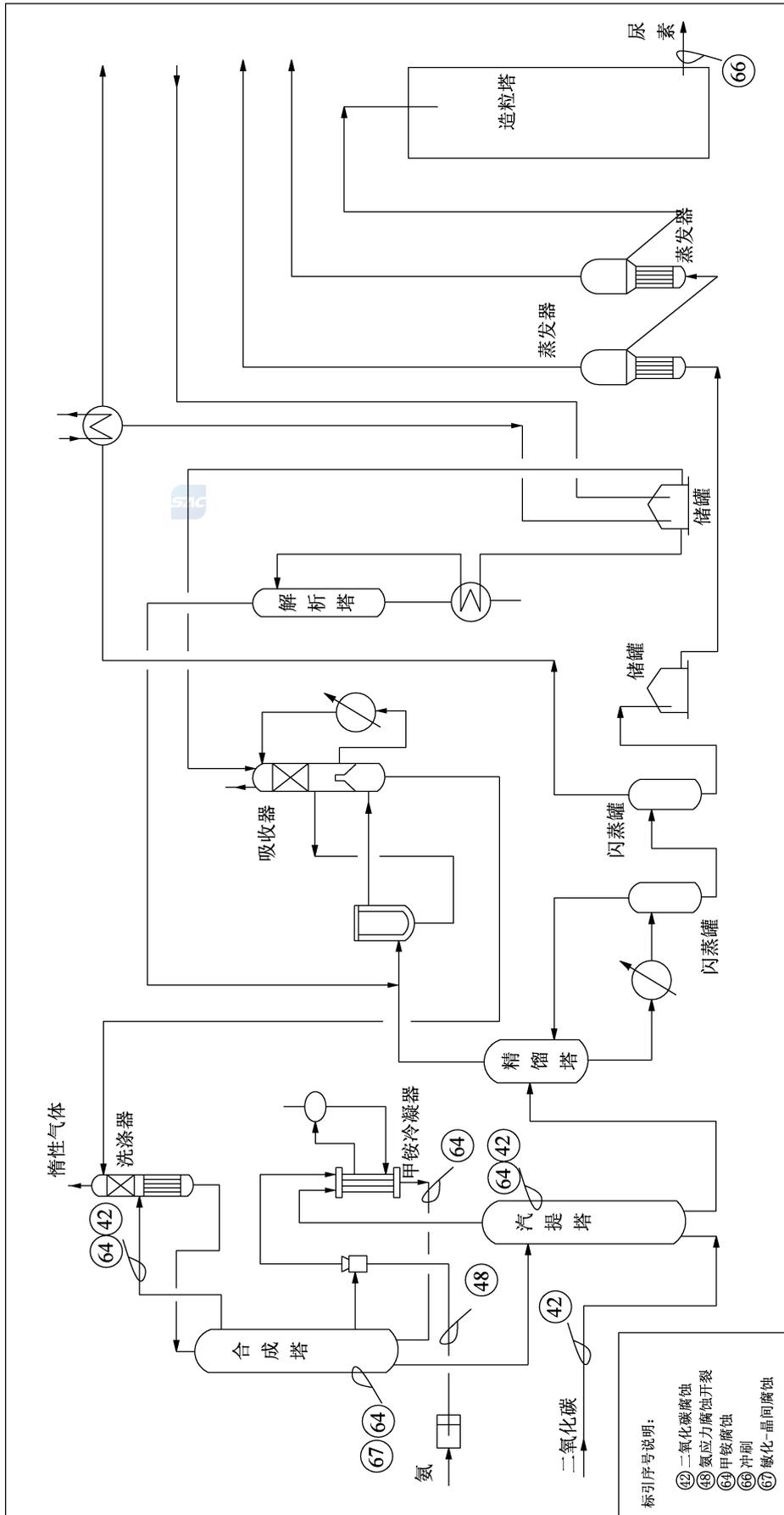


图 B.15 尿素合成装置

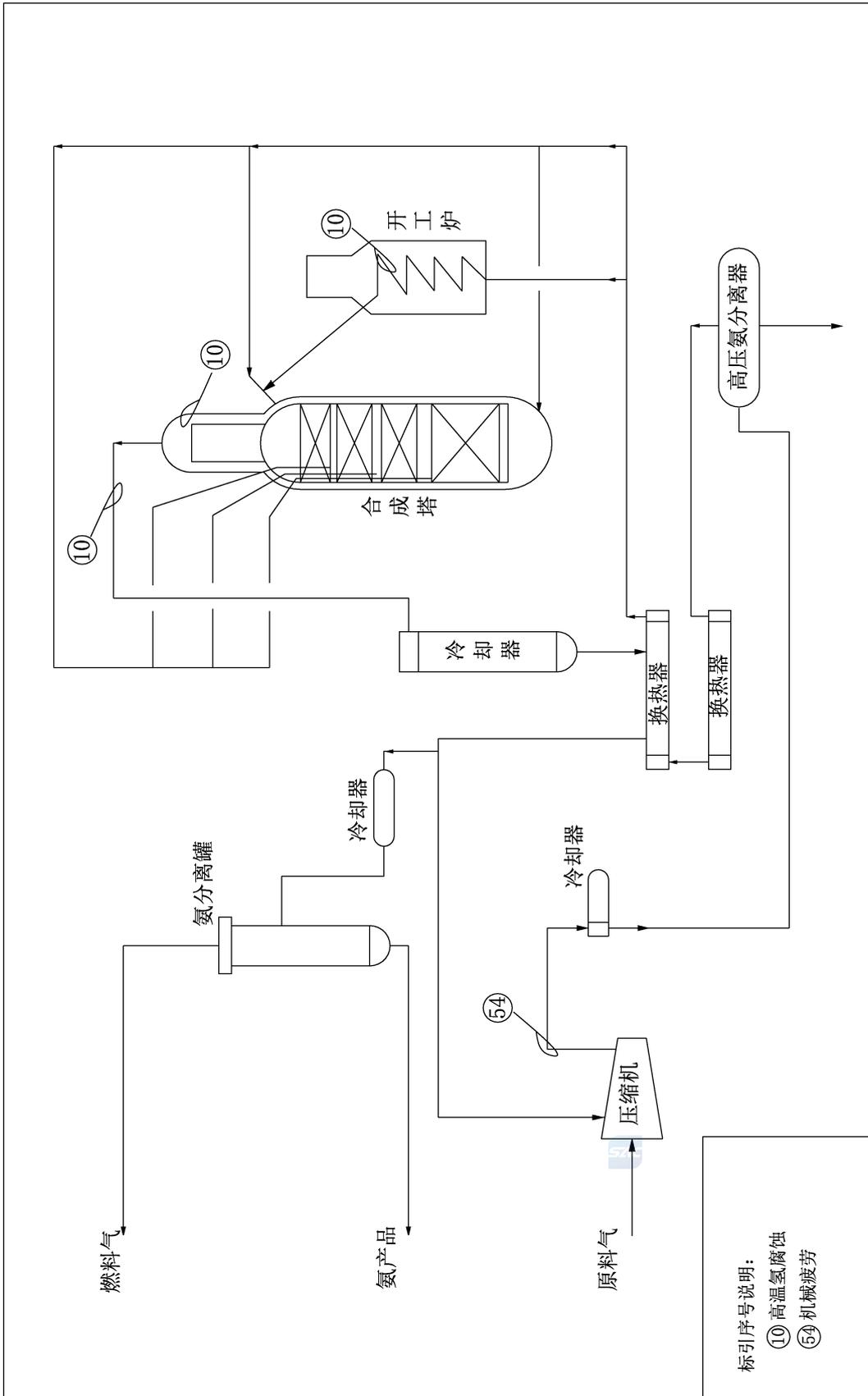


图 B.16 氨合成装置

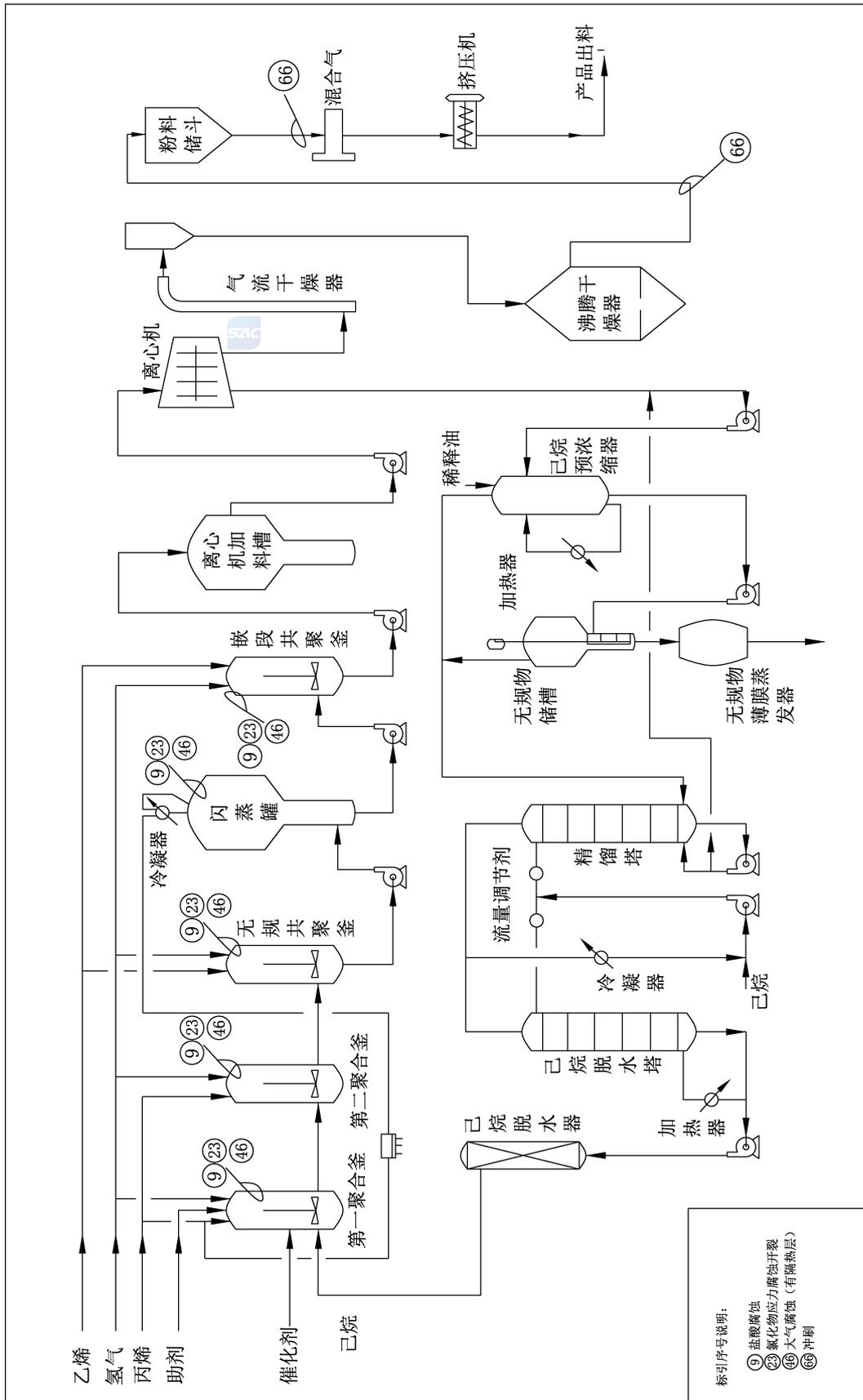


图 B.17 聚丙烯装置

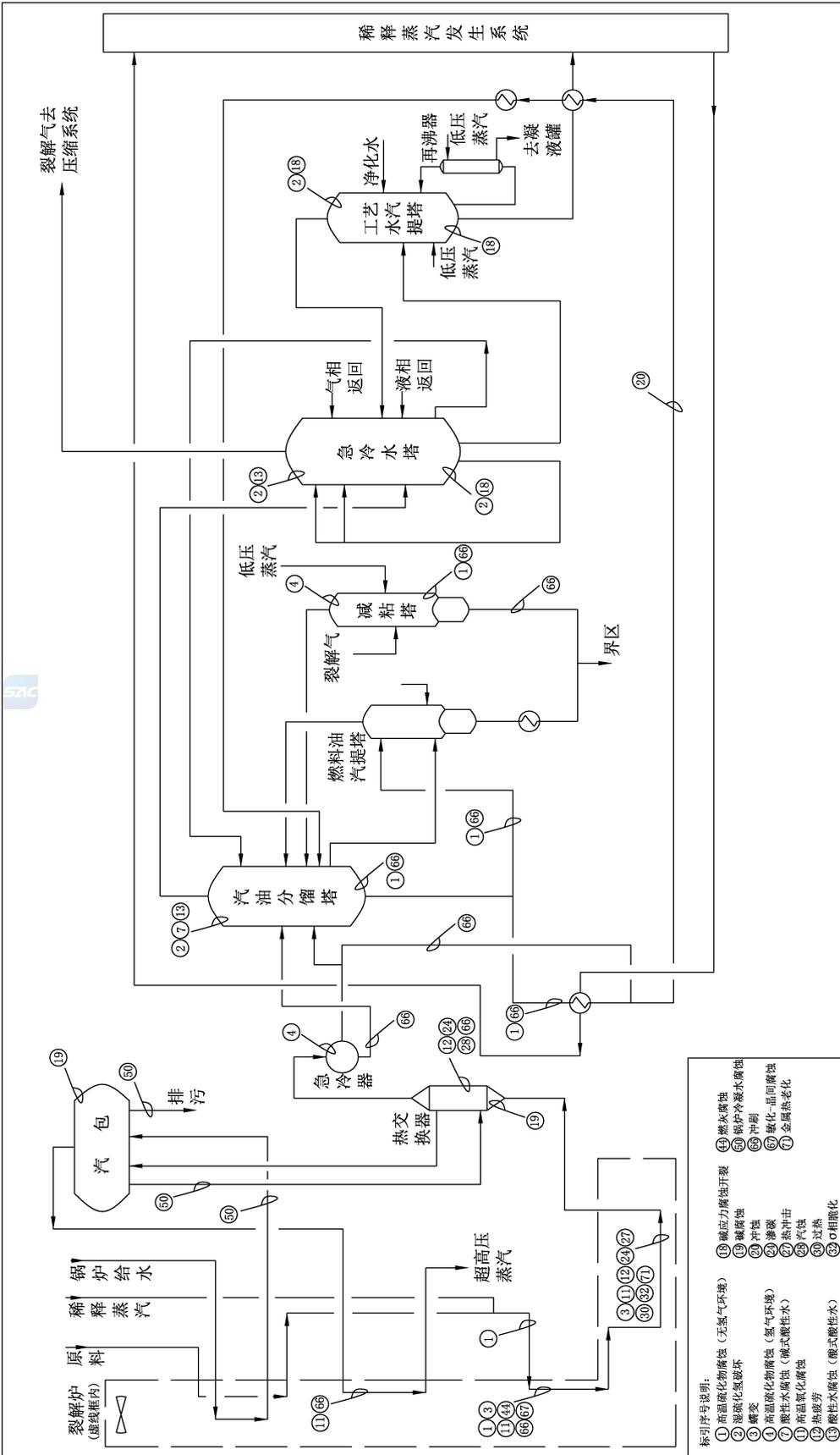
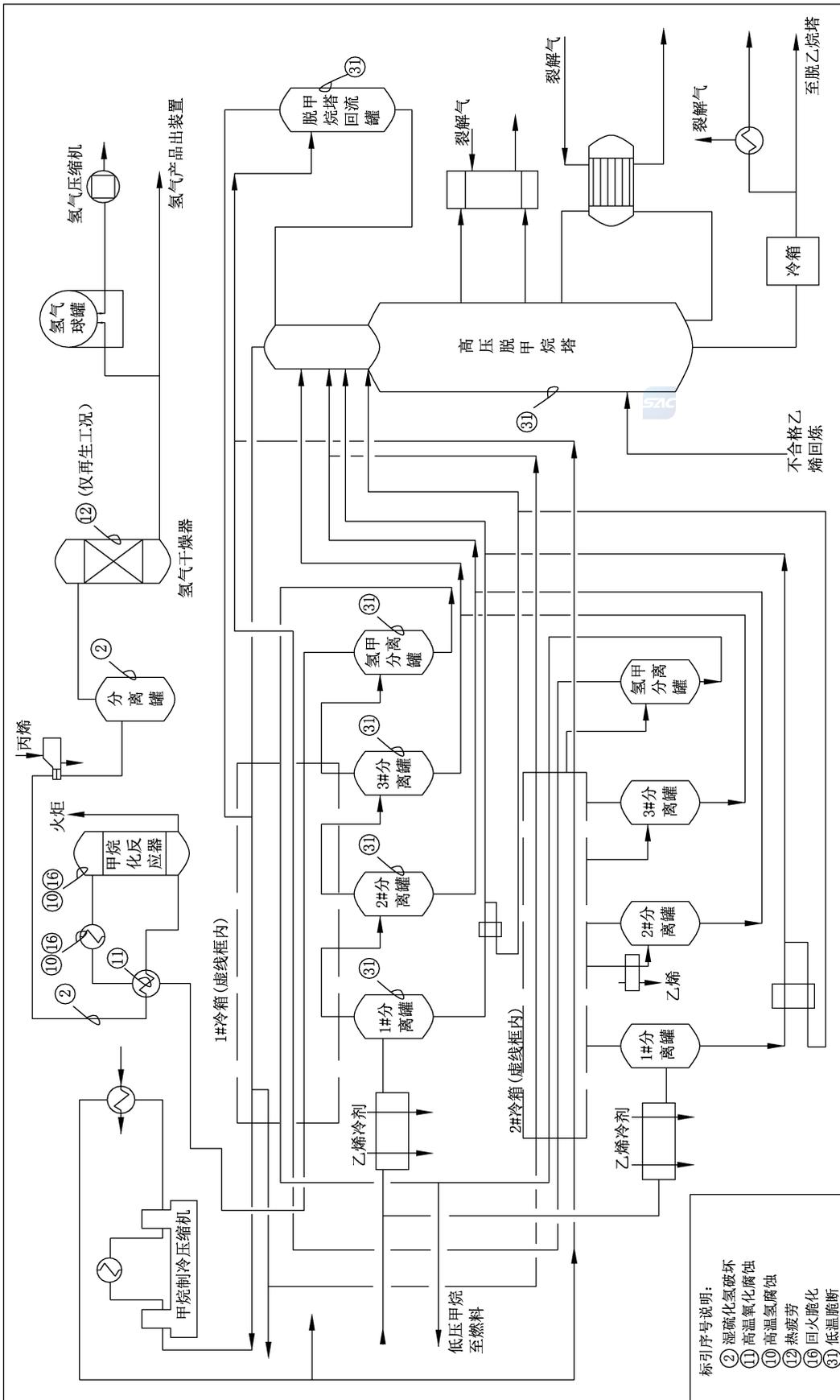


图 B.18 乙烯裂解装置(裂解与急冷系统)





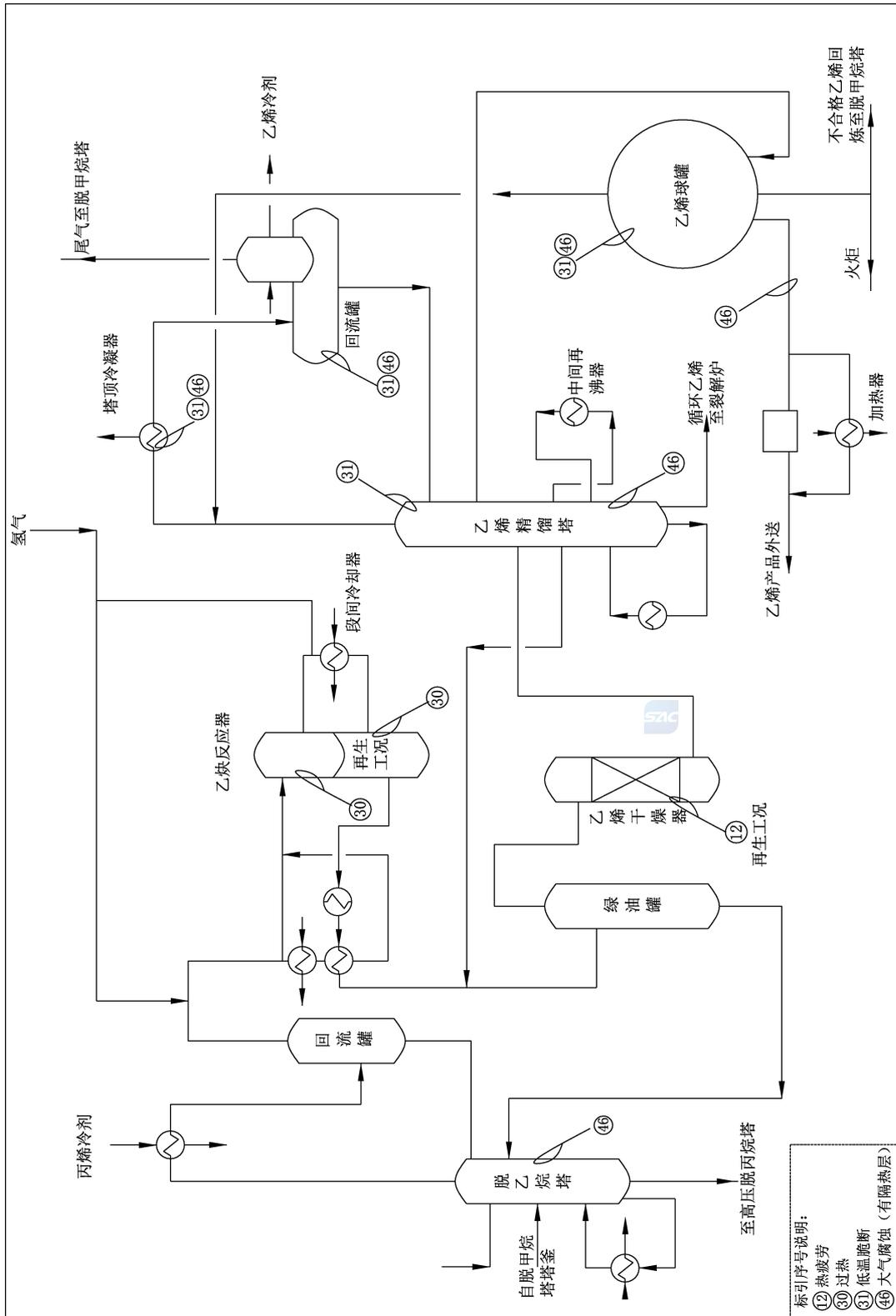


图 B.2.1 乙烯裂解装置(碳二系统)



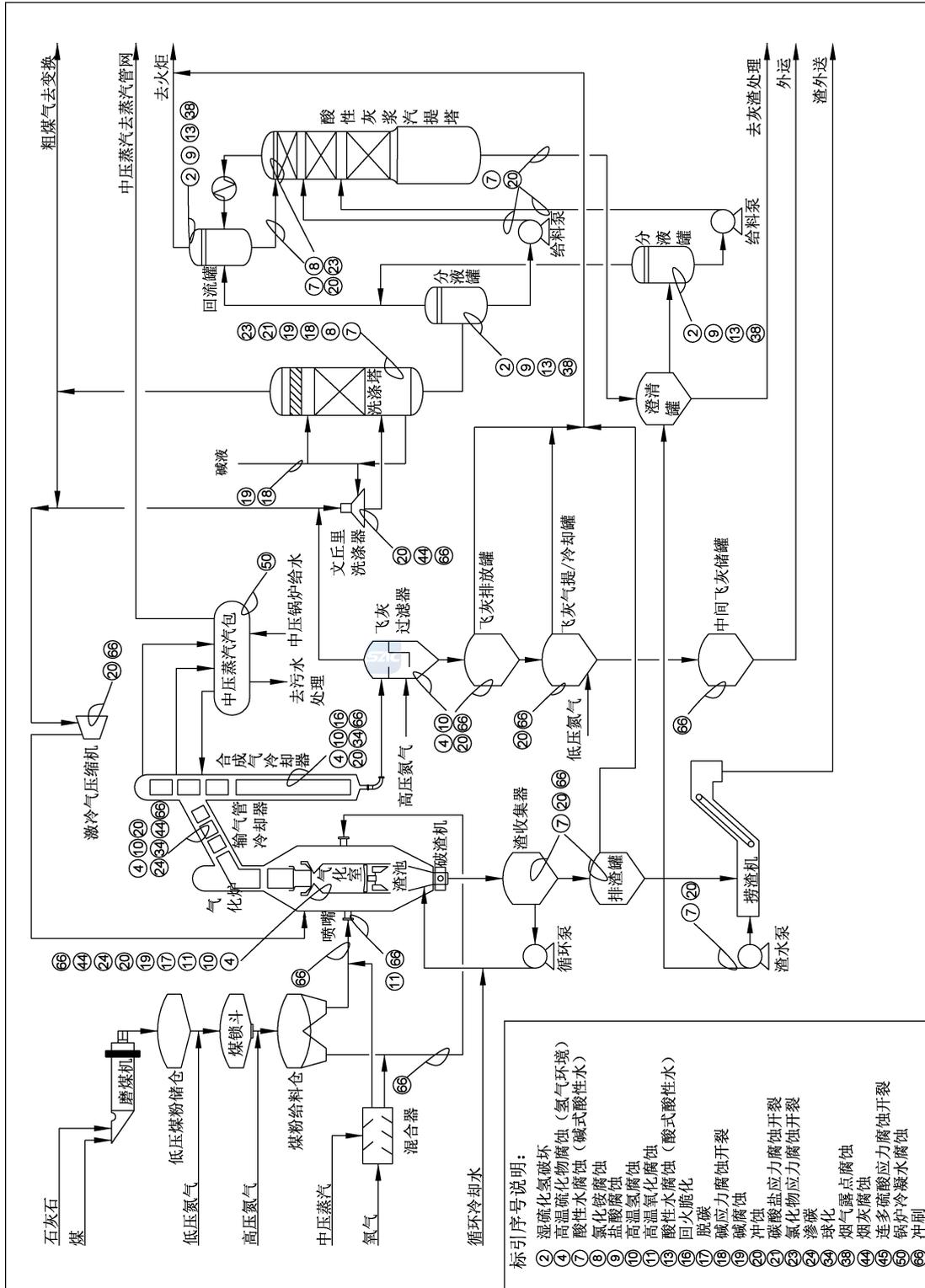


图 B.23 煤气化装置 (Shell 气化工序)

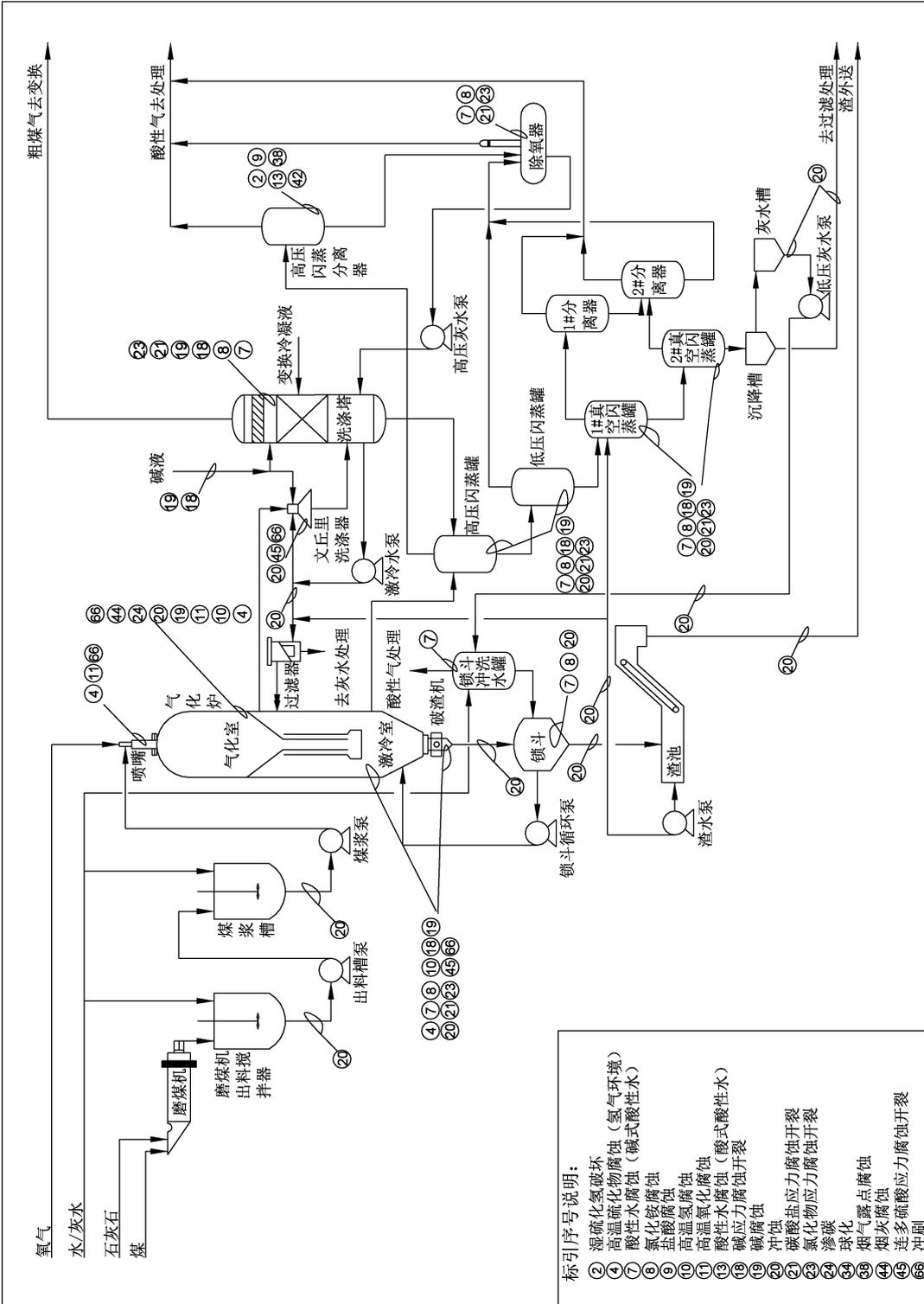


图 B.24 煤气化装置 (Texaco 气化工序)



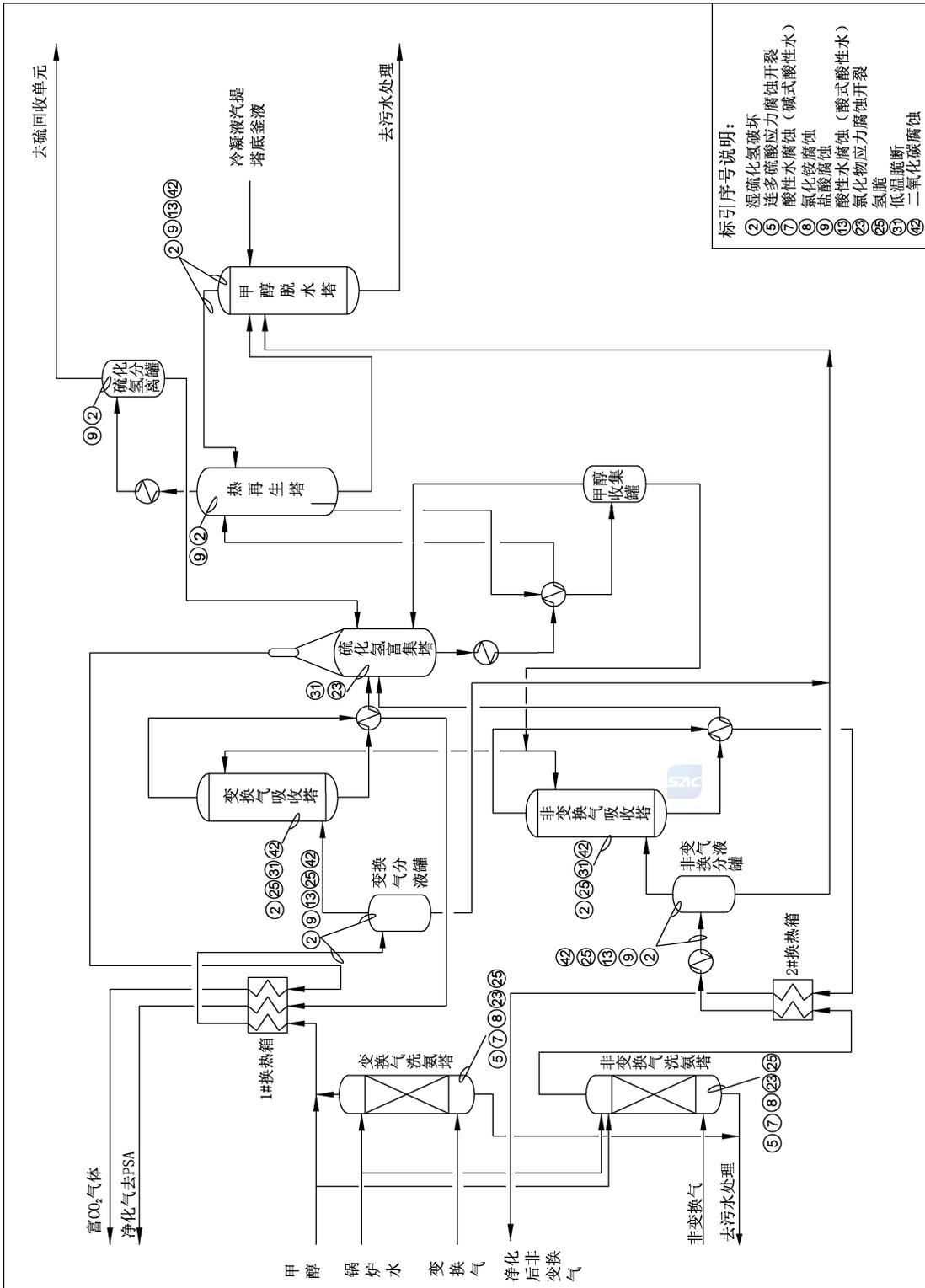


图 B.26 煤气化装置(变换气净化工序)

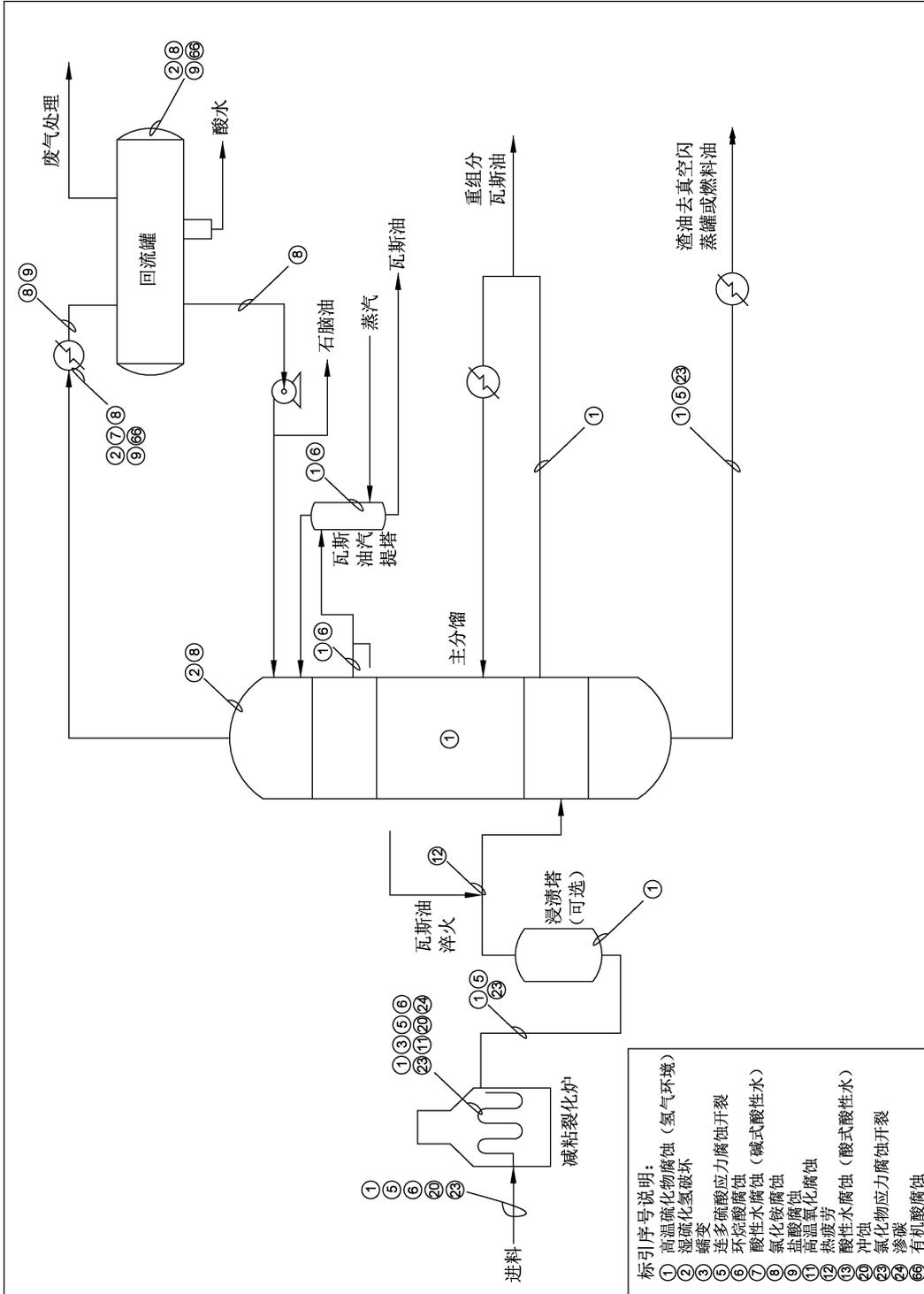


图 B.27 减粘装置

附 录 C  
(资料性)  
损伤模式识别推荐流程

### C.1 概述

本附录推荐了损伤模式识别的一般思路、程序及方法,适用于从事损伤模式识别的人员进行向导式损伤识别,以及通过计算机程序进行损伤自动化识别。

### C.2 损伤模式识别流程

损伤模式识别的流程包括基本数据确定、损伤模式初步筛查、损伤模式详细筛查、基于损伤形态及失效形态的主要损伤模式确认、基于同类设备损伤和失效案例的主要损伤模式确认。

### C.3 基本数据确定

确定评估设备或部件的材料、工艺介质、操作条件、装置及系统回路等基本数据,一般应包括但不限于以下内容。

- a) 材料:
  - 1) 材料牌号及标准;
  - 2) 材料交货状态;
  - 3) 材料化学成分(必要时查核复验结果);
  - 4) 材料代用;
  - 5) 材料的检测或检查结果(如果有)。
- b) 工艺介质:
  - 1) 物相平衡表(或主要介质成分及含量);
  - 2) 腐蚀介质成分及含量(包括微量的腐蚀性杂质);
  - 3) 主要反应原理及副反应原理;
  - 4) 流体成分分析(如果有)。
- c) 操作条件:
  - 1) 物相平衡表(或操作压力、温度);
  - 2) DCS 数据;
  - 3) 开停工程序;
  - 4) 应急程序;
  - 5) 特殊工况(再生、循环操作)。

同时考虑以下因素。

- a) 影响介质腐蚀性的因素:
  - 1) 介质环境是否已发生变化,与原设计不一致,可能导致腐蚀或其他损伤加剧;
  - 2) 腐蚀性介质或成分有无局部聚集浓缩;
  - 3) 保温隔热材料、各类助剂(催化剂、阻聚剂、活化剂、再生剂)等物料中是否存在可能引发腐蚀的组分;
  - 4) 反应过程有无副反应或生产的副产品具有腐蚀性;

- 5) 流动介质中是否含有固体颗粒,或者存在两相或多相流,有无出现局部相变;
  - 6) 有无添加有效的缓蚀剂,并已产生作用。
- b) 影响材料/结构抵抗损伤能力的因素:
- 1) 选材是否合理,结构设计有无缺陷,对介质环境可能引发的损伤是否敏感;
  - 2) 材料的制造工艺、结构的建造过程(包括焊接、热处理)是否合乎规范、标准的要求,有无超标缺陷或损伤;
  - 3) 在用过程中材料或结构是否已检验或检测出明显的缺陷或损伤;
  - 4) 有无超过设计使用寿命,并可能对其抵抗损伤的能力造成影响。
- c) 影响载荷或应力状态的因素:
- 1) 是否存在循环载荷、冲击载荷或者其他明显的载荷波动;
  - 2) 是否存在明显的应力集中,并可能对损伤产生影响;
  - 3) 是否存在局部温度不均匀,或温度循环变化,或温度剧烈变化;
  - 4) 开、停车过程是否建立规范、制度并有效实施;
  - 5) 有无遭遇不在设计预期范围内的意外载荷影响,如地质灾害、气相灾害、局部环境变化等。
- d) 其他因素:
- 1) 是否存在异种材料连接,可能形成电偶腐蚀环境,加剧腐蚀;
  - 2) 是否存在损伤的联动触发或耦合,产生多米诺骨牌效应或损伤叠加效应。

#### C.4 损伤模式初步筛查

根据基本数据及本文件规定进行初步筛查,列出所有可能存在的损伤模式:

- a) 根据腐蚀介质成分初步筛查可能的腐蚀减薄、环境开裂等类别的损伤模式;
- b) 根据材料以及温度初步筛查可能的材质劣化类别的损伤模式以及蠕变、低温脆断等损伤模式,温度低于 400 °C 可认为不存在材质劣化类别的损伤模式,温度低于 300 °C 可认为不存在蠕变损伤模式;
- c) 根据载荷形式初步筛查可能的疲劳、热冲击、过载等损伤模式,循环载荷下可能存在疲劳损伤模式;
- d) 如果设备所在装置及回路在附录 B 范围内,根据附录 B 初步筛查所有可能的损伤模式;
- e) 根据其他相关基本参数初步筛查其他可能存在的损伤模式。

#### C.5 损伤模式详细筛查

根据基本数据、本文件规定以及相关标准文献详细筛查所有可能的损伤模式,必要时对损伤敏感性进行定量判别:

- a) 根据本文件规定的易受影响材料以及主要影响因素详细筛查可能的腐蚀减薄及环境开裂类别的损伤模式,并可根据 GB/T 26610.4 等标准定量分析部分损伤模式的腐蚀速率和环境开裂敏感性;
- b) 根据本文件规定的易受影响材料以及主要影响因素详细筛查可能的材质劣化类别的损伤模式;
- c) 根据 GB/T 35013—2018 附录 A 确定部分材料的蠕变范围的温度极限,详细筛查是否存在蠕变损伤模式;
- d) 根据 JB/T 4732 确定疲劳免评条件,详细筛查是否存在疲劳损伤模式;
- e) 根据其他标准及可靠文献详细筛查可能的损伤模式。

#### C.6 基于损伤形态及失效形态的主要损伤模式确认

对于已发生损伤或失效的设备或部件,应根据其实际损伤形态,并按本文件各损伤模式中损伤形态的描述,确认其主要损伤模式。

#### C.7 基于同类设备损伤和失效案例的主要损伤模式确认

对于未发生损伤或失效的设备或部件,应根据同类设备损伤和失效案例,确认可能导致其损伤或失效的主要损伤模式。

**附 录 D**  
(资料性)  
**常用金属材料牌号**

表 D.1~表 D.3 分别给出了承压设备损伤模式识别常用金属材料牌号和标准号,以及与美国 ASME 类似标准的参考对应关系。

**表 D.1 常用碳钢和低合金钢**

序号	国内牌号	国内标准	ASME 牌号	ASME 标准及年号
1	10	GB/T 9948	SA106 GrA	ASME II Part A (2019)
2	20	GB/T 9948	SA106 GrB	ASME II Part A (2019)
3	35	NB/T 47008	SA266 Gr3	ASME II Part A (2019)
4	06Ni9DR	GB/T 150.2	SA553 Type 1	ASME II Part A (2019)
5	07MnMoVR	GB/T 19189	—	—
6	07MnNiVDR	GB/T 19189	—	—
7	07MnNiMoDR	GB/T 19189	—	—
8	08Cr2AlMo	GB/T 150.2	—	—
9	08MnNiMoVD	NB/T 47009	—	—
10	08Ni3D	NB/T 47009	SA350 LF.3 CL.1/CL2	ASME II Part A (2019)
11	08Ni3DR	GB/T 150.2	SA203 GrD/GrE	ASME II Part A (2019)
12	09CrCuSb	GB/T 150.2	—	—
13	09MnD	GB/T 150.2	—	—
14	09MnNiD	NB/T 47009	—	—
15	09MnNiDR	GB/T 3531	—	—
16	10Ni3MoVD	NB/T 47009	—	—
17	12Cr1MoVR	GB/T 713	—	—
18	12Cr2Mo1R	GB/T 713	SA387 Gr22	ASME II Part A (2019)
19	12Cr2Mol	NB/T 47008	SA336 F22	ASME II Part A (2019)
20	12Cr2MolV	NB/T 47008	SA336 F22V	ASME II Part A (2019)
21	12Cr2MolVR	GB/T 150.2	SA 832 Gr22V SA 542 Type D CL4a	ASME II Part A (2019)
22	12Cr3MolV	NB/T 47008	SA336 F3V	ASME II Part A (2019)
23	12Cr1MoV	NB/T 47008	—	—
24	12Cr1MoVG	GB/T 5310	—	—
25	12CrMo	GB/T 9948	SA335-P2	ASME II Part A (2019)

表 D.1 常用碳钢和低合金钢 (续)

序号	国内牌号	国内标准	ASME 牌号	ASME 标准及年号
26	12MnNiVR	GB/T 19189	—	—
27	13MnNiMoR	GB/T 713	—	—
28	14Cr1MoR	GB/T 713	SA387 Gr11	ASME II Part A (2019)
29	14Cr1Mo	NB/T 47008	SA336 F11	ASME II Part A (2019)
30	15CrMo	NB/T 47008	SA336 F12	ASME II Part A (2019)
31	15CrMoR	GB/T 713	SA387 Gr12	ASME II Part A (2019)
32	15MnNiDR	GB/T 3531	—	—
33	15MnNiNbDR	GB/T 150.2	—	—
34	16Mn	NB/T 47008	SA105	ASME II Part A (2019)
35	16MnD	NB/T 47009	SA350 LF.2 CL.1	ASME II Part A (2019)
36	16MnDR	GB/T 3531	SA662 GrC	ASME II Part A (2019)
37	18MnMoNbR	GB/T 713	SA302 GrB	ASME II Part A (2019)
38	12Cr5Mo	NB/T 47008	SA336 F5/ F5A	ASME II Part A (2019)
39	20MnMo	NB/T 47008	—	—
40	20MnMoD	NB/T 47009	—	—
41	20MnMoNb	NB/T 47008	—	—
42	20MnNiMo	NB/T 47008	SA508 Gr.3CL.2	ASME II Part A (2019)
43	35CrMo	NB/T 47008	—	—
44	Q245R	GB/T 713	SA516 Gr.60	ASME II Part A (2019)
45	Q345R	GB/T 713	SA516 Gr.70	ASME II Part A (2019)
46	Q370R	GB/T 713	—	—
47	12Cr2Mol	GB/T 150.2	SA335 P22	ASME II Part A (2019)
48	15CrMo	GB/T 9948	SA335 P12	ASME II Part A (2019)

表 D.2 常用高合金钢

序号	国内统一 数字代号	国内牌号	国内标准	ASTM/ASME 类似牌号	ASTM/ASME 标准及年号	备注
1	S11306	06Cr13	GB/T 24511	S41008,410S	ASME II Part A SA240(2019)	铁素体不锈钢板
2	S11348	06Cr13A1	GB/T 24511	S40500,405	ASME II Part A SA240 (2019)	铁素体不锈钢板

表 D.2 常用高合金钢 (续)

序号	国内统一 数字代号	国内牌号	国内标准	ASTM/ASME 类似牌号	ASTM/ASME 标准及年号	备 注
3	S11972	019Cr19Mo2NbTi	GB/T 24511	S44400,444	ASME II Part A SA240 (2019)	铁素体不锈钢板
4	S21953	022Cr19Ni5Mo3 Si2N	GB/T 24511	S31500	ASME II Part A SA240 (2019)	双相不锈钢板
5	S22053	022Cr23Ni5Mo3N	GB/T 24511	S32205,2205	ASME II Part A SA240 (2019)	双相不锈钢板
6	S22253	022Cr22Ni5Mo3N	GB/T 24511	S31803	ASME II Part A SA240 (2019)	双相不锈钢板
7	S30403	022Cr19Ni10	GB/T 24511	S30403,304L	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
8	S30408	06Cr19Ni10	GB/T 24511	S30400,304	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
9	S30409	07Cr19Ni10	GB/T 24511	S30409, 304H	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
10	S31008	06Cr25Ni20	GB/T 24511	S31008,310S	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
11	S31603	022Cr17Ni12Mo2	GB/T 24511	S31603,316L	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
12	S31608	06Cr17Ni12Mo2	GB/T 24511	S31600,316	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
13	S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	GB/T 24511	S31635,316Ti	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
14	S31703	022Cr19Ni13Mo3	GB/T 24511	S31703,317L	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
15	S31708	06Cr19Ni13Mo3	GB/T 24511	S31700,317	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
16	S32168	06Cr18Ni11Ti	GB/T 24511	S32100,321	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
17	S39042	015Cr21Ni26Mo5Cu2	GB/T 24511	N08904,904L	ASME II Part A SA240 (2019)	奥氏体不锈钢板
18	S31603	022Cr17Ni12Mo2	GB/T 13296	S31603,TP316L	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管

表 D.2 常用高合金钢 (续)

序号	国内统一 数字代号	国内牌号	国内标准	ASTM/ASME 类似牌号	ASTM/ASME 标准及年号	备 注
19	S31603	022Cr17Ni12Mo2	GB/T 14976	S31603, TP316L	ASME II Part A SA312(2019)	奥氏体不锈钢管
20	S30403	022Cr19Ni10	GB/T 13296	S30403, TP304L	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
21	S30403	022Cr19Ni10	GB/T 14976	S30403, TP304L	ASME II Part A SA312(2019)	奥氏体不锈钢管
22	S31703	022Cr19Ni13Mo3	GB/T 13296	S31703, TP317L	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
23	S31608	06Cr17Ni12Mo2	GB/T 13296	S31600, TP316	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
24	S31608	06Cr17Ni12Mo2	GB/T 14976	S31600, TP316	ASME II Part A SA312(2019)	奥氏体不锈钢管
25	S32168	06Cr18Ni11Ti	GB/T 13296	S32100, TP321	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
26	S32168	06Cr18Ni11Ti	GB/T 14976	S32100, TP321	ASME II Part A SA312(2019)	奥氏体不锈钢管
27	S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	GB/T 13296	S31635, TP316Ti	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
28	S30408	06Cr19Ni10	GB/T 13296	S30400, TP304	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
29	S30408	06Cr19Ni10	GB/T 14976	S30400, TP304	ASME II Part A SA312(2019)	奥氏体不锈钢管
30	S31708	06Cr19Ni3Mo3	GB/T 13296	S31700, TP317	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
31	S31008	06Cr25Ni20	GB/T 13296	S31008, TP310S	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
32	S30409	07Cr19Ni9	GB/T 13296	S30409, TP304H	ASME II Part A SA213 (2019)	奥氏体不锈钢管
33	S25073	022Cr25Ni7Mo4N	GB/T 21833	S32750, 2507	ASTM II Part A SA789(2019)	双相不锈钢管

表 D.3 常用有色金属及合金

序号	国内牌号	国内标准	ASTM/ASME 类似牌号	ASTM/ASME 标准及年号	备注
1	N5	JB/T 4756	N02201	ASME II Part B(2019)	镍基 201
2	N6	JB/T 4756	N02200	ASME II Part B(2019)	镍基 200
3	N7	JB/T 4756	N02200	ASME II Part B(2019)	镍基 200
4	NCu30	JB/T 4756	N04400	ASME II Part B (2019)	蒙乃尔合金 400
5	NS143	JB/T 4756	N08020	ASME II Part B(2019)	铁镍基合金 20 (Carpenter 20-Cb3)
6	NS312	JB/T 4756	N06600	ASME II Part B(2019)	因科耐尔合金 600 (Inconel 600)
7	NS315	JB/T 4756	N06690	ASME II Part B(2019)	因科耐尔合金 690 (Inconel 690)
8	NS335	JB/T 4756	N06455	ASME II Part B(2019)	哈氏合金 C-4
9	NS336	JB/T 4756	N06625	ASME II Part B(2019)	因科耐尔合金 625 (Inconel 625)
10	NS111	JB/T 4756	N08800	ASME II Part B (2019)	因科镍合金 800 (Incoloy 800)
11	NS112	JB/T 4756	N08810	ASME II Part B (2019)	因科镍合金 800H (Incoloy 800H)
12	NS142	JB/T 4756	N08825	ASME II Part B (2019)	因科镍合金 825 (Incoloy 825)
13	NS321	JB/T 4756	N10001	ASME II Part B (2019)	哈氏合金 B
14	NS322	JB/T 4756	N10665	ASME II Part B (2019)	哈氏合金 B-2
15	NS334	JB/T 4756	N10276	ASME II Part B (2019)	哈氏合金 C276
16	T2	JB/T 4755	C11000	ASME II Part B (2019)	二号铜
17	T3	JB/T 4755	C12700	ASME II Part B (2019)	三号铜
18	TU1	JB/T 4755	C10100	ASME II Part B (2019)	一号无氧铜
19	TU2	JB/T 4755	C10200	ASME II Part B (2019)	二号无氧铜
20	TP1	JB/T 4755	C12000	ASME II Part B (2019)	一号脱氧铜
21	TP2	JB/T 4755	C12200	ASME II Part B (2019)	二号脱氧铜
22	H96	JB/T 4755	C21000	ASTM UNS(2004)	96 黄铜
23	H80	JB/T 4755	C24000	ASTM UNS(2004)	80 黄铜
24	H68	JB/T 4755	C26200	ASTM UNS(2004)	68 黄铜
25	H62	JB/T 4755	C28000	ASTM UNS(2004)	62 黄铜

表 D.3 常用有色金属及合金 (续)

序号	国内牌号	国内标准	ASTM/ASME 类似牌号	ASTM/ASME 标准及年号	备注
26	HPB59-1	JB/T 4755	C37710	ASTM UNS(2004)	59-1 铅黄铜
27	HA177-2	JB/T 4755	C68700	ASME II Part B (2019)	77-2 铝黄铜
28	H5Sn70-1	JB/T 4755	C44300	ASME II Part B (2019)	70-1 锡黄铜
29	H5Sn62-1	JB/T 4755	C46400	ASME II Part B (2019)	62-1 锡黄铜
30	H85A	JB/T 4755	—	—	85A 加砷黄铜
31	H68A	JB/T 4755	C26130	ASTM UNS(2004)	68A 加砷黄铜
32	QA15	JB/T 4755	C60600	ASTM UNS(2004)	5 铝青铜
33	QA19-4	JB/T 4755	C62300	ASME II Part B (2019)	9-4 铝青铜
34	QSi3-1	JB/T 4755	C65500	ASME II Part B (2019)	3-1 硅青铜
35	B19	JB/T 4755	C71000	ASME II Part B (2019)	19 白铜
36	BFe10-1-1	JB/T 4755	C70600	ASME II Part B (2019)	10-1-1 铁白铜
37	BFe30-1-1	JB/T 4755	C71500	ASME II Part B (2019)	30-1-1 铁白铜
38	ZCuSn5Pb5Zn5	JB/T 4755	C83600	ASME II Part B (2019)	铸造铜合金
39	ZCuPb10Sn10	JB/T 4755	C93700	ASME II Part B (2019)	铸造铜合金
40	ZCuAl10Fe3	JB/T 4755	C95200	ASME II Part B (2019)	铸造铜合金
41	TA0	JB/T 4745	Gr 1	ASME II Part B (2019)	工业纯钛
42	TA1	JB/T 4745	Gr 2	ASME II Part B (2019)	工业纯钛
43	TA2	JB/T 4745	Gr 3	ASME II Part B (2019)	工业纯钛
44	TA3	JB/T 4745	Gr 4	ASME II Part B (2019)	工业纯钛
45	TA9	JB/T 4745	Gr 7	ASME II Part B (2019)	Ti-0.2Pd
46	TA10	JB/T 4745	Gr 12	ASME II Part B (2019)	Ti-0.3Mo-0.8Ni
47	TA1-A	JB/T 4745	—	—	工业纯钛
48	ZTi1	JB/T 4745	—	—	铸钛
49	ZTi2	JB/T 4745	—	—	铸钛
50	1A85	JB/T 4734	—	—	纯铝
51	1A90	JB/T 4734	—	—	纯铝
52	1035	JB/T 4734	—	—	纯铝
53	1050	JB/T 4734	—	—	纯铝
54	1060	JB/T 4734	1060	ASME II Part B (2019)	纯铝
55	1070	JB/T 4734	—	—	纯铝

表 D.3 常用有色金属及合金 (续)

序号	国内牌号	国内标准	ASTM/ASME 类似牌号	ASTM/ASME 标准及年号	备 注
56	1100	JB/T 4734	1100	ASME II Part B (2019)	纯铝
57	1200	JB/T 4734	—	—	纯铝
58	2014	JB/T 4734	2014	ASME II Part B (2019)	铝铜合金
59	2017	JB/T 4734	—	—	铝铜合金
60	2A11	JB/T 4734	—	—	铝铜合金
61	2A12	JB/T 4734	—	—	铝铜合金
62	2A14	JB/T 4734	—	—	铝铜合金
63	3A21	JB/T 4734	—	—	铝锰合金
64	3003	JB/T 4734	3003	ASME II Part B (2019)	铝锰合金
65	3004	JB/T 4734	3004	ASME II Part B (2019)	铝锰合金
66	5052	JB/T 4734	5052	ASME II Part B (2019)	铝镁合金
67	5454	JB/T 4734	5454	ASME II Part B (2019)	铝镁合金
68	5154	JB/T 4734	5154	ASME II Part B (2019)	铝镁合金
69	5456	JB/T 4734	5456	ASME II Part B (2019)	铝镁合金
70	5056	JB/T 4734	5056	ASME II Part B (2019)	铝镁合金
71	5A02	JB/T 4734	—	—	铝镁合金
72	5A03	JB/T 4734	—	—	铝镁合金
73	5083	JB/T 4734	5083	ASME II Part B (2019)	铝镁合金
74	5A05	JB/T 4734	—	—	铝镁合金
75	5086	JB/T 4734	5086	ASME II Part B (2019)	铝镁合金
76	5A06	JB/T 4734	—	—	铝镁合金
77	6A02	JB/T 4734	—	—	铝镁硅合金
78	6061	JB/T 4734	6061	ASME II Part B (2019)	铝镁硅合金
79	6063	JB/T 4734	6063	ASME II Part B (2019)	铝镁硅合金
80	8A06	JB/T 4734	—	—	铝合金

参 考 文 献

- [1] GB/T 150.2 压力容器 第2部分:材料
  - [2] GB/T 713 锅炉和压力容器用钢板
  - [3] GB/T 3531 低温压力容器用钢板
  - [4] GB/T 5310 高压锅炉用无缝钢管
  - [5] GB/T 9948 石油裂化用无缝钢管
  - [6] GB/T 13296 锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管
  - [7] GB/T 14976 流体输送用不锈钢无缝钢管
  - [8] GB/T 19189 压力容器用调质高强度钢板
  - [9] GB/T 21833(所有部分) 奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管
  - [10] GB/T 22030 车用乙醇汽油调合组分油
  - [11] GB/T 24511 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带
  - [12] GB/T 26610.4 承压设备系统基于风险的检验实施导则 第4部分:失效可能性定量分析方法
  - [13] GB/T 35013—2018 承压设备合于使用评价
  - [14] JB/T 4732 钢制压力容器—分析设计标准
  - [15] JB/T 4734 铝制焊接容器
  - [16] JB/T 4745 钛制焊接容器
  - [17] JB/T 4755 铜制压力容器
  - [18] JB/T 4756 镍及镍合金制压力容器
  - [19] NB/T 47008 承压设备用碳素钢和合金钢锻件
  - [20] NB/T 47009 低温承压设备用合金钢锻件
  - [21] ASME 2019 II Part A ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2019 II Part A; Ferrous Material Specifications
  - [22] ASME 2019 II Part B ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2019 II Part B; Nonferrous Material Specifications
  - [23] ASTM 2004 UNS ASTM 2004 Unified Numbering System
-