



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 42606—2023



## 固定式压力容器修理导则

Guidelines for repair of stationary pressure vessels

2023-05-23 发布

2023-05-23 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 总体要求 .....	2
5 焊接修理 .....	5
5.1 焊接挖补修理 .....	5
5.2 外壁堆焊修理 .....	11
5.3 密封焊接修理 .....	16
5.4 焊接卡具修理 .....	17
5.5 套筒焊接修理 .....	21
5.6 带加强塞焊贴板修理 .....	26
5.7 圆角焊接贴板修理 .....	31
5.8 堆焊和补焊修理 .....	35
5.9 螺纹塞或塞焊堵头修理 .....	39
6 机械修理 .....	41
6.1 更换承压部件 .....	41
6.2 冷冻塞 .....	42
6.3 螺纹修理 .....	47
6.4 去除金属 .....	49
6.5 法兰修理和更换 .....	52
6.6 机械夹具修理 .....	54
6.7 管道矫直或煨弯 .....	58
7 检验和试验 .....	60
8 文件管理 .....	60
附录 A (规范性) 石墨制压力容器的修理 .....	61
A.1 修理 .....	61
A.2 无损检测和试验 .....	62
附录 B (资料性) 焊前预热的替代方法 .....	63
B.1 概述 .....	63
B.2 设计 .....	63
B.3 修理 .....	65
B.4 无损检测 .....	67

附录 C (资料性) 焊后热处理的替代方法 ..... 69

    C.1 概述 ..... 69

    C.2 修理 ..... 69

附录 D (资料性) 碳钢承压设备的在役焊接 ..... 70

    D.1 概述 ..... 70

    D.2 注意事项和安全预防措施 ..... 70

    D.3 在役焊接种类 ..... 70

    D.4 在役焊接工艺变量 ..... 71

    D.5 无损检测 ..... 76

附录 E (资料性) 现场热处理 ..... 77

    E.1 概述 ..... 77

    E.2 设计 ..... 77

    E.3 修理注意事项 ..... 79

    E.4 检查和检测 ..... 79

附录 F (资料性) 铬钼钢制压力容器的焊接注意事项 ..... 81

    F.1 概述 ..... 81

    F.2 设计 ..... 83

    F.3 修理 ..... 84

    F.4 无损检测 ..... 85

    F.5 试验 ..... 85

附录 G (资料性) 热态拆卸和半数拆卸螺栓的方法 ..... 86

    G.1 概述 ..... 86

    G.2 相关风险 ..... 86

    G.3 设计 ..... 86

    G.4 拆卸过程 ..... 87

附录 H (资料性) 管壳式换热器的检修 ..... 89

    H.1 概述 ..... 89

    H.2 设计 ..... 89

    H.3 修理 ..... 91

    H.4 无损检测 ..... 94

    H.5 试验 ..... 95

参考文献 ..... 96

## 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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

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、中国石油化工股份有限公司、一重集团大连核电石化有限公司、中石油克拉玛依石化有限责任公司、中国石油四川石化有限责任公司、北京航空航天大学、南京工业大学、江苏省特种设备安全监督检验研究院、中国石化工程建设有限公司、北京燕华工程建设有限公司、上海赛科石油化工有限责任公司、中特检验集团有限公司。

本文件主要起草人：李志峰、邵珊珊、康晓鹏、卜华全、何承厚、任刚、周凤革、赵敏珍、张恩贵、孙福广、张峥、赵建平、缪春生、夏少青、康鸿雁、路宝玺、宋利滨、郭璟倩、李智慧。



# 固定式压力容器修理导则

## 1 范围

本文件规定了在役固定式压力容器(以下简称“容器”)以及与其相连的工业管道(以下简称“管道”)的修理要求。

本文件适用于《特种设备目录》中钢制和石墨制固定式容器及管道的修理,其他金属制固定式容器及管道的修理可参照使用。

## 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 150(所有部分) 压力容器
- GB/T 1954 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法
- GB/T 20801(所有部分) 压力管道规范 工业管道
- GB/T 21432 石墨制压力容器
- GB/T 26467 承压设备带压密封技术规范
- GB/T 26468 承压设备带压密封夹具设计规范
- GB/T 42595 承压设备修理基本要求
- NB/T 47013(所有部分) 承压设备无损检测
- NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
- NB/T 47015 压力容器焊接规程
- NB/T 47018(所有部分) 承压设备用焊接材料订货技术条件

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**工艺危害分析** **process hazard analysis; PHA**

在一系列的假设前提下按理想的情况建立模型,对事故的危险类别、出现条件、后果等进行概略地分析。

### 3.2

**预期修理寿命** **expected repair life**

采用制造标准或合于使用评价标准对修理方法的预期效果进行评价,得到按修理方案实施后设备的剩余寿命。

3.3

**挖补 flaw excavation and weld repair**

采用机加工或热加工方法去除承压部件缺陷部位后,将补板焊接于去除缺陷后留下的窗口位置的修理方法。

3.4

**补板 butt-welded insert plate**

焊接挖补法中用于填补缺陷去除部位的承压部件。

3.5

**密封焊接 seal-welded**

当螺纹连接无法满足设备运行过程中的密封性时,在螺纹啮合后的部位进行的焊接。

3.6

**冷冻塞 freeze plug**

通过降低管道外壁温度使内部液体介质冷冻形成栓塞,用来隔离管段上、下游介质的技术。

注:二氧化碳和液氮是两种最常用的冷冻剂。

3.7

**打磨 grinding**

利用由砂纸或硬质磨削材料制成的砂轮对金属进行磨削的表面处理工艺。

3.8

**珩磨 honing**

对圆筒形部件的内表面进行加工,使其表面尺寸达到较高精度的一种精磨工艺。

3.9

**精研 lapping**

一种抛光技术,用于要求粗糙度非常低的表面加工。

3.10

**机加工 machining**

使用机械化切割设备(镗杆,铣床,法兰端面加工机、便携式车床等)去除缺陷的加工处理方法。

3.11

**热刨 thermal gouging**

一种金属去除方法,用热量使金属部件局部熔化,并通过高速空气或气体喷射的力量将熔化的金属去除。

3.12

**临界转变温度 critical transformation temperature**

晶体结构开始从体心立方(BCC)向面心立方(FCC)转变的最低温度。

4 总体要求

4.1 容器的修理工作程序应符合 GB/T 42595 的要求。

4.2 修理方法包括焊接修理和机械修理,针对的缺陷包括壁厚减薄、裂纹、沟槽、分层、鼓泡等,具体见表 1。

表 1 修理方法列表及适用性

修理方法类别	修理方法	全面减薄	局部减薄	点蚀	沟槽	鼓泡	分层	周向裂纹	纵向裂纹	
焊接修理	5.1 焊接挖补修理 <sup>a</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
	5.2 外壁堆焊修理 <sup>b</sup>	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	
	5.3 密封焊接修理 <sup>c</sup>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	5.4 焊接卡具修理 <sup>d</sup>	N	Y	Y	N	N	N	R	R	
	5.5 套筒焊接修理	A 型	Y <sup>e</sup>	Y <sup>e</sup>	Y <sup>e</sup>	R	N	N	N	N
		B 型	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	R
	5.6 带加强塞焊贴板修理	N	Y	Y	Y	S	N	R	R	
	5.7 圆角焊接贴板修理	N	Y	Y	Y	S	N	R	R	
	5.8 堆焊和补焊修理	N	Y	S	S	S	N	N	N	
5.9 螺纹塞或塞焊堵头修理	N	Y	Y	Y	S	N	R	R		
机械修理	6.1 更换承压部件	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
	6.2 冷冻塞 <sup>f</sup>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	6.3 螺纹修理 <sup>g</sup>	N	N	N	N	N	N	N	N	
	6.4 去除金属 <sup>h</sup>	NA	NA	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
	6.5 法兰修理和更换	N	N	Y	Y	S	N	Y	N	
	6.6 机械夹具修理 <sup>b-i</sup>	N	Y	Y	R	N	N	R	R	
	6.7 管道矫直或煨弯	N	N	N	N	N	N	N	N	
注：“Y”表示适用，“S”表示不宜使用但可接受，“R”表示在分析修理方法和应用情景的适用性基础上可使用，“N”表示不应使用，“NA”表示不适用。										
<sup>a</sup> 该技术可用于接管更换、凹坑和划痕缺陷的修理。 <sup>b</sup> 限制条件见 5.2.2。 <sup>c</sup> 该技术用于提高螺纹连接接头的密封性。 <sup>d</sup> 该技术用于法兰、阀门等管道组成件、焊接接头和机械接头的泄漏修理。 <sup>e</sup> 对于内部缺陷，应分析并确定缺陷产生的原因，宜使用 B 型套筒。 <sup>f</sup> 该技术用于管道的隔离。 <sup>g</sup> 该技术用于螺孔中损坏螺纹的修理。 <sup>h</sup> 该技术也可用于表面硬化的修理。 <sup>i</sup> 该技术用于垫片和填料泄漏的修理。										

4.3 使用单位和修理单位应根据现场实际情况确定修理方法，可采用一种方法或几种方法的组合。

4.4 应力分析时所采用的计算压力，除非有特殊规定，应为最高允许工作压力。

4.5 修理过程中的设计、材料、焊接、热处理、无损检测、耐压试验和泄漏试验等，应按照第 5 章和第 6 章的规定执行。

4.6 第 5 章和第 6 章对焊接过程若无具体规定，修理的焊接过程应符合 NB/T 47015 的规定，焊材应符合 NB/T 47018(所有部分)的规定，各类焊缝的焊接工艺应按照 NB/T 47014 评定合格，焊工应按相关法规取得相应焊接项目的资质。

4.7 采用焊接修理方法时，修理单位应掌握材料的各项性能，尤其是材料的可焊接性。

4.8 无损检测作业的程序、人员、工机具应符合 NB/T 47013 相关部分的规定,其中射线检测应符合 NB/T 47013.2 或 NB/T 47013.11 的规定;超声检测应符合 NB/T 47013.3 或 NB/T 47013.10 的规定;无损检测发现的缺陷应按照 NB/T 47013 相关部分的规定对相关显示进行评定。

4.9 修理后设备的耐压试验和泄漏试验介质、试验参数、试验程序等应按照相关标准、设计文件和修理方案的规定执行。

4.10 施焊环境温度低于 0℃ 的容器和管道不应在役焊接修理。

4.11 修理过程中的带压堵漏应按照 GB/T 26467 的规定进行。

4.12 石墨制压力容器的修理应符合附录 A 的规定。

4.13 焊前预热的替代方法见附录 B。若修理过程中存在以下情况,不应采用焊前预热替代方法。

- a) 设备的服役条件限制了替代预热方法的实施。
- b) 使用单位不同意采用焊前预热的替代方法。
- c) 设计文件或安装规范中禁止采用焊前预热的替代方法。

焊接碳含量或碳当量高的材料,或焊接高淬透性和具有高约束结构的材料时,不宜采用焊前预热的替代方法。

4.14 焊后热处理的替代方法见附录 C。所采用的焊后热处理替代方法应经过设计确认。如果未进行设计确认,焊接修理后的容器和管道应按照原标准或使用单位的要求实施焊后热处理。新制造或安装的设备可参照附录 B 的内容实施。以下焊接接头在采用焊后热处理的替代方法时应进行适用性测试:

- a) 使用过程中有发生氢脆的可能性的焊接接头;
- b) 使用温度在蠕变温度范围内的焊接接头;
- c) 管道系统上进行的在役修理焊接接头或带压堵漏焊接接头;
- d) 耐氢腐蚀、耐硫化物或应力腐蚀开裂材料的焊接接头;
- e) 异种钢焊接接头。

若设备存在应力腐蚀开裂机理(如涉及胺、苛性碱或碳酸盐的使用环境),应评估采用焊后热处理的替代方法是否会影响修理部位在使用环境中的材质适应性。

4.15 碳钢承压设备的在役焊接见附录 D。焊缝应在焊接完成后进行检测,检测方法和验收标准应符合设计文件和修理方案的要求。应根据设计文件和修理方案进行耐压试验,对安装后的带压封堵组件进行耐压试验时,应分析运行温度对试验的影响,避免试验流体闪蒸成蒸汽。

4.16 现场热处理的技术要求见附录 E。现场热处理前应按照 GB/T 35013 的相关要求对膨胀量进行评估。现场热处理后按照相关标准的要求进行耐压试验或泄漏试验。在设备投用前,应测试仪表和电气线路的连接是否正确,联锁操作有无问题。有材料韧性要求的设备宜制备热处理试件,试验后得到的材料性能应满足相关法规和标准的规定。

4.17 铬钼钢制压力容器的焊接注意事项见附录 F。铬钼钢制压力容器的焊接工艺指导书应符合 NB/T 47014、设计文件和修理方案的要求。对于无法进行焊后热处理的低合金钢焊缝,评估后方可采用回火焊技术替代焊后热处理。无损检测的工艺流程应符合 NB/T 47013 相关部分的要求。

4.18 热态拆卸和半数拆卸螺栓的方法见附录 G。在应用热态拆卸和半数拆卸螺栓的方法时,应对附录 G 提出的风险进行评估。附录 G 仅对热态拆卸和半数拆卸螺栓提出了一般性指导,实际应用时应结合具体作业程序以及安全作业规定实施。拆卸过程中或作业完毕后应目视检查螺栓上的标记,确认是否使用了正确的材料,可用光谱分析和硬度检测补充检测。

4.19 管壳式换热器的检修要求见附录 H。管壳式换热器的焊接修复都应使用评定合格的焊接工艺,焊工资质应符合适用标准和规范要求。若适用的标准和规范对焊接工艺评定过程中的试板有冲击试验要求的,应按照适用的标准和规范执行。碳钢和低合金钢的焊接应使用低氢型焊条。

## 5 焊接修理

### 5.1 焊接挖补修理

#### 5.1.1 适用性

5.1.1.1 本方法适用于修理圆筒形、球形、圆锥形和板形承压部件。在补板和封头曲率匹配的情况下,也可用于修理封头。

5.1.1.2 本方法适用于存在穿透性裂纹的局部部位,或因冲刷、腐蚀及其他损伤造成的局部减薄部位的修理。

5.1.1.3 本方法不适用于筒体、球壳板、封头、管子或管件等承压部件的整体更换。

#### 5.1.2 限制条件

低温( $\leq -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )或高温( $\geq 315\text{ }^{\circ}\text{C}$ )工况不宜采用铁素体-奥氏体钢的异种钢焊接接头。

#### 5.1.3 设计

##### 5.1.3.1 一般要求

除 5.1.3.3 中规定的特殊情况外,补板厚度、材料和焊缝、焊接接头系数及质量验收条件等均应符合原设计文件的要求,许用应力应按照原设计标准选取。

对于外压容器,应分析因修理产生的永久变形或错边对稳定性的影响,如果部件承受循环载荷作用,还应分析永久变形对部件疲劳寿命的影响。

##### 5.1.3.2 材料

补板和焊材应采用与原设计相同的材料。当采用原设计材料的同类别材料时,其许用应力和韧性应略高于原设计材料,并符合使用要求。

对于有衬里或堆焊层的设备,补板的衬里或堆焊层材料应与原设备的相兼容,并应符合合于使用的要求。

补板与承压部件之间为异种钢焊接时,补板材料应满足承压部件的机械性能要求,且应评估不同材料与使用环境之间的相容性,如果存在热疲劳,还应分析异种钢焊接加速疲劳断裂的可能性。

##### 5.1.3.3 补板厚度

补板厚度不应小于原设计要求的名义厚度。如果补板厚度不符合原设计要求,应按原设计标准进行强度校核,特殊情况时(如疲劳容器)应采用应力分析方法进行校核,校核结果应符合使用要求。

##### 5.1.3.4 矩形补板的圆角半径

矩形补板的圆角半径应符合以下要求(整块更换的按原设计标准和设计文件要求)。

- a) 板厚小于 13 mm 时,采用圆角型式,对圆角半径不作要求。
- b) 板厚大于或等于 13 mm 且小于 25 mm 时,圆角半径大于或等于 75 mm。
- c) 板厚大于或等于 25 mm 时,圆角半径大于或等于 150 mm。

##### 5.1.3.5 管状设备的补板形状

管状设备的补板形状可采用圆形、椭圆形(如图 1 所示)或采用圆角矩形。

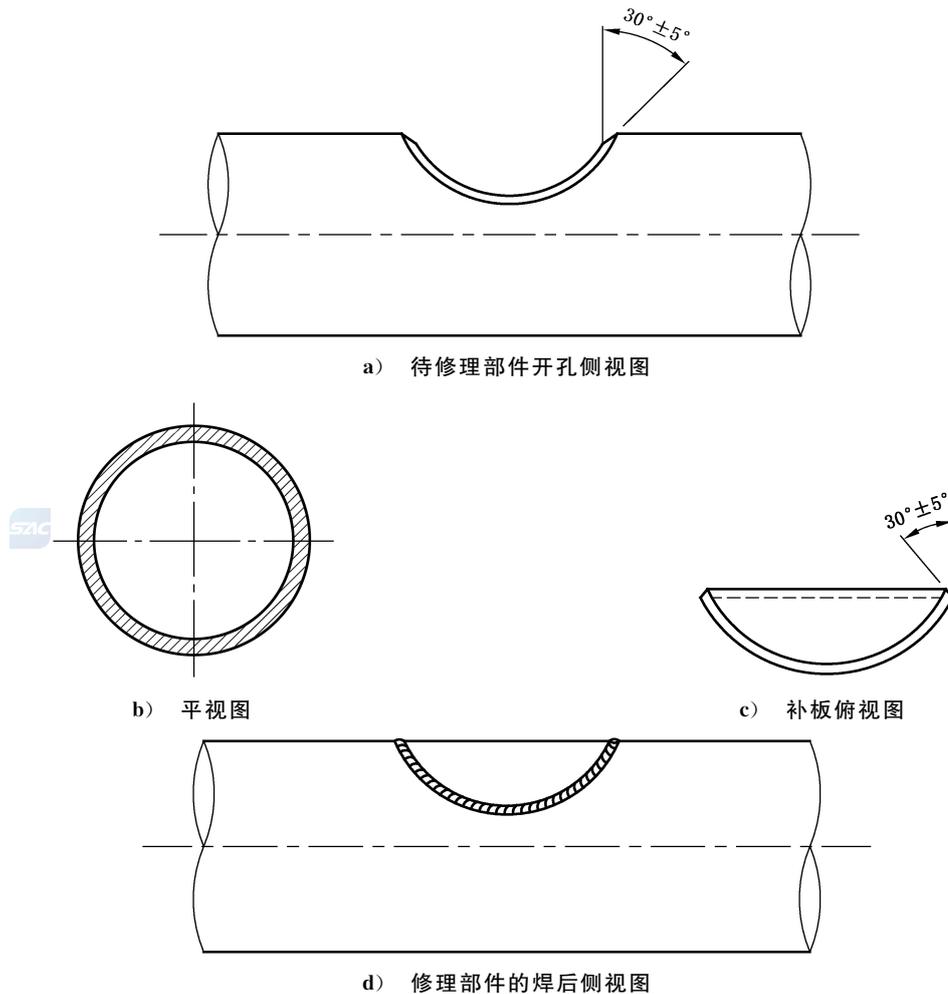


图 1 管状设备的补板形状

#### 5.1.3.6 补板尺寸

补板尺寸应大于或等于承压部件的损伤区域。

材质为碳钢或低合金钢,且不必焊后热处理的补板,其最小直径或最小短边长度应大于 12 倍基材厚度或 380 mm 中的较小值。带接管的补板尺寸要求应符合 5.1.3.8 的规定。

#### 5.1.3.7 开孔处的结构稳定性

挖补应分析设备的结构稳定性和无支撑板的壳体大开孔边缘的变形度。对更换部位进行切割作业时,应根据设备在修理过程中可能承受的所有载荷,包括设备焊后热处理时的结构稳定性,决定无支撑的开孔边缘是否应增设临时支撑。

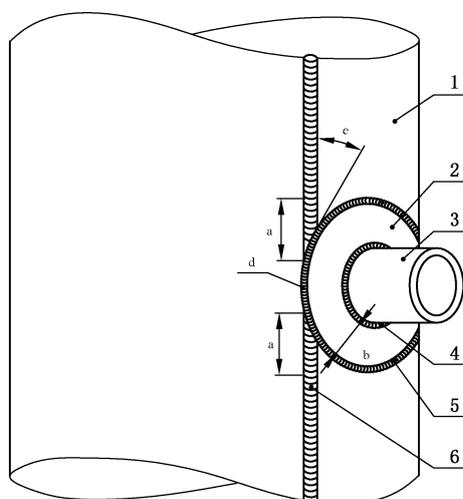
#### 5.1.3.8 带接管的补板

如果补板带有接管或人孔结构,对接管或人孔的补强应符合设备设计标准。

带有接管或人孔结构的补板,其直径为接管或人孔直径、补强宽度和焊接坡口斜面的宽度之和,最小直径应选择 a)和 b)中的较大值。

- a) 对于不必做焊后热处理的碳钢或低合金钢补板,接管角焊缝与补板对接焊缝边缘之间的最小距离不应小于 150 mm。

- b) 接管外径大于 300 mm 时,补板直径宜大于接管外径的 2 倍;接管外径小于或等于 300 mm 时,补板直径可不大于接管外径的 2 倍(补板与承压部件的焊接结构示意图见图 2 和图 3)。



标引序号说明:

- 1——壳体;  
2——补板;  
3——接管;  
4——接管角焊缝;  
5——补板与壳体对接焊缝;  
6——壳体对接焊缝。

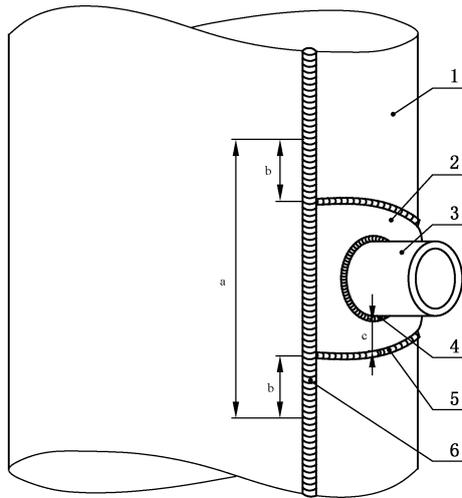
<sup>a</sup> 与补板相交的两侧焊缝(至少 100 mm 范围内)均应进行 100% 射线检测或超声检测;相交焊缝内外表面(长度至少 100 mm,宽度包括焊缝两侧各 50 mm 范围内)均应进行磁粉检测或渗透检测,如果内表面不具备磁粉检测或渗透检测的条件,可使用其他有效的检测方法从外表面检测内表面。

<sup>b</sup> 对于不必焊后热处理的碳钢或低合金钢材质的补板,接管角焊缝与补板对接焊缝边缘之间的最小距离不应低于 150 mm。

<sup>c</sup> 最小角度为 30°。

<sup>d</sup> 补板对接焊缝应进行 100% 射线检测或超声检测,且对焊缝内外表面应进行磁粉检测或渗透检测,如果内表面不具备磁粉检测或渗透检测的条件,可使用其他有效的检测方法从外表面检测内表面。

图 2 补板与承压部件焊接结构示意图



标引序号说明：

- 1——壳体；
- 2——补板；
- 3——接管；
- 4——接管角焊缝；
- 5——补板与壳体对接焊缝；
- 6——壳体对接焊缝。

- <sup>a</sup> 将原壳体焊缝与补板对接焊缝相交处两侧最小 150 mm 去除焊缝金属，并加工坡口，在补板对接焊缝焊接完毕后重新焊接。新焊缝应进行 100% 射线检测或超声检测，内外表面（包括焊缝两侧各 50 mm 范围内）应进行表面缺陷无损检测。如果内表面不具备磁粉检测或渗透检测的条件，可使用其他有效的检测方法从外表面检测内表面。
- <sup>b</sup> 壳体对接焊缝的去除长度为原焊缝与补板焊缝相交处两侧最小 150 mm。
- <sup>c</sup> 对于不必焊后热处理的碳钢或低合金钢材质的补板，接管角焊缝与补板对接焊缝边缘之间的最小距离不应低于 150 mm。

图 3 补板与承压部件“狗窝”形焊接结构示意图

### 5.1.4 修理

#### 5.1.4.1 切割和成形

5.1.4.1.1 可采用热切割、热刨、机加工和打磨的方法加工补板和承压部件上的焊接坡口。焊接坡口应符合相关标准的要求，采用热切割、热刨等热加工的方法加工的坡口应打磨去除热影响区。应对坡口进行渗透检测或磁粉检测。

5.1.4.1.2 补板一般可采用轧制或卷制的方法加工成形。管子补板宜从与被修理承压部件规格相同的管子上切割；如果补板厚度大于被修理管子的实际公称壁厚应削薄处理，削薄长度不应小于二者厚度差的 3 倍。

5.1.4.1.3 补板冷加工成形产生的应变应满足被修理设备的原设计标准要求。碳钢和低合金钢材质的补板在冷加工成形过程中伸长率超过 5% 时，应对补板进行消除应力热处理。补板的极限伸长率按公式(1)或公式(2)进行计算。

a) 单曲率壳体(圆筒形)：

$$\delta = \frac{50t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right) \dots\dots\dots (1)$$

b) 双曲率壳体(封头和球形)：

$$\delta = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $\delta$  ——极限伸长率，%；
- $t$  ——板材板厚，单位为毫米(mm)；
- $R_f$  ——成形后的中心曲率半径，单位为毫米(mm)；
- $R_o$  ——原始板材的中心曲率半径，单位为毫米(mm)。

5.1.4.1.4 除碳钢和低合金钢之外，其他材料补板冷加工成形产生的应变(如弯曲)未超过原设计标准要求的不做热处理。

5.1.4.1.5 补板对接焊缝错边量应满足 GB/T 150(所有部分)的规定或设计标准要求。如果补板与部件的厚度差超过 GB/T 150(所有部分)的规定或设计标准要求，应削薄处理，削薄长度不应小于二者厚度差的 3 倍。

#### 5.1.4.2 焊接

5.1.4.2.1 补板和原承压部件组对后的坡口两侧应在焊接前采用均布的弧板进行加固防止变形，弧板厚度宜与母材厚度相同，几何尺寸不应超过 200 mm×400 mm。

5.1.4.2.2 补板与原承压部件之间的焊缝应采用全焊透对接结构形式，并且宜采用双面全焊透对接结构。

5.1.4.2.3 焊接接头(焊缝和热影响区)的强度应符合设计标准规定的最小强度和韧性要求。不宜使用比原焊材强度级别更高的焊材。

5.1.4.2.4 焊接工艺规程应通过焊接工艺评定，焊接工艺评定应包括设计标准或设计文件中规定的冲击试验。

5.1.4.2.5 焊材应符合设计文件、修理方案和焊接工艺规程的要求。在制定修理方案时，应评估焊缝区域母材可能存在的损伤(如腐蚀减薄等)，合理选用焊材。碳钢和低合金钢部件的修理宜选用碱性焊材。

5.1.4.2.6 应根据腐蚀减薄等缺陷对焊接修理工作的影响制定焊接方案，选用降低残余应力和材料变形的装配和焊接方法。

5.1.4.2.7 施焊前应清洁焊缝附近区域的油脂、油漆、水垢及其他杂质。

5.1.4.2.8 补板焊缝应全焊透，应减少因焊接引起的变形和棱角度，降低由于附近材料的约束而导致焊接开裂的风险。

5.1.4.2.9 对于无法实现双面焊接的承压部件，根部焊道宜采用氩弧焊打底。

5.1.4.2.10 补板对接焊缝应打磨圆滑，必要时打磨至与母材平齐。焊趾应与母材平滑熔合。打磨造成的壁厚减薄量不应超过 0.8 mm 和相邻部件公称壁厚的 10% 中的较小值。在任何情况下，焊缝处壁厚都不应小于被修理承压部件的设计壁厚。

#### 5.1.4.3 碳钢和低合金钢承压部件上的不相交对接焊缝间距

5.1.4.3.1 若无焊后热处理要求，补板对接焊缝与承压部件本体对接焊缝或补强板角焊缝之间的间距应满足以下要求：

- a)  $t_w \leq 13$  mm 时，间距不小于 150 mm；
  - b)  $t_w > 13$  mm 时，间距为 250 mm 和  $8t_w$  中的较大值。
- $t_w$  ——补板焊缝与相邻焊缝的最大壁厚，单位为毫米(mm)。

5.1.4.3.2 若无焊后热处理要求，当  $t_w \leq 40$  mm，且相邻的不相交对接焊缝间距小于 5.1.4.3.1 的要求，应将本次修理焊接的焊缝打磨圆滑，并进行 100% 射线检测/超声检测和 100% 表面缺陷无损检测，其间距可减小到  $8t_w$  或 200 mm 中的较小值。

5.1.4.3.3 若原焊缝已进行过消应力热处理,则承压部件本体对接焊缝或加强板角焊缝与补板对接焊缝之间的间距不应小于  $2t_w$ 。

#### 5.1.4.4 碳钢和低合金钢承压部件上的相交焊缝

5.1.4.4.1 补板对接焊缝不宜与承压部件本体上的对接焊缝相交。若无法避免,与承压部件本体上未进行过消应力热处理的对接焊缝相交的补板对接焊缝,当采用图 2 所示的相交结构形式时,补板对接焊缝与承压部件本体对接焊缝间的相交角度不应小于  $30^\circ$ ,否则应采用图 3 所示的丁字焊缝结构。

5.1.4.4.2 应对相交点两侧重新焊接的焊缝内外表面实施 100% 表面缺陷检测,设计标准和修理方案有射线检测或超声检测要求的,应按原设计标准或修理方案要求实施。图 3 所示的“狗窝”形结构,应对所有新增焊缝进行 100% 射线检测或超声检测和 100% 表面缺陷检测。

#### 5.1.4.5 热处理

5.1.4.5.1 在临氢或可能由于腐蚀产生氢的环境中使用的设备,补板焊接前应对焊接位置进行消氢热处理。

5.1.4.5.2 补板焊缝以及接管/人孔和补板之间的焊缝应依据设计标准或修理方案进行焊后热处理。在热处理期间应采取适当的预防措施,以免发生变形。

5.1.4.5.3 原设计要求焊后热处理的设备补板修理后应进行焊后热处理。

#### 5.1.5 无损检测

##### 5.1.5.1 补板焊缝

5.1.5.1.1 补板焊缝及受补板焊接影响的焊缝应进行 100% 射线检测或超声检测,焊缝内外表面应进行 100% 表面缺陷无损检测。

5.1.5.1.2 若内表面(或外表面)无法进行表面缺陷检测,采用超声检测时应观察非检测面的缺陷回波。采用超声波衍射时差法检测时,技术等级不应低于 NB/T 47013.10 中的 B 级。

5.1.5.1.3 当设计要求磨平焊缝余高时,无损检测应在焊缝磨平后进行。

5.1.5.1.4 有延迟裂纹倾向的,在焊接完成 24 h 后进行无损检测。

##### 5.1.5.2 附加检测要求

5.1.5.2.1 应对矩形或方形补板的圆角周围的焊缝根部焊道、填充焊道及成形焊缝表面进行表面缺陷检测。

5.1.5.2.2 焊缝间距较小或出现丁字焊缝时,应按 5.1.4.3.2 和 5.1.4.4.2 对焊缝进行附加检测。

#### 5.1.6 试验

5.1.6.1 主要受压元件补板修理后应进行耐压试验,试验过程应满足原设计标准的要求;如果无法进行耐压试验,经设计单位同意和专家会议评审通过后,可采用无损检测方法替代耐压试验。若采用无损检测方法替代耐压试验,除 5.1.5 规定的无损检测部位外,还应对补板 1 m 范围内的原焊缝进行 100% 射线检测或超声检测,焊缝内外表面进行 100% 表面缺陷检测。

5.1.6.2 耐压试验前,应评估在原使用条件下可能发生的材质劣化和脆化对设备材质韧性的影响,还应分析与试验介质有关的任何危害(毒性、易燃性、爆炸性等)。

5.1.6.3 采用气体作为耐压试验介质时,应采取额外的安全预防措施。

5.1.6.4 设备的泄漏试验可单独进行,也可与耐压试验同时进行。在升压过程中,升压至泄漏试验压力时检查泄漏,然后再继续升压至耐压试验的压力。

5.1.6.5 对于有绝热层或涂层的设备,耐压试验或泄漏试验应在绝热层或涂层施工前进行。

## 5.2 外壁堆焊修理

### 5.2.1 适用性

5.2.1.1 本方法通过在设备内壁局部减薄部位所对应的外壁区域堆焊金属,使减薄部位恢复到适当的壁厚,从而避免设备因结构强度不足而发生失效。使用该修理方法时,应分析设备的减薄机理和腐蚀速率。

5.2.1.2 本方法适用于修理流动加速腐蚀、冲刷腐蚀以及其他腐蚀造成的内壁局部减薄,但不适用于修理裂纹类缺陷。

5.2.1.3 本方法适用于修理碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢材质的容器和管道。

5.2.1.4 本方法不适用于修理满载液体介质的部件和Ⅲ类固定式压力容器。

### 5.2.2 限制条件

5.2.2.1 设备存在开裂机理时,不应采用此方法。

5.2.2.2 使用单位和修理单位在使用本方法前,应评估设备内介质的可燃性、挥发性和潜在反应特性(包括在修理时介质自身的反应和介质与钢材可能发生的反应),严禁在不清楚介质特性的情况下施焊。施焊前应对氢、氰化氢、氧、碱/苛性材料、丁二烯、炔类化合物、硫化氢、氯和酸等易燃易爆、有毒有害物质进行置换处理。修理方案中应明确是否对介质进行置换。

5.2.2.3 若焊接温度接近或处于基材的蠕变温度范围内,应根据 5.2.3 中的工程设计方法进行评定。

### 5.2.3 设计

#### 5.2.3.1 堆焊结构设计

##### 5.2.3.1.1 堆焊材料

外壁堆焊的材料应满足以下条件。

- a) 堆焊材料的化学成分与基材相匹配。
- b) 堆焊材料的抗拉强度不低于基材的抗拉强度。
- c) 可通过设计计算和合于使用评价选择替代材料。

##### 5.2.3.1.2 堆焊形状一般要求

堆焊结构见图 4,堆焊形状应满足以下要求。

- a) 堆焊形状不会妨碍修理后的无损检测和试验。
- b) 堆焊层完全覆盖减薄区域并延伸至减薄区域外,且在各个方向上的延伸长度不小于  $B$ ,延伸部分的堆焊层厚度与减薄区域的堆焊层厚度相同(除非通过设计计算或其他方式证明可不执行此条要求),延伸部分的长度按公式(3)计算。

$$B = \frac{3}{4} \sqrt{Rt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

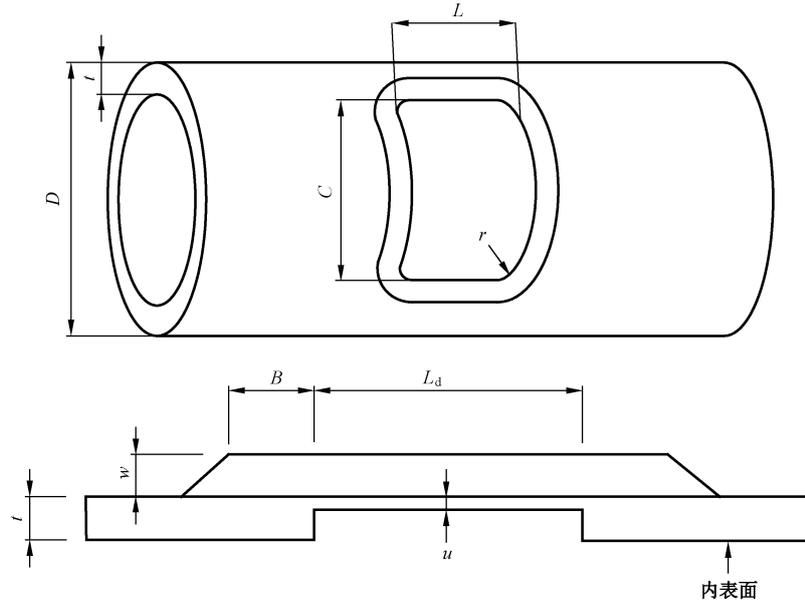
$B$  ——堆焊层延伸长度,单位为毫米(mm);

$R$  ——堆焊层外缘半径,或  $\frac{1}{2}D$ ,单位为毫米(mm);

$t$  ——公称壁厚,单位为毫米(mm)。

- c) 堆焊层逐步减薄过渡至设备表面,坡度不超过  $45^\circ$ 。

- d) 堆焊厚度满足预期修理寿命的要求。
- e) 堆焊圆角半径  $r$  不小于堆焊厚度。
- f) 堆焊层的腐蚀裕量根据工况条件确定。
- g) 如果存在多个堆焊层,相互间距不小于每个堆焊层的  $\frac{3}{4}\sqrt{Rt}$ 。
- h) 堆焊平均高度  $w$  不超过设备的公称壁厚。
- i) 若堆焊结构无法满足 5.2.3.1.1 和 5.2.3.1.2 的要求,采用工程设计[5.2.3.1.3 b)]或验证试验(5.2.3.2)进行设计。



标引说明:

- $t$  ——公称壁厚,单位为毫米(mm);
- $D$  ——承压件外径,单位为毫米(mm);
- $L$  ——堆焊长度,单位为毫米(mm);
- $C$  ——堆焊宽度,单位为毫米(mm);
- $r$  ——堆焊圆角半径,单位为毫米(mm);
- $w$  ——堆焊平均高度,单位为毫米(mm);
- $u$  ——缺陷处剩余壁厚,单位为毫米(mm);
- $B$  ——堆焊延伸长度,单位为毫米(mm);
- $L_d$  ——缺陷长度,单位为毫米(mm)。

图 4 堆焊结构示意图

### 5.2.3.1.3 设计要求

堆焊层的设计应符合下列条件之一。

- a) 符合性设计指在容器筒节及其焊缝或管道直段及其焊缝上进行堆焊时,如果符合相关条件可免除工程设计或验证试验,具体条件如下。
  - 1) 符合 5.2.3.1.1 和 5.2.3.1.2 的所有要求。
  - 2) 设备最高设计温度不超过 340 °C。
  - 3) 基材的公称厚度不小于 Sch40 和设计标准壁厚中的较小值,容器基材的公称厚度不小于有效壁厚。

- 4) 堆焊的坡度不超过 30°。
  - 5) 堆焊完成后,其形状为圆形、椭圆形或矩形。
  - 6) 圆形、椭圆形或矩形堆焊修复层的轴向堆焊长度  $L$  不超过设备公称半径和 200 mm 的较小值。
  - 7) 矩形堆焊层与被修理承压部件的轴线平行或垂直对齐,边角圆形过渡,边角半径不小于堆焊层厚度。
  - 8) 椭圆形堆焊层长轴半径不小于  $\frac{3}{4}\sqrt{Rt}$ ,并且堆焊层的轴线平行或垂直于被修理承压件的轴线。
  - 9) 堆焊至少能将修理部位的壁厚恢复至公称壁厚。
  - 10) 除圆滑过渡的边缘外,堆焊层的厚度相对均匀。
  - 11) 若原设计标准要求进行柔性分析,堆焊层与原分析结果相符或按照 b)设计。
- b) 工程设计指采用相应的工程设计方法对堆焊层结构进行评价计算。采用工程设计方法时,可选取计算温度下基材材料的许用应力作为堆焊材料的许用应力值。

开展工程设计时,应分析:

- 1) 焊材的收缩效应;
- 2) 柔性、应力集中和截面特性的影响;
- 3) 被修理承压件内部结构的应力集中;
- 4) 基材和堆焊层的热膨胀系数差异;
- 5) 焊接输入热量对堆焊层的影响;
- 6) 工作温度高于 340 °C 时发生蠕变的可能性。

### 5.2.3.2 验证(爆破)试验

5.2.3.2.1 验证(爆破)试验可作为工程设计的替代方法对堆焊层的设计进行验证。当满足下述条件时,可在同类承压部件的相同位置开展验证试验。

- a) 试验模型材料的焊评类别、组别应与被修理承压部件基材相同。
- b) 试验模型基材材料的抗拉强度不应小于被修理承压部件的最小抗拉强度。
- c) 试验模型堆焊区域的平均厚度不应小于被修理承压部件内壁减薄的壁厚。
- d) 试验模型的堆焊延伸长度  $B$  应与被修理承压部件的相同。
- e) 试样模型坡度不应小于被修理承压部件的坡度。
- f) 试验模型表面状况等于或劣于被修理承压部件堆焊层表面。
- g) 试验模型的最大轴向尺寸与直径比( $L/D$ )不应小于被修理承压部件相应值。
- h) 试验模型的最大周向尺寸与直径比( $C/D$ )不应小于被修理承压部件相应尺寸的比值。
- i) 试验模型的公称直径不大于被修理承压部件的 2 倍,且不小于被修理承压部件的 1/2。
- j) 试验模型的公称壁厚与直径的比值( $t/D$ )不大于被修理承压部件的 2 倍,且不小于被修理承压部件的 1/3。

5.2.3.2.2 模拟试验模型的减薄区域,可从外部挖除模拟减薄区域(局部减薄或点蚀坑)的金属,然后堆焊,堆焊厚度为模拟腐蚀量,堆焊坡口处应全焊透,堆焊层应与模拟外表面平齐;也可用磨削、水力切割等机械加工方法从内部去除等量的基材来模拟缺陷,然后在外部堆焊。

5.2.3.2.3 堆焊结构的截面厚度(堆焊层+基材)见图 4 中的尺寸  $u$  和  $w$ 。为了保守评价堆焊结构的可靠性,试验模型减薄区域的壁厚( $u+w$ )不应大于公称壁厚的 87.5%。

5.2.3.2.4 爆破压力不应小于最小允许爆破压力,最小允许爆破压力按公式(4)计算:

$$P = \frac{2t_{\min} S_{\text{act}}}{D} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$P$  ——最小允许爆破压力，单位为兆帕(MPa)；

$t_{\min}$  ——试验模型基材的最小厚度(即名义厚度减去材料厚度负偏差)，单位为毫米(mm)；

$S_{\text{act}}$  ——试验模型基材的材料标准抗拉强度上限值，单位为兆帕(MPa)；

$D$  ——被修理承压部件外直径，单位为毫米(mm)。

5.2.3.2.5 若原设计标准要求进行柔性分析的，应对堆焊部位的管系进行柔性分析，或按照 5.2.3.1.3 进行评定。

### 5.2.3.3 爆破测试注意事项

爆破试验前做好以下工作。

- a) 泵的出口压力应超过最大计算爆破压力的 25%。
- b) 所有管件、软管和压力表的额定工作压力不应小于泵的额定压力，与试验模型相连的管件应采用承插焊结构，压力表应在有效的校准期内，试验模型的预期爆破压力应在压力表额定值的  $1/4 \sim 2/3$ 。
- c) 爆破试验前应设置必要的安全防护措施，避免试验过程中因碎片飞溅造成人员伤亡和财产损失。

### 5.2.4 修理

#### 5.2.4.1 修理前的准备工作

修理前开展以下准备工作。

- a) 对待堆焊修理的承压部件基材状况进行分析，确定待堆焊部位的平均壁厚和结构。
- b) 为了修理后不会产生新的潜在损伤机理，应分析壁厚减薄原因及腐蚀速率。
- c) 确定被修理承压部件是否发生过开裂。
- d) 测量减薄区域，确定堆焊的范围。
- e) 对待堆焊部位进行无损检测，确定没有影响堆焊质量的缺陷。

#### 5.2.4.2 待堆焊部位的表面处理

修理前应对待堆焊部位的表面进行以下处理。

- a) 待堆焊部位的表面无锈蚀、污垢、油漆、涂层或其他杂质。打磨去除待堆焊部位表面氧化物或保护涂层。
- b) 堆焊前，使用丙酮等溶剂彻底清洁待堆焊部位表面，去除任何油脂和水迹。
- c) 如果有泄漏点，在堆焊前采用焊接或其他方法堵漏。
- d) 对于带压堵漏或在存在易燃易爆、有毒有害介质的系统进行的密封焊接修理制定特殊方案。

#### 5.2.4.3 堆焊位置的标识

可在待堆焊部位表面划线或采用其他标记对堆焊区域进行标识。

#### 5.2.4.4 焊条的规格和材质

焊条的规格和材质满足以下条件。

- a) 焊条的材质应满足 5.2.3.1.1 的要求。
- b) 堆焊前，应测定待堆焊部位的剩余壁厚，正确选用焊条规格，防止基材被烧穿。
- c) 为了减少烧穿的可能性，堆焊第一层金属时应使用较小直径的焊条。如果对剩余壁厚值的准

确性存在疑问,如存在点蚀的情况下,宜选择小直径焊条。

- d) 焊条直径不应超过待堆焊部位的剩余壁厚。
- e) 应评估基材烧穿的可能性和后果。

#### 5.2.4.5 焊接工艺

焊接工艺满足以下条件。

- a) 可采用的焊接方法包括但不限于手工电弧焊(SMAW)和钨极惰性气体保护焊(GTAW)。
- b) 焊条直径大于待堆焊部位的剩余壁厚时,宜停机修理;如果无法停机,应在修理焊接前对设备进行降压操作。
- c) 不停机修理时,焊接前应降低系统压力,或参照附录 D 采用适用的不停机焊接技术。
- d) 对待堆焊区域进行标识并完成表面清洁后,即可开始焊接。在焊道完全熔合的前提下,宜采用低的热输入。为明确焊接区域的界限并改善热影响区质量,初始焊道应沿堆焊区域的外围焊接。在完成外围焊道之后,可按照焊接工序堆焊第一层。
- e) 为了减少烧穿的可能性并获得合适的焊道布置,应保持约 50% 的焊道重叠。为防止第一层焊道中的熔融金属液将基材烧穿,应在剩余壁厚较大的部位开始堆焊,然后叠加后续焊道,跨过壁厚较薄的区域。
- f) 堆焊结构边缘坡度减弱了因堆焊区域几何不连续而引起的应力集中,堆焊结构边缘坡度宜为 30°,不应大于 45°。
- g) 应按照设计标准或修理方案实施堆焊部位的热处理。实施热处理的部位应与系统隔离。如果设计标准未提出热处理要求,但堆焊部位处于湿硫化氢等可能发生应力腐蚀开裂的环境中,也应对堆焊部位实施热处理。
- h) 在碳钢和低合金钢材质的待修理承压部件上可采用回火焊技术替代热处理。因工况条件应实施热处理的情况(介质含有 H<sub>2</sub>S、HCN、HF 的湿润环境),不应使用回火焊方法替代热处理。

#### 5.2.4.6 堆焊后的表面处理

在实际堆焊厚度大于设计厚度的基础上,可采用打磨或其他机加工的方法来改善堆焊表面的粗糙度。

### 5.2.5 无损检测

#### 5.2.5.1 表面缺陷检测

堆焊层表面及其边缘 50 mm 范围内的被修理承压部件基材表面应进行 100% 表面缺陷检测,检测结果应满足修理方案中的验收标准。

#### 5.2.5.2 堆焊层厚度测量

使用超声检测仪器按照 NB/T 47013.3 对堆焊层进行测厚,验证其厚度是否满足修理方案的要求。

#### 5.2.5.3 埋藏缺陷检测

堆焊层(不包括坡形边缘)和基材应进行射线检测或超声检测,检测结果应满足修理方案中的验收标准。

### 5.2.6 试验

#### 5.2.6.1 耐压试验

耐压试验前应将被修理设备与系统隔离,并根据相关标准和修理方案的要求进行耐压试验。气压

试验时应采取必要的安全预防措施。如果耐压试验实施困难,经使用单位或设计单位同意,可采用无损检测和泄漏试验替代耐压试验。

#### 5.2.6.2 泄漏试验

如果相关标准或修理方案有要求,应进行泄漏试验。

#### 5.2.6.3 绝热层和涂层

对于有绝热层或涂层的设备,耐压试验或泄漏试验应在绝热层或涂层施工前进行。

### 5.3 密封焊接修理

#### 5.3.1 适用性

本方法可用于改善螺纹连接接头的密封性或对发生泄漏的螺纹连接接头进行密封。

#### 5.3.2 限制条件

在线或对含危险介质的系统进行密封焊修理时应制定安全防护方案,安全防护方案应由单位负责人审批。

#### 5.3.3 设计

##### 5.3.3.1 适用标准

修理原密封焊缝可参照原标准或适用的其他标准,并在设计中明确:

- a) 密封焊缝仅能实现密封性能,而不能提供接头的机械强度;
- b) 对剩余的外露螺纹(如果有)进行包焊。

##### 5.3.3.2 在用接头的修理

应对每个在用螺纹接头密封焊接修理的安全性和可靠性进行评估。为了提高螺纹连接的可靠性,宜在外露螺纹上施加两道密封焊缝。

##### 5.3.3.3 对相邻部件的影响

密封焊接修理时,应评估焊接对相邻部件(如丝扣阀门中的软密封阀座)可能造成的破坏性影响。

##### 5.3.3.4 重新安装接头

重新安装拆卸解体的螺纹接头时,不应使用胶带、润滑剂或接头密封剂。

##### 5.3.3.5 焊前评估

修理前,应对螺纹连接接头材质的可焊性进行评估。应根据材料特性和使用工况确定是否对螺纹接头进行高温预热,或采用不锈钢或铬钼钢焊材,或有其他特殊焊接要求。

#### 5.3.4 修理

##### 5.3.4.1 危害辨识

对在用螺纹连接进行密封焊接修理之前,应辨识修理过程产生的潜在危险,并确定在装置运行期间是否可隔离待修理部位,人员与介质接触的风险以及非计划停工的后果。经过评估后,确定是否全部

更换螺纹连接部位。

#### 5.3.4.2 系统隔离

用蒸汽、氮气或其他惰性气体对整个系统进行吹扫后进行能量隔离。

#### 5.3.4.3 待修理部位的处理

密封焊接修理前,应清理待修理的螺纹接头表面的所有污染物。修理过程中螺纹密封剂、润滑剂不应污染工艺流体。

#### 5.3.4.4 疲劳因素

对受振动或疲劳影响的螺纹连接接头,应在密封焊接修理前打磨去除所有暴露的螺纹。

#### 5.3.4.5 对原密封焊接接头的修理或更换

原密封焊接头修理或更换时按下列要求执行。

- a) 如果更换管子或管件,不应使用螺纹密封剂或润滑剂。
- b) 如果在不拆卸的情况下进行修理,应目视检查原密封焊缝的完整性,确定是否应完全清除原密封焊缝。

#### 5.3.4.6 无需拆卸即可焊接的螺纹连接结构

无需拆卸即可焊接的螺纹连接结构修理时按下列要求执行。

- a) 可使用钢丝刷或打磨机去除螺纹连接接头处的化合物和残留介质。
- b) 如果存在焊接缺陷,应将缺陷打磨消除并重新焊接。

#### 5.3.4.7 涂层

密封焊接修理前,应清除焊接区域的涂层,包括镀锌层。应在检查合格后再恢复焊接区域的涂层。

#### 5.3.5 无损检测

采用目视检查方法对密封焊接修理后的螺纹连接接头的焊接质量进行检查;若修理方案中有要求的,按规定进行表面缺陷检测。

#### 5.3.6 试验

密封焊接修理完成后应进行泄漏试验。泄漏试验前,使用单位应对试验介质的安全性、试验压力、接头强度等进行评估。

### 5.4 焊接卡具修理

#### 5.4.1 适用性

5.4.1.1 焊接卡具可用于修理焊接接头泄漏、机械接头泄漏和局部减薄导致的泄漏,也可用于受损承压部件的加固。卡具也可用于封装法兰、阀门、支管、接管、放空管和导淋管等。

5.4.1.2 焊接卡具根据几何形状的不同可分为圆筒形、矩形等,可采用板材或管材,按照被修理承压部件的几何轮廓制造。

5.4.1.3 焊接卡具和被修理部件间允许存在空隙,也可用环氧树脂、密封剂、纤维、耐火材料等材料填充或内衬。

5.4.1.4 焊接卡具结构可采用不规则结构(用于封堵泄漏点),也可采用规则结构(用于加强并将受损部件固定在一起)。

#### 5.4.2 限制条件

焊接卡具修理是一种在役临时性修理方法,在装置停工后应去除焊接卡具,更换部件或采取永久性修理方法。

除以下情况外,焊接卡具不应用于含裂纹缺陷承压部件的修理:

- a) 裂纹形成和扩展诱因已被消除,且在预期修理寿命内不会继续扩展;
- b) 在预期修理寿命内,裂纹的扩展量是可接受的,且裂纹不会扩展至焊接卡具边界焊缝;
- c) 用于修理周向裂纹,且能够有效阻止承压部件环向横截面断裂;
- d) 发生破裂的放空管或导淋管的封堵。

#### 5.4.3 设计

##### 5.4.3.1 材质

焊接卡具材质应满足设计要求,且应与使用工况相适应,同时还应分析介质泄漏滞留在焊接卡具内对被修理承压部件和焊接卡具材质的影响。修理方案中应明确给出焊接卡具材质的要求。

焊接卡具宜采用与被修理承压部件相同的或同类型的材质,并应分析其可焊性。

##### 5.4.3.2 设计寿命

应根据被修理承压部件和焊接卡具的强度、耐腐蚀性以及焊缝的机械性能来确定预期修理寿命。

##### 5.4.3.3 失效模式

设计焊接卡具时,应分析修理后的承压部件在修理后的使用过程中可能产生的失效模式。

- a) 被焊接卡具包裹在内的部件(如法兰、螺栓),在与泄漏介质接触后会发生的腐蚀或开裂。
- b) 泄漏气体遇焊接卡具冷凝后发生的腐蚀。
- c) 焊接卡具改变了部件的温度,导致腐蚀加剧,或发生露点腐蚀。
- d) 介质的腐蚀和焊接卡具的绝热效果导致封闭在焊接卡具内的螺栓发生屈服。
- e) 因热膨胀系数不同产生的热应力。

##### 5.4.3.4 设计载荷

焊接卡具的设计载荷包括持久载荷和瞬时载荷,应分别进行强度计算。焊接卡具的焊接接头系数应按所采用的无损检测方法和比例确定。

##### 5.4.3.5 持久载荷条件

持久载荷条件应至少包括以下内容。

- a) 被修理承压部件的设计压力和设计温度。若焊接卡具无配套限压装置,应将被修理承压部件的设计压力和设计温度作为焊接卡具设计持久载荷条件。若采用低于被修理承压部件设计温度,应通过可靠的方法进行验证,如热传导计算等。
- b) 焊接卡具自重及其相关附件的质量(包括夹带的泄漏介质和环形空间注胶的质量等)。
- c) 保温层的质量。被修理承压部件设置有保温层时,焊接卡具也应设置保温层。

##### 5.4.3.6 瞬时载荷条件

瞬时载荷条件应至少包括以下内容。

- a) 待修理承压部件断裂时产生的推力。如果在达到预期修理寿命时(包括使用过程中预期发生的持续损伤),能够确定修理部位具有足够的剩余强度,则可不考虑断裂时产生的轴向推力。可在管道或部件上增加固定支撑,以降低焊接卡具上的载荷。
- b) 风载荷、地震载荷或介质产生的瞬时载荷(水击或液塞)。
- c) 其他适用的瞬时载荷条件。

#### 5.4.3.7 腐蚀裕量

应结合使用工况和预期修理寿命确定焊接卡具的腐蚀裕量,腐蚀裕量不应低于被修理承压部件的腐蚀裕量。

#### 5.4.3.8 安装规范

如果没有适用的安装规范,应按照经过验证的修理方案要求进行安装。通过加工标准件(如在标准管帽上开孔来制作端部)制作的焊接卡具部件,应按照安装规范和修理方案进行分析计算或试验验证,必要时可进行补强。除非分析计算或试验验证合格(包括疲劳循环载荷试验),否则不应将焊接卡具焊接到端盖或成形封头的折边部分。

#### 5.4.3.9 排放口

- 5.4.3.9.1 修理已泄漏的承压部件时,焊接卡具应设计有排放口,以便排放内部的泄漏介质。
- 5.4.3.9.2 排放口上应装有丝堵、法兰或阀门,在焊接卡具焊接过程中,排放口应处于打开状态,以防止内部压力升高,检查和试验工作完成后关闭。

#### 5.4.3.10 焊接区域

焊接卡具应覆盖被修理承压部件未损伤或轻微损伤的区域。应对被修理承压部件进行测厚,避免发生因施焊部位壁厚不足而被烧穿的情况。

#### 5.4.3.11 密封胶

- 5.4.3.11.1 密封胶可通过排放口注入到焊接卡具内,或从专设的注胶口注入。
- 5.4.3.11.2 若在焊接卡具与被修理承压部件空隙处注胶,应评估因注胶产生的压力导致被修理承压部件向内塌陷的可能性。同时还应评估密封胶渗入到被修理承压部件内部的可能性和后果。
- 5.4.3.11.3 密封胶固化时应进行排气。

#### 5.4.3.12 其他设计要求

对膨胀节、滑动接头、球形接头等管道组成件修理时,应分析管道系统的应力状况。应力分析时应包含焊接卡具的自重载荷、支管的附加载荷以及支吊架的约束限制、操作中的热膨胀和停机条件下的情况。

### 5.4.4 修理

#### 5.4.4.1 人员资质

焊接卡具安装和注胶的施工人员应经过相应的培训。

#### 5.4.4.2 安全要求

修理人员应了解作业风险,并采取必要的安全预防措施,避免发生安全事故。具体要求如下:

- a) 修理工作开始前应按照 GB/T 42595 进行工作危害分析;

- b) 如果在焊接卡具安装过程中修理部位发生泄漏或有可能发生泄漏,且介质具有危害性,应在修理工作开始前采取相应的安全预防措施,如预备空气呼吸器等。

#### 5.4.4.3 修理前的准备工作

修理前,应对焊接卡具焊接部位及其附近区域进行检查,确认无腐蚀沉积物、污垢、油漆、保温材料、胶黏剂和其他涂层或覆盖物。

#### 5.4.4.4 焊接卡具安装

焊接卡具安装时应注意以下内容。

- a) 如果焊接卡具质量大,无法用手提起,应使用吊装设备。
- b) 安装过程中应防止焊接卡具焊接坡口损坏。
- c) 对于微泄漏点,可将焊接卡具直接安放在泄漏点位置。如果泄漏严重或泄漏介质的压力较高,应先将焊接卡具安放在靠近泄漏点的位置进行组装,然后再滑动到泄漏点位进行焊接。

#### 5.4.4.5 焊接

焊接卡具焊缝应进行焊接工艺评定或者有合格的焊接工艺评定书(WPS)支持。

#### 5.4.4.6 在役焊接

焊接卡具修理宜在被修理设备的停机状态下进行,若在在役工况下进行,焊接工艺评定应包含预热温度、焊接冷却速度、烧穿风险以及焊接温度对基材强度的影响等因素。

#### 5.4.4.7 热处理

焊前预热和焊后热处理应符合相应标准和安装规范的要求。

#### 5.4.5 无损检测

##### 5.4.5.1 一般要求

无损检测人员、检测程序和验收标准应符合 4.8 的要求。

##### 5.4.5.2 检测要求和比例

焊接卡具修理完成后,除下列情况外应对焊缝进行 100%无损检测。

- a) 正常和预期瞬时载荷下的应力计算值较低(在工作温度下低于许用应力的 1/2)。
- b) 焊接卡具与部件焊接接头处发生缝隙腐蚀的风险较低。

##### 5.4.5.3 表面缺陷检测

因焊缝几何形状限制不能进行射线检测或超声检测的焊缝可采用表面缺陷无损检测方法。

#### 5.4.6 试验

##### 5.4.6.1 一般要求

焊接卡具安装后,耐压试验或泄漏试验应评估焊接卡具和部件间的环形空间在加压过程中可能导致被修理承压部件失效的风险(可能性和后果)。

##### 5.4.6.2 试验方法

试验方法可选取以下之一:

- a) 在线泄漏试验(如果焊接卡具试验时发生泄漏的后果是可接受的);
- b) 水压试验(如果在大气压力下没有闪蒸过热的风险);
- c) 气压试验;
- d) 泄漏试验。

### 5.4.6.3 试验压力

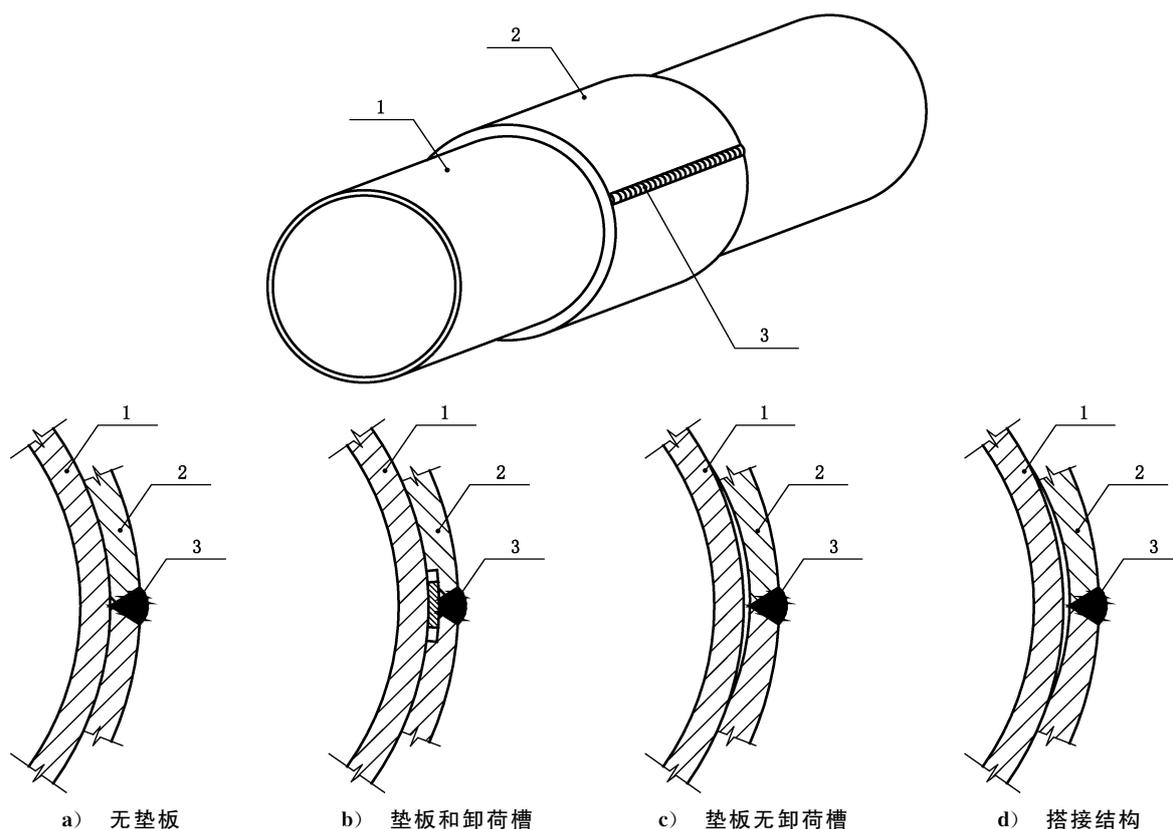
在确定试验压力时,应评估试验过程中被修理承压部件外压失稳的可能性。

## 5.5 套筒焊接修理

### 5.5.1 适用性

5.5.1.1 本方法适用于管道和轴对称受力的容器各种内部和外部缺陷的修理。

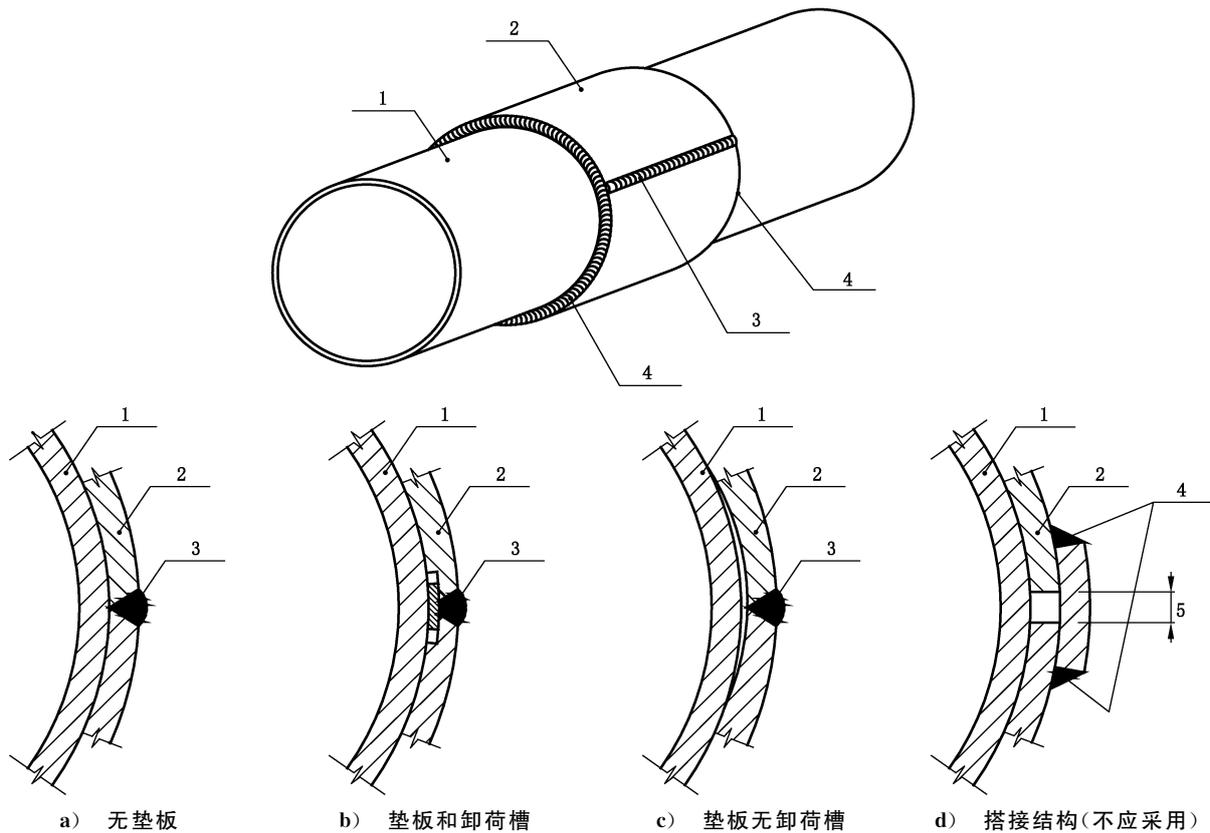
5.5.1.2 套筒由两个半圆管状壳体组成,然后组对焊接形成套筒。本方法给出了两种套筒形式,即 A 型套筒和 B 型套筒,如图 5 和图 6 所示。其中 A 型套筒两端未焊接,不能承受内压和轴向载荷,其仅适用于未泄漏且预期修理寿命期内不会扩展的缺陷修理;若已完全掌握缺陷的损伤机理和扩展速率,也可使用 A 型套筒对缺陷部位进行修理。B 型套筒两端沿周向与设备焊接在一起,可承受内压和轴向载荷,其适用于已发生泄漏或可能发生泄漏的缺陷的修理。



标引序号说明:

- 1——被修理承压部件;
- 2——套筒;
- 3——套筒对接焊缝。

图 5 A 型套筒



标引序号说明：

- 1——被修理承压部件；
- 2——套筒；
- 3——套筒对接焊缝；
- 4——角焊缝；
- 5——缝隙。

图 6 B 型套筒

### 5.5.2 限制条件

应用本方法时，符合以下限制条件。

- a) A 型套筒不适用于周向缺陷的修理。
- b) A 型套筒应采取措施防止水分渗入管道和套筒之间导致腐蚀，可采取的措施包括使用适于操作环境的密封剂或涂层。
- c) 采用 B 型套筒修理泄漏缺陷时，焊接前应对泄漏部位进行堵漏处理。
- d) 在承受循环载荷的设备上应用本方法时，应按照 5.5.3.7 的要求进行合于使用评价；当 B 型套筒受疲劳工况影响时，应对套筒角焊缝进行合于使用评价。
- e) 被修理承压部件的环、纵焊缝余高可能会影响套筒与被修理承压部件的紧密贴合，宜对焊缝余高打磨处理（在套筒安装前，应对被修理承压部件的环、纵焊缝进行超声检测或射线检测，余高打磨后应进行表面磁粉检测或渗透检测），否则应降低设备压力。被修理承压部件进行在役修理时，应对套筒包裹的焊缝进行 100% 磁粉/渗透检测和 100% 超声/射线检测。也可制作周向凸起的套筒跨过焊缝，如图 7 所示。焊缝根部包括套筒凸起沿长度方向的间隙应是均匀的。

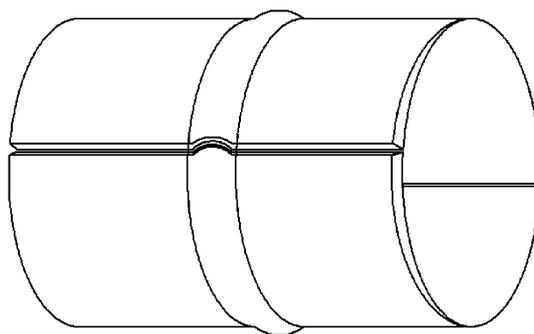


图 7 用于环形焊缝的套筒

### 5.5.3 设计

#### 5.5.3.1 设计标准

被修理承压部件的设计标准也适用于套筒。套筒材料、许用应力和腐蚀裕量应符合相关设计标准要求。

#### 5.5.3.2 套筒壁厚

A 型套筒的壁厚不应小于管道厚度的  $2/3$ 。

B 型套筒的壁厚不应小于被修理承压部件计算壁厚,或与被修理承压部件的公称壁厚相同。在计算套筒壁厚时,焊接接头系数应取 0.8,在焊缝进行 100% 超声检测的情况下,焊接接头系数可取 1.0。如果 B 型套筒用于有裂纹缺陷的环焊缝的修理,应计算套筒安装位置所承受的轴向和弯曲载荷,校核 B 型套筒角焊缝强度。

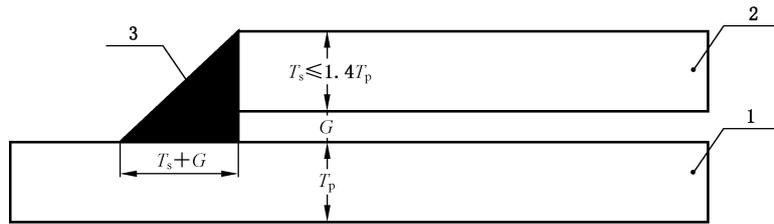
#### 5.5.3.3 套筒结构尺寸

套筒应能覆盖所有缺陷。A 型和 B 型套筒的长度不应小于 100 mm,且两侧应各超出缺陷范围至少 50 mm。采用 B 型套筒时,应先对待修理部位进行壁厚测量,确认待修理部位与套筒端部的焊接部位有足够的剩余壁厚,避免管道被烧穿。

#### 5.5.3.4 B 型套筒角焊缝

B 型套筒周向角焊缝尺寸要求如下。

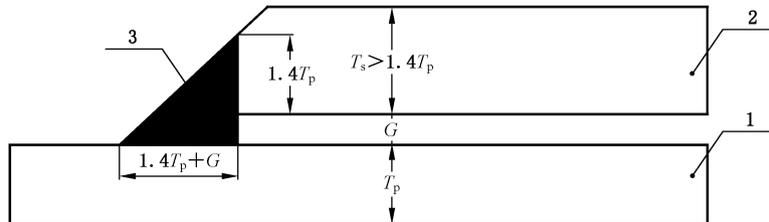
- a) 如果套筒厚度小于或等于被修理承压部件公称壁厚的 1.4 倍,角焊缝结构如图 8 所示。
- b) 如果套筒厚度大于被修理承压部件公称壁厚的 1.4 倍,B 型套筒的两端应倒角处理,倒角的角度约为  $45^\circ$ ,焊趾应圆滑过渡。焊趾与被修理承压部件之间的夹角不应有尖锐缺口,不应有咬边等缺陷存在。角焊缝结构如图 9 所示。



标引说明：

- 1 —— 被修理承压部件；
- 2 —— B形套筒；
- 3 —— 角焊缝；
- $T_s$  —— 套筒壁厚,单位为毫米(mm)；
- $T_p$  —— 被修理承压部件壁厚,单位为毫米(mm)；
- $G$  —— 被修理承压部件与套筒的间距,单位为毫米(mm)。

图 8 套筒厚度小于或等于被修理承压部件公称壁厚 1.4 倍情况下的角焊缝结构



标引说明：

- 1 —— 被修理承压部件；
- 2 —— B形套筒；
- 3 —— 角焊缝；
- $T_s$  —— 套筒壁厚,单位为毫米(mm)；
- $T_p$  —— 被修理承压部件壁厚,单位为毫米(mm)；
- $G$  —— 被修理承压部件与套筒的间距,单位为毫米(mm)。

图 9 套筒厚度大于被修理承压部件公称壁厚 1.4 倍情况下的角焊缝结构

### 5.5.3.5 外压

设计时应计算 B 型套筒覆盖下的被修理承压部件所承受的外压载荷。应使套筒与设备紧密贴合,减小二者之间的空隙。如果无法做到,应向空隙内注入可硬化的填充材料(见 5.5.3.9),或者采用热套筒安装方法。B 型套筒设计时宜设置排放口。

### 5.5.3.6 外部损伤

如果使用 A 型或 B 型套筒修理承压部件外部损伤,应使用可硬化的、有足够的抗压强度填充材料填充外部损伤部位。

### 5.5.3.7 循环操作工况

修理处于循环载荷工况的承压部件时,应进行以下工作。

- a) 如果被修理承压部件所处工况属于循环载荷工况,且循环次数超过 400,一个循环周期内的压力变化超过设计压力的 20%,则应对套筒和被修理承压部件进行疲劳分析。
- b) 如果 B 型套筒受到温度变化的影响,套筒与被修理承压部件之间的平均金属温差小于 37 °C,且

循环次数小于 200,则不进行疲劳分析。否则,应对套筒和被修理承压部件进行疲劳分析。

#### 5.5.3.8 凸起变形的约束

局部减薄或划痕等缺陷会削弱被修理承压部件的承载能力。在压力增加的情况下,被修理承压部件失效前会外凸变形,套筒可有效约束被修理承压部件失效前的外凸变形。设计时宜采用以下措施。

- a) 如果被修理承压部件外壁存在缺陷,采用可硬化的填充材料(环氧树脂等)填充套筒与被修理承压部件之间的空隙。
- b) 在安装套筒时,降低设备压力。

#### 5.5.3.9 填充材料

如果在套筒和管道之间使用可硬化的填充材料,填充材料应适合被修理承压部件的工作温度。如果未在内空隙内填充可硬化材料,应分析套筒和被修理承压部件之间的滞留介质是否会引起腐蚀。

采用 A 型套筒时,应使套筒与被修理部位紧密贴合,可使用合适的填充材料对二者之间的空隙进行填充。

采用 B 型套筒时,填充材料应与介质相容。可在套筒安装之前使用填充物,也可在安装之后将填充物注入套筒和被修理承压部件之间。

#### 5.5.3.10 热膨胀

在套筒的设计和应用中,应分析套筒和被修理承压部件之间的热膨胀量的差异。

### 5.5.4 修理

#### 5.5.4.1 修理时机

宜在承压设备停机状态下进行修理,若采用在役修理,宜将承压设备工作压力降低至其正常工作压力的 50%~80%,并保持被修理承压部件内的介质流量。

#### 5.5.4.2 套筒安装

安装前,应对套筒覆盖区域内的承压设备表面进行处理,露出金属光泽。可使用液压设备、液压拉伸螺栓或其他机械夹具进行安装,套筒应与被修理承压部件紧密贴合,最大允许径向间隙不超过 2.5 mm。对于 B 型套筒的安装,应根据现场实际情况对焊接尺寸和焊接技术进行调整,如间隙过大宜进行表面堆焊处理。

#### 5.5.4.3 填充材料

如果使用填充材料对套筒和被修理承压部件间空隙进行填充,不应使填充材料被挤到焊接区域。焊接过程中不应引起填充材料燃烧影响焊接质量。焊接前应将多余的填充材料去除。在间隙足够大时(允许填充物流入所有空隙),可在套筒焊接完毕后再将填充材料填充到空隙中。

#### 5.5.4.4 已泄漏的缺陷

如果被修理承压部件已发生泄漏,应在焊接前隔离缺陷区域。对于盛装易燃介质的承压设备,应使用氮气或其他惰性气体对套筒进行吹扫,防止在套筒与被修理承压设备之间的空隙中形成可燃混合物。

#### 5.5.4.5 焊缝

B 型套筒纵焊缝应采用全焊透结构形式的对接接头,如图 6 所示。在最终的封闭焊期间应进行通风。角焊缝的焊接工艺应包含焊接电流、冷却速度和待修理承压部件的工况条件等影响因素。应使用碱性焊条。A 型套筒纵焊缝可采用对接接头形式,也可采用角接接头、搭接接头形式,如图 5 所示。

#### 5.5.4.6 在役焊接

在役焊接时应评估以下可能存在的风险：

- a) 由于冷却加速和环境中的氢气导致热影响区有氢致开裂的可能性；
- b) 焊接接头热影响区组织硬化的风险；
- c) 被修理承压部件被烧穿的风险。

#### 5.5.4.7 焊接程序

焊接程序,包括预热和焊后热处理,都应有相应的作业指导书。应由具备相应资质的焊工按照焊接工艺指导书实施焊接。

### 5.5.5 无损检测

#### 5.5.5.1 焊接前的目视检查

焊接前应对所有套筒配件进行目视检查。

#### 5.5.5.2 A型套筒

在焊接过程中应对焊接根部区域进行目视检查,以确认是否存在未焊透和未熔合等缺陷。焊接完成后对纵焊缝进行100%超声检测,100%渗透检测或磁粉检测。

#### 5.5.5.3 B型套筒

修理前,利用超声波测厚仪对套管两端焊接区域范围内被修理承压部件的壁厚进行测量,避免发生烧穿。若套筒纵焊缝下方未使用垫板,焊前应对纵焊缝下方区域的被修理承压部件本体和焊缝进行100%埋藏缺陷检测和100%表面缺陷检测。纵焊缝焊接完成后应进行100%埋藏缺陷检测。焊接过程中应目视检查焊缝根部区域,焊缝应完全焊透和熔合。两端角焊缝焊接完成后应进行100%表面缺陷检测。具有延迟裂纹倾向的材料,应至少在焊接完成24 h后对角焊缝进行无损检测。

#### 5.5.5.4 制作过程的检查

使用单位应由有资质的或经过培训的人员对整个过程进行检查,检查结果应做记录。无损检测应符合4.8的要求。

### 5.5.6 试验

B型套筒的耐压试验和泄漏试验应按以下要求执行。

- a) 按照GB/T 150(所有部分)或GB/T 20801(所有部分)的相关规定进行泄漏试验。
- b) 套筒和被修理承压部件之间空隙的耐压试验,在返修方案制定时,应综合分析套筒壁厚、角焊缝强度、被修理承压部件的剩余壁厚,计算其试验压力,避免因试验压力过大导致被修理承压部件失稳。

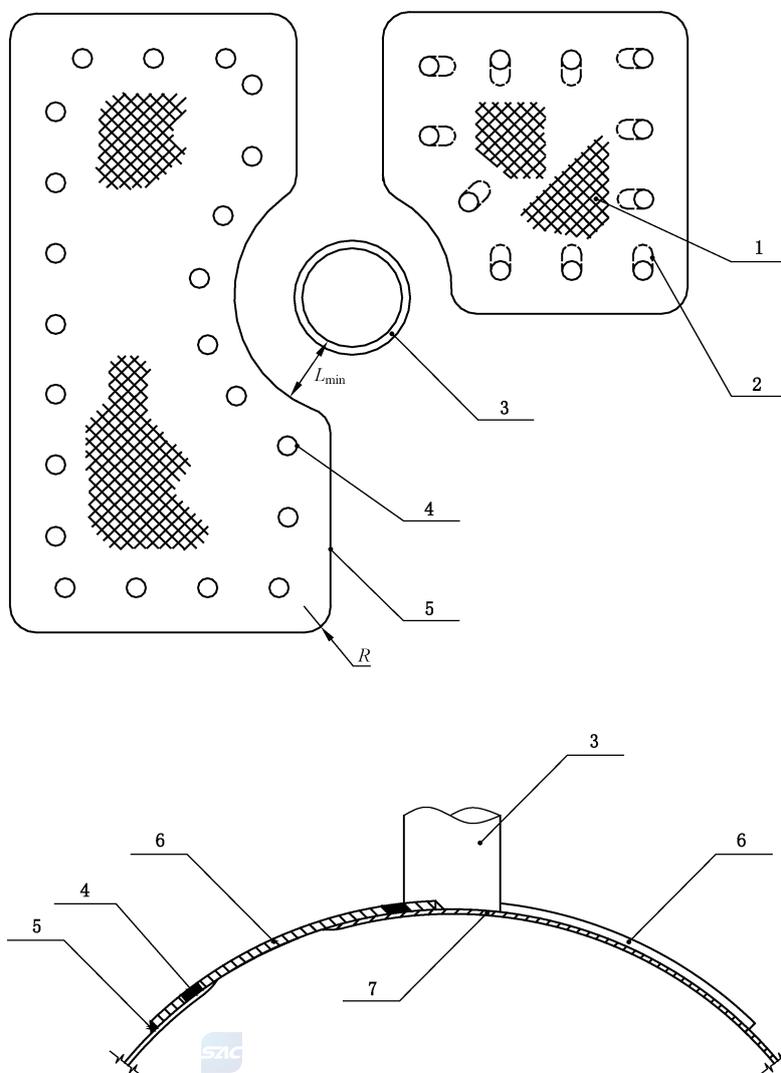
## 5.6 带加强塞焊贴板修理

### 5.6.1 适用性

本方法是将带圆孔或长圆孔的金属板贴合焊接在承压设备受损区域的内部或外部,覆盖整个受损区域的修理方法。图10给出了对容器结构不连续区域(接管)附近缺陷的贴板修理示意图,贴板一般都带有圆角。本方法适用性如下：

- a) 适用于因磨蚀、腐蚀或其他损伤导致局部减薄的承压设备壳体；

- b) 适用于圆筒形、球形、平盖和圆锥形壳体及其他承压部件；
- c) 适用于工作温度高于材料无延性转变温度，且低于 345 °C 的工况环境。在工作温度较低的工况下应对材料韧性和其他可能存在的低温效应进行评估。在工作温度较高的工况下应用本方法时应对材料的热疲劳、蠕变和其他可能存在的高温效应进行评估。



标引说明：

- 1 —— 壳体受损区；
- 2 —— 备选槽焊缝；
- 3 —— 接管；
- 4 —— 塞焊；
- 5 —— 角焊缝；
- 6 —— 贴板；
- 7 —— 壳体；

$L_{\min}$  —— 接管与贴板之间的最小距离(mm)；

$R$  —— 贴板圆角(mm)。

注：此图中的角焊缝(见序号 5)为整圈角焊缝。

图 10 带加强塞焊贴板的典型修理结构

5.6.2 限制条件

5.6.2.1 本方法不受被修理承压设备的尺寸限制。修理几何形状为轴对称结构的承压设备时,应优先采用套筒焊接修理方法。

5.6.2.2 若无法辨识被修理承压设备的损伤机理、损坏程度及其潜在的失效模式,则不应使用本方法。

5.6.2.3 在满足下列条件时,本方法可用于修理承压设备局部裂纹缺陷。

- a) 裂纹形成和扩展诱因已被消除,并且经过分析和评估,在预期修理寿命内裂纹不会继续扩展。
- b) 经过分析和评估,在预期修理寿命内,裂纹的扩展量是可接受的,且裂纹不会扩展至贴板边缘。

5.6.3 设计

5.6.3.1 一般要求

设计的一般要求包括以下内容。

- a) 本方法应满足原设计标准要求。在设计计算过程中应分析待修理承压部件可能会受到弯曲、扭转、风载或循环载荷等的影响。
- b) 贴板应采用与被修理承压部件相同或相近(包括化学成分、物理性能和机械性能)的材料。
- c) 贴板厚度应根据贴板材料的机械性能和焊接接头尺寸确定。
- d) 贴板尺寸大小应能够覆盖被修理承压部件的受损区域,以及预期修理寿命内损伤的扩展区域。贴板应与被修理承压部件未受损区域至少重叠 25 mm,贴板圆角  $R$  应不小于 75 mm。
- e) 外压设备的贴板修理应进行可靠性评估。
- f) 在对贴板的适用性及其预期使用寿命开展评估时,应分析材料与工艺介质相容性、操作条件、焊接残余应力、裂纹、结构不连续性、贴板与基材之间的温差以及其他方面(如无损检测、试验等)的影响。
- g) 修理已失效承压部件时,应分析贴板与被修理承压部件之间缝隙内积液的影响(如浓缩、腐蚀等)。
- h) 在确定贴板设计壁厚时,应分析贴板和基材的组合强度(包括角焊缝的强度、焊接接头系数),也可采用设计标准中的接管开孔补强计算公式,腐蚀裕量另计。
- i) 若在设备运行期间贴板,应采取相应的安全预防措施。

5.6.3.2 应力计算

按照下列要求对贴板结构的应力进行计算。

a) 对于被修理承压部件为承受内压的圆筒形部件,贴板结构的周向应力和轴向应力按照公式(5)和公式(6)进行计算。

1) 周向应力:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{PD_m}{2T} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- $\sigma_{\varphi}$  ——周向应力,单位为兆帕(MPa);
- $P$  ——被修理承压部件的内部压力,单位为兆帕(MPa);
- $D_m$  ——被修理承压部件的中径,单位为毫米(mm);
- $T$  ——贴板壁厚,单位为毫米(mm)。

2) 轴向应力:

$$\sigma_{\theta} = \frac{PD_m}{4T} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- $\sigma_{\theta}$  —— 轴向应力,单位为兆帕(MPa);  
 $P$  —— 被修理承压部件的内部压力,单位为兆帕(MPa);  
 $D_m$  —— 被修理承压部件的中径,单位为毫米(mm);  
 $T$  —— 贴板壁厚,单位为毫米(mm)。

- b) 如果存在其他载荷(如弯曲、扭转、风等)引起的附加应力,应将其加到相应的应力值上,按公式(7)和公式(8)计算。

$$\sigma_c = \sigma_{\varphi} + \sigma_{c0} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\sigma_L = \sigma_{\theta} + \sigma_{L0} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中：

- $\sigma_c$  —— 周向应力之和,单位为兆帕(MPa);  
 $\sigma_{c0}$  —— 其他载荷引起的周向应力,单位为兆帕(MPa);  
 $\sigma_L$  —— 轴向应力之和,单位为兆帕(MPa);  
 $\sigma_{L0}$  —— 其他载荷引起的轴向应力,单位为兆帕(MPa)。

- c) 被修理承压部件为承受内压的球形、环形或椭圆形部件,应按照设计标准选择公式计算其应力值。

### 5.6.3.3 结构不连续性评估

设计过程中,应对贴板的结构进行不连续评估。

- a) 在忽略接管附近的应力或其他的结构不连续条件下,贴板角焊缝与结构不连续处(接管或其他类似的结构不连续)之间的最小距离按公式(9)计算。

$$L_{\min} = 2.5 \sqrt{R_m t} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中：

- $L_{\min}$  —— 角焊缝与结构不连续之间的距离,单位为毫米(mm);  
 $R_m$  —— 被修理承压部件的中半径,单位为毫米(mm);  
 $t$  —— 被修理承压部件的壁厚,单位为毫米(mm)。

当存在多个贴板时,该距离也可用于确定相邻贴板之间的最小距离。

- b) 贴板与接管补强结构焊接时,贴板的轮廓应与补强结构的形状相匹配,且应采用全焊透焊接结构。  
c) 受损部位与接管(或开孔)距离小于  $L_{\min}$  时,贴板应设计为绕接管或开孔一周的结构形式,并采用全焊透焊接结构。必要时,应对贴板区域的局部应力进行分析计算。

### 5.6.3.4 贴板角焊缝的许用载荷

5.6.3.4.1 单位长度的角焊缝许用载荷应大于贴板结构单位长度的周向载荷和轴向载荷,按公式(10)计算。

$$\sigma_A = t_{w,\min} \varphi [\sigma]^t \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中：

- $\sigma_A$  —— 单位长度的角焊缝许用载荷,单位为牛每毫米(N/mm);  
 $\varphi$  —— 焊接接头系数,取 0.55;  
 $[\sigma]^t$  —— 焊材许用应力,单位为兆帕(MPa);  
 $t_{w,\min}$  —— 最小焊脚高度,单位为毫米(mm)。

5.6.3.4.2 角焊缝焊脚尺寸取决于传递的载荷大小,一般情况下,角焊缝的腰高不小于贴板和被修理承压部件中较薄厚度的 0.7 倍,且不大于两焊件中的较薄厚度与 40 mm 的较小值。

5.6.3.5 塞焊的许用载荷

5.6.3.5.1 圆孔/长圆孔焊缝可承受贴板应力的 30%。圆孔塞焊在剪切或拉伸状态下的许用载荷按公式(11)计算。

$$\sigma_p = 0.63 [\sigma]^t (d - 6)^2 \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- $\sigma_p$  ——圆孔塞焊许用载荷,单位为牛(N);
- $d$  ——圆孔的底部直径,单位为毫米(mm)。

长圆孔塞焊的许用载荷按公式(12)计算。

$$\sigma_s = 0.8 [\sigma]^t [(W - 6)(L - 6) - 0.86R^2] \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- $\sigma_s$  ——长圆孔塞焊许用载荷,单位为牛(N);
- $W$  ——长圆孔的底部宽度,单位为毫米(mm);
- $L$  ——长圆孔的底部长度,单位为毫米(mm);
- $R$  ——长圆孔端半径,单位为毫米(mm)。

5.6.3.5.2 为了减小贴板角焊缝处的应力,避免角焊缝中的载荷路径偏心问题,应在贴板上设置圆孔或长圆孔,并进行塞焊。塞焊的直径不应小于 $(T+6)$ mm,且不大于 $(2T+6)$ mm。圆孔或长圆孔与贴板边缘的距离不应小于 $2T$ ,且不大于 $4T$ 。圆孔或长圆孔相互之间的距离(中心间距)不应小于 $3d$ 。

5.6.3.5.3 当贴板壁厚不大于 8 mm 时,塞焊应填满整个孔;贴板壁厚大于 8 mm 时,塞焊填充高度应为 1/2 孔深度或 5/16 孔直径的较大值,且不小于 8 mm。

5.6.3.5.4 直径小于 19 mm 的塞焊,为了避免因孔间距过小和焊接操作限制导致发生焊接质量问题,可采用长圆孔塞焊形式。槽的宽度不应小于 $(T+6)$ mm,且不大于 $(2T+6)$ mm,长度不应大于 $(3T+6)$ mm。长圆孔的长轴应与其相邻角焊缝边缘垂直,位置和间距应符合 5.6.3.5.2 的要求。

5.6.3.6 冷加工成形尺寸极限

贴板冷加工成形尺寸应满足以下要求。

a) 贴板材质为碳钢或低合金钢的,冷加工成形过程中产生的伸长率不应大于 5%,伸长率按公式(13)和公式(14)计算。

1) 双曲率

$$\delta = \frac{75T}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_o}\right) \dots\dots\dots (13)$$

2) 单曲率

$$\delta = \frac{50T}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_o}\right) \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- $\delta$  ——贴板伸长率,%;
- $R_f$  ——贴板冷加工成形后的中心曲率半径,单位为毫米(mm);
- $R_o$  ——贴板冷加工成形前的中心曲率半径,单位为毫米(mm)。

b) 若采取措施消除冷加工成形过程中产生的应力,碳钢或低合金钢材质的贴板可采用伸长率超 5%的冷加工成形贴板。

c) 其他材质贴板的伸长率应符合相应设计标准的规定。

5.6.4 修理

带加强塞焊贴板的修理步骤如下。

- a) 按贴板设计图纸或相关设计文件中规定的尺寸要求,采用机加工或热加工等方法加工贴板边缘。若采用热加工方法,加工完成后,应打磨去除贴板边缘 1.5 mm 的材料。若贴板厚度大于 25 mm,且角焊缝腰高尺寸小于贴板厚度,应对贴板边缘焊接坡口进行表面缺陷检测,检测发现分层的贴板不应使用。
- b) 圆孔和长圆孔可通过冲压、钻孔、机加工或热加工(火焰、电弧切割)等方法制造。长圆孔端部的半径应等于孔宽的一半。若采用热加工方法,加工完成后,应打磨去除贴板边缘 1.5 mm 的材料。若贴板厚度大于 25 mm,且圆孔或长圆孔填充深度小于板厚,应对圆孔和长圆孔边缘进行表面缺陷检测,检测发现分层的贴板不应使用。
- c) 采用适当的方法将贴板加工成满足修理要求的形状。贴板可分块加工后采用全焊透对接接头焊接在一起,贴板自身焊缝应先预制。
- d) 去除焊接区及其两侧不小于 40 mm 范围内的油漆、水垢、铁锈、液体和其他异物。
- e) 将贴板覆盖区域内的焊缝打磨至与母材平齐,并进行 100% 表面缺陷检测。
- f) 贴板与待修理承压部件间距不应超过 5 mm。若贴板边缘与待修理承压部件间距大于或等于 1.5 mm,角焊缝腰高尺寸计算时应包括间距。
- g) 使用适当的方法将贴板放置在计划位置,然后完成贴板角焊缝焊接,在役焊接的要求见附录 D,现场热处理的要求见附录 E。
- h) 为了防止贴板和被修理承压部件之间的空隙产生气压,应在闭合焊缝前或焊后热处理期间进行排气处理。对于穿透性缺陷的贴板修理,应在焊接完成后将排气口进行密封。
- i) 完成所有检查和试验后,金属表面应重新防腐处理。

### 5.6.5 无损检测

带加强塞焊贴板修理的无损检测要求如下。

- a) 在温度允许的情况下,应对贴板角焊缝进行 100% 表面缺陷检测。
- b) 如果使用吊耳移装贴板,应检测吊耳角焊缝。在修理后移除临时吊耳的,应对移除区域进行 100% 表面缺陷检测。
- c) 对于拼接贴板,应对拼接接头部位进行 100% 埋藏缺陷检测,若无法实施,应对每层焊道表面进行表面缺陷检测。
- d) 有焊后热处理要求的,应在热处理完成后进行相应的无损检测。
- e) 设计文件有要求的,还应按其规定执行。

### 5.6.6 试验

试验要求如下。

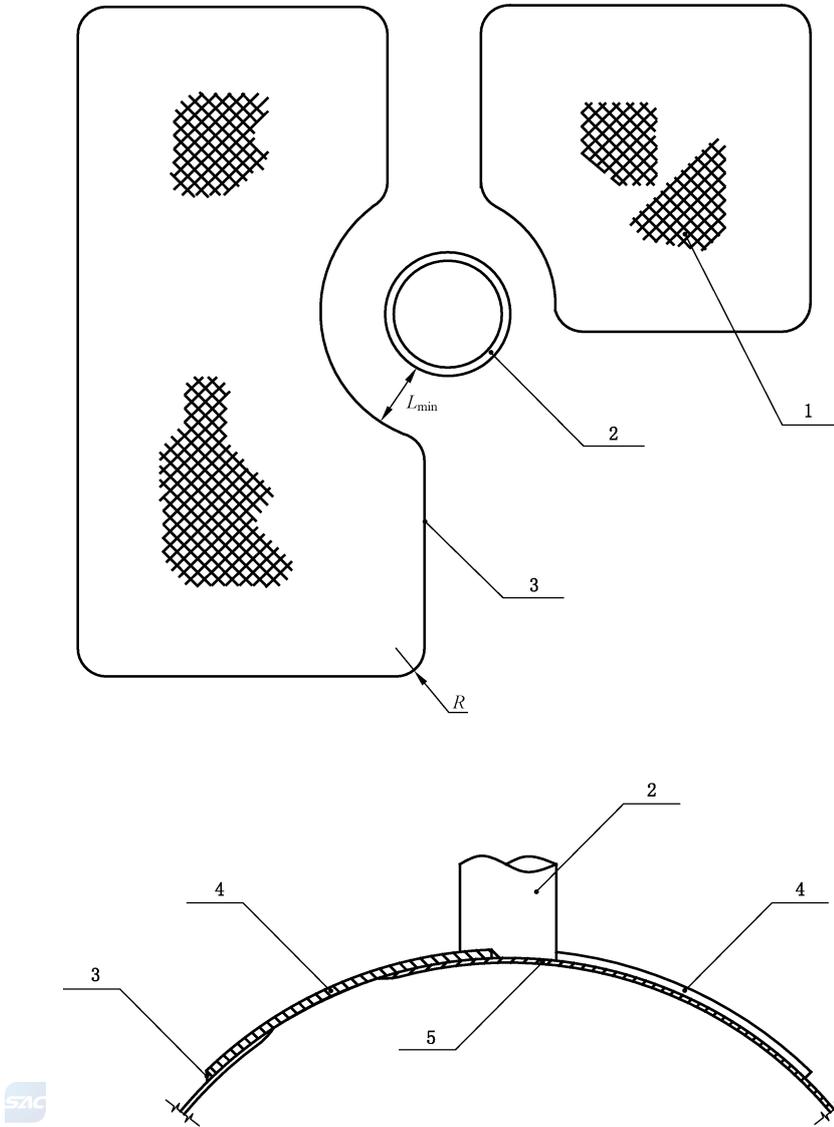
- a) 应按照设计文件和修理方案的要求进行耐压试验或泄漏试验。
- b) 承压部件和贴板应按照适用的标准和安装规范进行泄漏试验。气体泄漏试验时应采取特殊的安全预防措施。
- c) 若设计文件和修理方案允许,可用无损检测替代耐压试验。在恢复到正常操作压力和温度之后,应对所有焊接接头进行气密性检查。
- d) 耐压试验或泄漏试验应在绝热层或涂层(如存在)施工前进行。

## 5.7 圆角焊接贴板修理

### 5.7.1 适用性

本方法是将金属板贴合焊接在承压设备受损区域的内部或外部,覆盖整个受损区域的修理方法。图 11 给出了对容器结构不连续区域(接管)附近缺陷的贴板修理示意图,贴板一般都带有圆角。本方法适用性如下。

- a) 适用于因磨蚀、腐蚀或其他损伤导致局部减薄的承压设备壳体。
- b) 适用于圆筒形、球形、平盖和圆锥形壳体及其他承压部件。
- c) 适用于工作温度高于材料无延性转变温度，且低于 345 ℃ 的工况环境。在工作温度较低的工况下应用本方法时应应对材料韧性和其他可能存在的低温效应进行评估。在工作温度较高的工况下应用本方法时应应对材料的热疲劳、蠕变和其他可能存在的高温效应进行评估。



标引说明：

1 —— 壳体受损区；

2 —— 接管；

3 —— 角焊缝；

4 —— 贴板；

5 —— 壳体；

$L_{min}$  —— 接管与贴板之间的最小距离(mm)；

$R$  —— 贴板圆角(mm)。

注：此图中的角焊缝(见序号 3)为整圈角焊缝。

图 11 圆角焊接贴板的典型修理结构

## 5.7.2 限制条件

5.7.2.1 本方法不受被修理承压设备的尺寸限制。修理几何形状为轴对称结构的承压设备时,应优先采用套筒焊接修理方法。

5.7.2.2 若无法辨识被修理承压设备的损伤机理、损坏程度及其潜在的失效模式,则不应使用本方法。

5.7.2.3 在满足下列条件时,本方法可用于修理承压设备局部裂纹缺陷。

- a) 裂纹形成和扩展诱因已被消除,并且经过分析和评估,在预期修理寿命内裂纹不会继续扩展。
- b) 经过分析和评估,在预期修理寿命内,裂纹的扩展量是可接受的,且裂纹不会扩展至贴板边缘。

## 5.7.3 设计

### 5.7.3.1 一般要求

设计的一般要求如下。

- a) 本方法应满足原设计标准要求。在设计计算过程中应分析待修理承压部件可能会受到弯曲、扭转、风载或循环载荷等的影响。
- b) 贴板应采用与被修理承压部件相同或相近(包括化学成分、物理性能和机械性能)的材料。
- c) 贴板厚度应根据贴板材料的机械性能和焊接接头尺寸确定。
- d) 贴板尺寸大小应能够覆盖被修理承压部件的受损区域,以及预期修理寿命内损伤的扩展区域。贴板应与被修理承压部件未受损区域至少重叠 25 mm,贴板圆角  $R$  应不小于 75 mm。
- e) 外压设备的贴板修理应进行可靠性评估。
- f) 在对贴板的适用性及其预期使用寿命开展评估时,应分析材料与工艺介质相容性、操作条件、焊接残余应力、裂纹、结构不连续性、贴板与基材之间的温差以及其他方面(如无损检测、试验等)的影响。
- g) 修理已失效承压部件时,应分析贴板与被修理承压部件之间缝隙内积液的影响(如浓缩、腐蚀等)。
- h) 在确定贴板设计壁厚时,应分析贴板和基材的组合强度(包括角焊缝的强度、焊接接头系数),也可采用设计标准中的接管开孔补强计算公式,腐蚀裕量另计。
- i) 若在设备运行期间贴板,应采取相应的安全预防措施。

### 5.7.3.2 应力计算

对于被修理承压部件为承受内压的圆筒形部件,贴板结构的周向应力和轴向应力按照公式(5)和公式(6)进行计算。

如果存在其他载荷(如弯曲、扭转、风等)引起的附加应力,应将其加到相应的应力值上,按照公式(7)和公式(8)计算。

被修理承压部件为承受内压的球形、环形或椭圆形部件,应按照设计标准选择公式计算其应力值。

5.7.3.3 设计过程中,应按照 5.6.3.3 对贴板进行结构不连续评估。

5.7.3.4 贴板角焊缝单位长度的许用载荷按照 5.6.3.4 确定。还应分析载荷路径偏心问题。承受周向载荷的角焊缝应力为:

$$S_w = \left( \frac{PD_m}{2T} \right) + \left( \frac{3PD_m e}{T^2} \right) \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$S_w$  ——角焊缝应力,单位为兆帕(MPa);

$e$  ——加载路径偏心 $(T+t)/2$ ,单位为毫米(mm);

$T$  ——贴板壁厚,单位为毫米(mm);

$$S_w \leq 1.5[\sigma]^t。$$

### 5.7.3.5 冷加工成形极限

5.7.3.5.1 贴板材质为碳钢或低合金钢的,冷加工成形过程中产生的伸长率不应大于5%,伸长率按公式(13)和公式(14)计算。

5.7.3.5.2 若采取措施消除冷加工成形过程中产生的应力,碳钢或低合金钢材质的贴板可采用伸长率超5%的冷加工成形贴板。

5.7.3.5.3 其他材质贴板的伸长率应符合相应设计标准的规定。

### 5.7.4 修理

贴板的修理步骤如下。

- a) 按贴板设计图纸或相关设计文件中规定的尺寸要求,采用机加工或热加工等方法加工贴板边缘。若采用热加工方法,加工完成后,应打磨去除贴板边缘1.5 mm的材料。若贴板厚度大于25 mm,且角焊缝腰高尺寸小于贴板厚度,应对贴板边缘焊接坡口进行表面缺陷检测,检测发现分层的贴板不应使用。
- b) 采用适当的方法将贴板加工成满足修理要求的形状。贴板可分块加工后采用全焊透对接接头焊接在一起,贴板自身焊缝应先预制。
- c) 去除焊接区及其两侧不小于40 mm范围内的油漆、水垢、铁锈、液体和其他异物。
- d) 将贴板覆盖区域内的焊缝打磨成与母材平齐,并进行100%表面缺陷检测。
- e) 贴板与待修理承压部件间距不应超过5 mm。若贴板边缘与待修理承压部件间距大于或等于1.5 mm,角焊缝腰高尺寸计算时应包括间距。
- f) 使用适当的方法将贴板放置在计划位置,然后完成贴板角焊缝焊接,在役焊接的要求见附录D,现场热处理的要求见附录E。
- g) 为了防止贴板和被修理承压部件之间的空隙产生气压,应在闭合焊缝前或焊后热处理期间进行排气处理。对于穿透性缺陷的贴板修理,应在焊接完成后将排气口进行密封。
- h) 完成所有检查和试验后,若设计有要求,金属表面应重新防腐处理。

### 5.7.5 无损检测

贴板修理的无损检测要求如下。

- a) 在温度允许的情况下,应对贴板角焊缝进行100%表面缺陷检测。
- b) 如果使用吊耳移装贴板,应检测吊耳角焊缝。在修理后移除临时吊耳的,应对移除区域进行100%表面缺陷检测。
- c) 对于拼接贴板,应对拼接接头部位进行100%埋藏缺陷检测,若无法实施,应对每层焊道表面进行表面缺陷检测。
- d) 有焊后热处理要求的,应在热处理完成后进行相应的无损检测。
- e) 设计文件有要求的,还应按其规定执行。

### 5.7.6 试验

试验要求如下。

- a) 应按照相应设计文件和修理方案要求进行耐压试验或泄漏试验。
- b) 承压部件和贴板应按照适用的标准和安装规范进行泄漏试验。气体泄漏试验时应采取特殊的安全预防措施。
- c) 若设计文件和修理方案允许,可用无损检测替代耐压试验。在恢复到正常操作压力和温度之

后,应对所有焊接接头进行气密性检查。

d) 耐压试验或泄漏试验应在绝热层或涂层(如存在)施工前进行。

## 5.8 堆焊和补焊修理

### 5.8.1 适用性

堆焊是用焊接的方法将耐腐蚀金属熔敷在碳钢或低合金钢基材上,用于恢复复合板或堆焊层衬里厚度。补焊是用焊接的方法将碳钢或低合金钢焊材金属熔敷在基材上,用于恢复基材厚度。

本方法适用于修复碳钢或低合金钢基材和设备内部耐蚀层(堆焊层或复合板)的减薄缺陷,具体情况如下:

- a) 适用于碳钢或低合金钢制承压设备局部减薄区域的修理;
- b) 适用于裂纹打磨消除后形成的凹坑的修理;
- c) 适用于原堆焊层或复合板衬里受损区域的修理;
- d) 以碳钢或低合金钢为基材的复合板的合拢缝修理。

### 5.8.2 限制条件

本方法不适用于除壁厚减薄外其他类型缺陷的修复;采用本方法时,剩余基材厚度应满足堆焊或补焊的实施条件。

### 5.8.3 设计

#### 5.8.3.1 减薄原因

焊前应分析确定壁厚减薄原因。本方法用作永久性修理时,应根据被修理承压部件的潜在减薄机理,采取相应的预防措施,若堆焊层或复合板衬里存在腐蚀、脆化和开裂等损伤,宜更换全部或部分衬里。

#### 5.8.3.2 焊层数量

堆焊或补焊可采用单层或多层焊接。若使用回火焊技术,应采用多层焊接。施工过程中的焊接层数不应小于焊接工艺规程中的焊接层数。

#### 5.8.3.3 堆焊厚度

堆焊厚度不应小于 3 mm,且堆焊后的衬里厚度不应小于设计文件中规定的最小设计厚度。若为了满足部件尺寸要求进行机加工或打磨堆焊层(如加工垫圈凹槽)的,最终机加工或打磨后的衬里厚度不应小于设计文件中的最小设计厚度。

#### 5.8.3.4 基材修理

补焊所用的焊材抗拉强度不应小于基材的抗拉强度。还应分析焊材与基材的相容性以及预期修理寿命的影响。

#### 5.8.3.5 腐蚀防护

若堆焊材料用于增强承压部件的抗腐蚀性能(如在碳钢或低合金钢基材上堆焊不锈钢),应选用合适的焊材和焊接工艺(如在 2 1/4Cr1Mo 基材上先堆焊 309L,再堆焊 347)。

#### 5.8.3.6 其他要求

5.8.3.6.1 采用堆焊修理方法应分析基材和堆焊层热膨胀系数的差异。

5.8.3.6.2 堆焊的焊材为高合金钢或有色金属时,应评估在堆焊层与基材连接的边缘处发生电偶腐蚀的可能性。

#### 5.8.4 修理

##### 5.8.4.1 表面处理

焊前应检查待焊接部位的表面情况,确认焊接部位及其附近区域表面无腐蚀沉积物、污垢、油漆、水垢和其他污染物。如果表面要喷砂处理,砂中不应含二氧化硅。

##### 5.8.4.2 焊接工艺

宜采用可提高效率和减少热量输入的半自动焊接工艺(如 GMAW)。如果焊接区域面积较大,为了提高效率,控制焊接过程的质量,可使用安装在轨道上的焊接设备。

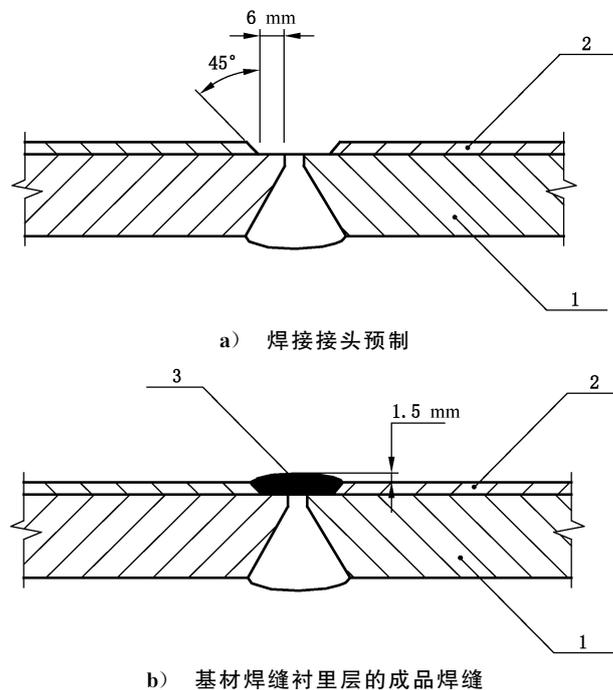
##### 5.8.4.3 堆焊

5.8.4.3.1 若被修理承压部件壁厚较薄,为了防止烧穿和变形,宜采用较小的线能量。

5.8.4.3.2 焊接完成后,应测量堆焊层厚度。

##### 5.8.4.4 基材焊缝处的衬里修理

5.8.4.4.1 典型的基材焊缝衬里修理如图 12 所示。基材焊缝焊接前,应先对衬里焊缝进行焊接,填充至与衬里大致齐平,余高不应大于 1.5 mm。基材焊缝金属和衬里焊缝金属之间不应发生交叉污染。任何可疑的交叉污染区域,都可使用硝酸或硫酸铜溶液检查和确定衬里与基材的界面位置。



标引序号说明:

1——基材;

2——衬里;

3——内衬焊缝金属背覆层。

注:焊缝坡口近似平齐。

图 12 基材焊缝衬里修理

5.8.4.4.2 基材焊缝焊接前,应去除衬里焊缝两侧至少 6 mm 范围内的衬里材料。

#### 5.8.4.5 低合金钢的特殊要求

5.8.4.5.1 为了避免修理过程中可能产生的氢导致部件开裂,焊前应对临氢(含腐蚀产生的氢)的被修理承压部件进行脱氢处理。

5.8.4.5.2 存在材料脆化工况的,应对被修理承压部件已发生材料脆化的可能性进行评估。修理过程中应采用可降低开裂风险的焊接工艺,如采用焊接速率和热输入可控的焊接技术。

5.8.4.5.3 低合金钢基材补焊后,堆焊衬里(如适用)前,宜进行消氢或中间消应力热处理,特别是合金含量大于或等于 2-1/4Cr 的材料以及壁厚大于 38 mm 的材料。

5.8.4.5.4 焊后应检测焊材和基材金属热影响区的最大硬度和韧性。

#### 5.8.4.6 表面状况

修理完成后,被修理承压部件表面应无缺口、划痕等缺陷。如果存在表面缺陷,应打磨消除。

#### 5.8.4.7 热处理

5.8.4.7.1 热处理应按照设计文件的要求进行。如果设计文件允许并征得使用单位同意,可采用回火焊技术等热处理替代方法。

5.8.4.7.2 应分析修理前和修理过程中的热处理对熔覆层、母材和焊接接头的强度和韧性的影响。

5.8.4.7.3 基材为低合金钢的衬里进行修理时,应分析第一层焊道可能会对基材产生影响,修理区域的最终热处理可在堆焊层沉积 5 mm 耐蚀材料后进行。

#### 5.8.5 无损检测

##### 5.8.5.1 一般要求

###### 5.8.5.1.1 焊前无损检测

焊前应采用适用的无损检测方法确定待修理部位缺陷已消除。

###### 5.8.5.1.2 焊后无损检测

应采用适用的无损检测方法对焊后堆焊或补焊表面进行无损检测。补焊厚度大于 9.5 mm 的部位应进行射线检测或超声检测。

##### 5.8.5.2 硫酸铜溶液测试

去除不合格的堆焊层后,在重新堆焊前为了确认原堆焊层被完全去除,应使用硫酸铜溶液检查基材表面。

##### 5.8.5.3 衬里的渗透检测

5.8.5.3.1 采用多层焊接时,应对堆焊的第一层焊道进行渗透检测,如果堆焊材料有两种,应在堆焊两种材料的第一层焊道时分别进行一次渗透检测。

5.8.5.3.2 堆焊层表面和衬里受焊接影响的区域应进行 100% 渗透检测。

#### 5.8.6 试验

##### 5.8.6.1 化学成分分析

5.8.6.1.1 焊接工艺评定试验中应包括堆焊层有效深度处的化学成分分析测试。

5.8.6.1.2 设计文件对堆焊层有效深度有要求时,应对堆焊层有效深度处的化学成分进行分析测试。

5.8.6.1.3 化学成分分析和铁素体测试的取样位置和取样数量要求如下。

- a) 设计文件应规定堆焊层的化学成分分析和铁素体含量测试数量,以及奥氏体不锈钢堆焊层中铁素体含量范围。应在最终焊后热处理(如适用)之前,选择合适位置取样测试或进行现场测试。除非另有规定,最终焊后热处理完成后,一般可不再进行测试。具体要求如下。
  - 1) 采用自动焊接方式进行堆焊的,应在被修理承压部件的环焊缝处、主要受压元件及其与其他受压元件连接处、衬里焊缝等部位进行取样测试。采用手工焊接方式进行堆焊的,同一部位的取样点不应少于 2 处。
  - 2) 直径不大于 600 mm 的承压设备部件,应在衬里焊缝上每隔 600 mm 处取 1 点进行测试(长度不足 600 mm 的取 1 点)。采用相同的焊接工艺、焊接过程和焊材的焊缝可算作同类型焊缝,焊缝长度可累计计算。一个 500 mm 的人孔和 3 个 200 mm 的接管可累计计算为 1 100 mm,按上述规定焊缝上的取样点为 2 个。
- b) 对于直径大于 600 mm 的承压设备部件,采用手动、半自动或自动焊接方式的,征得使用单位同意,可每周对相同焊工、相同焊接工艺的焊缝上取样 2 次进行测试,用以代替上述 a)1) 的要求。采用不同焊接工艺的焊缝应按照 a) 的要求进行测试。

#### 5.8.6.2 奥氏体不锈钢堆焊层的化学成分

奥氏体不锈钢堆焊层的化学成分应满足原设计文件中的要求。

#### 5.8.6.3 奥氏体不锈钢堆焊层的铁素体测量

除特殊规定外,奥氏体不锈钢堆焊层的铁素体含量的要求如下。

- a) 堆焊材料为 304、304L、316、316L 和 317L,铁素体含量范围应为 4~10。
- b) 堆焊材料为 347,铁素体含量范围应为 3~10。

#### 5.8.6.4 铁素体测量仪的校准

铁素体测量仪应按照 GB/T 1954 的要求进行校准,并在有效校验周期内。使用前,应至少在 2 个试块上测试验证仪器的精度,2 个试块的铁素体含量变化幅度至少为 5,其中一个试块的铁素体含量应为 4~10。

#### 5.8.6.5 Ni-Cu(合金 400)和 Cu-Ni 合金的铁氰化物测试

5.8.6.5.1 应对所有 Ni-Cu 合金(蒙乃尔合金 400、67Ni-30Cu)和 Cu-Ni 合金(70Cu-30Ni、90Cu-10Ni)堆焊层和复合板衬里焊缝进行铁氰化物测试。

5.8.6.5.2 铁氰化物测试应在 100%Ni-Cu 或 Cu-Ni 堆焊层和复合板衬里焊缝上进行,测试结果不应存在游离铁。测试程序如下。

- a) 待测试表面应采用不会引起游离铁污染的方法制备;使用溶剂或清洁剂溶液去除待测试表面的油、油脂和污垢;使用酸洗溶液去除待测试表面的氧化物;表面清洁后使用蒸馏水或去离子水彻底冲洗表面;若需表面处理,应使用新的砂纸或砂轮,以及非铁素体抛光片和刷子。
- b) 测试溶液应为新调配的溶液。测试溶液各组分配比如下:
  - 1) 90%(体积分数)的铁氰化钾(4%质量分数溶液);
  - 2) 10%(体积分数)的溶液,由 1 份浓盐酸[36%~38%(质量分数)HCl]和 9 份蒸馏水组成。
- c) 应检查测试溶液的有效性。将测试溶液涂抹(或喷涂)至 Ni-Cu、Cu-Ni 和碳钢标准试样上,碳钢标准试样上应立即出现蓝色,在 10 min 内 Ni-Cu 或 Cu-Ni 标准试样上不应出现任何颜色。如果出现颜色,表明测试溶液 pH 值偏低,应重新配制溶液。

- d) 将测试溶液通过雾化器或滴管施加至焊缝表面。若焊缝表面 2 min 内出现蓝色,则表明 Ni-Cu 或 Cu-Ni 合金堆焊层或衬里中含有游离铁。对于反应颜色为浅蓝色的,是可接受的。
- e) 可根据色度确定铁含量大小,铁含量不应超过 6%(质量分数)。

#### 5.8.6.6 耐压试验

设计文件或修理方案中应明确是否进行耐压试验。堆焊层和复合板衬里的修理一般不必进行耐压试验,但如果涉及基材补焊,耐压试验应按照相关法规要求执行。

### 5.9 螺纹塞或塞焊堵头修理

#### 5.9.1 适用性

本方法通过钻孔或加工孔去除待修理承压部件上的裂纹或其他缺陷,再将实心塞或螺纹塞插入孔中进行密封焊接后完成修理。具体结构形式如图 13 所示。本方法还可用于检查孔或其他的开孔操作。

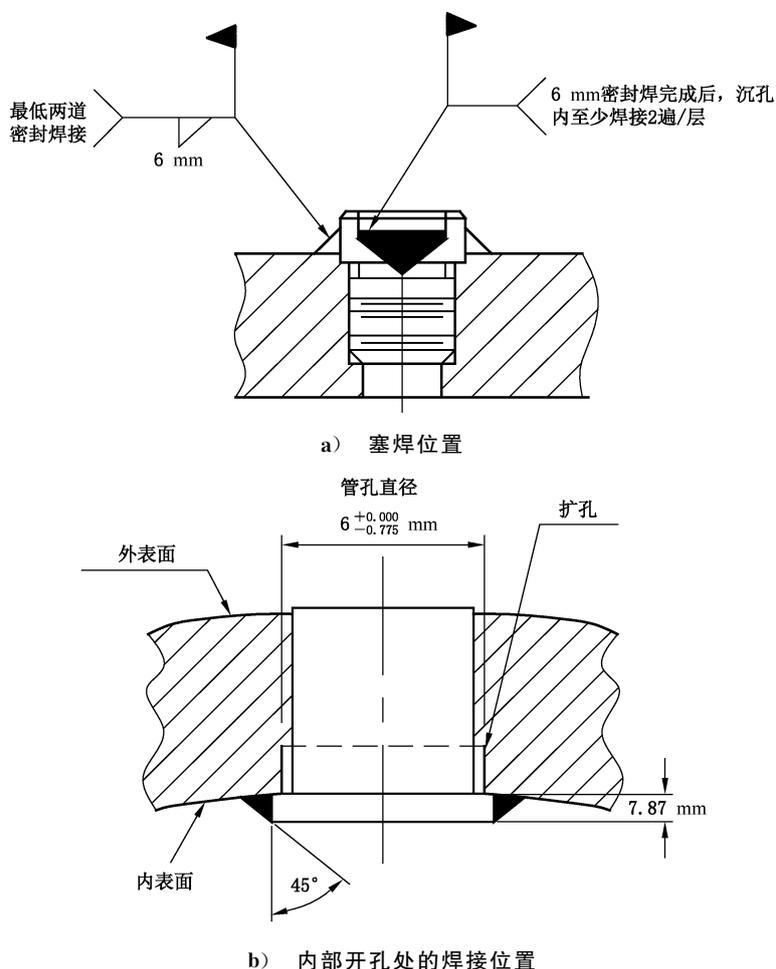
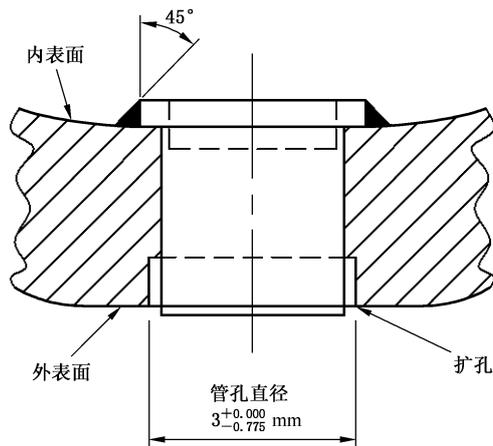


图 13 典型的塞子布置图



c) 未开孔或外部开孔处的焊接位置

图 13 典型的塞子布置图 (续)

## 5.9.2 限制条件

5.9.2.1 本方法不适用于焊接缺陷的常规修理和可用焊接挖补法进行修理的情况。

5.9.2.2 本方法不适用于可能发生缝隙腐蚀的服役环境。

## 5.9.3 设计

### 5.9.3.1 适用性评估

修理前,应评估本方法的适用性,至少包括:

- a) 选择螺纹塞还是塞焊堵头;
- b) 开孔部位是否补强;
- c) 射线检测时是否使用  $\gamma$  源。

### 5.9.3.2 材料

塞子材料的机械性能、物理性能和化学成分等应与被修理承压部件材料相同或相近;如果塞子材料与被修理承压部件材料类别不同,应评估其材质适应性。

### 5.9.3.3 开孔补强

开孔补强应符合相关标准要求。

### 5.9.3.4 承载能力

螺纹塞的螺栓结构尺寸(包括螺栓直径、螺距、啮合长度等)以及塞焊堵头的焊接尺寸应具有满足工况要求的承载能力。

### 5.9.3.5 堵头形式选取

应从强度和所处的工况环境(温度、腐蚀性介质、缝隙的存在、不同材料)等方面,评估螺纹塞和塞焊堵头的优劣,选择更为适合的堵头形式。

### 5.9.3.6 材料去除

在修理方案中应结合所选择的堵头形式,明确提出材料去除的位置、范围、尺寸等。

### 5.9.3.7 开孔尺寸

最终孔的直径和结构形状(钻孔、螺纹或锥度等)应通过工程分析确定。开孔尺寸应采用适用的工程计算方法计算确定。

## 5.9.4 修理

### 5.9.4.1 缺陷位置

采用适用的检测方法对缺陷进行检测,确定缺陷的位置以及待修理区域的范围。

### 5.9.4.2 去除缺陷

采用机加工方法(如钻孔机)将缺陷部位的材料去除,并将其加工成所需尺寸的圆形通孔。

### 5.9.4.3 塞子的加工制造

塞子应按照设计文件加工制造。

### 5.9.4.4 润滑剂和胶带

高温服役环境中,螺纹塞不应与螺纹润滑剂或胶带一起使用。

### 5.9.4.5 塞子安装

根据设计文件的要求安装螺纹塞或塞焊堵头,并验证安装后的装配度和密封性。

### 5.9.4.6 焊接

密封焊或强度焊应按照设计文件或修理方案进行焊接。

## 5.9.5 无损检测

### 5.9.5.1 消缺验证

应采用适用的无损检测对缺陷消除情况进行验证,确认缺陷已被完全消除。

### 5.9.5.2 表面缺陷检测

应采用适用的无损检测方法对完工的密封焊缝或加强角焊缝进行表面缺陷检测。

## 5.9.6 试验

耐压试验应按照相关设计文件执行。如果相关设计文件允许,启用前系统气密性试验可替代泄漏试验。

## 6 机械修理

### 6.1 更换承压部件



#### 6.1.1 适用性

本方法适用于更换容器的受压元件或管道的管道组成件。更换的承压部件可使用是同材质、同规格的部件,也可使用经过改造(材料升级、结构改变等)的承压部件。

## 6.1.2 设计

6.1.2.1 由材料性能退化造成的缺陷,应分析原因并通过更换部件来减轻或消除材料性能退化。

6.1.2.2 当更换的承压部件和原部件相比有变化,应重新进行设计计算。设计文件中应确定更换部件的工况条件,提出更换部件的材料和机械性能要求。工况条件包括工艺参数、介质流动特性等,材料要求包括选择与工艺相适应的材料、材料规格、材料质量等,机械要求包括壁厚、压力等级、结构、支撑等。

6.1.2.3 更换的承压部件的设计应符合相关设计标准要求。

6.1.2.4 更换承压部件改变现有系统结构时,宜设置临时或永久的支撑和约束设施。

## 6.1.3 修理

### 6.1.3.1 修理前准备

更换承压部件时,应将修理承压设备从系统中隔离出来,锁定标记,并做好排水、通风和清洁等工作。

### 6.1.3.2 连接接头

更换的承压部件上的焊接接头和机械连接接头应符合相关标准和设计文件的要求。更换前,应对机械连接接头进行清理。连接接头处未更换的部件壁厚应满足继续使用的要求。

新旧部件的接头应按照相关标准进行检查,应在修理方案内明确检查的类型、范围和位置,以及验收标准。

### 6.1.3.3 安装过程的检查



使用单位应提出机械连接接头(如法兰、螺纹接头、锻造或压合接头以及管接头等)安装过程的检查项目,至少包括对连接过程和装配结果的验收确认,是否按要求使用扭矩扳手进行紧固,必要时还应确认力矩测量仪表是否准确等。

### 6.1.3.4 更换后的监测

承压部件更换完成后,应在初始操作期间监测系统是否存在异常振动、膨胀、收缩或其他故障迹象。

## 6.1.4 无损检测

新更换的承压部件无损检测应按照相关标准和设计文件要求执行。

## 6.1.5 试验

新更换的承压部件应按照相关标准和设计文件的要求进行耐压试验。

## 6.2 冷冻塞

### 6.2.1 适用性

6.2.1.1 本方法用来截断管道内的介质流动,适用的介质包括水、水溶液、污泥、碳氢化合物、酸、碱等。使用本方法应先测试冷冻塞的承载能力,承压大小取决于介质的凝固点、管道的尺寸、初始温度、流量以及走向等因素。

6.2.1.2 采用本方法前,应对冷冻塞对管道的影响进行评估。

6.2.1.3 修理单位应有使用冷冻塞的经验或做过相同条件下的模拟试验。

## 6.2.2 安全防护要求

6.2.2.1 本方法在实施过程中存在因冷冻剂(液氮或二氧化碳)泄漏导致作业人员窒息的风险。相关作业人员应佩戴具有可视指示器和声音警报的氧含量分析仪。

6.2.2.2 修理单位应有规范化作业程序和必要的防护设备,不应发生低温灼伤事故。

6.2.2.3 作业人员和监护人员应接受与修理方法相关的培训,有作业经验,了解使用低温液体的危害;还应遵守 HSE 规定,穿防护服,保持密闭空间通风,监测温度和作业环境氧气,了解紧急情况的处置方法和急救知识等。

6.2.2.4 在地面以下受限空间作业时,冷冻夹套装置应设置在非动火工作区域或单独开挖的坑内。如无法做到,则应采取额外的安全预防措施,包括但不限于受限空间作业相关的防护措施。

6.2.2.5 冷冻剂排放口应位于受限空间的外部或地面以上,不可设置在受限空间内,同时应保持受限空间内通风。

6.2.2.6 不应出现冷冻剂泄漏。工作区域应设置隔离障碍物并铺设防水布。

6.2.2.7 含碳氢化合物介质的冷冻操作应有特殊预防措施。

## 6.2.3 设计

### 6.2.3.1 冷冻效果的影响因素

6.2.3.1.1 采用本方法前,应掌握被修理管道内介质的凝固点和组分。如果介质含有轻馏分,不宜采用本方法。可通过测试凝固点温度来确定冷冻介质的可行性,介质的凝固点温度也可由使用单位提供或在相关文献中查找,也可按照 6.2.6 进行介质凝固点温度测试。

6.2.3.1.2 应对布置在管道中心的热电偶读数提出要求。

6.2.3.1.3 为了避免冷冻塞形成失败,待冷冻部位的管道内部介质应处于静止状态。

6.2.3.1.4 待冷冻的管道内部介质的初始温度应低于 50 °C。

### 6.2.3.2 材料

6.2.3.2.1 本方法适用于所有材料的管道,包括无延性转变温度较高的材料。

6.2.3.2.2 应分析冷冻过程对材料强度和韧性的影响。若冷冻温度低于管材的无延性转变温度,应分析碳钢、低合金钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢以及双相(奥氏体-铁素体)不锈钢冲击韧性的下降程度;铜、铝、奥氏体不锈钢和高镍合金在低温下的冲击韧性会下降,但一般能够保持满足设计标准要求的冲击韧性。

### 6.2.3.3 冷冻塞的强度

冷冻塞承压能力与其强度成正比,强度与其长度成正比,且剪切强度随着温度的降低而增加。在较高压力下形成的冷冻塞强度更大,应在最高操作压力下形成冷冻塞。

### 6.2.3.4 冷冻塞对管道的压力

在冷冻塞形成时,不必考虑其对管道内壁的压力。

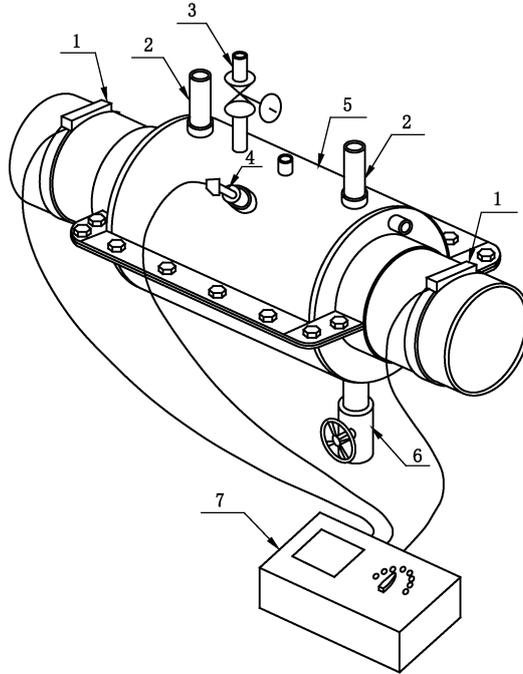
### 6.2.3.5 位置

冷冻位置的选取应不影响管道永久和临时支撑的自由膨胀和收缩。此外,还应分析冷冻位置是否会影响排液管、通风口、泄压点和隔断阀的正常工作。

### 6.2.3.6 液氮冷冻

6.2.3.6.1 液氮是最常用的冷冻剂之一,可用于公称直径不大于 1 200 mm 的管道。

6.2.3.6.2 液氮冷冻夹套典型结构如图 14 所示,其中冷冻夹套的材料为不锈钢、铝和玻璃纤维。液氮进口阀应位于冷冻夹套的底部和顶部,底部的阀门也可用作液氮排放口。



标引序号说明:

- 1——热电偶;
- 2——氮气排气口;
- 3——液氮进口;
- 4——热电偶(可选);
- 5——冷冻夹套;
- 6——液氮进口和夹套排水;
- 7——温度监控器。

图 14 液氮冷冻装置的结构形式

6.2.3.6.3 所用冷冻夹套的长度不应超过 3 倍管径,不应使用两个互相衔接的冷冻夹套。

6.2.3.6.4 冷冻夹套的操作压力应为大气压,蒸发的氮气从夹套顶部排出。

6.2.3.6.5 冷冻夹套上的各种部件(如软管、管道和阀门等)应选用低温材料。

6.2.3.6.6 冷冻夹套中心和两端的管道上都应装设热电偶,利用夹套中心的热电偶测量夹套和管道的温度,利用两端热电偶监控修理进程。

6.2.3.6.7 应配备液氮液位报警装置和管道温度报警装置,防止液氮液位过低或管内温度升高。

6.2.3.6.8 必要时,可使用流量监测器、压差监测器和远程摄像机等设备对冷冻情况进行监测。

### 6.2.3.7 二氧化碳冷冻

6.2.3.7.1 二氧化碳冷冻可用于公称直径不大于 100 mm 的管道,一般用于建筑物供水线的冷冻。

6.2.3.7.2 二氧化碳冷冻夹套可用缠绕在管道周围的布料制成,并用拉绳固定两端。

6.2.3.7.3 冷冻夹套的长度不应大于 3 倍管径,不应使用两个互相衔接的冷冻夹套。

6.2.3.7.4 冷冻夹套两端的管道上都应装设有热电偶,用于监控冷冻进程。

6.2.3.7.5 修理过程中可能要持续向冷冻夹套内注入二氧化碳以保持冷冻塞的强度。

## 6.2.4 修理

### 6.2.4.1 程序

作业前,应编制修理方案、HSE 方案和应急方案等文件。

### 6.2.4.2 相容性

管内介质的凝固点应与冷冻剂的冷却范围及所采用的冷冻设备相匹配。

### 6.2.4.3 冷冻剂供应

为满足作业需求,应预备足够的液氮或二氧化碳冷冻剂。为保证大直径管道的介质冷冻或长时间保持冷冻状态,宜在现场储存或持续输送液氮或二氧化碳冷冻剂。

### 6.2.4.4 保温和涂层

为了便于安装冷冻夹套和热电偶,应将冷冻位置的保温和黏性涂层去除,类似油漆的薄涂层可不去除。

### 6.2.4.5 环境

冷冻作业时应屏蔽可能会影响操作的环境条件,如风、雨和热源(阳光、高温管和高温设备等)。

### 6.2.4.6 封闭端

当冷冻位置位于管道封闭端附近时(如焊帽、盲法兰或关闭的阀门),应采取特殊预防措施。

### 6.2.4.7 相连设备

制定修理方案时,应对可能影响修理过程的设备进行分析,必要时隔离此类设备,如有压力波动的泵。

### 6.2.4.8 安装

冷冻夹套应按照修理方案的要求安装。

### 6.2.4.9 过程监测

应对修理作业的全过程(从液氮或液态二氧化碳被引入夹套到作业完毕)进行监测。

### 6.2.4.10 外部动态载荷

冷冻作业期间,管道系统不应承受任何显著的外部动态载荷。如不可使用锤形扳手或冲击扳手来移除螺栓和螺母。冷冻作业前,应一次性将螺栓全部拆除,清洁或更换。

### 6.2.4.11 强度验证

打开下游管路,进行后续工作前,验证以下内容。

- a) 冷冻夹套两端的热电偶测温仪表读数不应高于预先设定的温度。
- b) 冷冻夹套的两端管道上应形成一个完整的圆形霜环。



- c) 可在管道下游拆除一个法兰,打开一个阀门,或在管道上钻孔释放下游压力,利用上游压力来验证冷冻塞的强度。在冷冻塞强度验证试验时,管道内压不应低于最高操作压力。为了验证冷冻塞强度,该试验应保持一定时间。对烃类产品的冷冻塞强度验证试验应进行较长时间。

#### 6.2.4.12 泄漏

若在管道下游观察到介质泄漏,应确定泄漏介质来源。如果泄漏介质来自冷冻塞处,则需继续冻结;如果有其他来源,应找出泄漏点并进行封堵;如果泄漏介质和泄漏量可接受,则可不作处理。

#### 6.2.4.13 焊接

在冷冻塞附近焊接作业时,为防止冷冻塞融化和失效应制定特殊工作程序。

#### 6.2.4.14 冷冻作业停止时间

冷冻作业应持续到管道系统安全并且使用单位同意停止冷冻作业的时间点。

#### 6.2.4.15 试验

管道系统重新投用前,冷冻塞可用于新更换承压部件的耐压试验。

#### 6.2.4.16 回充

管道修理完成后,应回充下游管道介质,使冷冻塞两侧的压力均衡,并在高点处排出管道中的空气。

#### 6.2.4.17 解冻

冷冻塞应自然解冻,不宜采用对管道加热的方法加速冷冻塞的溶解。

### 6.2.5 无损检测

#### 6.2.5.1 目视检查

冷冻作业前和冷冻作业完毕后都应目视检查冷冻位置的管道外部是否有划痕、沟槽、腐蚀以及其他可能影响管道安全的损伤。

#### 6.2.5.2 检测要求

冷冻作业完毕后,应使用射线检测或超声检测方法对管道冷冻区域和附近的焊缝进行检测,必要时对管道进行全面检验。

#### 6.2.5.3 评估

根据冷冻作业完毕后的检查和检测数据评估本次冷冻操作是否影响管道安全运行。

### 6.2.6 试验

#### 6.2.6.1 未知流体属性

凝固点不明的介质应进行凝固点温度测试,包括但不限于以下介质:

- a) 具有不同黏度的烃混合物;
- b) 冷冻塞的下游侧减压时可蒸发的轻馏分介质;
- c) 含有挥发性成分的介质。

### 6.2.6.2 凝固点测试

可使用小型冷冻夹套和相关设备进行凝固点温度测试。将夹套安装在一个足够长的含法兰的管道短节上,在短节内部充满介质,并加压至工作压力的 1.5 倍。形成冷冻塞后,可拆除两侧法兰,检查和评估冷冻塞的强度。

### 6.2.6.3 测温仪表的校准

测温仪表应定期校准,每次作业前应通过与环境温度、冰水温度或其他参考温度进行比对来检查其测量值是否准确。

### 6.2.6.4 氧含量监测仪校准

氧含量监测仪应定期校准,每次作业前应通过与大气氧含量进行比对来检查其读数是否准确。

## 6.3 螺纹修理

### 6.3.1 适用性

本方法适用于螺孔中受损螺纹的修理。修理方法包括:

- a) 钻孔,扩大螺孔的尺寸后,更换配套紧固件或安装螺纹套;
- b) 用焊条金属填充螺孔,重新钻孔和攻丝。

以下方法也可用于修理受损螺纹,但本文件未涉及:

- a) 使用相同规格的丝锥重新对螺孔进行攻丝;
- b) 更换螺纹受损的部件。

### 6.3.2 限制条件

#### 6.3.2.1 保留现有螺孔

腐蚀产物和/或残留物可能堵塞螺纹,如果目视检查后发现螺孔内的螺纹并未严重损坏,宜使用相同规格的丝锥重新攻丝,无需扩孔或填充金属后重新钻孔。

#### 6.3.2.2 设计确认

螺孔在扩孔前应经设计确认。

#### 6.3.2.3 裂纹修理



如果在螺孔表面发现裂纹,且扩孔尺寸不足以消除裂纹,则应在扩孔前采用适用的方法消除裂纹。

#### 6.3.2.4 焊接填充螺孔

焊接填充螺孔应选择适合的焊接方法,避免出现以下情况。

- a) 焊接完成后,部件发生翘曲和泄漏(无论有无焊后热处理)。
- b) 焊后热处理完成后,低合金钢制的承压部件韧性降低。
- c) 焊接完成后,有回火脆化倾向的材料发生开裂。

#### 6.3.2.5 螺纹套

螺纹套的规格通常不大于 M38。使用螺纹套应符合制造单位的要求,特别是有关使用条件(内部

和外部),材料和负载方面的要求。

### 6.3.3 设计

#### 6.3.3.1 标准

修理后的螺柱组件应符合原设计标准或其他适用的设计标准的要求。

#### 6.3.3.2 螺纹修改

为了防止丝锥攻丝后,无法在螺纹孔底部形成完整的螺纹,进而导致使用过程中螺柱末端整圈螺纹的损坏以及受损螺柱退出时造成螺孔螺纹损坏,可适当缩短螺柱螺纹尺寸或增加螺孔深度。

#### 6.3.3.3 扩孔

采用扩大螺孔直径修理受损螺纹的方法时,按以下步骤操作。

- a) 扩大螺孔直径前,应重新检查螺纹啮合长度,确认其是否满足原设计标准要求。
- b) 扩孔后,应重新校核法兰的应力(包括没有螺纹的配对法兰/法兰盖),应力值应在可接受范围内,同时还应分析增加螺柱的预紧力。
- c) 可采用定制的异径锥形双头螺柱替换现有的螺柱,螺柱的一端保持其原始直径而将另一端的直径增大。

#### 6.3.3.4 扩孔对强度的影响

由于扩孔会去除螺孔内的部分母材,设计应确认扩孔修复后的部件仍能满足使用要求。

#### 6.3.3.5 螺纹套的设计

应在设计文件中给出螺纹套的设计方法。螺纹套所用材料不应采用未在原设计标准中列出的材料,其许用应力不应低于螺柱(含螺栓)材料的许用应力。

### 6.3.4 修理

#### 6.3.4.1 钻孔深度

钻孔深度不应超过设计文件规定的承压部件壁厚方向的最大钻孔深度。

#### 6.3.4.2 焊接前的准备

焊接填充螺孔前应先消除螺孔内螺纹(通过钻孔完成),并检查螺孔内无碎屑后才可焊接。

#### 6.3.4.3 焊接作业程序和人员资质

焊接作业程序和焊工资质应符合设计文件和修理方案的要求。

#### 6.3.4.4 焊接

焊接过程(包括焊前和焊后热处理等)应满足原设计文件和修理方案的要求,同时部件(如法兰)在焊接过程中不应发生翘曲。

#### 6.3.4.5 法兰修补

如果法兰密封面在焊接过程中发生翘曲,应重新修整。

#### 6.3.4.6 螺纹套的安装

使用螺纹套时,应按照制造单位提供的安装说明进行安装。

#### 6.3.4.7 螺纹拉毛和润滑

螺柱安装时,宜在螺栓螺纹表面涂抹润滑剂改善螺纹接触面粗糙度,防止在螺柱拧入过程中导致螺纹拉毛。

#### 6.3.5 无损检测

应目视检查扩孔或钻孔的加工过程,确定螺孔内的清洁度,以及是否有开裂。如果怀疑材料存在劣化或损坏现象,应采用相应的无损检测方法对怀疑部位进行检测。

#### 6.3.6 试验

螺纹修理相关的试验要求应满足设计文件的要求。

### 6.4 去除金属

#### 6.4.1 适用性



本方法通过去除含缺陷部位的金属来消除承压部件的表面缺陷[图 15 a)]或埋藏缺陷[图 16 a)]。去除金属的方法包括机加工方法和热加工方法。材料去除后所形成的凹坑可补焊[图 15 c)、图 16 c)],或圆滑过渡后保留[图 15 b)、图 16 b)]。

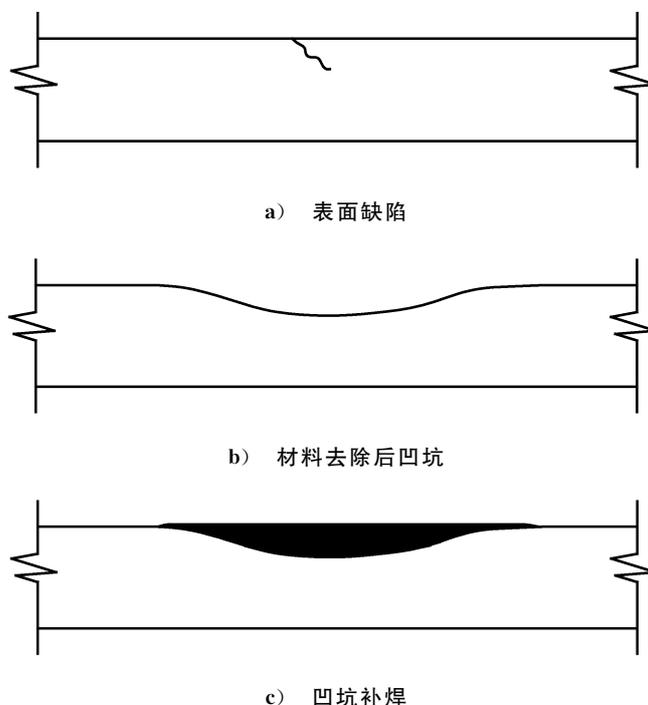


图 15 表面缺陷的修理

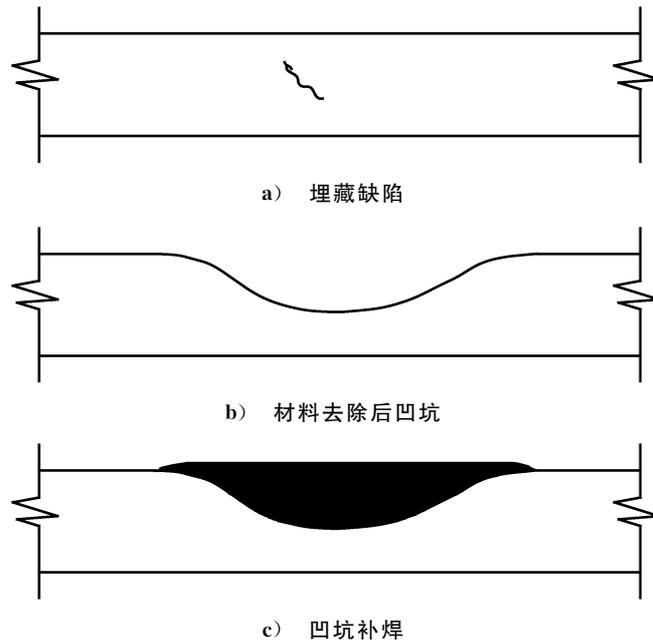


图 16 埋藏缺陷的修理

本方法适用于消除局部缺陷。如果缺陷面积很大(如容器内壁存在大面积应力腐蚀开裂裂纹),宜对承压部件进行整体更换。

机加工可使用便携式设备去除缺陷并同步完成焊接的准备工作。

在缺陷面积比较大且对表面精度要求不严格的情况下,可使用热刨方法(碳弧气刨或等离子电弧气刨)对缺陷部位进行处理。

## 6.4.2 限制条件

### 6.4.2.1 打磨

6.4.2.1.1 打磨前,应有合适的清洁程序。

6.4.2.1.2 砂轮片不应过度受力,以免失效或破裂带来施工安全隐患。

6.4.2.1.3 砂轮不应过载,过载会导致打磨区域的母材局部温度过高,某些情况下会形成马氏体或致密的浅表裂纹。打磨表面的不平整和氧化会导致材料表面残余拉应力和应力水平上升,疲劳强度降低和过早失效。

6.4.2.1.4 高强度合金钢打磨前应进行预热。

6.4.2.1.5 特定材料(如铁素体或奥氏体不锈钢等)的打磨,砂轮宜使用镍合金制旋转锉刀。

6.4.2.1.6 奥氏体不锈钢表面被碳钢或低合金钢残余物污染后会出现腐蚀或点蚀。为避免污染,奥氏体不锈钢的打磨应采用专用砂轮机。

6.4.2.1.7 打磨不锈钢中的应力腐蚀裂纹或者其他钢材的阳极溶解应力腐蚀裂纹(如胺应力腐蚀开裂)时,应控制打磨产生的热量,避免因打磨导致裂纹扩展。

6.4.2.1.8 在狭窄的作业空间内,可使用去毛刺的工具代替砂轮。

### 6.4.2.2 切削

6.4.2.2.1 使用切削液时,应注意其是否对修理表面有害。

6.4.2.2.2 应防止切削碎屑进入部件内造成损坏。

### 6.4.2.3 珩磨

珩磨速度应根据部件的长径比及材料的硬度进行调整。

### 6.4.2.4 精研

6.4.2.4.1 精研仅应用于平滑或抛光表面,不适合用于浅表面瑕疵以外的其他缺陷去除。

6.4.2.4.2 精研的磨痕应与上一道磨痕的方向相垂直,在进行更加精细的打磨之前,应去除前一道打磨的痕迹。

### 6.4.2.5 热刨

6.4.2.5.1 利用碳弧或等离子电弧进行热刨时,快速加热和随后的淬火可能会导致热影响区变硬或变脆。热刨后,应打磨去除受影响区域的材料。

6.4.2.5.2 对于按设计要求应进行焊后热处理的材料,为防止开裂,热刨前宜进行预热。

## 6.4.3 设计

### 6.4.3.1 不必补焊的情况

去除金属后不必补焊的情况:

- a) 去除的金属壁厚如果小于壁厚余量的;
- b) 符合凹坑评定条件的,且打磨形成的凹坑可通过凹坑评定的;
- c) 可通过合于使用评价的。

### 6.4.3.2 应补焊的情况

去除金属后应补焊的情况:

- a) 去除金属后剩余壁厚(包括未来的腐蚀量)低于设计标准要求最小壁厚的;
- b) 未通过合于使用评价的。

去除金属后形成的凹坑形状应便于焊接操作,避免产生夹渣或未焊透。为了降低焊缝收缩应力,在缺陷完全清除后,坑的宽度便于补焊即可。

### 6.4.3.3 热刨

采用热刨去除金属时,补焊前,应采用机加工方法去除凹坑表面 1.5 mm 厚的金属材料。

### 6.4.3.4 凹坑坡度

凹坑应圆滑过渡,坡度应满足 3 : 1 的要求;当确定凹坑进行补焊时,凹坑坡度可不满足 3 : 1 的要求。

## 6.4.4 修理

### 6.4.4.1 修理步骤

按照以下步骤消除缺陷。

- a) 采用相应的检测方法确定缺陷位置及其尺寸。如果是裂纹缺陷,可先钻孔止裂,防止裂纹在修理过程中发生扩展。
- b) 采用机加工法或热加工法将含缺陷部位金属材料去除。
- c) 采用相应的无损检测方法对材料去除后形成的凹坑表面进行检测,并确认缺陷已被完全消除。

- d) 测量凹坑尺寸和底部剩余壁厚。
- e) 判断凹坑是否补焊。
- f) 必要时,根据设计标准和修理方案进行预热或焊后热处理。

#### 6.4.4.2 特殊工装

某些情况下,可能采用特殊工装完成对精度要求较高的修理工作。此外,可研制专用量具监测金属去除深度,防止去除过量。可使用特殊轮廓的模板或木工量规进行测量,也可将其集成至特殊工装中使用。

#### 6.4.5 无损检测

##### 6.4.5.1 检测要求

设备修复完成后,表面及相邻区域应进行目视检查和表面缺陷检测。如果补焊或堆焊可能导致新的缺陷产生(如厚壁容器的深坑补焊可能会产生收缩裂纹),应采用相应的无损检测方法对补焊或堆焊部位进行埋藏缺陷检测和表面缺陷检测。

##### 6.4.5.2 其他检查

如果设计文件或修理方案中对被修理区域有其他检测要求时,应增加相应的检测项目。

#### 6.4.6 试验

主要受压元件补焊深度大于 $1/2$ 实测壁厚的容器应在补焊完成后或焊后热处理后进行耐压试验。耐压试验程序、介质、压力等要求应按照设计文件执行。必要时,还应进行泄漏试验。

#### 6.5 法兰修理和更换

##### 6.5.1 适用性

6.5.1.1 适用于因机械损伤、腐蚀或其他原因导致的法兰面损坏的修理,也可用于改善法兰面粗糙度。

6.5.1.2 可使用便携式机床在现场进行修理,也可将与受损法兰连接的管段或设备一同拆除在维修车间进行修理。

##### 6.5.2 限制条件

###### 6.5.2.1 再次损坏的可能

应分析法兰面产生损坏的原因,分析再次损坏的可能。

###### 6.5.2.2 法兰剩余厚度

受限于设计压力等级要求的法兰最小壁厚,如果不能直接对加工法兰面进行加工,应先在法兰表面堆焊,增加法兰凸缘的厚度;如果几何形状和间距满足设计要求,结构强度满足使用要求的,可在现有法兰背面增设开口环法兰作为替代解决方案,以此补偿法兰凸缘厚度的减小。

###### 6.5.2.3 残余应力

未经过消应力热处理的堆焊层表面加工时,可能使焊接残余应力重新分布,导致法兰发生尺寸变形。宜在堆焊后,对法兰进行消应力热处理。

### 6.5.3 设计

#### 6.5.3.1 法兰突出部分高度

在修理过程中可能会造成法兰面凸面高度减少,其修理后的高度不应小于 0.8 mm,并满足法兰密封要求。

#### 6.5.3.2 厚度评估

法兰修复过程中,去除凸面以外部位的金属时,应确认材料去除不影响法兰的结构完整性,必要时应进行评估。

#### 6.5.3.3 粗糙度和平整度

法兰表面的粗糙度和平整度应能满足垫片的安装要求,具体如下。

- a) 平整度允许偏差不应超过相关垫片标准的规定值。
- b) 法兰密封面粗糙度的选择应符合相关标准和设计文件的要求,并且:
  - 1) 榫槽面以及 O 形圈面的表面粗糙度不应超过 3.2  $\mu\text{m}$ ;
  - 2) 环连接面的表面粗糙度不应超过 1.6  $\mu\text{m}$ ;
  - 3) 其他类型密封面:全平面、突面、凹凸面的表面粗糙度为 3.2  $\mu\text{m}$ ~6.3  $\mu\text{m}$ 。对于全平面、突面、凹凸面法兰,密封面一般加工成锯齿形的同心圆或螺旋齿槽,加工刀具的圆角半径不应小于 1.5 mm,同心圆或螺旋齿槽的深度约为 0.05 mm,节距约为 0.50 mm~0.56 mm。

### 6.5.4 制作

#### 6.5.4.1 非焊接修理

在法兰厚度和其他尺寸允许的情况下,可不堆焊,直接对法兰密封面进行加工,去除有缺陷区域。

#### 6.5.4.2 焊接修理

以下两种情况可采用焊接修理。

- a) 通过补焊修理局部损坏区域(如凿痕或划痕)。
- b) 通过堆焊恢复法兰母材金属或原堆焊层厚度。

补焊或堆焊区域不应有任何影响焊接质量的残留物、垫片材料、腐蚀产物等,可采用机械或化学方法清洁焊接区域,焊接程序和人员应符合相关标准和修理方案的要求。

#### 6.5.4.3 焊后热处理

以下情况应在堆焊后进行焊后热处理:

- a) 相关标准和修理方案有要求的;
- b) 工艺原因要求的。

如果堆焊厚度小于相关标准规定的实施热处理的限值或存在尺寸稳定性问题,则不必进行焊后热处理。

#### 6.5.4.4 加工

为了得到符合标准或修理方案要求的法兰表面粗糙度,切削刀具半径和进给速度应设置为预定值。轻微缺陷可用锉削的方法修整法兰面。

#### 6.5.4.5 环连接面法兰转换为凸面法兰

如果已发生环槽开裂或存在潜在的环槽开裂可能性,可将环连接面法兰转换为凸面法兰。一种转换方法是在环槽中堆焊,并进行加工,以满足适用标准中规定的凸面法兰尺寸;另一种转换方法是在原环连接面法兰上使用特殊的转换垫片,但应分析垫圈的宽度、反作用力的分布、法兰旋转的影响以及表面粗糙度对垫圈密封性能的影响。

转换时还应注意以下内容。

- a) 转换前,应分析转换对设计规格和其他方面的影响,包括潜在的密封困难和垫圈爆裂等情况;应根据使用环境选择新垫片的类型和材质。
- b) 用于填充环槽的焊材宜与法兰母材相匹配,也可使用与工况条件相适应的不同材料。如某些情况下,可能用奥氏体不锈钢填充 Cr-Mo 钢制法兰中的凹槽。如果槽内填充材料的热膨胀系数与法兰母材不同,应分析热膨胀差异的影响。预制焊接表面、消除裂纹或其他缺陷,可能会从环槽底部去除一些材料。如果使用其他材料填充环槽,环槽底部材料的去除可能导致法兰厚度小于适用标准规定的厚度,但如果去除深度不超过法兰厚度的 10%,则可接受;否则应经过工程分析评估。
- c) 应去除环连接面法兰边缘的标记字母“RJ”和相应的环槽编号(或其他环连接面标记)。

#### 6.5.5 无损检测

##### 6.5.5.1 密封面检查

修复后的法兰表面应进行检查,以符合适用标准或使用单位指定的要求,如按要求进行目视检查表面光洁度。

##### 6.5.5.2 检测要求

为了确定法兰结构的完整性,堆焊前应采用适用的无损检测方法对待堆焊的部位进行检测。堆焊时,宜采用无损检测方法对每个焊道表面进行检测。修复后,法兰表面应进行无损检测。

##### 6.5.5.3 尺寸检查

修复后,法兰厚度和其他尺寸应满足适用标准或设备的要求。

#### 6.5.6 试验

法兰在现场重新组装后,投用前应进行泄漏试验,或进行系统密封试验。系统密封试验时应在系统升压过程中对法兰接头泄漏情况进行监测。应综合分析工况条件的危险性和标准要求选择最适合的试验方法。

#### 6.6 机械夹具修理

##### 6.6.1 适用性

6.6.1.1 机械夹具主要用于对承压部件、法兰和垫圈泄漏部位堵漏,或对局部减薄泄漏(或潜在的泄漏)部位封堵或加固,夹具具有各种形状(如圆筒形、矩形、具有平板封头或其他成形封头),通常要与被修理的管道或部件的外部轮廓相适应。

6.6.1.2 机械夹具也可用于法兰、阀门或其他管道组成件(支线、接管或排放小接管等)的密封。

6.6.1.3 机械夹具通常为批量制品,也可特别定制,定制的夹具包括壳体,密封垫片及螺栓(或者螺柱和螺母)。机械夹具和修理部件之间的环形空间可留空或填充环氧树脂、密封剂、纤维、耐火材料或其他化

合物衬里。夹具可分为用于堵漏的非结构件和用于加固或固定受损部位的结构件。

### 6.6.2 限制条件

6.6.2.1 除以下情况外,机械夹具不应被用于含裂纹缺陷的承压部件的修理。

- a) 裂纹形成和扩展诱因已被消除,并且在预期修理寿命期间内不会继续扩展。
- b) 在预期的修理寿命内,裂纹的扩展量是可被接受的,且裂纹不会穿过扩展至夹具以外的部位。
- c) 裂纹周向扩展的,且所采用的夹具能够有效阻止被修理承压部件的环向横截面的整周断裂,此种情况下,非结构件夹具可与结构件夹具配合使用完成对含周向裂纹缺陷的承压部件的修理。

6.6.2.2 必要时,应由有经验的人员安装夹具和注入密封剂。

6.6.2.3 机械夹具安装前,应进行风险源辨识。作业人员应了解夹具安装过程中可能存在的危险,并采取必要的安全预防措施。

6.6.2.4 如果在夹具安装过程中存在介质泄漏的风险,应采取有针对性的安全预防措施,并在工艺危害分析期间提出安全预防措施(如配备空气呼吸装备等)。

6.6.2.5 机械夹具修理是一种在役的临时性修理方法,在装置停工后应去除夹具,更换部件或采取永久性修理方法。

### 6.6.3 设计

#### 6.6.3.1 材料

机械夹具的材料宜与待修理的部件相同或相似。如果采用与待修理部件不同的材料,应与工艺环境和待修理部件材质相适应。夹具结构如图 17 所示。

夹具材料应根据以下因素制定修理方案:

- a) 介质泄漏到夹具中对材料的影响;
- b) 夹具密封件及其润滑剂可能不满足高温下使用条件;
- c) 夹具的设计和构造,包括材料选择,部件的失效模式;
- d) 夹具应在预期修理寿命期内具备抗失效的能力。

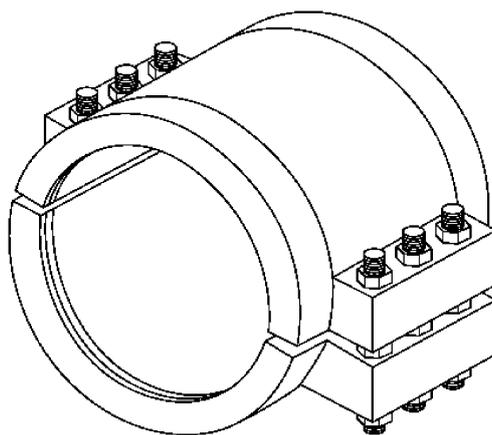


图 17 机械夹具示例

#### 6.6.3.2 设计寿命

确定机械夹具的设计寿命应综合分析修理部件的剩余强度,夹具的耐腐蚀性和机械性能,其密封元件以及密封剂(如有使用)寿命。

应注意,高温设备冷却时,某些类型的密封剂可能会失去其密封性能,或者随着使用时间的推移可

能发生变质失效。

#### 6.6.3.3 失效模式

应分析在修理过程中可能产生新的失效模式。

- a) 如果修复部位的外部部件(如法兰螺栓)被夹具封闭,在与泄漏流体接触过程中,可能会很快发生劣化、开裂或腐蚀。
- b) 夹具的温度可能低于部件温度,泄漏介质冷凝液对部件和夹具的腐蚀作用。
- c) 使用夹具可能导致部件在不同温度下运行,会增加腐蚀速率或导致露点腐蚀。
- d) 工艺介质接触或夹具的绝热效果可能会使封装在夹具内的螺栓温度升高,发生屈服。
- e) 由于操作温度和内腔压力的升高,以及不同热膨胀系数产生的应力可能导致夹具泄漏。

#### 6.6.3.4 温度和韧性

夹具材料应满足适用标准中无延性转变温度和冲击韧性的要求。

#### 6.6.3.5 设计条件

应依据管道或部件的设计条件和预加的瞬态载荷,对机械夹具、密封面和螺栓进行设计。

#### 6.6.3.6 设计标准

带压密封夹具设计应按照 GB/T 26468 执行。若没有适用的设计标准,应通过加工标准件(如在标准管帽上开口来制造端件)制造机械夹具部件,并按照适用的安装规范进行测试和试验,必要时进行加固。

#### 6.6.3.7 腐蚀裕量

确定夹具壁厚时应增加合理的腐蚀裕量。

#### 6.6.3.8 设计载荷和温度

正常工况下机械夹具的设计载荷和温度应包括以下内容。

- a) 系统中压力和温度的最高值和最低值,有限压功能的机械夹具除外。
- b) 夹具的设计温度应与部件的设计温度相一致,也可通过热传导分析证明夹具比部件具有更低的设计和操作温度。
- c) 夹具的自重载荷包括夹具内的泄漏流体和填充材料。
- d) 热膨胀的影响主要是不同的膨胀或收缩量对夹套、管道或部件的影响,在有绝热保护的管道或部件上,为了减小膨胀差,夹具也可包裹绝热层。

#### 6.6.3.9 瞬态载荷

机械夹具设计时应考虑的瞬态载荷包括以下内容:

- a) 待修理承压部件断裂时产生的推力,如果在达到预期修理寿命时(包括使用过程中预期发生的持续损伤),能够确定修理部位的剩余强度足够,则可不考虑断裂时产生的轴向推力;如果夹具用于限制轴向推力,则应设计锁定结构或定位板,以防止发生分离。有毒有害、腐蚀性的介质或在蠕变范围内运行的夹具不应依赖摩擦力连接。
- b) 风载荷、地震载荷或介质产生的瞬时载荷(水击或液塞)。
- c) 其他适用的瞬时载荷条件。

#### 6.6.3.10 排放

夹具应设计有排气口和排液口,以便在组装时排出泄漏介质和环型空间内的空气。

- a) 安装在水下的机械夹具应有排放口,防止在紧固时环形空间发生超压。
- b) 排放口应包括螺纹管帽、法兰或阀门,在夹具组装过程中要将阀门打开防止内部憋压。可使用同一排气口或排液口来排空夹具内的介质。注入密封剂时,可利用排放口注入,也可设计单独的注剂口。

#### 6.6.3.11 修理区域

夹具长度应延伸至部件的完好区域。检查夹紧部位,该位置应可承受工况下的内压和结构载荷,以及由夹具引起的额外载荷。

#### 6.6.3.12 空腔压力

注入密封剂时,应评估由于空腔压力增加导致部件向内塌陷的可能性。应在密封胶固化时进行排气。

#### 6.6.3.13 密封剂渗入

注入密封剂时,应评估密封剂渗入受损部件的可能性和后果,避免造成安全隐患。

#### 6.6.3.14 各种接头

在膨胀节、挠性接头、补偿器等部位使用夹具属于特殊情况,应对安装夹具的管道系统、紧固件和管口的载荷状况进行分析,包括在运行和停车时因温度变化产生的位移。

### 6.6.4 修理

#### 6.6.4.1 修理前准备

部件与夹具相连的部位,尤其是密封区域,应无腐蚀沉积物、污垢、油漆、绝缘材料、胶黏剂和其他涂层。可通过注入密封剂解决这些杂质阻碍接触面贴合以及形成泄漏通道的问题。

#### 6.6.4.2 机械夹具安装

安装过程中应注意不要损坏夹具,以及其与部件的接触面。对于微小泄漏点,夹具通常可直接放置在泄漏处。在体积较大或压力较高的部件上安装夹具时,通常先将夹具安装在泄漏部位附近,不上紧,待将夹具滑动到泄漏部位时再拧紧螺栓。

#### 6.6.4.3 资质

属于带压堵漏作业的机械夹具安装,作业人员应具备相应的资质;非带压堵漏作业的,作业人员应有安装修理夹具和密封剂注入的经验。

#### 6.6.4.4 安装时机

可在停工期间安装,也可在运行期间安装,但应做好必要的安全预防措施。

#### 6.6.4.5 泄漏状态下的安装

在剩余壁厚较薄或已泄漏的部件上安装机械夹具,应先堵漏,再使用玻璃纤维、复合材料或金属包裹物包覆部件,然后安装夹具。

#### 6.6.4.6 焊接

机械夹具可焊接到部件上。如果进行焊接,应确定本节规定的修理、无损检测和试验的要求是否

适用。

#### 6.6.4.7 扭矩核算

设计文件要求时,应对螺栓上紧后的扭矩进行核算。

#### 6.6.5 无损检测

6.6.5.1 目视检查夹具是否符合设计要求。

6.6.5.2 修理方案中应提出对夹具进行的无损检测项目、范围和验收标准。

#### 6.6.6 试验

6.6.6.1 设计人员应分析夹具与部件之间的环形空间在加压后部件失效的风险,在此基础上确定安装后的耐压或泄漏试验类型。

6.6.6.2 试验方法包括:

- a) 在夹具泄漏可接受的情况下,可实施在线泄漏试验;
- b) 水压试验(在工作温度较高的系统上进行水压试验时,注意蒸汽的排放);
- c) 气压试验;
- d) 泄漏试验(如氦泄漏试验等)。

#### 6.7 管道矫直或煨弯

##### 6.7.1 限制

##### 6.7.1.1 屈曲评估

如果管道有衬里或易于弯曲(如外径与壁厚的比值大于 100),应在矫直或煨弯之前进行屈曲评估。

##### 6.7.1.2 材料

6.7.1.2.1 加热或变形可能会使管道材料耐蚀性能或抗裂性能下降(如固溶退火奥氏体不锈钢的敏化,或因残余应力集中导致应力腐蚀开裂)。

6.7.1.2.2 在管道最终热处理温度以上加热低合金高强度钢和可淬透高合金钢会降低其机械性能。

##### 6.7.1.3 衬里和外涂层

煨弯可能会损坏衬里或外涂层。

##### 6.7.1.4 危害评估

在矫直或煨弯前,应进行危害评估,包括但不限于 6.7.1.1~6.7.1.3 的内容。

##### 6.7.2 设计

##### 6.7.2.1 防止损伤再次发生

应对损伤原因进行分析,并采取适当的预防纠正措施,防止再次发生损伤。

##### 6.7.2.2 分析

矫直或煨弯操作应由避免在管口、管件或支撑上施加超过其承载能力的载荷;也可采用应力分析方法,计算验证管口、管件及支撑件的载荷是否符合设计标准要求。

弯曲过程会使管道发生塑性变形,可能会导致管子和焊缝处的应力过大。如果满足 6.7.2 规定的其他条件,矫直和煨弯部位应远离管口、管件或管子本体支撑。

### 6.7.2.3 载荷和变形极限

修理过程中机械接头(如法兰接头、螺纹接头、挠性接头等)的载荷和变形应满足相关设计文件要求。

### 6.7.2.4 残留介质

残留的工艺介质在矫直或煨弯温度下可能直接产生安全危害或使材质发生劣化,应在开始作业前,对残留工艺介质的危害进行评估。否则,应在矫直或煨弯前彻底清洁管道。

## 6.7.3 修理

### 6.7.3.1 方法

矫直管道可使用弯管机或千斤顶等机械装置将管道推回或拉回到期望的位置;也可对管道局部加热后冷却,使其达到预期形状。

### 6.7.3.2 表面保护

当使用千斤顶或牵引装置时,应在链条、绳索与管道接触处铺设垫子,避免管道表面被擦伤、磨损,产生局部应力或留下划痕。应将矫直力或对中力分布在较宽的区域以避免管材的局部应变。

### 6.7.3.3 热弯或冷弯

6.7.3.3.1 铁素体钢的热弯要在高于材料临界转变温度下进行。碳钢钢管的临界转变温度约为 705 °C。

抗蠕变低合金铁素体钢加热到临界转变温度以上时,高温性能可能下降,不应热弯。

对运行中的管道进行局部加热时,应选择与实际相适应的加热工艺(如使用加热垫加热,不使用喷枪火焰加热),使用温度计或热电偶控制加热温度,以防止材质劣化。应严格执行修理方案中的加热和温度控制程序,并做记录。

6.7.3.3.2 冷弯是在比材料临界转变温度低的温度下进行管道煨弯。冷弯通常加热计划缩短的一侧,并按菱形图案加热。

### 6.7.3.4 热处理

根据设计文件和修理方案确定是否进行热弯或冷弯后的热处理。必要时也可根据材料耐腐蚀性能确定是否进行热处理。

### 6.7.3.5 弯曲半径的要求

弯管的弯曲半径应满足适用的管道设计标准要求。

## 6.7.4 无损检测

6.7.4.1 超声波壁厚抽查,壁厚不应低于设计文件中要求的最小值(包含腐蚀裕量)。壁厚测定位置应在弯曲半径最大处的外侧。

6.7.4.2 目视检查,确认矫直的管道没有皱褶、褶皱/凹坑、凿痕、尖角和其他缺陷;若有表面粗糙度的控制指标,则应在矫直或煨弯操作后进行检查;还应检查衬里和涂层是否完好。如果发现缺陷,可依据相关的安装规范进行评定。

6.7.4.3 椭圆度尺寸(管道同一截面上最大外径与最小外径之差)检查,确认其不超过安装规范所允许的范围。

6.7.4.4 硬度检测,硬度值应符合安装规范和设计标准的要求。

6.7.4.5 焊缝检测,若矫直管上有焊缝(纵焊缝或环焊缝),应采用表面缺陷无损检测方法对其进行检测,并按照安装规范和适用的设计标准进行评定。

## 6.7.5 试验

6.7.5.1 如果设计文件和修理方案有要求,应对矫直或煨弯后的管道进行耐压试验。

6.7.5.2 如果设计文件和修理方案无耐压试验要求,应评估矫直或煨弯的管道在使用时泄漏或破裂的风险。若不进行耐压试验,开车时应进行泄漏试验。

## 7 检验和试验

7.1 修理过程中的检验和试验应满足本文件各章节内的具体要求。

7.2 应按照相关法规进行重大修理和改造的监督检验。

7.3 修理方法中实施耐压试验的,试验方法、步骤、介质、温度等参照 GB/T 150(所有部分)和 GB/T 20801(所有部分)确定,其试验压力应以工作压力或定期检验报告中确定的监控使用压力为基础计算。

## 8 文件管理

### 8.1 修理方案

修理项目应有修理方案,修理方案由实施修理的施工单位起草,并经过审核、审批后提交设备使用单位,经使用单位确认后方可施工。如有必要,应由使用单位组织专家对修理方案进行评审。

在制定方案前,施工单位应对现场情况进行充分勘察,并将现场情况如实写入修理方案。

修理方案应附修理单位和人员的资质证书。

### 8.2 记录和报告

修理单位应在修理方案中规定修理记录(可参照相关设计、制造标准中的修理记录格式),在修理过程中,施工单位相关人员应据实填写修理记录,使用单位设备管理人员或修理项目负责人应对修理记录进行复核。

在修理完成后,修理单位应出具修理合格证明文件,附修理报告,报告格式可由施工单位自行制定或参照相关设计、制造标准中的报告格式。

### 8.3 第三方检测报告

如果在修理项目中使用单位委托了第三方检测单位,第三方检测单位应据实出具检测报告。

### 8.4 文件保存

使用单位应留存设备修理方案、焊接记录、热处理记录、检查或测试报告、修理前后的照片、修理合格证明等与修理质量相关的资料。

**附录 A**  
(规范性)  
**石墨制压力容器的修理**

**A.1 修理**

石墨制压力容器的修理要求如下。

- a) 承受内部或外部压力的替换部件应按原标准制造,维修单位应具有石墨制压力容器制造资质,并提供替换部件的质量证明文件。
- b) 使用单位应按 A.1a) 检查替换部件的来源以及相应的质量证明文件是否符合要求。
- c) 若无法按原标准制造替换部件时,应由部件的制造厂家提供维修用标准与原标准的对比说明,明确修理过程采用的标准满足原标准要求。
- d) 修理方案应按照相应的规范和标准制定,并经过设计单位确认。修理所采用的浸渍和粘接工艺应经过工艺评定。
- e) 粘接操作人员应经过制造单位培训考核合格。
- f) 未经使用单位同意,不应在待修理的压力容器中使用其他石墨制压力容器中已使用过的石墨部件。
- g) 裂纹和分层不能仅通过注入黏合剂进行修复。
- h) 管道中的裂纹和孔隙如果无法修复,可移除有裂纹和孔隙部分,剩余部分可继续使用。但单个管段长度不应小于 0.61 m,管段数量不应超过表 A.1 列出的数量。
- i) 再压实方法可降低已使用石墨部件的孔隙率,改善石墨部件的性能和延长其寿命,但不应作为可恢复石墨部件原始强度或原始浸渍深度的方法。

**表 A.1 管段允许数量**

管子总长 m	管段数量 个	管接头数量 个
6	1	0
7	2	1
12	3	2
14	3	2
16	4	3
18	4	3
20	4	3
22	4	3
24	5	4
27	5	4

## A.2 无损检测和试验

修理完毕后应按原标准进行无损检测和耐压试验,合格后方可投入使用。耐压试验的压力不应低于 1.5 倍的最大允许工作压力,盛装毒性危害程度为极度或者高度危害介质的压力容器,其试验压力不应低于 1.75 倍的最大允许工作压力。压力每升高 0.1 MPa 保压 2 min~3 min,达到试验压力后保压 30 min,然后缓慢降至最大允许工作压力,保压足够时间(不小于 60 min)后进行检查,不渗漏为合格。耐压试验的介质和所用压力表应满足 GB/T 21432 的要求。



**附录 B**  
(资料性)  
**焊前预热的替代方法**

**B.1 概述**

在某些条件下,采用替代方法能达到预热的目的,必要时采用模拟试验验证。

修理过程中,存在部分特殊情况无法实施原设计要求的预热过程,如附近存在涂层或其他遮挡部件等因素,通过选控焊接工艺、焊材和焊接方法等替代传统的预热。

**B.2 设计****B.2.1 坡口几何形状**

**B.2.1.1** 为了减少残余应力,在不影响焊接性能、不导致开裂的基础上,应减少坡口几何形状和焊缝金属体积。随着熔池凝固,焊材金属尺寸收缩产生残余应力,如图 B.1 所示。焊接过程中应减小焊缝和热影响区上的残余应力。

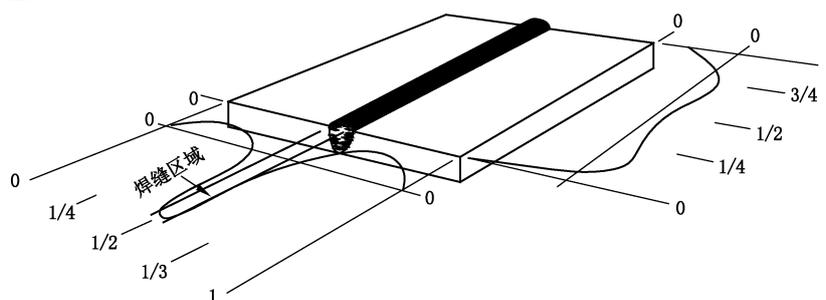


图 B.1 典型焊接残余应力

**B.2.1.2** 薄而宽的焊道的厚度和横截面较小,比圆形或锥形焊道更容易因预热减少而开裂。如图 B.2 所示,横向收缩较大的焊接接头更容易开裂,具有更宽坡口角度和更大焊接体积的焊缝通常也会具有更高的残余应力水平。

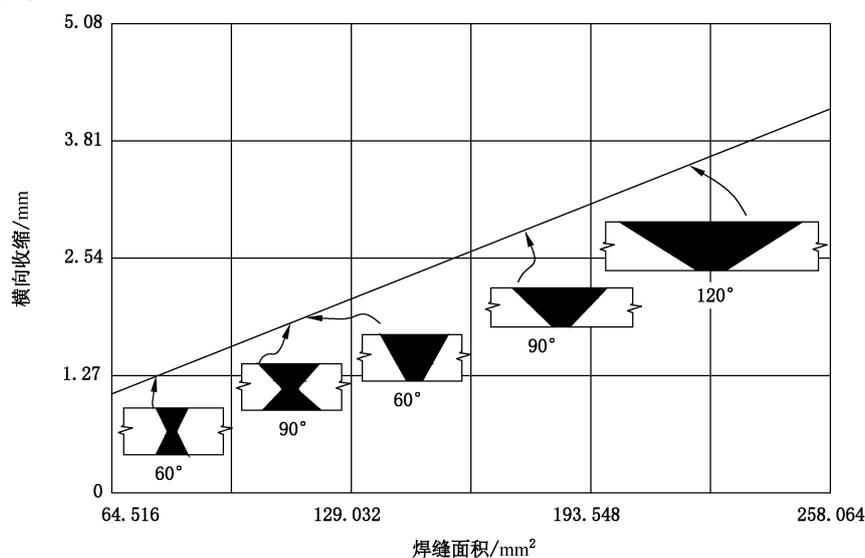


图 B.2 焊接面积对横向收缩的影响

**B.2.2 焊接工艺**

采用能够有效控制稀释度和渗氢的焊接工艺。

- a) 熔化极气体保护焊(GMAW)和钨极惰性气体保护焊(GTAW)可控制稀释率,通常不会将氢引入焊接熔敷层。采用这两种焊接方法时,可尝试减少预热。
- b) 手工电弧焊(SMAW)、药芯焊丝电弧焊(FCAW)或埋弧焊(SAW)可用以增加熔敷率和降低收缩率。在焊接工艺评定时,应对热输入参数进行评定,避免造成过度熔透、稀释或收缩。

**B.2.3 焊材**

选用能够承受快速冷却(如在冷却过程中抵抗热裂纹)的焊材和可焊性好的低氢型焊条。

为了避免焊缝金属,热影响区和基材之间的强度不匹配,应使用与基材同等且不过度匹配(较低的强度、合适的碳和铁素体含量、合适的合金元素含量等)的焊材。标准与实际焊材金属性能的比较见表 B.1。在采用预热的替代方法前,应通过材料力学性能测试验证焊材的相关数据。

**表 B.1 标准与实际焊材金属性能的比较**

单位为兆帕

焊材(AWS)	标准要求		焊接后		消除应力后	
	抗拉强度	屈服强度	抗拉强度	屈服强度	抗拉强度	屈服强度
E6013	427	345	510	441	—	—
E6018	462	379	469	393	—	—
E7018	496	414	600	545	572 <sup>a</sup>	510 <sup>a</sup>
E7018-A1	483 <sup>a</sup>	393 <sup>a</sup>	621	490	579 <sup>a</sup>	483 <sup>a</sup>
E8018-B2	552 <sup>b</sup>	469 <sup>b</sup>	814	710	655 <sup>a</sup>	545 <sup>a</sup>
E9018-B3	621 <sup>b</sup>	531 <sup>b</sup>	972	876	696 <sup>a</sup>	600 <sup>a</sup>
E9015-B9	621 <sup>c</sup>	531 <sup>c</sup>	1 448	—	827 <sup>d</sup>	690 <sup>d</sup>
ER70S-2	483	400	510	414	—	—
ER70S-6	496	414	648 <sup>e</sup>	517 <sup>e</sup>	586 <sup>a,e</sup>	490 <sup>a,e</sup>
ER80S-D2	552	469	758	545	690 <sup>b</sup>	593 <sup>b</sup>
ER70S-A1	552 <sup>f</sup>	469 <sup>f</sup>	634	545	621 <sup>b</sup>	496 <sup>b</sup>
ER90S-B3	621 <sup>b</sup>	538 <sup>b</sup>	—	—	717 <sup>b</sup>	641 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> 621 °C, 1 h 消除应力。  
<sup>b</sup> 690 °C, 1 h 消除应力。  
<sup>c</sup> 746 °C, 1 h 消除应力。  
<sup>d</sup> 760 °C, 1 h 消除应力。  
<sup>e</sup> GTAW 工艺。  
<sup>f</sup> SGMo DIN 8575, Wks. No. 1.5424。

**B.2.4 碳当量**

可使用碳当量(CE)计算确定预热相关参数:

$$CE = W_C + (W_{Mn} + W_{Si})/6 + (W_{Cr} + W_{Mo} + W_V)/5 + (W_{Ni} + W_{Cu})/15 \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

CE —— 碳当量, %;

$W_C$  ——材料中的碳含量, %;

$W_{Mn}$  ——材料中的锰含量, %;

$W_{Si}$  ——材料中的硅含量, %;

$W_{Cr}$  ——材料中的铬含量, %;

$W_{Mo}$  ——材料中的钼含量, %;

$W_V$  ——材料中的钒含量, %;

$W_{Ni}$  ——材料中的镍含量, %;

$W_{Cu}$  ——材料中的铜含量, %。

$CE \leq 0.45\%$ , 非强制焊前预热;

$0.45\% \leq CE \leq 0.6\%$ , 焊前预热温度  $93\text{ }^\circ\text{C} \sim 204\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$CE > 0.6\%$ , 焊前预热温度  $204\text{ }^\circ\text{C} \sim 371\text{ }^\circ\text{C}$ 。

若  $CE > 0.5\%$ , 有延迟开裂倾向, 应将焊后无损检测时间延迟至少 24 h。

### B.2.5 开裂参数

当碳含量等于或小于 0.17% (质量分数) 或修理高强钢时, 可使用开裂参数 ( $P_{cm}$ ) 确定预热相关参数:

$$P_{cm} = W_C + \frac{W_{Si}}{30} + \frac{W_{Mn} + W_{Cu} + W_{Cr}}{20} + \frac{W_{Ni}}{60} + \frac{W_{Mo}}{15} + \frac{W_V}{10} + 5W_B \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$P_{cm}$  ——开裂参数, %;

$W_C$  ——材料中的碳含量, %;

$W_{Si}$  ——材料中的硅含量, %;

$W_{Mn}$  ——材料中的锰含量, %;

$W_{Cu}$  ——材料中的铜含量, %;

$W_{Cr}$  ——材料中的铬含量, %;

$W_{Ni}$  ——材料中的镍含量, %;

$W_{Mo}$  ——材料中的钼含量, %;

$W_B$  ——材料中的硼含量, %。

$P_{cm} \leq 0.15\%$ , 非强制焊前预热;

$P_{cm}$  大于 0.15% 且小于或等于 0.26%, 焊前预热温度  $93\text{ }^\circ\text{C} \sim 204\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$P_{cm}$  为  $>0.26\% \sim 0.28\%$ , 焊前预热温度  $204\text{ }^\circ\text{C} \sim 371\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### B.2.6 回火焊

使用回火焊技术可产生细晶粒热影响区并改善焊材韧性。当不能进行较高温度的焊前预热或焊后热处理时, 使用回火焊技术。

本方法不会降低残余应力。在使用本方法时, 要分析焊接残余应力的影响。

## B.3 修理

**B.3.1** 细致控制焊接过程, 并对焊接过程的关键数据进行监测, 选择不易产生氢脆的工艺和焊材。

**B.3.2** 焊接前, 清除污染物 (污垢、油脂、水分等)。

**B.3.3** 焊接过程中采用的工艺对缩孔和残余应力的产生、控制热输入和避免开裂等具有显著影响, 具体如下。

a) 短焊道与长焊道相对比可减少纵向收缩。可采用图 B.3 中所示的 1~7 步焊接顺序及焊接方向进行分段退焊来减少残余应力。

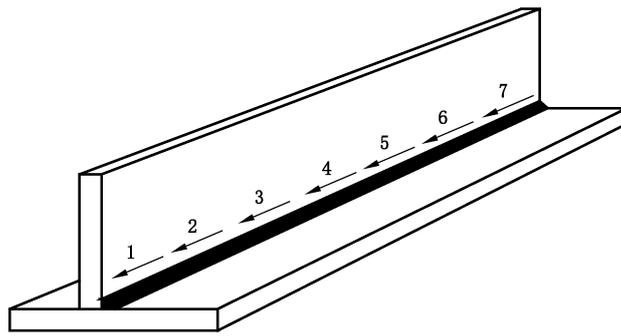


图 B.3 典型分段退焊接顺序

b) 相对于宽的摆动焊道,采用带轻微摆动的线状焊道控制或减少热量输入(参见图 B.4)。



图 B.4 线状焊道和摆动焊道的差异

**B.3.4** 喷丸处理可有效减小收缩变形,但不应用于焊缝根部和最终焊道。有效的喷丸会使金属变形屈服。用针枪等工具在表面造成凹坑并不等同于喷丸。

**B.3.5** 通过采用适当的焊接工艺,以最大限度地减少或消除焊缝裂纹,具体如下。

a) 薄而宽的焊道易发生开裂,圆形焊道为了避免发生开裂应按照图 B.5 进行熔敷。

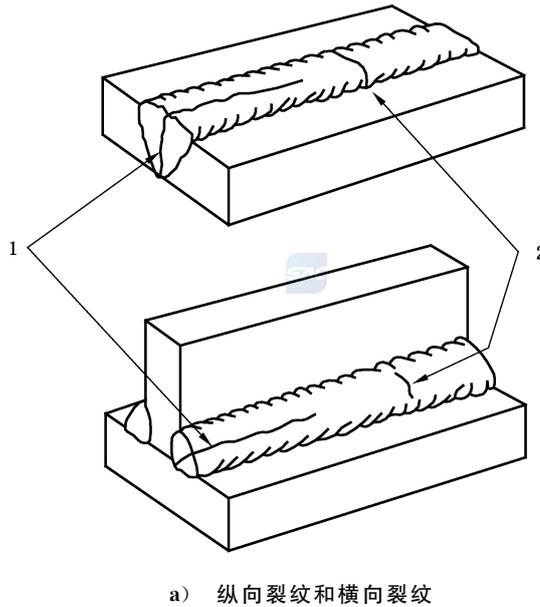


图 B.5 焊缝截面对裂纹的影响

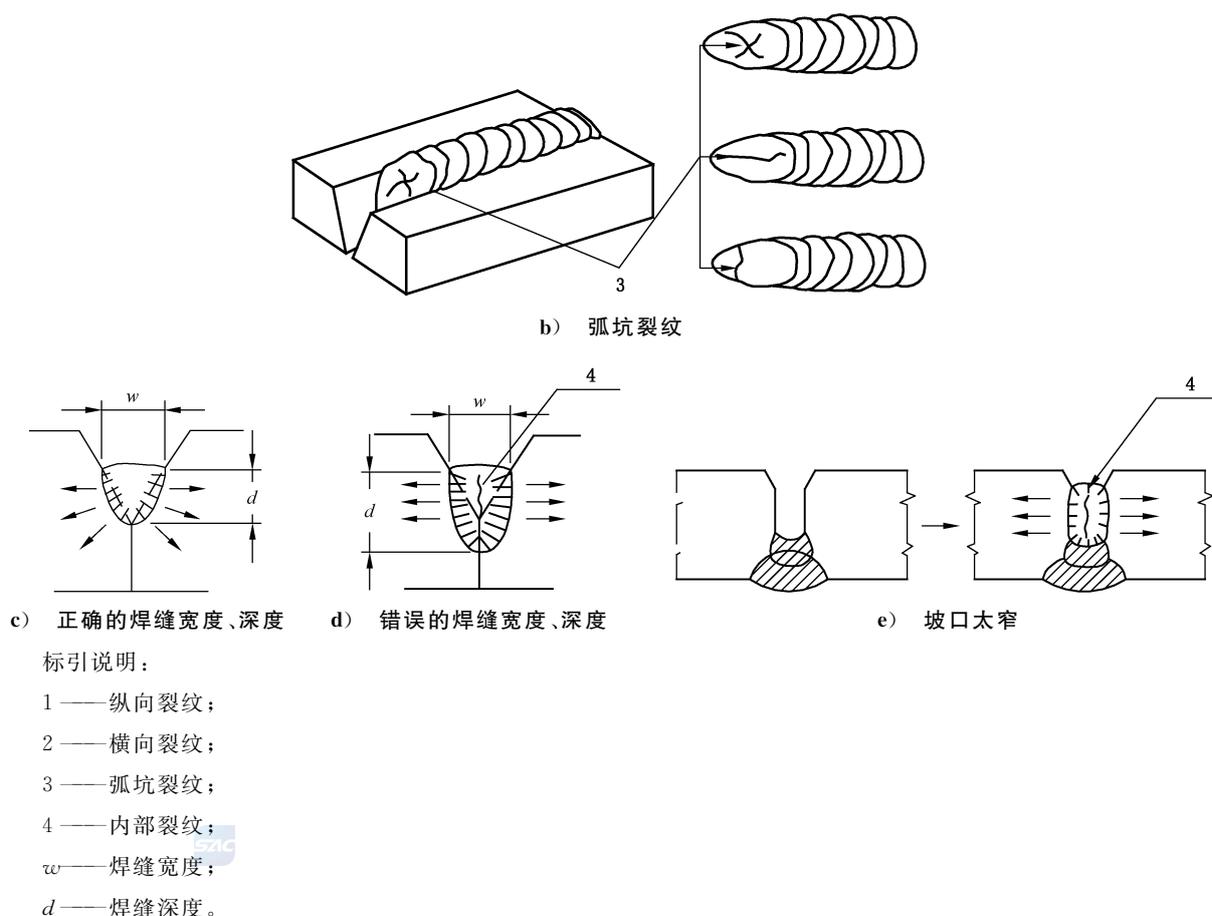


图 B.5 焊缝截面对裂纹的影响（续）

- b) 为了避免焊接过程的突然启动或停止,应通过工艺操作或电子控制方式来实现焊接电流的递增或递减。
- c) 为了避免因收缩和施工影响造成的裂纹,应熔敷足够的金属。熔敷的最小壁厚为 10 mm 或坡口厚度的 25%。

**B.3.6** 可在车间和现场使用火焰(空气—燃料或氧—燃料),电阻或电感应方法进行预热。无论采用何种方法加热,都应均匀穿透焊接件整个壁厚(除非另有规定)。

**B.3.7** 在预热过程中,应对温度进行监控。通常仅需监测焊接范围边缘预定距离处的表面温度。监测数值是可读取的,且监测的过程不对焊缝产生不良影响。采用以下监测方法。

- a) 温度指示蜡笔。温度指示蜡笔会在特定温度下熔化,可确定预热已达到的最低温度,简单经济;蜡笔融化则达到预期的温度。本方法的局限性是不能确定蜡笔熔化时的具体温度。如果要测量具体的温度,应使用不同熔化温度的多种蜡笔。
- b) 电子温度监测。对于预热和焊接操作,可使用接触式温度计和具有模拟或瞬时数字读数的直读式热电偶装置。该测温设备应进行校准或采用有效的方法来验证其测量能力(温度范围)。由于能够提供连续监测数据和数据存储,因此使用图表记录仪或数据采集系统的热电偶可用于预热过程。

## B.4 无损检测

**B.4.1** 为了确认使用预热替代方法不会导致开裂或产生其他不可接受的情况,应进行表面缺陷检测。

**B.4.2** 必要时,应根据适用的设计标准和安装规范对最终焊缝进行射线检测或超声检测。

**B.4.3** CE>0.5%的钢或高强度低合金钢材的焊缝易于产生延迟裂纹,应在焊后 24 h~48 h 进行无损检测。

**B.4.4** 检测记录的内容至少包括检测类型、检测方法、检测对象和检测结果。



**附 录 C**  
(资料性)  
**焊后热处理的替代方法**

### C.1 概述

在某些情况下,标准和规范规定的焊后热处理不能实施。如钢筋混凝土或液体介质包围的穿透或嵌入式的设备,可能在实施焊后热处理后发生损坏;焊后热处理(尤其是较高的热处理温度和较长的保温时间)后,性能受相态变化的影响较大的材料,焊缝金属会存在韧性和/或强度损失;低合金高强度钢、珠光体耐热钢、奥氏体不锈钢、镍基合金等材料在焊后热处理期间焊缝热影响区可能发生再热裂纹。

焊后热处理的替代方法包括用提高预热温度和采用特定的焊接技术等。所采用的焊后热处理替代方法能通过适应性测试,证明在提高预热温度或采用特定焊接工艺的情况下,焊接金属和热影响区的硬度值不超标,且符合适用的设计标准和安装规范要求。

### C.2 修理

#### C.2.1 提高预热温度

提高预热温度可作为焊后热处理的替代方法,但仅可用于 NB/T 47014 中母材类别为 Fe-1 的材料。

#### C.2.2 回火焊

回火焊可作为焊后热处理的替代方法。

#### C.2.3 焊后焊缝性能试验

确认采用焊后热处理替代方法的焊缝应满足使用工况下的机械和腐蚀性能要求。

## 附录 D

(资料性)

### 碳钢承压设备的在役焊接

#### D.1 概述

本附录规定了碳钢制容器和管道在役焊接作业时的注意事项和安全预防措施。本附录一般与本文件涉及的焊接修理方法或适用的设计标准和安装规范一起使用。本附录适用于所有碳钢承压设备的在役焊接,不适用于不锈钢、合金钢(如铬钼钢)或有色金属材料的在役焊接。

本附录仅限于在役焊接,并未包括所有修理改造过程中的焊接(如设备在线开孔)。

#### D.2 注意事项和安全预防措施

##### D.2.1 焊接热输入

在役焊接通过控制焊接热输入能在降低烧穿发生的可能性和降低氢致开裂发生的可能性之间取得平衡。如当焊接小于 6.4 mm 的管道时,减少焊接热输入能降低发生烧穿的可能性;但较低的焊接热输入可能会形成易产生氢致开裂的微观结构。当防止烧穿的最大焊接输入热量低于防止氢致开裂所需的最小输入热量时,采用回火焊等特殊的焊接方法更为适宜。

##### D.2.2 待修理承压部件的介质

为了在焊接过程中不发生材质劣化或化学反应(介质自身或介质与高温金属),在役焊接前,使用单位评估焊接过程可能对内部介质产生的影响(如导致燃烧、爆炸以及使材料腐蚀或脆化的敏感性增加)。

##### D.2.3 压力调节

一般情况下,在役焊接在焊接过程中不进行压力调节。如果焊接过程中可能发生烧穿,在作业前编制关于发生烧穿的安全应急预案,通过降低压力来增加焊接过程的安全性。

##### D.2.4 介质流量调节

一般情况下,在焊接过程中不会调节待修理承压部件内部的介质流量。在役焊接期间,增加介质流量可能会增加氢致开裂可能性,减少流量可能会增加烧穿可能性。使用单位一般在役焊接实施之前完成介质流量的调节。

##### D.2.5 焊后热处理

一般在待修理承压部件使用时不进行焊后热处理。若确需实施焊后热处理,应制定并实施相应的安全措施;若没有相应安全措施应评估选用无需焊后热处理的修理方法。

#### D.3 在役焊接种类

##### D.3.1 在役角焊缝焊接

在役角焊缝焊接是指将已加工成形的板材或部件焊接到容器或管道上,用来加固受损区域(如 B 型套筒焊接修理和贴板焊接修理)或部分结构改造(用于带压开孔的封堵和开孔管件)。

##### D.3.2 在役对接焊缝焊接

在役对接焊缝焊接是指对待修理承压部件的对接焊缝进行焊接修理。如果焊缝强度满足适用的设

计标准和安装规范要求则不必补强,否则应进行补强。

### D.3.3 在役补焊

在役补焊是将金属熔敷到碳钢制承压部件表面用来加强壁厚减薄区域(如由腐蚀或冲刷造成的金属损失)。

## D.4 在役焊接工艺变量

### D.4.1 通则

D.4.1.1 在役焊接应选用可消除或降低烧穿和氢致开裂的可能性的焊接工艺,并经修理单位技术负责人批准。必要时,焊接工艺按照 D.4.3 进行评定。在役焊接工艺评定的基本变量符合适用的标准和安装规范的要求,还包括 D.4.1.2 中列出的基本变量。

D.4.1.2 具有高碳当量(如  $CE > 0.45\%$ )或经历过较高焊接冷却速率的材料时应制定特殊焊接工艺,包括但不限于焊前预热和采用回火焊技术。

### D.4.2 在役焊接关键变量

D.4.2.1 冷却速率(如从  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  冷却至  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  的时间或在  $556\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冷却速率)。如果预计在役焊接过程中的冷却速率大于在焊接工艺评定报告中的冷却速率,则重新进行焊接工艺评定。冷却速率可通过直接测量、计算、建模模拟,或上述方法的组合来确定。

注:在焊接工艺评定过程中,壁厚不是关键变量,但壁厚与承压设备冷却速率直接相关,因此在役焊接过程中壁厚是关键变量。

D.4.2.2 在役焊接工艺应根据材料的碳当量进行分组。应分别确定基材与待焊接件(如 B 型套筒或封堵和开孔管件)的碳当量。冷却速率相同的情况下,高碳当量材料评定合格的在役焊接工艺也适用于低碳当量材料;如果在役焊接时的冷却速率低于焊接工艺评定报告中的冷却速率,并且氢致开裂可能性没有增加,低碳当量材料的在役焊接工艺也可用于高碳当量材料的修理。碳当量应根据公式(B.1)计算。

D.4.2.3 若变更焊接工艺,应重新进行评定。

D.4.2.4 若焊材的扩散氢含量增加或焊条类型发生改变,应重新进行评定。

D.4.2.5 热输入范围不应发生烧穿,而且要将产生易开裂微观结构的可能性降到最低。若热输入范围发生变化重新进行评定,具体如下。

- a) 若热输入超过焊接工艺指导书中确定的范围,应评估发生烧穿的风险。可通过实验、计算机模拟或二者相结合的方法进行评估。
- b) 若热输入低于焊接工业指导书中规定的范围,应重新评估发生氢致开裂的敏感性。按照 D.4.3 的试验方法进行评估。

D.4.2.6 若焊接工业指导书中规定的焊接电流范围发生变化,应重新进行评定。

D.4.2.7 若降低焊后退火温度或缩短退火时间,应重新进行评定。在焊接工业指导书中规定最低退火温度和退火时间。评估焊后退火对承压部件内介质的潜在影响。

D.4.2.8 若降低预热温度或缩短预热时间,应重新进行评定。在焊接工业指导书中规定最低预热温度和预热时间。评估预热对承压部件内介质的潜在影响。

D.4.2.9 若消氢热处理的温度或时间发生变化,应重新进行评定。评估消氢热处理对承压部件内介质的潜在影响。

D.4.2.10 若焊道位置或熔敷顺序发生变化,应重新进行评定。

### D.4.3 在役焊接工艺评定

D.4.3.1 在役焊接工艺评定目的是通过选择比现场在役焊接更易发生氢致开裂的焊接条件。如基材

选用高碳钢,冷却方式选择急速冷却,或将二者结合在一起,由此获得更加保守的焊接工艺。

**D.4.3.2** 焊接工艺评定的关键变量应包括适用的标准中要求的关键变量和 D.4.2 中列出的在役焊接关键变量。

**D.4.3.3** 在役焊接工艺评定中的冷却方式一般选用水冷,并且选择碳当量较高的材质作为焊接的基材,但使用水作为冷却介质可能会使焊接工艺评定过于保守,焊接试样评定不合格。

**D.4.3.4** 试件的数量和尺寸应满足测试试样制备的要求。

**D.4.3.5** 焊接工艺评定前,冷却介质应在整个焊评试验装置中循环。完成试件焊接后,冷却介质继续循环流动,直到整个焊评试验装置的温度达到均衡。

**D.4.3.6** 在役角焊缝的焊评试件的焊接方向应模拟实际在役焊接的位置。一般情况下,套筒应与承载管紧密贴合。套筒纵向焊缝应在焊接角焊缝之前完成。

**D.4.3.7** 在役对接焊缝的焊评试件应模拟实际在役焊接的位置。焊前应将定位焊点打磨消除,且不在定位焊点位置截取试样。

**D.4.3.8** 在役补焊的焊评试件应模拟实际在役焊接位置,直接在管壁上补焊。一般情况下,应先去除部分壁厚模拟金属损失。在补焊之前,应评估发生烧穿的风险。

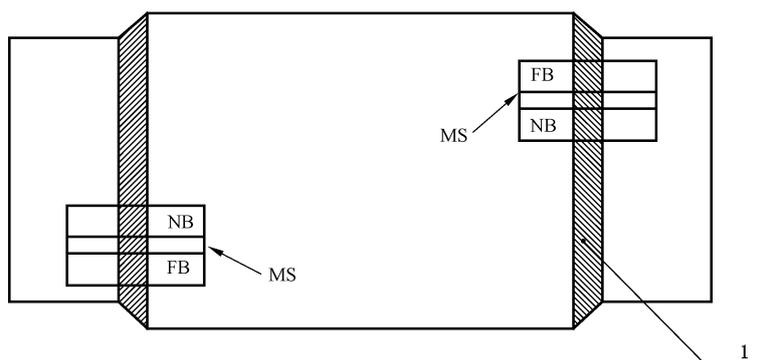
**D.4.4 焊接试板的取样和测试**

**D.4.4.1** 表 D.1 中给出了在役焊接工艺评定试样的类型和数量。若无足够材料制备试样,应制造多个焊接工艺评定试件。测试试样应按照相关标准进行加工。焊接工艺评定试件应按照 D.4.4.2 的规定取样。试样按照 D.4.4.3~D.4.4.6 的规定进行试验。

**表 D.1 在役焊接工艺评定所需试样的类型和数量**

壁厚 mm	焊接类型	试样 个				
		面弯	侧弯	缺口韧性	金相	硬度
≤12.7	角焊	4	—	4	2	2
	对接焊	4	—	4	2	2
	堆焊	4	—	—	2	2
>12.7	角焊	4	—	4	2	2
	对接焊	4	—	4	2	2
	堆焊	2	2	—	2	2

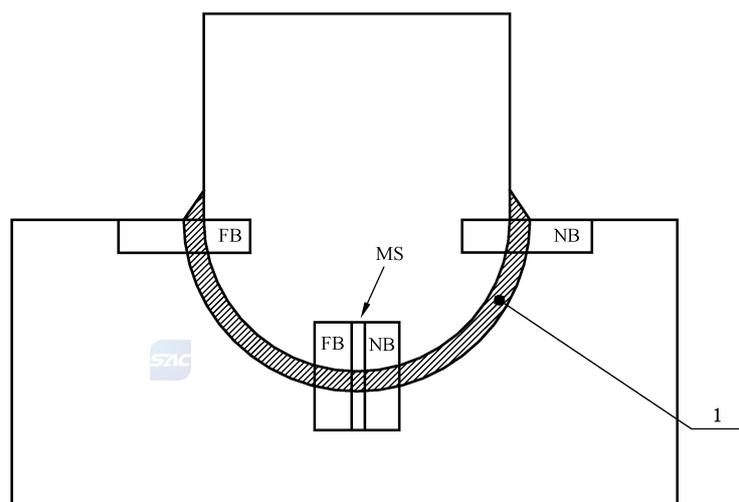
**D.4.4.2** 取样位置。角焊缝焊接应等间隔取样,如图 D.1 所示。对接焊缝的取样位置如图 D.2 所示。堆焊的取样位置如图 D.3 所示。



标引说明：

- 1 ——角焊缝；
- NB——冲击试样；
- FB ——面弯试样；
- MS ——金相试样。

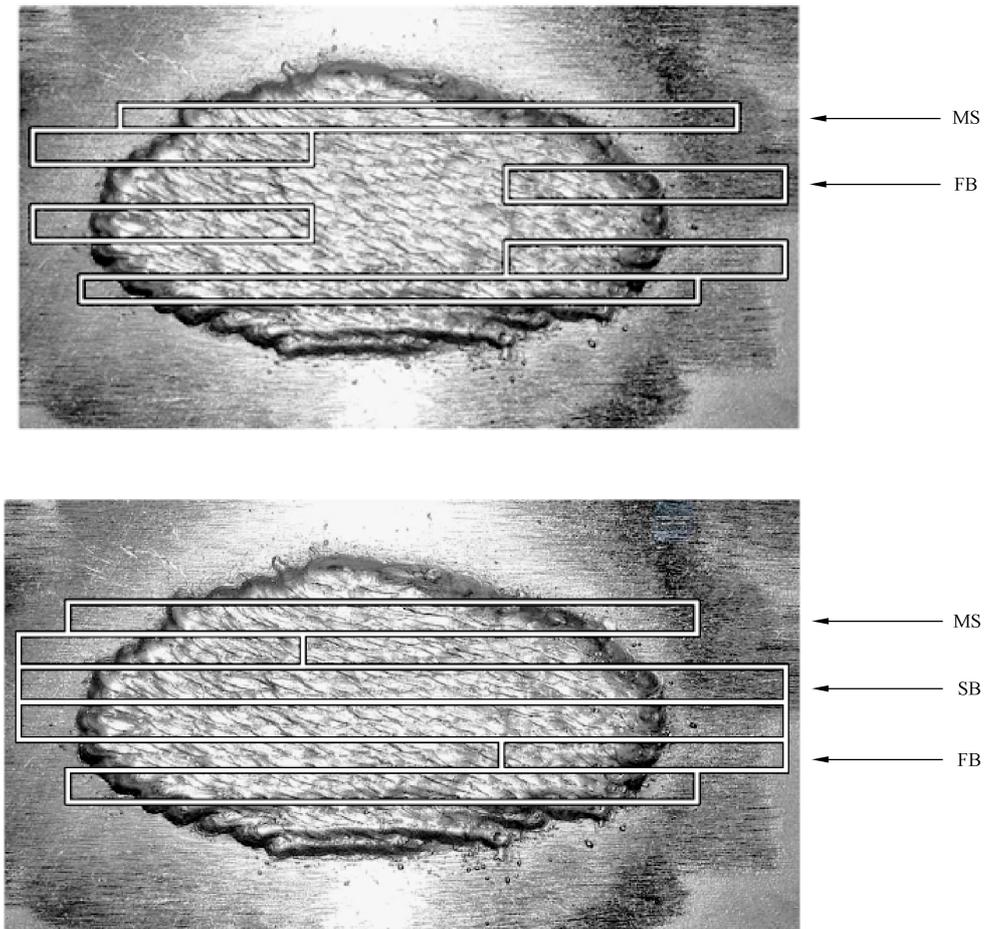
图 D.1 在役角焊工艺评定的取样位置图



标引说明：

- 1 ——对接焊缝；
- NB——冲击试样；
- FB ——面弯试样；
- MS ——金相试样。

图 D.2 在役对接焊缝取样位置(假定焊缝等间距可获得所有符合要求的试样)



标引说明：

SB —— 侧弯试样；

FB —— 面弯试样；

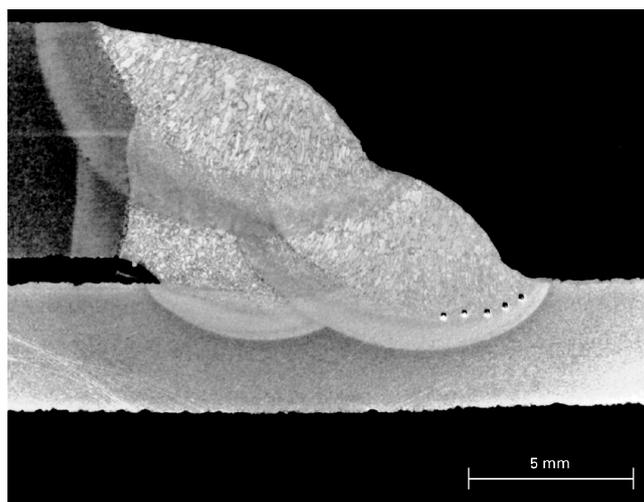
MS —— 金相试样。

图 D.3 在役堆焊工艺评定的取样位置

**D.4.4.3** 焊接接头截面目视检查。截面目视检查试样采用非热加工方法制备。目视检查应满足：

- a) 完全熔合；
- b) 没有裂纹；
- c) 咬边没有超过 0.8 mm 或试件壁厚的 10% 中的最小值；
- d) 对于角焊缝,焊脚长度不应小于焊接工业指导书规定的值。

**D.4.4.4** 硬度检测。在焊趾的粗晶热影响区进行至少 5 次 10 kg 负载维氏硬度检测,并记录数据,检测位置参照图 D.4。



注 1: 压痕与熔合线间隔 0.2 mm, 与另一边间隔 0.6 mm。初始压痕位于焊趾 0.6 mm 处。  
注 2: 该图未按比例绘制。

图 D.4 热影响区硬度测试位置

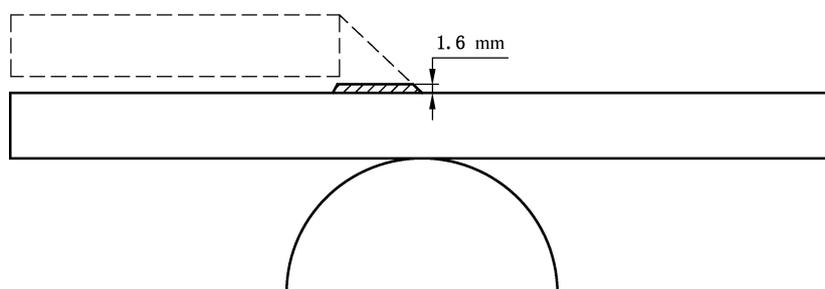
**D.4.4.5** 冲击试验。试样采用机加工方法制备,按照相关试验标准要求进行试验。断口的目视检查应满足:

- a) 完全熔合;
- b) 单个圆形缺陷的尺寸不超过 1.6 mm,并且所有圆形缺陷的面积和不超过断口面积的 2%;
- c) 夹渣深度不超过 0.8 mm,长度不超过 3.2 mm 或公称厚度的一半(取二者中的较小值)。相邻夹渣之间的距离不应小于 12.7 mm。

**D.4.4.6** 面弯或侧弯试验。试样使用机加工方法制备,按照相关试验标准要求进行试验。在导向弯曲试验装置或其他具有相同功能的设备上弯曲试样。试样的焊缝中心应对准弯心轴线,对典型在役角焊缝进行面弯曲试验时,弯心相对于焊趾的位置见图 D.5。弯曲试验前去除焊缝余高,角焊缝面弯试样的焊趾余高为 1.6 mm。弯曲试样应弯曲至近似 U 形。

弯曲试样的目视检查应满足:

- a) 焊缝或熔合线不存在裂纹,且不存在长度超过 3.2 mm 或公称壁厚一半(取二者中的较小值)的其他焊接缺陷;
- b) 除非存在明显的焊接缺陷,否则试样边缘产生的长度小于 6.4 mm 裂纹是可接受的。



注 1: 在测试之前,移除焊缝的虚线部分。  
注 2: 该图未按比例绘制。

图 D.5 在役角焊缝进行面弯试验时试样与弯心的相对位置

## D.5 无损检测

### D.5.1 检测方法

如果在役焊接是为了修复缺陷,采用之前发现缺陷的无损检测方法验证缺陷是否消除。

如果设备在高于环境温度下运行,则采用特殊检测方法,如高温磁粉检测或高温超声检测,可参照 GB/T 26610.2 选择适合的在线检测方法。

### D.5.2 检测时机

存在氢致开裂可能性时,在焊接完成后 24 h~72 h 对焊缝进行在线检测。



## 附 录 E

### (资料性)

### 现场热处理

#### E.1 概述

本附录适用于承压设备的现场焊后热处理操作以及其他热处理操作,如焊后消氢热处理。

#### E.2 设计

##### E.2.1 加热方法

现场热处理过程的加热方法包括内部或外部点火加热、电阻加热和感应加热。热处理可针对整个容器、整圈带板、局部点或片状区域进行。热处理的应力和稳定性评价结果取决于所采用的加热方法。局部加热通常会比大面积整圈加热产生更大的热应力,但从结构稳定来说优于大面积整圈加热。

外部点火加热方法是在容器外部用燃烧器点火加热,空气经过燃烧器加热后导入容器内部完成热处理。内部点火加热方法是在容器内部布置燃烧器点火加热,为热处理区域提供辐射和对流热量。在外部或内部点火加热时,热量绝缘隔板可用于隔离热处理区域。电阻加热方法是用电加热垫对热处理部位进行加热。感应加热方法是用电磁装置对热处理部位进行加热。每种加热方法都有特定的优缺点和安全注意事项。应制定热处理方案,选择适宜的现场热处理的加热方法。

可参照 GB/T 30583 设计局部热处理工艺程序。工艺程序文件内包含热处理温度控制系统、加热部位和温差梯度控制等内容。温度梯度、加热带宽度、保温层宽度、应力和稳定性评估可手动计算或使用线性、非线性有限元分析技术计算,在计算中可忽略残余应力。

##### E.2.2 热膨胀

**E.2.2.1** 所有经过热处理的部位都会产生热膨胀。热处理过程中材料的热膨胀一般不会导致容器损坏。碳钢和低合金钢在 650 °C 典型焊后热处理温度下的膨胀率估计为 8 mm/m,也可进行更详细的分析。

**E.2.2.2** 产生局部约束有多种原因。对容器上的某个部位而不是大面积整圈进行热处理时,由于保温区和相邻的低温区具有不同的热膨胀量将导致壳体产生热应力。对这种类型的热处理工艺的评估宜使用有限元分析软件进行计算。在评估计算过程中,保温区到未加热区的温度梯度数据是很重要的,评估时要设置相对保守的边界条件。封头如果与正在进行热处理的壳体距离较近也会产生局部约束。随着壳体由于热处理温度升高而膨胀,温度较低的封头限制了膨胀。应确定作业过程中会涉及局部约束的热处理工艺。

**E.2.2.3** 设备的附属设施对热膨胀部位的约束可能导致应力产生。为避免这种外部约束可暂时松动或拆卸相应附属设施。某些情况下可能会切割和重新焊接附属设施。加强圈、绝热材料支撑圈、鞍座等部位可能要补充加热,以缩小与热处理部位的温差。具体内容如下。

- a) 去除限制容器自由热膨胀的内外部结构部件,或者松开连接。内部结构部件包括容器内构件,如催化剂床层支撑系统、托盘、分配器、出口收集器、防冲板等。未能拆除的焊接内构件宜在热处理时进行单独加热和监控。外部结构部件包括梯子和平台。平台的评估包括容器的径向热膨胀量以及与相邻容器和其他结构的连接情况。检查相邻平台上的扶手和导轨,确认上述部件不会限制平台的相对运动。检查梯子是否仅在一个高度受到支撑,在其他高度可延伸。松动导轨上的螺母,以便梯子垂直移动。

- b) 支撑形式为鞍座的容器一般都有一个滑动端,允许容器在工作温度下沿轴向滑动。确定鞍座之间的热膨胀量并检查滑动槽的长度(应检查地脚螺栓相对于滑动端槽边缘的位置),确认鞍座具有足够的移动空间。检查底板和结构支撑板的腐蚀情况,确认其可相对移动。可将不锈钢薄板穿过地脚螺栓放置在底板和支撑板之间,减少滑动摩擦力。确认地脚螺栓上的螺母是否彻底拧松,以免阻碍移动。确认地脚螺栓上的螺母是否足够松动的一种方法是拧紧螺母直至其接触底板,然后再将螺母拧松半圈;另一种方法是提升一个鞍座并在鞍座和支撑板之间放置滚柱(实心杆或小直径管),滚柱放置在不会滚入地脚螺栓的位置。
- c) 裙座。在大多数情况下,裙座的长度足以使底板不会受到热处理温度的影响。如果裙座较短或热处理部位靠近裙座时,确认裙座可自由轴向运动。对地脚螺栓与槽或孔的间距、类似于鞍座滑动端的裙座底板和支撑板的轴向自由滑动进行评估。对于裙座式容器,其顶部的轴向热梯度是很关键的。如果裙座未隔热,则可能由于温度急速下降导致塑性变形。在设备底部封头下方增加一个隔热板或制作一个隔热舱来保持裙座的温度。在这种情况下,评估裙座的抗弯性能。
- d) 设备的支腿、吊耳或其他支撑结构不会限制热膨胀。
- e) 检查与容器相连的管道,并在适当情况下断开相互的连接,避免限制容器自由热膨胀。
- f) 仪表和电气系统的导管会沿着容器和相关的梯子、平台布线,可能会限制容器的自由热膨胀,如有必要应在接线盒、其他终端和支撑处松开紧固件。检查导轨位置是否有足够的滑动空间。检查导管内的布线是否具有足够的松弛度。分析导线绝缘皮可承受的温度,靠近热处理区域的导管可能温度较高会损坏导线绝缘皮,在外部加热或电阻加热时可将隔热垫放置在热处理区域和导管之间,使导管内导线不被损坏。  
注:感应加热方法不管容器和导管之间是否存在绝热物都可能将导管加热到足以使绝缘皮损坏的温度。
- g) 松开设备外部绝热层的保护皮和捆绑带。确定带有弹簧的连接装置有足够的扩展空间。对铆接或螺纹连接的保护皮应拆除铆钉或螺钉。不同类型的保温材料对热膨胀的限制是不同的,矿物棉等柔性保温材料比刚性保温材料(如硅酸钙)更耐用。

### E.2.3 材料

E.2.3.1 热处理可能会降低基材或焊材的性能,在设计文件或修理方案中确认热处理温度在材料允许范围内,并基于修理方案设定的热处理温度和时间对以下情况进行评估。

- a) 对已长期使用并存在与时间相关的劣化的材料是否能够进行热处理进行评估,如在临氢环境下长期运行的材料。
- b) 对多次热处理对某些材料性能产生的影响进行评估,如高强钢再次热处理的时间对材料性能的影响。
- c) 评估拟实施的热处理方法对抗蠕变铁素体钢的影响,是否会因热处理导致材料性能下降。

E.2.3.2 分析热处理和热膨胀对容器内堆焊和复合板衬里的影响,确定可能由热处理引起的敏化或其他劣化机制是否会影响到衬里。

E.2.3.3 热处理过程中耐火衬里可能因基材的热膨胀而剥落或开裂。壳体或封头与耐火材料之间不存在残留的工艺介质或冷凝液,应制定对保温区或温度梯度附近的耐火衬里进行更换的预案。

E.2.3.4 分析绝热材料在热处理过程中是否发生劣化。

E.2.3.5 在热处理温度下内外涂层会降解。作业过程中评估降解后的气体对作业人员健康的影响。预防涂层降解产生的烟雾影响视觉。

### E.2.4 结构

E.2.4.1 因热处理温度一般会超过设备的设计温度,评估在热处理温度下的结构稳定性,评估内容包

括壳体和支撑件的变形以及在热处理温度下材料性能的降低。在某些情况下,去除一些部件有益于容器热处理过程中结构的稳定性。

**E.2.4.2** 现场热处理过程中可能会要相邻结构和容器、起重机械,为热处理容器提供附加支撑。在采用外部支撑时,应注意以下内容。

- a) 可将索具固定到相邻结构或容器,或临时架设的结构上,为热处理容器提供支撑,但要对这种支撑的适用性进行评估。
- b) 确定在热处理过程中起重机的负载是否在其承受范围之内。如果容器的稳定性受到风载影响,不能采用起重机提供外部支撑。采用起重机支撑作业前,检查或检测吊耳或其他提升装置的焊缝,如果新装设吊耳或其他提升装置,其焊缝也进行检查和检测。

### **E.3 修理注意事项**

#### **E.3.1 修理单位**

修理单位应制定详细的热处理方案并经设备使用单位相关人员审批。

#### **E.3.2 测温仪表**

采用在有效的校准期内的测温仪表记录整个热处理过程中的金属温度。配备冗余传感器和记录装置准确控制热处理温度并保留过程记录。将测温仪表放置在附近不受热处理影响的位置。

#### **E.3.3 特别注意事项**

厚壁容器进行热处理时,宜在内、外部同时加热。

注:不适宜的加热方式可能会沿壁厚方向产生有害的温度梯度。

使用感应加热时,可能会加热诸如梯子、平台、管道等相邻附件。

#### **E.3.4 监控**

操作人员对热处理过程持续监控,并根据热处理温度变化及时调整加热功率。

#### **E.3.5 记录存档**

使用单位将热处理单位提供的热处理报告以及温度记录(图表)保存在设备档案中。热处理报告包括:

- a) 容器编号、热处理目标温度和允许偏差、加热速率、保温时间和冷却速率;
- b) 保温区,加热区和温度梯度控制区的尺寸、测温仪表的位置示意图和其他记录,示意图中测温仪表的位置可利用容器管口的相对位置、加热器的相对位置等特征部位来标注说明。

热处理报告应由修理单位热处理实施人员记录和签字确认。

### **E.4 检查和检测**

#### **E.4.1 容器**

热处理后,应对容器进行检查和检测。检查和检测项目包括目视检查、硬度检测和其他无损检测方法。目视检查的内容应包括:容器支撑是否完好,立式容器的铅垂度,衬里是否完好(如存在)。应对受热部位进行硬度检测,其数值应符合相关标准要求。应采用与材质相适应的无损检测方法检测容器是否存在裂纹或其他损伤。

#### **E.4.2 结构件**

热处理后,应检查内部和外部结构件是否有损坏,并检查确认所有热处理前断开部位均已恢复连

接。应注意重新连接内、外结构件时,不应限制容器在工作温度下的热膨胀。如梯子应在一个高度固定支撑,在其他高度可自由延伸;与其他容器或结构相连接的平台和扶手均应能够互不干扰地自由膨胀。

#### E.4.3 管道

检查在热处理前已断开连接的管道,并重新连接,如果是采用焊接连接接头,应按照相关的安装规范对此焊缝进行相应的无损检测。

#### E.4.4 仪表和电气设备

检查仪表和电气连接,确认导线连接良好;检查热处理前松开的导管是否重新连接以及盒盖是否关闭。

#### E.4.5 保温绝热

检查受热处理影响的保温绝热材料是否发生劣化。检查保护皮和保温捆绑带,确认其位置是否合理。填充支撑或接管周围的保温层缝隙,防止雨水渗入。

## 附录 F

(资料性)

## 铬钼钢制压力容器的焊接注意事项

## F.1 概述

本附录中的焊接注意事项适用于炼油厂、化工厂和电厂的铬钼钢制容器，相同材质的管道可参考使用。具体包含以下内容。

- 铬钼钢制容器在焊接修理时分析的因素见图 F.1。
- 将铬钼钢制容器的损伤机理和影响后续使用的各种因素作为制定修理方案参考。图 F.2 中列出铬钼钢材料在高温使用中易发生的损伤示例。
- 本附录不适用于发生蠕变的铬钼钢、抗蠕变铁素体钢、加钒钢或不锈钢堆焊层和衬里的修理。
- 回火脆化和其他时效效应对铬钼钢断裂韧性的影响参见 GB/T 30579。

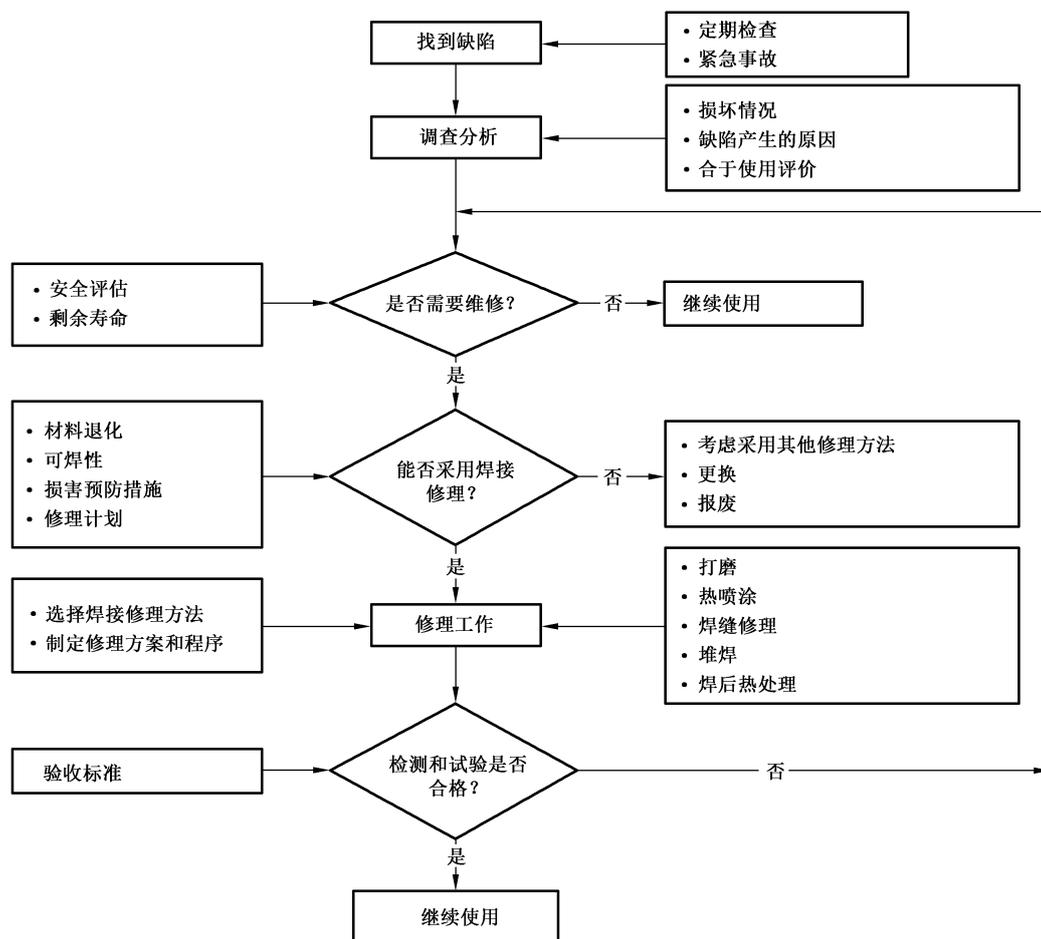


图 F.1 焊接修理的标准步骤

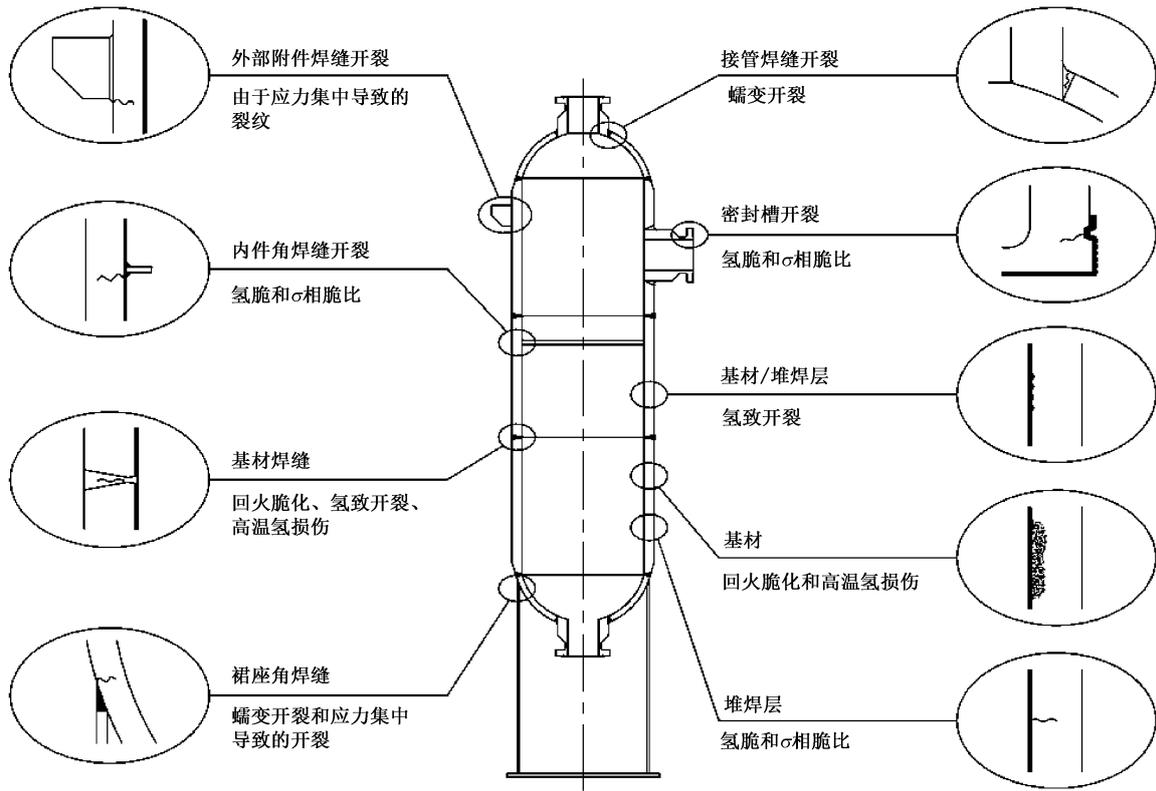


图 F.2 铬钼容器常见的损坏示例

铬钼钢材料的最高设计温度按照设计标准的要求确定。本附录适用的典型铬钼钢材料和部分国外材料,见表 F.1。

表 F.1 适用于本附录的铬钼钢

材料类型	钢板		锻件		容器、管道部件	
	ASME	GB	ASME	GB	ASME	GB
1Cr-1/2Mo	SA-387-12, Cl.1 和 Cl.2	15CrMoR	SA-182-F12 SA-336-F12	15CrMo	SA-335-P12	15CrMo
1 1/4Cr-1/2Mo	SA-387-11, Cl.1 和 Cl.2	14Cr1MoR	SA-182-F11 SA-336-F11	14Cr1Mo	SA-335-P11	—
2 1/4Cr-1Mo	SA-387-22, Cl.1 和 Cl.2 SA-542-B, Cl. 4	12Cr2Mo1R	SA-182-F22, Cl.1 和 Cl.3 SA-336-F22, Cl.1 和 Cl.3 SA-541-F22, Cl.3	12Cr2Mo1	SA-335-P22	12Cr2Mo1
3Cr-1Mo	SA-387-21, Cl.1 和 Cl.2	—	SA-182-F21 SA-336-F21, Cl. 1 和 Cl. 3	—	SA-335-P21	—
5Cr-1/2Mo	SA-387-5, Cl.1 和 Cl.2	—	SA-182-F5	—	SA-335-P5	—
9Cr-1Mo	—	—	SA-182-F9 SA-336-F9	—	SA-335-P9	—

## F.2 设计

### F.2.1 焊接修理的可行性评估

在确定失效原因并提供适当的焊接修理工艺程序的基础上,参照 GB/T 35013 对焊接修理的可行性进行评估,评估包括以下内容:

- a) 容器的结构完整性;
- b) 修理的可行性;
- c) 修理完成后容器对服役环境的适用性。

### F.2.2 在役性能退化

确定焊接修理工艺程序前,分析材料在服役期间的性能退化程度。

表 F.2 列出了材料性能退化的因素,GB/T 30579 中提供了材料性能退化的详细信息。

表 F.2 典型的材质劣化机理

损伤类型	发生条件	表现	典型材料
回火脆化	370 °C ~ 580 °C	用 J 因子测定了 21/4Cr 和高铬基材的沿晶显微偏析和焊缝金属及 1Cr 和 11/4Cr 基材和焊缝金属的 X 因子	1Cr-1/2Mo 1 1/4Cr-0.5Mo 2 1/4Cr-1Mo 3Cr-1Mo 5Cr-1Mo
蠕变	超过 454 °C 并有外加载荷	—	1Cr-1/2Mo 1 1/4Cr-1/2Mo
氢损伤	高温高压氢气环境	CH <sub>4</sub> 气泡, 裂纹	较高氢分压环境下的低铬合金
氢脆	高温高压氢气环境的开停车阶段	氢原子合并成氢分子降低韧性	1Cr-1/2Mo 1 1/4Cr-0.5Mo 2 1/4Cr-1Mo 3Cr-1Mo
热疲劳	运行期间温度波动幅度大, 或者开停车阶段	裂纹扩展	所有材料

### F.2.3 确定焊接修理方法

根据预期修理寿命和修理方法的适用性选择合理可靠的焊接修理方法。

焊接卡具修理、套筒焊接修理和贴板修理一般属于临时性修理方法,在下次停车检修时对修理部位进行更换。

表 F.3 列出了适用的修理方法及注意事项。

表 F.3 适用于铬钼钢容器的修理方法

修理方法	本文件中相关章节	其他因素
套筒焊接修理	5.5	宜采用 B 型套筒
堆焊和补焊修理	5.8	在因腐蚀造成金属损失的情况下,堆焊所采用的材料应根据腐蚀原因选择

表 F.3 适用于铬钼钢容器的修理方法（续）

修理方法	本文件中相关章节	其他因素
焊接挖补修理	5.1	补板的壁厚不宜大于壳体或封头壁厚
焊后热处理的替代方法	附录 C	—
焊前预热的替代方法	附录 B	—

### F.3 修理

#### F.3.1 焊接修理工艺程序

按图 F.1 所示过程制定焊接修理程序。

#### F.3.2 焊前准备

在使用手工电弧焊时,对焊条进行烘干以降低氢致开裂的可能性,保持焊接坡口干燥,无油污、油漆或其他污染物。

#### F.3.3 焊接条件

F.3.3.1 采用阶段焊接的方式以防止焊缝硬化,一次焊缝填充长度不应大于 50 mm。

F.3.3.2 防止局部加热温度梯度导致材料发生脆性断裂。

F.3.3.3 对于 2 1/4Cr-1Mo 及合金含量更高的钢制管道单面焊接修理时,采用适合的背面保护方法。

#### F.3.4 预热和焊后热处理

除 F.3.5~F.3.7 以外,应进行预热、消氢热处理和焊后热处理以防止焊缝硬化和冷裂纹,表 F.4 列出了典型材料的预热和焊缝层间控制温度。

表 F.4 典型材料的预热和层间温度

单位为摄氏度

典型材料	类别	最低预热温度	层间最大温度
1Cr-1/2Mo, 1 1/4Cr-1/2Mo	Fe-4	120	300
2 1/4 的 Cr-1Mo 钢	Fe-5A	150	300
	Fe-5C	177	300
3Cr-1Mo 钢	Fe-5C	150	300
5Cr-1/2Mo, 9Cr-1Mo	Fe-5B	200	300

#### F.3.5 脱脆热处理

当材料严重脆化时,使用脱脆处理来恢复材料的韧性,如表 F.5 所示。

表 F.5 铬钼钢的脱脆热处理

损伤类型	材料和服役环境	脱脆化热处理方法
氢腐蚀	所有 Cr-Mo 钢在高温高压氢气环境中	损伤不可逆,不适用
蠕变脆化	1Cr-1/2Mo, 1 1/4Cr-1/2Mo 超过 480 °C	损伤不可逆,不适用
回火脆化	2 1/4Cr-1Mo, 3Cr-1Mo 在 370 °C~580 °C	加热温度不低于 600 °C
氢脆	2 1/4Cr-1Mo, 3Cr-1Mo 在高温氢气下使用	消氢停机操作或加热处理温度不低于 300 °C

### F.3.6 消氢热处理

为了防止氢渗入,保持预热温度直至进行焊后热处理或消氢热处理。焊后消氢热处理温度高于 300 °C,保温 1 h 或者由使用单位与制造单位讨论确定。

### F.3.7 焊后热处理

焊后热处理注意以下内容。

- a) 附录 C 中的回火焊和其他焊接方法仅适用于部分低铬钢。

注: 由于在焊接过程中会产生高硬度的焊缝金属和热影响区,所以回火焊方法通常不适用于 2 1/4Cr-1Mo 和在临氢环境中服役的高铬钢。

- b) 修理方案中明确热电偶和保温设施如何布置,减少焊后热处理过程中产生的热应力。

## F.4 无损检测

选择适用的无损检测方法和工艺程序进行以下检测。

- a) 焊接修理前的无损检测:
- 1) 待焊接修理区域的表面和埋藏缺陷检测,不存在对焊接、热处理和耐压试验等修理工序(包括)有影响的缺陷;
  - 2) 待焊接修理区域及其相邻区域的壁厚测定。
- b) 焊后和耐压试验后的无损检测:
- 1) 对修理部位(包括焊接修理、预热或焊后热处理区域)外延 2 倍壁厚或 100 mm 的区域(选择二者中的较大区域),进行 100% 表面和埋藏缺陷检测;
  - 2) 耐压试验后,还应对 1) 中所述的区域实施表面和埋藏缺陷检测抽查。
- c) 声发射检测可用于修理后设备的无损检测。
- d) 必要时,应在运行期间对修理区域进行在线监测。
- e) 堆焊或不超过 1/2 实测壁厚的补焊,可使用无损检测代替耐压试验。

## F.5 试验

F.5.1 在评估焊后耐压试验的适用性的基础上进行耐压试验。

F.5.2 耐压试验时的介质温度高于材料无延性转变温度,且高于适用的设计标准和安装规范规定的耐压时间介质最低温度。

F.5.3 如果待修理承压部件在运行工况下发生材质劣化,劣化后的材料冲击韧性值和无延性转变温度点根据累积的材料数据库或取样测试获得。

F.5.4 分析容器是否可做到将受焊接影响的所有部位能量隔离后进行耐压试验。

## 附 录 G

(资料性)

## 热态拆卸和半数拆卸螺栓的方法

## G.1 概述

螺栓是指用于承压法兰螺栓连接的任何类型的螺纹紧固件的总体术语,如螺栓、螺柱、双头螺栓、螺钉等。在装置停工检修时,由于存在拆卸在法兰的连接螺栓较为困难的情况,可能会使检修项目中断或造成较大的经济损失,延长检修作业的持续时间。在此情况下可采用热态拆卸和半数拆卸螺栓的方法。

热态拆卸螺栓是在降低工作压力的情况下按照一定顺序拆卸和更换螺栓的一种方法。其以预定的交叉顺序一次拆卸和更换一个螺栓。将每个更换的螺栓完全上紧后再拆除下一个螺栓。停工前,采用热态拆卸螺栓方法能对螺栓进行清洁、润滑和重新安装,更换腐蚀或损坏的螺栓,或升级螺栓等级。

注:热态拆卸还可用于检查使用过一段时间的螺栓的残余应力,或重新拧紧松动的螺栓。这些操作不在本附录规定的范围内。

半数拆卸螺栓是在设备降压过程中,通常当系统接近大气压时,每隔一个螺栓拆卸一个(作业完毕后只剩下一半数量的螺栓)的方法。

## G.2 相关风险

虽然热态和半数拆卸螺栓方法可减少工厂的停工时间,但具有潜在的危险性,因此在计划和实施时谨慎操作。当进行热态螺栓拆卸作业时,由于剩余螺栓应力增加和垫片压缩松弛,可能导致法兰泄漏或垫片爆裂。当进行半数拆卸螺栓作业时,由于垫片压紧力减少以及系统可能存在的意外增压,导致介质泄漏的风险增加。进行半数螺栓拆卸时,系统压力应远低于设计压力,最好在大气压或接近大气压下,采用系统监控手段防止压力增加。

## G.3 设计

## G.3.1 工程设计和风险分析

在作业期间无不可接受的外部载荷和/或弯矩作用在法兰上时,对热态拆卸或半数拆卸螺栓进行工程和风险分析至少包括以下因素:

- a) 管道或设备的介质;
- b) 设计和操作的压力和温度;
- c) 可能存在的风险;
- d) 法兰接头的弯曲力矩;
- e) 管道支撑的位置和功能;
- f) 波纹管膨胀节的位置和类型;
- g) 法兰接头的维护历史;
- h) 使用热态拆卸或半数拆卸方法拆卸类似法兰螺栓的经验;
- i) 法兰连接件紧固力矩;
- j) 包覆垫片与非包覆垫片类型;  
注:内环缠绕垫片属于包覆型垫片。
- k) 双头螺栓与单头螺栓连接结构;
- l) 垫片材料和厚度;

- m) 法兰的状况；
- n) 螺栓的状况,包括螺栓强度是否足够,或有无过载；
- o) 螺母的状况。

### G.3.2 法兰螺栓的最小数量

结合法兰的设计标准、使用工况、法兰级别和拆卸辅助装置确定待拆卸法兰上的最小螺栓数量。

### G.3.3 确定热态拆卸和半数拆卸螺栓方法的最大允许压力值

热态拆卸和半数拆卸螺栓时的最大允许压力：

- a) 对于标准法兰,根据标准确定不同温度下的最大允许压力；
- b) 对于非标准法兰,根据适用标准或规范计算出最大允许压力；
- c) 确定法兰所承受的外部载荷和/或弯矩,及其对法兰承压能力的作用,将法兰的外部轴向载荷和外部弯矩保守地转换为等效压力,总的等效压力加上系统的设计压力即为风险分析中所使用的压力；
- d) 螺栓拆除时,各相关螺栓间垫片压紧力的减少量。

### G.3.4 热态拆卸螺栓时的最大操作压力

在热态拆卸螺栓作业之前,确认压力已经降低并且在拆卸作业期间有足够的控制措施确保在系统恢复到可安全操作的状态之前不再加压。当操作压力等于或小于最大允许压力值的 50% 时,进行热态拆卸螺栓操作。

### G.3.5 半数拆卸螺栓时的最大压力

在操作压力等于或小于最大允许压力值的 25% 或 0.34 MPa(以较低者为准),并且用低压蒸汽、空气或氮气(见 G.4.1.5)作为吹扫介质时,进行半数拆卸螺栓作业。

如果液体介质泄漏后造成的伤害比较低,则评估是否有必要吹扫后进行拆卸操作。

### G.3.6 螺纹孔内螺栓

对于螺纹孔内的螺栓,不应使用热态拆卸或半数拆卸螺栓的方法。

## G.4 拆卸过程

### G.4.1 准备

**G.4.1.1 人员防护和应急方案。**在有可能发生介质泄漏的情况下,应穿戴合适的防护设备,并评估是否紧急停工和启动应急预案。

**G.4.1.2 作业通道。**作业区域的通道应通畅,如果现场情况恶化,应提前布置作业人员所需的逃生路线。

**G.4.1.3 切断阀的位置和状况。**作业开始前,应确定最近的上、下游切断阀的位置和状况。操作人员应熟知隔离法兰的应急处置方案,在发生异常泄漏时,能够迅速切断设备或降低设备的工作压力。

**G.4.1.4 应急设施。**根据现场需求配备安全淋浴和眼浴等应急设施,并将应急设施的位置告知作业人员。

**G.4.1.5 窒息危害。**如果在密闭空间内使用氮气作为吹扫介质,万一发生泄漏,作业人员要采取相应的保护措施。

**G.4.1.6 法兰组件的检查。**对法兰组件进行检查,确定法兰及其螺栓的完整性。

- a) 螺栓和螺母的劣化,如颈缩(腐蚀变薄)、螺纹磨损或开裂。
- b) 垫片是否还能被压紧和垫片爆裂的可能性。
- c) 垫片的劣化,以及由于外因干扰或重新紧固造成垫片失效的可能性。
- d) 半数螺栓上紧之前,验证螺纹的啮合长度是否足够,如应用超声波检测方法测量螺柱长度。

**G.4.1.7** 现有螺栓负荷能力的评估。如果发现螺栓和螺母性能退化,评估螺栓拆卸过程的安全性和剩余螺栓负荷的增加程度。应分析法兰密封所需的最小载荷并评估螺栓强度。

#### **G.4.2 实施**

**G.4.2.1** 检查现有螺栓的紧固情况。为了预先获知是否存在螺栓松动,在拆下第一个螺栓之前,检查每个螺栓的紧固情况。可用手动扳手或液压扭矩扳手施加扭矩来检查螺栓的紧固性,不能使用锤击(敲击)扳手。

**G.4.2.2** 螺栓更换顺序。热态拆卸螺栓时,采用十字交叉法一次更换一条螺栓,并及时测量法兰面间隙检查对中情况。在开始拆卸螺栓之前,在法兰上将拧紧顺序的编号标记在易于发现的位置。

**G.4.2.3** 关于运行和停机前的注意事项。对 G.4.2.4~G.4.2.7 中所述的操作进行风险分析(见 G.3.1)。

**G.4.2.4** 表面的清洁和润滑。当螺栓和螺母被拆除时,与螺母接触的法兰表面用钢丝刷或电动刷进行清洁(如有必要,应去除斑点和突出物)。但背面的螺母和法兰之间的结合面(扭矩扳手的另一侧)除外,这有利于结合表面之间产生摩擦。使用适用的润滑剂对螺栓组件的摩擦面进行适当润滑,包括螺纹和螺母的所有结合部,但螺母和接头后部法兰之间的表面(扭矩扳手法兰的另一侧)除外,这有利于螺母与法兰表面产生摩擦。

**G.4.2.5** 手动拧紧和螺栓基准长度值。用手拧紧螺栓和螺母时,螺栓和螺母的标记端应朝外,并位于接头的同一侧以便于检查。如果要使用超声测距伸长控制,记录初始的螺栓长度读数。

**G.4.2.6** 第一次紧固。安装新的螺栓和螺母之前,检查确定螺母是否可手动自由拧紧。如果螺母不能手动拧紧,检查原因并进行必要的修理或更换。安装每个新螺栓时,使用目标扭矩值拧紧螺栓。按适当的顺序对每个螺栓继续此过程。如果要使用超声测距伸长控制,在更换前 8 个螺栓后读取读数,必要时调整扭矩值。如果调整后的扭矩值远远高于前 8 个螺栓的扭矩值,则使用新的扭矩值重新拧紧这些螺栓。

热膨胀差可能导致热法兰冷却过程中螺栓负载损失,在热态装配预紧时应分析此影响因素。此外,在最终拧紧之前,应确认允许更换的螺栓达到其工作温度。

**G.4.2.7** 最终紧固。每拧紧一遍螺栓后,用游标卡尺测量配对法兰面的间隙,以验证配对法兰的安装间隙是否均匀一致。

按照适当的顺序将所有螺栓扭转至目标扭矩值后,根据是否使用超声测距伸长控制,决定是否采取以下措施。

- a) 再次使用相同的扭矩值,按照首次紧固顺序,进行一次或多次拧紧。
- b) 如有必要,读取超声测距读数并调整扭矩值。如果扭矩值因超声测距发生变化,则按照适当的顺序在最终扭矩值处重新拧紧两次,然后以旋转顺序至少拧紧一次,直到螺母无法在目标扭矩下转动。如果不必更改目标扭矩值,按 a) 执行。

**G.4.2.8** 切割螺栓。在工程和风险分析允许的情况下,冷切割卡住的螺栓和使用螺母分离器。对于含有易燃易爆、有毒有害介质的管线,应评估切割螺栓的可行性。

## 附 录 H

### (资料性)

### 管壳式换热器的检修

#### H.1 概述

本附录适用于管壳式换热器的管束、管板和其他承压部件的修理和检测。

本附录不适用于设计压力在 70 MPa 以上的管壳式换热器。

#### H.2 设计

##### H.2.1 一般要求

**H.2.1.1** 设计文件中确定更换部件的工况条件,提出更换部件的材料和机械性能要求。当新更换部件和原部件相比有变化,应重新进行设计计算。

**H.2.1.2** 新更换部件的厚度一般不小于原部件厚度,当新更换部件厚度小于原部件时,应经设计计算确认后方可更换。

**H.2.1.3** 选择换热管的修理方法时,分析由于换热面积的减少对换热效率的影响。

**H.2.1.4** 根据以下内容制定换热管的检修计划。

- a) 确定换热管可接受的壁厚损失量的数据:
  - 1) 当前操作条件下的持续运行时间;
  - 2) 下一次计划检修时间;
  - 3) 换热器使用工况(工作压力和工作温度边界值);
  - 4) 换热管已存在的损伤机理和腐蚀速率;
  - 5) 历史失效率,以及失效率是否一直上升;
  - 6) 材质升级的可能性;
  - 7) 换热管失效的潜在后果;
  - 8) 换热管是否可检;
  - 9) 换热管检测工作的范围;
  - 10) 检测方法的准确性和有效性。
- b) 对装置运行或过程安全非常重要的换热器:
  - 1) 若检测发现壁厚减薄量超过 40% 的换热管,应更换整个管束;
  - 2) 若检测发现壁厚减薄量在 20%~40% 的换热管,宜更换整个管束或更换单根管子。
- c) 一般的换热器:
  - 1) 对检测发现壁厚减薄量超过 40% 的换热管堵管处理,堵管后管束应满足工艺换热要求,根据堵管情况确定下一个周期是否整体更换管束;
  - 2) 检测发现壁厚减薄量在 20%~40% 的换热管可不处理,下一次检修跟踪检测。

##### H.2.2 换热管

**H.2.2.1** 换热管按照 H.5 要求的方法和比例进行检测,并根据检测数据确定是否修理,修理方法包括:焊接堵头堵管、机械堵头堵管或摩擦配合堵头堵管,更换部分管子,更换整个管束。

**H.2.2.2** 换热器(特别是对装置运行或过程安全非常重要的换热器)如果采用堵管的修理方法,应分析由于换热面积的减少对换热器效率和其他性能的影响。

**H.2.2.3** 内衬管可安装在换热管内保护损坏区域或修复已减薄的换热管,一般不用于保护管端。

**H.2.2.4** 套管可安装在换热管管口,用于防止管口腐蚀。

**H.2.2.5** 内衬管和套管的使用应分析以下因素:

- a) 内衬管或套管与换热管之间的接触均匀性,见 H.3.3 和 H.3.4;
- b) 内衬管或套管与换热管之间可能发生的缝隙腐蚀;
- c) 管束膨胀的可能性;
- d) 由内衬管或套管引起的附加压降;
- e) 内衬管或套管可能导致管束内的介质流量减少;
- f) 内衬管或套管导致的附加传热阻力;
- g) 内衬管或套管与换热管之间的径向和轴向热膨胀差。

**H.2.2.6** 管束的内构件按照 H.5 进行检测,并根据检测数据判断是否修理。如果确定管束失效是由于内构件损坏造成的,建议更改内构件的设计并更换内构件。更改内构件设计的注意事项应包括以下内容。

- a) 支撑板的腐蚀裕量为壳程的 2 倍,若无腐蚀,可将其腐蚀裕量定为 3 mm。
- b) 使用合金支撑板或折流板代替较厚的碳钢板,但较硬材质的支撑板或折流板可能会对管子造成更大损伤。分析异种钢焊接处热膨胀差异的影响。
- c) 若确定管子的潜在振动会导致管子和/或支撑板损坏,则评估和调整二者间距。
- d) 管束拉筋的安装要从壳程侧穿入,不必拆卸管束。一般情况下,拉筋安装要求管束是圆形且间隔均匀,因此对于 U 形弯管部位的拉筋安装应进行专项设计。

当管束材料变更或流速增加要增加支撑但又无法增加的情况下,可安装拉筋来增强管束支撑,如劣化或损坏的支撑板提供额外的支撑,在分段的折流板之间加固支撑,或进口管的加强支撑。评估拉筋的使用对壳程压降和流量变化的影响,管束材质和拉筋材质的相容性,热膨胀差的影响等。

**H.2.2.7** 如果要防止冲刷腐蚀,可在冲刷路径设置防冲板,并分析设置防冲板后介质流向发生改变后对管束或壳体的影响。

### H.2.3 管板

**H.2.3.1** 新更换的管板材料的许用应力不小于原管板。

**H.2.3.2** 若要更换更大直径的换热管,确定管板的孔桥减弱系数是否在相关标准规定范围内。

**H.2.3.3** 按照 H.5 的要求进行检测,并根据检测数据判断管板是否修理。修理过程应符合以下要求。

- a) 立式换热器壳程侧的管板开裂(未穿透)较为常见。在管板上安装排气管和排液管使介质无法滞留。将排气管焊接在管板边缘,排气管直径一般为 19 mm,管板开孔直径一般为 16 mm,具体结构由设计文件确定。在排气管上安装合适的阀门。
- b) 高压管束内的介质在管束与管板的连接处泄漏,会导致堆焊层撕裂剥离。
- c) 管板孔桥上发生开裂时进行失效分析,确定失效原因。根据失效原因和孔桥开裂的程度确定管板的修理方法。
- d) 管板背面(壳程侧)会发生腐蚀,当金属损失量大于腐蚀裕量时,进行安全评定或更换管板。
- e) 管板正面(管程侧)会发生腐蚀,当金属损失量大于腐蚀裕量时,进行安全评定或更换管板,也可通过堆焊来恢复管板壁厚。采用堆焊恢复管板壁厚时应确定:
  - 1) 管板最小孔桥宽度;
  - 2) 换热管与管板的焊接、强度和密封性的要求,以及从管板正面缩进的要求。

### H.2.4 换热管和管板的接头

根据检测数据判断换热管和管板接头是否修理。换热管和管板接头的修理方法包括以下内容。

- a) 更换损坏的换热管,见 H.3.6。
- b) 堵管,见 H.3.2。
- c) 抽管并堆焊管孔,随后将管孔重新加工到原始直径。管板接头的设计按照原设计标准,或 GB/T 151 的规定。注意避免损坏相邻的管子。
- d) 密封焊或强度焊。如果在原焊接部位施焊,焊接接头的设计按照原设计标准或 GB/T 151 的规定进行。施焊前清除焊接接头上的介质残留物等杂质。
- e) 换热器类型对管板接头承载性能的影响。如由于热膨胀系数不同,固定管板换热器可承受的载荷比 U 形管换热器要高。

### H.2.5 壳程筒体和管板的异种钢焊缝

壳程筒体和管板的材质不相同,计算壳程筒体和管板之间的热应力。对于异种钢焊接产生的裂纹,常见的解决方案是将壳程筒体材料更换为与管板材料相匹配的材料。可更换整个壳程筒体,或者更换与管板相接的筒节。由于壳程热膨胀或强度的改变,更换筒体或筒节应重新进行设计计算。

### H.2.6 其他要求

H.2.6.1 更换符合相关的设计标准的壳程、管程或其他受压元件的其他要求见 H.2.1。

H.2.6.2 非受压元件的更换符合原标准要求。

H.2.6.3 其他有关折流板的要求参照原设计标准或 GB/T 151 的规定。

## H.3 修理

### H.3.1 一般要求

H.3.1.1 多台换热器并联使用时,切出单台换热器检修会导致其他换热器的流量增加,进而增加腐蚀损坏、管束振动或其他机械损伤发生的可能性。

H.3.1.2 在对管子进行检测和修理前,采用高压水、化学溶液或喷砂除垢等方法对管子进行清洗。根据污垢的性质、换热管材料及其耐受性选择清洁方法,各清洁方法的注意事项如下。

- a) 高压水清洗压力通常为 70 MPa。部分情况可能要使用高达 275 MPa 超高压水喷射清洗。管束除垢还要分析水的流速和喷嘴结构等对换热管的影响。
- b) 化学溶液清洗作业对换热管或换热器壳体不会产生不利影响。如严禁使用苛性碱溶液清洗 300 系列不锈钢材质的换热管。
- c) 喷砂除垢时,不会对管子造成损坏。清洗内构件有紊流换热作用的换热管时,应不降低换热器换热能力。

H.3.1.3 在清洗过程中或清洗过程完成后可使用内窥镜检查管子的清洗效果。

H.3.1.4 抽芯时,不应损坏管束或其他部件。

H.3.1.5 换热管发生泄漏后将泄漏管子抽出,并进行失效分析。

### H.3.2 堵管修理

可采用焊接或机械方法进行堵管处理,典型的摩擦配合锥形堵头见图 H.1,典型的机械堵头见图 H.2。

- a) 堵塞的换热管开孔排放管内的气体或液体。具体操作时,立式换热管在换热管的上下两端开孔,卧式换热器则在换热管的顶部和底部开孔。堵管开孔是防止堵头部位发生爆裂,并且可验证堵头的完整性。如果在管程侧和壳程侧之间温差较大宜将堵管切割成两部分。
- b) 采用摩擦配合锥形堵头堵管的,同时满足以下条件。

- 1) 壳程工作压力不大于 1.5 MPa。
  - 2) 壳程工作温度不大于 205 ℃。
  - 3) 检查胀接部分管子是否减薄,确认堵头的安装是否会损坏管子,导致换热管与管板的接头发生密封失效。
  - 4) 已安装锥形堵头的换热管上如果没有穿孔,可能会有严重的安全隐患。如果无法穿孔,将管子拉出或采取其他措施,如先将换热管中的液体排放干净后再进行堵管,并将堵头焊接到管板上。
- c) 摩擦配合锥形堵头不适用的情况下,使用机械堵头。机械堵头通常由气压或液压系统安装。在更高的压力下可使用其他类型的堵头。使用机械堵头注意以下情况:
- 1) 换热管内表面的严重腐蚀或开裂;
  - 2) 换热管和堵头的材质;
  - 3) 在严重腐蚀性环境中的安装;
  - 4) 换热管与管板机械胀接的情况。
- d) 绘制堵管图,记录堵管的数量和位置。绘制换热管失效数量、累积失效数量与时间的关系图。当换热管失效数量急剧增加时,更换管束。
- e) 跟踪记录因堵管造成的压降。有些类型的换热器当管程压降达到一定程度时,换热器便无法正常工作。如果不进行换热器修理,就打开旁路防止折流板发生失效,旁路应设计合理。



图 H.1 典型的摩擦配合锥形堵头



图 H.2 典型的机械堵头

### H.3.3 内衬管修理

H.3.3.1 对曾经堵管处理的换热管进行修复时,在可定位或保守判断穿孔位置的情况下,增加内衬管要优于更换换热管。

H.3.3.2 安装内衬管时,先通球推过内衬管使其切合在管子内壁,焊接内衬管端部,内衬管滚柱贴胀,爆炸贴胀和液压贴胀。分析换热管鼓胀的可能性,如发生鼓胀,会加大修复难度。焊接或贴胀宜进行模拟试验。

H.3.3.3 绘图记录内部有内衬管的换热管数量和位置。统计内衬管数量,累积内衬管的数量与服役时间的关系。当换热管失效数量急剧上升时,整体更换管束。

### H.3.4 套管修理

套管通过末端折边固定,端部采用胀接或焊接的方法与换热管内壁紧密贴合。也可采用滚柱贴胀或液压贴胀的方法使套管与管子贴合均匀。评估换热管鼓胀的可能性,如果换热管发生鼓胀,会加大修复难度。焊接或贴胀宜进行模拟试验。

### H.3.5 抽管修理

对管子进行失效分析或无法堵管时,从换热器中抽出发生失效的换热管并按照 H.3.2 封堵管板上的管孔。

抽管后,如果不更换新的管子,分析折流板可能发生的潜在损坏。

### H.3.6 更换修理

更换修理包括:

- a) 更换单根换热管,可能包括更换区域的管板修理;
- b) 更换整个管束。

### H.3.7 管板修理

#### H.3.7.1 裂纹的修理

H.3.7.1.1 按照 H.3.3 的方法修理未穿透管板且不在孔桥中的裂纹。

H.3.7.1.2 若不在孔桥部位的裂纹已经穿透管板,将裂纹打磨消除,然后将凹坑加工成 U 形或 V 形焊接坡口,补焊修复。

H.3.7.1.3 管板孔桥部位的裂纹修复可按照 H.3.7.1.1 和 H.3.7.1.2 进行。也可依据 GB/T 30579 和 GB/T 35013 的规定或其设计标准对管板受损部位进行分析,确定是否可带缺陷运行。

H.3.7.1.4 在拆除修理区域的换热管和对管子和管板接头进行修理时,不对修复区域换热管产生不良影响。

#### H.3.7.2 补焊和机械加工修理

对管板局部减薄部位进行补焊,然后按要求打磨补焊表面。

### H.3.8 管子和管板接头的修理

#### H.3.8.1 重新胀接

H.3.8.1.1 修理前,对接头部位进行清洁和检验,见 H.3.1。

H.3.8.1.2 如果只是渗漏,接头表面没有发生明显损坏,可采用滚珠贴胀的方法重新胀接达到制造标准

要求。

H.3.8.1.3 重新胀接前,确认管子内表面是否存在因腐蚀造成的壁厚减薄;根据现场检测数据、管子特性和管板孔桥的状况计算管子最大允许内径。

H.3.8.1.4 其他按照 GB/T 151 的规定执行。

### H.3.8.2 管孔的补焊修理和加工

H.3.8.2.1 当更换管子且管孔已经损坏时,可采用补焊和机械加工方法对管孔进行修复。

H.3.8.2.2 采用原标准对直径和焊接坡口的规定加工管孔。

### H.3.8.3 密封焊或强度焊

H.3.8.3.1 管子和管板的机械连接接头如果强度不足,改为强度焊。

H.3.8.3.2 采用符合适用的制造规范的密封焊或强度焊工艺流程。

### H.3.9 容器部件的修理

对换热器壳体的修理按原制造标准进行。

## H.4 无损检测

### H.4.1 换热管的检测

检测换热管时,采用以下无损检测技术。

- a) 涡流检测(ET)通常用来检测非铁磁性管子或弱磁性管子,在检测 U 形管束的 U 形弯曲部分时,检测灵敏度较直管有所降低。
- b) 远场涡流(RFET)通常用于检测铁磁性管子,灵敏度和准确度较低,但比超声波方法快捷。
- c) 局部磁饱和涡流(PSET)可定位和测量铁磁性管子中的裂纹,对外表面缺陷不敏感。
- d) 漏磁检测(MFL)可用来检测铁磁性管子。对于碳钢管子,这种方法的检测灵敏度较低,可用于确定管子的整体状况,无法确定单个缺陷位置。
- e) 管壁厚度超声检测系统可用于确定小型换热器的损伤部位,或用于验证其他检测方法有效性。超声波检测系统特别适用于碳钢管:一种是内部旋转超声波检测(IRIS)系统,IRIS 是一种精确的无损检测方法,用于检测和测量管子内表面和外表面金属损失;另一种是横波内旋超声检测系统(SWIRIS),可有效地检测内表面和外表面裂纹。以上两种方法都要对管子内部进行清洗。
- f) 可使用射线检测或内窥镜检查 U 形管束的 U 形弯部分。
- g) 作为预测性维护和更换计划的一部分,对管子状况进行监测和损坏趋势分析。
- h) 检修期间,每个换热器中换热管的最小检测数量如下:

5%
----

当换热管总数小于 500 个时,检测 50 个换热管或总管数的 25%(以较大者为准);  
当换热管总数等于或大于 500 个,且小于 750 个时,检测换热管总数的 20%;  
当换热管总数等于或大于 750 个,且小于 1 000 个时,检测换热管总数的 15%;  
当换热管总数等于或大于 1 000 个时,检测换热管总数的 10%。  
若 10%被检查的换热管存在失效,应扩检 10%数量的换热管。
- i) 管束重点检测部位:临近入口管的前三排和临近出口管的最后两排;在管束外周每隔两根管子抽检一根换热管,对于多管程换热器,对每个管程外周按此比例抽检;管束内圈管子的抽查;经常发生损伤的换热管部位;未曾检测过的部位。

#### H.4.2 管和管板连接修理的检测

采用以下一种或多种方法对换热管与管板的修理部位进行检测：

- a) 符合适用的制造标准的渗透检测；
- b) 根据 NB/T 47013.7 进行目视检查。

#### H.4.3 管板修理的检测

管板修理的检测：

- a) 对焊接过程进行目视检查；
- b) 在焊接修理完成后进行渗透检测；
- c) 修理期间对可能会在管板上产生新的缺陷进行超声检测。

#### H.4.4 受压元件的检测

受压元件的检测要求如下。

- a) 对所有焊接修理部位进行目视检查和渗透检测或磁粉检测，特别是对系统安全至关重要的换热器。
- b) 如果可行，在焊接修理部位进行射线检测或超声检测。

#### H.4.5 其他部件的检测

在检修过程中对管束的支撑板等内构件进行目视检查，对目视检查发现的可疑部位进行有针对性检测，如对目视检查发现有腐蚀产物堆积的部位进行测厚，疑似开裂的部位进行表面无损检测等。

#### H.5 试验

完成检测后，按照原设计文件和修理方案进行耐压或泄漏试验。换热管与管板的接头修理后，进行壳程的耐压和泄漏试验。



参 考 文 献

- [1] GB/T 151 热交换器
  - [2] GB/T 26610.2 承压设备系统基本风险的检验实施导则 第2部分:基于风险的检验策略
  - [3] GB/T 30579 承压设备损伤模式识别
  - [4] GB/T 30583 承压设备焊后热处理规程
  - [5] GB/T 35013 承压设备合于使用评价
  - [6] 特种设备目录(质检总局 2014 年第 114 号公告)
-