



中华人民共和国国家标准

GB/T 4732.1—2024

压力容器分析设计 第1部分：通用要求

Pressure vessels design by analysis—
Part 1: General requirements

2024-07-24 发布

2024-07-24 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
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义、符号	2
4 失效模式	9
5 基本要求	9
附录 A（规范性） 风险评估报告	17
参考文献	18



前 言

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

本文件是 GB/T 4732《压力容器分析设计》的第 1 部分。GB/T 4732 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：通用要求；
- 第 2 部分：材料；
- 第 3 部分：公式法；
- 第 4 部分：应力分类方法；
- 第 5 部分：弹塑性分析方法；
- 第 6 部分：制造、检验和验收。

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、中国机械工业集团有限公司、浙江大学、江苏省特种设备安全监督检验研究院、甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司、清华大学、大连金州重型机器集团有限公司、中国石化工程建设有限公司、中国天辰工程有限公司。

本文件主要起草人：杨国义、陈学东、徐锋、郑津洋、李军、缪春生、张延丰、陆明万、刘静、陈志伟、段瑞、曲建平。

引 言

GB/T 4732《压力容器分析设计》给出了压力容器按分析设计方法进行建造的要求,GB/T 150 基于规则设计理念提出了压力容器建造的要求。压力容器设计制造单位可依据设计具体条件选择两种建造标准之一实现压力容器的建造。

GB/T 4732 由 6 个部分构成。

- 第 1 部分:通用要求。目的在于给出按分析设计建造的压力容器的通用要求,包括相关管理要求、通用的术语和定义以及 GB/T 4732 其他部分共用的基础要求等。
- 第 2 部分:材料。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中的钢制材料相关要求及材料性能数据等。
- 第 3 部分:公式法。目的在于给出按分析设计建造的压力容器的典型受压元件及结构设计要求。具体给出了常用容器部件按公式法设计的厚度计算公式。GB/T 4732.3 可作为 GB/T 4732.4、GB/T 4732.5 的设计基础,也可依据 GB/T 4732.3 自行完成简化的、完整的分析设计。
- 第 4 部分:应力分类方法。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中采用应力分类法进行设计的相关规定。
- 第 5 部分:弹塑性分析方法。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中采用弹塑性分析方法进行设计的相关规定。
- 第 6 部分:制造、检验和验收。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中所涵盖结构形式容器的制造、检验和验收要求。

GB/T 4732 包括了基于分析设计方法的压力容器建造过程(即指材料、设计、制造、检验、试验和验收工作)中需要遵循的技术要求、特殊禁用规定。由于 GB/T 4732 没有必要,也不可能囊括适用范围内压力容器建造中的所有技术细节,因此,在满足安全技术规范所规定的基本安全要求的前提下,不限制 GB/T 4732 中没有特别提及的技术内容。GB/T 4732 不能作为具体压力容器建造的技术手册,也不能替代培训、工程经验和工程评价。工程评价是指由知识渊博、娴于规范应用的技术人员所作出针对具体产品的技术评价。工程评价需要符合 GB/T 4732 的相关技术要求。

GB/T 4732 不限制实际工程建造中采用其他先进的技术方法,但工程技术人员采用先进的技术方法时需要作出可靠的判断,确保其满足 GB/T 4732 的规定。

GB/T 4732 既不要求也不限制设计人员使用计算机程序实现压力容器的分析设计,但采用计算机程序进行分析设计时,除需要满足 GB/T 4732 的要求外,还要确认:

- 所采用程序中技术假定的合理性;
- 所采用程序对设计内容的适用性;
- 所采用程序输入参数及输出结果用于工程设计的正确性。

进行应力分析设计计算时可以选择或不选择以 GB/T 4732.3 作为设计基础,进而采用 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 进行具体设计计算以确定满足设计计算要求中防止结构失效所要求的元件厚度或局部结构尺寸。当独立采用 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 作为设计基础时,无需相互满足。

压力容器分析设计

第 1 部分:通用要求

1 范围

1.1 GB/T 4732 规定了采用分析设计方法设计的钢制压力容器(以下简称“容器”)的建造要求,提供了以弹性应力分析或弹塑性应力分析为基础,基于失效模式的设计方法。本文件规定了采用分析设计方法设计的容器材料、设计、制造、检验和验收的通用要求。

1.2 GB/T 4732 适用的设计压力:

- a) 大于或等于 0.1 MPa 且小于 100 MPa 的容器;
- b) 真空度高于或等于 0.02 MPa 的容器。

1.3 GB/T 4732 适用的设计温度范围按各部分适用的温度范围确定。

1.4 下列容器不在 GB/T 4732 的适用范围内:

- a) 设计压力小于 0.1 MPa 且真空度低于 0.02 MPa 的容器;
- b) 旋转或往复运动机械设备中自成整体或作为部件的受压器室(如:泵壳、压缩机外壳、涡轮机外壳、液压缸等);
- c) 核能装置中存在中子辐射损伤失效风险的容器;
- d) 直接火焰加热的容器;
- e) 内直径(对非圆形截面,指截面内边界的最大几何尺寸。如:矩形为对角线,椭圆形为长轴)小于 150 mm 的容器。

1.5 容器结构界定范围

1.5.1 容器与外部管道连接:

- a) 焊接连接的第一道环向接头坡口端面;
- b) 螺纹连接的第一个螺纹接头端面;
- c) 法兰连接的第一个法兰密封面;
- d) 专用连接件或管件连接的第一个密封面。

1.5.2 接管、人孔、手孔等的承压封头、平盖及其紧固件。

1.5.3 非受压元件与受压元件的连接焊缝。

1.5.4 直接连接在容器上的非受压元件,如支座、裙座等。

1.5.5 容器的超压泄放装置(见 GB/T 150.1)。

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 150.1 压力容器 第 1 部分:通用要求

GB/T 151 热交换器

GB/T 4732.2 压力容器分析设计 第 2 部分:材料

GB/T 4732.3 压力容器分析设计 第 3 部分:公式法

- GB/T 4732.4 压力容器分析设计 第4部分:应力分类方法
GB/T 4732.5 压力容器分析设计 第5部分:弹塑性分析方法
GB/T 4732.6 压力容器分析设计 第6部分:制造、检验和验收
GB/T 12337 钢制球形储罐
GB/T 26929 压力容器术语
JB/T 4756 镍及镍合金制压力容器
NB/T 47041 塔式容器
NB/T 47042 卧式容器
TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程
TSG R0005 移动式压力容器安全技术监察规程

3 术语和定义、符号

3.1 术语和定义

GB/T 26929 和 GB/T 150.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

压力 **pressure**

垂直作用在容器单位表面积上的力。

注:除注明外,压力均指表压力。

3.1.2

工作压力 **operating pressure**

在正常工作情况下,容器顶部可能达到的最高压力。

3.1.3

设计压力 **design pressure**

设定的容器顶部的最高压力。

注:设计压力与相应的设计温度一起作为容器的基本设计载荷条件,其值不低于工作压力。

3.1.4

计算压力 **calculation pressure**

在相应设计温度下,用以确定元件厚度的压力。

注:计算压力包括液柱静压力等附加载荷。

3.1.5

试验压力 **test pressure**

进行耐压试验或泄漏试验时,容器顶部的压力。

3.1.6

最高允许工作压力 **maximum allowable working pressure; MAWP**

在指定的相应温度下,容器顶部所允许承受的最大压力。

注:该压力是根据容器各受压元件的有效厚度,考虑了该元件承受的所有载荷而计算得到的,且取最小值。当压力容器的设计文件没有给出最高允许工作压力时,将该容器的设计压力作为最高允许工作压力。

3.1.7

设计温度 **design temperature**

容器在正常工作情况下,设定的元件的金属温度(沿元件金属截面的温度平均值)。

注:设计温度与相应的设计压力一起作为容器的基本设计载荷条件。设计温度的上限值称为最高设计温度,设计温度的下限值称为最低设计温度。

3.1.8

试验温度 test temperature

进行耐压试验或泄漏试验时,容器壳体的金属温度。

3.1.9

最低设计金属温度 minimum design metal temperature

设计时,容器在运行过程中预期的各种可能条件下各元件金属温度的最低值。

3.1.10

计算厚度 required thickness

按 GB/T 4732 相应公式或方法基于所计及的载荷计算得到的厚度。

3.1.11

设计厚度 design thickness

计算厚度与腐蚀裕量之和。

3.1.12

名义厚度 nominal thickness

设计厚度加上材料厚度负偏差后向上圆整至材料标准规格的厚度。

3.1.13

有效厚度 effective thickness

名义厚度减去腐蚀裕量和材料厚度负偏差。

3.1.14

最小成形厚度 minimum required fabrication thickness

受压元件成形后保证设计要求的最小厚度。

3.1.15

低温容器 low-temperature pressure vessel

设计温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低合金钢、双相不锈钢和铁素体不锈钢制容器,以及设计温度低于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的奥氏体不锈钢制容器。

3.1.16

当量应力 equivalent stress

由强度理论定义的用作任意应力状态下强度判据的组合应力。

注: GB/T 4732.3 公式法设计总体上采用第三强度理论;GB/T 4732.4 基于应力分类方法进行设计或强度核算,以及 GB/T 4732.5 基于弹塑性应力分析方法进行强度设计采用第四强度理论。

3.1.17

总体结构不连续 gross structural discontinuity

几何形状、材料或载荷的不连续使结构在较大范围内的应力或应变发生变化,对结构总的应力分布和变形影响显著。

示例:总体结构不连续的实例,如封头、法兰、接管、支座等与壳体的连接处,以及不等直径或不等壁厚的壳体连接处等。

3.1.18

局部结构不连续 local structural discontinuity

几何形状、材料或载荷的不连续使结构在很小范围内的应力或应变发生变化,对结构总的应力分布和变形无显著影响。

注:局部结构不连续的实例,如小的过渡圆角处、壳体与小附件连接处,以及未全熔透的焊缝等。

3.1.19

正应力 normal stress

正交于所考虑截面的应力分量。

注 1: 也称“法向应力”。

注2: 通常正应力沿部件厚度的分布是不均匀的,可分解成沿厚度均匀分布的薄膜应力、线性分布的弯曲应力和非线性分布的峰值应力三个成分。

3.1.20

切应力 shear stress

与所考虑截面相切的应力成分。

注: 也称“剪应力”。

3.1.21

薄膜应力 membrane stress

沿截面厚度均匀分布的应力成分,等于沿所考虑截面厚度的应力平均值。

3.1.22

弯曲应力 bending stress

沿厚度方向线性变化,且与离中性轴的距离成正比的正应力。

注: 对于非线性分布的应力可用等效线性化得到弯曲应力。

3.1.23

 **一次应力 primary stress**

为平衡压力与其他机械载荷所必需的正应力或切应力。

注1: 对理想塑性材料,一次应力所引起的总体塑性流动是非自限的,即当结构内的塑性区扩展到使之变成几何可变的机构时,达到极限状态,即使载荷不再增加,仍产生不可限制的塑性流动,直至破坏。

注2: 一次应力分为一次总体薄膜应力、一次局部薄膜应力和一次弯曲应力。

3.1.24

一次总体薄膜应力 general primary membrane stress

P_m

影响范围遍及整个结构的一次薄膜应力。

注: 在塑性流动过程中一次总体薄膜应力不会发生重新分布,它将直接导致结构破坏。

示例: 一次总体薄膜应力的实例,如各种壳体中平衡内压或分布载荷所引起的薄膜应力。

3.1.25

一次局部薄膜应力 primary local membrane stress

P_l

应力水平大于一次总体薄膜应力,但影响范围仅限于结构局部区域的一次薄膜应力。

注1: 当结构局部发生塑性流动时,这类应力将重新分布。若不加以限制,则当载荷从结构的某一部分(高应力区)传递到另一部分(低应力区)时,会产生过量塑性变形而导致破坏。

示例: 一次局部薄膜应力的实例,如在壳体的固定支座或接管处由外部载荷和力矩引起的薄膜应力。

注2: 总体结构不连续引起的局部薄膜应力,虽具有二次应力的性质,但出于方便与稳妥考虑仍归入一次局部薄膜应力。

注3: 局部应力区是指经线方向延伸距离不大于 $1.0\sqrt{R\delta}$, 当量应力超过 $1.1S_m$ 的区域(此处 R 是该区域内壳体中面的第二曲率半径,即沿中面法线方向从壳体回转轴到壳体中面的距离; δ 为该区域内的最小壁厚)。局部薄膜当量应力超过 $1.1S_m$ 的两个相邻应力区之间彼此隔开,它们之间沿经线方向的间距大于或等于 $2.5\sqrt{R_m\delta_m}$ [其中, $R_m = \frac{1}{2}(R_1 + R_2)$, $\delta_m = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2)$ 。 R_1 与 R_2 分别为所考虑两个区域壳体中面的第二曲率半径; δ_1 与 δ_2 为每一所考虑区域的最小厚度]。

3.1.26

一次弯曲应力 primary bending stress

P_b

平衡压力或其他机械载荷所需的沿截面厚度线性分布的弯曲应力。

示例: 一次弯曲应力的实例,如平盖中心部位由压力引起的弯曲应力。

3.1.27

二次应力 secondary stress

Q

为满足外部约束条件或结构自身变形连续要求所需的正应力或切应力。

注：二次应力的基本特征是具有自限性，即局部屈服和小量变形就可以使约束条件或变形连续要求得到满足，从而变形不再继续增大。

示例：二次应力的实例，如总体热应力和总体结构不连续处的弯曲应力。

3.1.28

峰值应力 peak stress

F

由局部结构不连续或局部热应力影响而引起的附加于一次加二次应力的应力增量。

注：峰值应力的特征是同时具有自限性与局部性，它不会引起明显的变形；其危害性在于可能导致疲劳裂纹或脆性断裂。非高度局部性的应力，如果不引起显著变形者也属于此类。峰值应力的实例，如壳体接管连接处由于局部结构不连续所引起的应力增量中沿厚度非线性分布的应力，复合钢板容器中覆层的热应力。

3.1.29

载荷应力 load stress

由压力或其他机械载荷所引起的应力。

3.1.30

热应力 thermal stress

由结构内部温度分布不均匀或材料线膨胀系数不同所引起的自平衡应力；或当温度发生变化，结构的自由热变形被外部约束限制时所引起的应力。

注：热应力分为总体热应力和局部热应力。

3.1.31

总体热应力 grossthermal stress

影响范围遍及厚度和结构较大范围的热应力。

注：总体热应力属于二次应力。总体热应力的实例如下：

- 圆筒中由于轴向温度梯度所引起的应力；
- 由壳体与接管间的温度差所引起的应力；
- 圆筒中由于径向温度梯度所引起的等效线性应力。等效线性应力是指由应力等效线性化得到的薄膜加弯曲应力，要求合力相等和合力矩相等。

3.1.32

局部热应力 localthermal stress

影响范围仅占厚度很小部分和结构局部区域的热应力。

注：局部热应力属于峰值应力范畴。

示例：局部热应力的实例如下：

- 容器壁上小范围局部过热处的应力；
- 筒体中由于径向温度梯度所引起的实际应力与当量线性应力之差；
- 复合钢板中因复层与基体金属线膨胀系数不同而在复层中引起的热应力。

3.1.33

工作循环 operating cycle

由初始状态进入新状态，随后又回到初始状态开始点的过程。

注：工作循环有以下三种情况。

- 启动停止循环。以大气压力或大气温度为一个极值，而正常工作条件为另一极值的任一工作循环。
- 正常工作循环。从启动到停止之间，容器为了实现其预期目的所需的任何工作循环。
- 设计中需要考虑的任何紧急状态或异常情况由起始到恢复的循环。

3.1.34

应力循环 stress cycle

应力由某初始值开始,经过代数最大值和代数最小值,然后又返回初始值的循环。

注:一个工作循环可以引起一个或多个应力循环。

3.1.35

变形 deformation

元件形状或尺寸的改变。

3.1.36

非弹性 Inelasticity

材料的一般性质。即:当卸去全部外加载荷后材料不再恢复到原来的(未变形的)形状与尺寸的性质。

3.1.37

塑性 plasticity

材料中应力超过屈服强度后发生与时间无关的不可恢复的变形。

注:塑性变形有三个主要特点:

- 非线性:应力-应变关系是非线性的;
- 加卸载性质不同:加载是塑性,卸载是弹性;
- 历史相关性:应力与应变没有一一对应关系,与加载历史有关。

3.1.38

塑性分析 plastic analysis

考虑材料塑性变形特性(包括塑性应力-应变关系、应力重分布等)来计算给定载荷作用下结构状态的方法。

3.1.39

极限分析 limit analysis

假设材料为理想塑性、结构处于小变形状态时,研究塑性极限状态下的结构平衡特性的塑性力学分析方法。

注:极限分析的理论基础是下限定理与上限定理。下限定理是:在所有与静力容许应力场(满足平衡条件且不违背屈服条件的应力场)对应的载荷是极限载荷的下限解,其中最大者为极限载荷。上限定理是:在所有与机动容许位移场(满足几何可能条件形成破坏机构的位移场)对应的载荷是极限载荷的上限解,其中最小者为极限载荷。由上、下限定理得到的分别称为上限解、下限解,当二者相等时称为完全解。

3.1.40

极限载荷 limit load

理想塑性结构在小变形情况下,当载荷不变时发生无限制塑性变形而丧失承载能力时的载荷。

注:用极限分析方法能求得极限载荷。

3.1.41

塑性铰 plastic hinge

在梁、刚架、板、壳等结构极限分析中描述弯曲型塑性垮塌机构的理想模型。

注1:塑性铰的实例,如当梁的某一截面全部进入塑性状态后,该处曲率变化率可以任意地增大,称该点处出现了一个塑性铰。

注2:塑性铰与工程中的机械铰有两个本质区别:

- 它是单向铰,只能朝加载时的转动方向转动,卸载是弹性的,不能转动。
- 它不是光滑铰,转动时截面上有塑性极限弯矩,在转动过程中做塑性功。在板壳结构中连续的一串塑性铰会形成塑性铰线。

3.1.42

蠕变 creep

在应力不变的条件下应变随着时间不可逆缓慢增加的现象。

3.1.43

棘轮现象 ratcheting

当构件经受一次应力和循环热应力(或循环一次应力)共同作用时,产生逐次渐增非弹性变形的现象。

注:也称“渐增塑性”(progressive plasticity),亦称“棘轮”。

3.1.44

安定性 shakedown

结构除在初始阶段少数几个载荷循环中产生一定的塑性变形外,在继续施加的循环外载荷作用下不再发生新的塑性变形,或者说不出现塑性疲劳或棘轮现象。此时称结构处于安定状态。

3.1.45

疲劳 fatigue

零部件的某处受循环载荷的作用,在应力集中部位产生局部损伤累积,并在一定载荷循环次数后裂纹萌生、扩展和断裂的机理。

3.1.46

失效 failure

容器在规定的服役环境和寿命内,因尺寸、形状或材料性能变化而危及安全或者丧失规定功能的现象。

3.1.47

失效模式 failure mode

容器丧失其规定功能或者危及安全的事件及其本质原因。

3.1.48

短期失效模式 short term failure mode

非循环载荷短期作用导致容器短期失效的模式。

注:短期失效模式包括但不限于脆性断裂、韧性断裂(如塑性垮塌、局部过度应变)、过量变形、屈曲和某些环境助长导致的短期失效。

3.1.49

长期失效模式 long-term failure mode

非循环载荷长期作用导致容器失效的模式。

注:长期失效模式包括但不限于蠕变破裂、蠕变过量变形、蠕变失稳、腐蚀和磨蚀、某些环境助长导致的长期失效。

3.1.50

循环失效模式 cyclic failure mode

循环载荷作用导致容器延迟失效的模式。

注:循环失效模式包括但不限于疲劳、棘轮(渐增塑性)。

3.1.51

脆性断裂 brittle fracture

容器构件未经明显的塑性变形而发生的断裂。

3.1.52

屈曲 buckling

在压应力作用下,处在弹性或弹塑性状态的容器构件失去原有规则几何形状而导致的失效。

3.1.53

塑性垮塌 plastic collapse

在单调加载条件下容器构件因过量总体塑性变形而不能继续承载导致的失效。

3.1.54

局部过度应变 excessive local strains

在局部多向拉应力状态下,容器因材料延性耗尽而导致裂纹产生或者撕裂。

3.1.55

泄漏 leakage

容器本体或者连接件失去密封功能。

3.1.56

倾覆 overturning

结构失去平衡而产生倾翻的不稳定模式。

3.1.57

设计评定准则 design evaluating criteria

防止失效发生的设计许用判据。

3.1.58

塑性失效准则 plastic failure criteria

防止塑性失效的各类设计评定准则的统称。

注:塑性失效准则包括但不限于以下评定准则:

- 塑性垮塌;
- 局部过度应变;
- 塑性疲劳;
- 棘轮。



3.2 符号

下列符号适用于本文件。

C ——厚度附加量,mm。

C_1 ——材料厚度负偏差,mm。

C_2 ——腐蚀裕量,mm。

E' ——材料在设计温度下的弹性模量,MPa。

p ——设计压力,MPa。

p_T ——试验压力最低值,MPa。

R_o ——圆筒的外半径,mm。

R_m ——材料标准抗拉强度下限值,MPa。

$R_{eL}(R_{p0.2}, R_{p1.0})$ ——材料标准室温屈服强度(或0.2%、1.0%非比例延伸强度),MPa。

$R'_{eL}(R'_{p0.2}, R'_{p1.0})$ ——材料在设计温度下的屈服强度(或0.2%、1.0%非比例延伸强度),MPa。

R'_D ——材料在设计温度下经10万h、15万h或20万h断裂的持久强度的平均值,MPa。

R'_n ——材料在设计温度下经10万h蠕变率为1%的蠕变极限平均值,MPa。

S_I ——一次总体薄膜应力的当量应力,MPa。

S_{III} ——一次薄膜加一次弯曲应力的当量应力,MPa。

S_m ——容器元件材料在耐压试验温度下的许用应力,MPa。

S'_m ——容器元件材料在设计温度或工作温度下的许用应力,MPa。

S'_1 ——设计温度下基层材料的许用应力,MPa。

- $S_{\frac{1}{2}}$ ——设计温度下覆层材料的许用应力,MPa。
 S_{cr}^{\perp} ——设计温度下圆筒许用轴向压缩应力,MPa。
 S_i^{\perp} ——设计温度下多层包扎圆筒内筒材料的许用应力,MPa。
 S_o^{\perp} ——设计温度下多层包扎圆筒层板层材料的许用应力,MPa。
 δ_1 ——基层材料的名义厚度,mm。
 δ_2 ——覆层材料的厚度,不计入腐蚀裕量,mm。
 δ_e ——圆筒或球壳的有效厚度,mm。
 δ_i ——多层包扎圆筒内筒的名义厚度,mm。
 δ_n ——多层包扎圆筒的名义厚度,mm。
 δ_o ——多层包扎圆筒层板层总厚度,mm。
 ϕ_o ——多层包扎圆筒层板层的焊接接头系数。

4 失效模式

4.1 容器建造中涉及的主要失效模式

容器建造中考虑的主要失效模式如下。

- a) 短期失效模式:脆性断裂(brittle fracture)、韧性断裂(ductile fracture)(如塑性垮塌、局部过度应变)、过量变形(excessive deformation)、屈曲(buckling)。

注:过量变形会导致法兰等连接处介质泄漏或丧失其他功能。

- b) 长期失效模式:蠕变断裂(creep rupture)、蠕变过量变形(creep excessive deformation)、蠕变失稳(creep instability)、腐蚀和磨蚀(corrosion and erosion)、环境助长断裂(environmentally assisted cracking)。
c) 循环失效模式:棘轮或称渐增塑性(ratcheting or progressive plastic deformation)、交替塑性(alternating plasticity)、疲劳(fatigue)、环境助长疲劳(environmentally assisted fatigue)。

4.2 GB/T 4732 涵盖的基本失效模式

GB/T 4732 涵盖的基本失效模式如下:

- a) 塑性垮塌——GB/T 4732.3、GB/T 4732.4、GB/T 4732.5 中考虑了该失效模式;
b) 局部过度应变——GB/T 4732.3、GB/T 4732.4、GB/T 4732.5 中考虑了该失效模式;
c) 屈曲——GB/T 4732.3、GB/T 4732.5 中考虑了该失效模式;
d) 疲劳——GB/T 4732.4、GB/T 4732.5 中考虑了该失效模式;
e) 棘轮——GB/T 4732.4、GB/T 4732.5 中考虑了该失效模式;
f) 脆性断裂——GB/T 4732.2、GB/T 4732.6 中考虑了该失效模式;
g) 泄漏——在法兰设计、密封结构设计等要求中考虑了该失效模式;
h) 均匀腐蚀和磨蚀——受压元件设计计算中确定设计厚度时考虑了该失效模式;
i) 环境助长断裂——GB/T 4732.2、GB/T 4732.6 中考虑了该失效模式。

4.3 工程上考虑的失效模式

包括 4.1 规定的失效模式和容器在全寿命周期内可能出现的其他失效模式。

5 基本要求

5.1 通则

- 5.1.1 容器的设计、制造、检验和验收除应符合 GB/T 4732 相关部分的规定外,还应遵守国家发布的有

关法律、法规和安全技术规范要求。

5.1.2 特定结构容器,其设计、制造、检验和验收应符合本文件及 GB/T 4732.2~GB/T 4732.6 的规定外,还应符合 GB/T 151、GB/T 12337、NB/T 47041 和 NB/T 47042 的相应结构设计要求。

5.1.3 容器的设计、制造单位应建立健全质量管理体系并有效运行。

5.1.4 TSG 21 和 TSG R0005 管辖范围内的压力容器设计和制造应接受特种设备安全监察机构的监察。

5.1.5 固定式容器类别按照 TSG 21 的规定确定,移动式容器类别按照 TSG R0005 或有关文件的规定确定。

5.2 资质与职责

5.2.1 资质

TSG 21 和 TSG R0005 管辖范围内压力容器的设计单位应持有含分析设计的相应特种设备设计许可证,TSG 21 和 TSG R0005 管辖范围内压力容器的制造单位应持有相应的 A 级或 C 级特种设备制造许可证。

5.2.2 职责

5.2.2.1 用户或设计委托方的职责

容器的用户或设计委托方应以正式书面形式向设计单位提出容器设计条件,应至少包含以下内容:

- a) 容器设计所依据的主要标准和规范;
- b) 操作参数(包括工作压力、工作温度范围、液位高度、接管载荷等);
- c) 压力容器使用地及其自然条件(包括环境温度、抗震设防烈度、风和雪载荷等);
- d) 介质组分与特性;
- e) 预期使用年限,承受循环交变载荷的容器,注明预期使用年限内载荷波动范围及循环次数;
- f) 几何参数和管口方位;
- g) 设计需要的其他必要条件。

5.2.2.2 设计单位的职责

设计单位的职责要求如下:

- a) 设计单位应对设计文件的正确性和完整性负责;
- b) 容器的设计文件应至少包括应力分析报告(或计算书)、设计图样、制造技术条件、风险评估报告,必要时还应包括安装与使用维修保养说明;
- c) TSG 21 和 TSG R0005 管辖范围内压力容器的设计总图应盖有特种设备设计专用印章;
- d) 设计单位向容器用户出具的风险评估报告应符合附录 A 的规定;
- e) 设计单位应在容器设计使用年限内保存全部容器设计文件。

5.2.2.3 制造单位的职责

制造单位的职责要求如下。

- a) 制造单位应按照设计文件的要求进行制造,当需要对原设计进行变更时,应取得原设计单位同意变更的书面文件,并且对改动部位作出详细记载。
- b) 制造单位在容器制造前应制定完善的质量计划,其内容应至少包括容器或元件的制造工艺控制点、检验项目和合格指标。
- c) 制造单位的检查部门在容器制造过程中和完工后,应按本文件、设计文件和质量计划的规定对

容器进行各项检验和试验,出具相应报告,并对报告的正确性和完整性负责。

- d) 制造单位在检验合格后,应出具产品质量合格证。
- e) 制造单位对其制造的每台容器产品应在容器设计使用年限内至少保存下列技术文件备查:
 - 1) 质量计划;
 - 2) 制造工艺图或制造工艺卡;
 - 3) 产品质量证明文件;
 - 4) 容器的焊接工艺和热处理工艺文件;
 - 5) 标准中允许制造厂选择的检验、试验项目记录;
 - 6) 容器制造过程中及完工后的检查、检验、试验记录;
 - 7) 容器的原设计图和竣工图。

5.3 设计一般规定

5.3.1 容器设计单位(设计人员)应依据用户或设计委托方所提供的容器设计条件进行容器设计,考虑容器在全寿命周期中可能出现的所有失效模式,提出防止失效的措施。

注:设计中考虑的失效模式见第4章。

5.3.2 设计时应计及以下载荷:

- a) 内压、外压或压差;
- b) 液柱静压力,当液柱静压力小于设计压力的5%时,可忽略不计,需要时,还应计及c)~k)载荷;
- c) 容器的自重(包括内件和填料等),以及正常工作条件下或耐压试验状态下内装介质的重力载荷;
- d) 附属设备及隔热材料、衬里、管道、扶梯、平台等的重力载荷;
- e) 风载荷、地震载荷、雪载荷;
- f) 支座及其他型式支承件的反作用力;
- g) 连接管道和其他部件的作用力;
- h) 温度梯度或由于热膨胀量不同引起的作用力;
- i) 冲击载荷,包括压力急剧波动引起的冲击载荷、流体冲击引起的反力等;
- j) 运输或吊装时的作用力;
- k) 其他应计及的载荷。

5.3.3 确定设计压力或计算压力时,需满足下述要求。

- a) 容器上装有超压泄放装置时,应按GB/T 150.1的规定确定设计压力。
- b) 对于常温储存液化气体的容器,当装有可靠的保冷设施,在规定的装量系数范围内,设计压力应以规定温度下的工作压力为基础确定。工作压力按TSG 21的规定确定。
- c) 对于外压容器(例如真空容器、液下容器和埋地容器),确定计算压力时应计及在正常工作情况下可能出现的最大内外压力差。
- d) 确定真空容器的壳体厚度时,设计压力按承受外压考虑。当装有安全控制装置(如真空泄放阀)时,设计压力取1.25倍最大内外压力差或0.1 MPa两者中的低值;当无安全控制装置时,取0.1 MPa。
- e) 由2个或2个以上压力室组成的容器,如夹套容器,应分别确定各压力室的设计压力。确定公用元件的计算压力时,需计及相邻室之间的最大压力差。

5.3.4 设计温度的确定要求如下。

- a) 设计温度不应低于元件金属在工作状态可能达到的最高温度。对于0℃以下的金属温度,设计温度不应高于元件金属可能达到的最低温度。

- b) 容器各部分在工作状态下的金属温度不同时,可分别设定每部分的设计温度。
- c) 元件的金属温度可通过以下方法确定:
 - 1) 传热计算求得;
 - 2) 在已使用的同类容器上测定;
 - 3) 根据容器内部介质温度并结合外部条件确定。
- d) 在确定最低设计金属温度时,应计及在运行过程中,大气环境低温条件对容器壳体金属温度的影响。

注:大气环境低温条件系指历年来月平均最低气温(指当月各天的最低气温值之和除以当月天数)的最低值。

5.3.5 多工况运行的容器,应按最苛刻的工况设计,必要时还需考虑不同工况的组合,并在图样或相应技术文件中注明各工况操作条件 and 设计条件下的压力和温度值。

5.3.6 厚度附加量按公式(1)确定:

$$C = C_1 + C_2 \dots\dots\dots(1)$$

式中, C_1 和 C_2 按下列要求确定。

- a) 板材或管材的厚度负偏差(C_1)按材料标准的规定。
- b) 为防止容器受压元件由于腐蚀、机械磨损而导致厚度削弱减薄,按下列规定考虑腐蚀裕量(C_2):
 - 1) 对有均匀腐蚀或磨损的元件,应根据预期的容器设计使用年限和介质及环境对金属材料的腐蚀速率(及磨蚀速率)确定腐蚀裕量;
 - 2) 容器各元件受到的腐蚀程度不同时,可采用不同的腐蚀裕量;
 - 3) 介质为压缩空气、水蒸气或水的非合金钢或低合金钢制容器,腐蚀裕量不应小于 1 mm。

5.3.7 壳体加工成形后不包括腐蚀裕量的最小厚度:

- a) 非合金钢、低合金钢制容器,不宜小于 3 mm;
- b) 高合金钢制容器,不宜小于 2 mm。

5.3.8 容器元件的名义厚度和最小成形厚度应标注在设计图样上。

5.4 许用应力

5.4.1 GB/T 4732 中材料的许用应力 S'_m 应按 GB/T 4732.2 的规定选取。应按表 1 的规定确定钢材(螺栓材料除外)许用应力,按表 2 的规定确定钢制螺栓材料许用应力。

表 1 许用应力的取值(螺栓材料除外)

材料	许用应力/MPa (取下列各值中的最小值)
非合金钢、低合金钢	$\frac{R_m}{2.4}, \frac{R_{eL}(R_{p0.2})}{1.5}, \frac{R'_{eL}(R'_{p0.2})}{1.5}, \frac{R'_D}{1.5}, \frac{R'_n}{1.0}$
高合金钢	
对奥氏体高合金钢制受压元件,根据使用部位,当允许有微量的永久变形时,可适当提高许用应力至 $0.9R'_{p0.2}$,但不超过 $R_{p0.2}/1.5$ 。此规定不适用于法兰或其他有微量永久变形就产生泄漏或故障的场合。 对奥氏体高合金钢制受压元件,如果引用标准规定了 $R_{p1.0}$ 或 $R'_{p1.0}$,则可以选用该值计算其许用应力。 根据设计使用年限选用 1.0×10^5 h、 1.5×10^5 h、 2.0×10^5 h 等持久强度极限值。 对非焊接瓶式容器瓶体,其许用应力可基于产品经过改善材料性能热处理后的强度保证值确定	



表 2 钢制螺栓材料许用应力的取值

材料	螺栓直径/mm	热处理状态	许用应力/MPa
非合金钢	≤M22	热轧、正火	$\frac{R_{eL}^t}{2.7}$
	M24~M48		$\frac{R_{eL}^t}{2.5}$
低合金钢、 马氏体高合金钢	≤M22	调质	$\frac{R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)}{3.5}$
	M24~M48		$\frac{R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)}{3.0}$
	≥M52		$\frac{R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)}{2.7}$
奥氏体高合金钢	≤M22	固溶	$\frac{R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)}{1.6}$
	M24~M48		$\frac{R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)}{1.5}$

5.4.2 设计温度低于 20 °C 时,取 20 °C 时的许用应力。

5.4.3 对于覆层与基层结合率达到 NB/T 47002.1、NB/T 47002.2 中 2 级板以上的不锈钢-钢、镍-钢复合钢板,在设计计算中,当计入覆层材料的强度时,其设计温度下的许用应力应按公式(2)确定:

$$S_m^t = \frac{S_1^t \delta_1 + S_2^t \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \dots\dots\dots (2)$$

S_1^t 按 GB/T 4732.2 选取; S_2^t 根据覆层材料按 GB/T 4732.2 或 JB/T 4756 选取。当 S_2^t 值高于 S_1^t 值时,取 S_1^t 值代替 S_2^t 值。

5.4.4 多层包扎圆筒设计温度下的许用应力应按公式(3)确定:

$$S_m^t = \frac{\delta_i}{\delta_n} S_i^t + \frac{\delta_o}{\delta_n} S_o^t \phi_o \dots\dots\dots (3)$$

式中, $\phi_o = 0.95$ 。

5.4.5 壳体许用压缩应力应按 GB/T 4732.3 的规定确定。

5.5 当量应力的许用极限

5.5.1 基于应力分类方法设计时当量应力的许用极限

采用应力分类方法进行容器设计时,相应类别当量应力及组合当量应力的许用极限应按 GB/T 4732.4 的规定。

5.5.2 特殊应力的许用极限

5.5.2.1 支承载荷

5.5.2.1.1 在最大设计载荷作用下,用于防止挤压破坏的平均支承应力应限制在所处温度下的屈服强度 $R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$ 以下。当支承载荷作用边缘到自由端的距离(非承压部分)大于支承载荷作用的长度范围时,支承应力可为所处温度下屈服强度 $R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$ 的 1.5 倍。

评定复合材料覆层表面上的支承应力时,应采用复材的屈服强度 $R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$;当计算支承应力时,如果支承面积取为实际接触面积和支承接触表面的基层金属面积两者中的较小值时,则可采用基材的屈服强度 $R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$ 。

5.5.2.1.2 当支承载荷作用于具有自由端的部件上时,例如外伸边缘处,应计及剪切失效的可能性。当仅有载荷应力时,平均剪应力不应超过 $0.6S_m$; 针对载荷应力加二次应力,平均剪应力不应超过下列数值:

- a) 对奥氏体不锈钢,取常温下 $0.5R_{p0.2}$ 和其他温度下 $0.675R_{p0.2}^t$ 中的较低值;
- b) 对其他所有材料,在任何温度下均为 $0.5R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$;
- c) 对于复合层表面,如果剪切失效仅发生在覆层金属中,覆层的许用剪应力按与该覆层材料相当的锻件性能确定;如果剪切失效一部分发生在基层,一部分发生在覆层,评定这种类型失效的综合抗力时,采用覆层和基层各自材料的许用剪应力。

5.5.2.1.3 销子及类似部件的支承应力不应超过该温度下的 $R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$; 但距板边一个销子直径范围内的承压面上无承载时,许用值取 $1.5R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$ 。

5.5.2.2 纯剪切

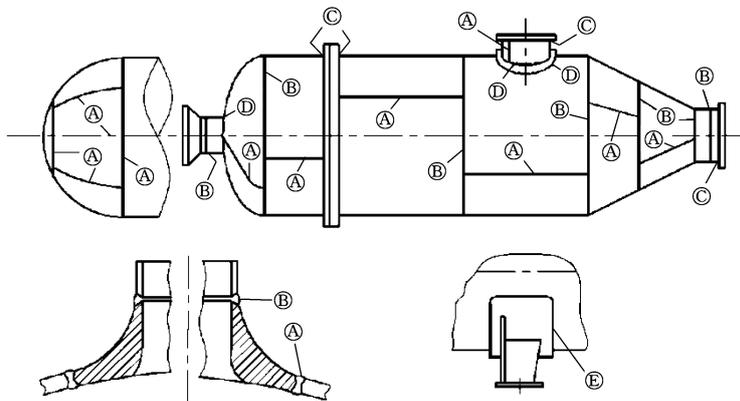
受纯剪切的截面(如键、抗剪环、螺纹)的平均一次剪应力不应超过 $0.6S_m^t$ 。承受扭力的实心圆形截面外周上,不计集中应力时的最大一次剪应力不应超过 $0.8S_m^t$ 。

5.5.2.3 非整体连接件的扩展性变形

螺帽、丝堵、环状抗剪锁紧装置、栓状锁紧装置等非整体连接件,由于喇叭状或其他形状的扩展性变形而受到损坏,以致不能啮合,引起非整体连接件之间产生滑移。为防止发生此类现象,一次加二次当量应力不应超过 $R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$ 。

5.6 焊接接头分类

5.6.1 容器受压元件之间的焊接接头分为 A、B、C、D 四类,如图 1 所示。



①②③④⑤分别表示 A、B、C、D 和 E 类焊接接头。

图 1 焊接接头分类

焊接接头的具体分类方法如下:

- a) 圆筒部分(包括接管)和锥壳部分的纵向接头(多层包扎容器层板层纵向接头除外)、球形封头与圆筒连接的环向接头、各类凸形封头和平封头中的所有拼焊接头,以及嵌入式的接管与壳体对接连接的接头或凸缘与壳体对接连接的接头,均属 A 类焊接接头;
- b) 壳体部分的环向接头、锥形封头小端与接管连接的接头、长颈法兰与壳体或接管连接的接头、平盖或管板与圆筒对接连接的接头以及接管间的对接环向接头,均属 B 类焊接接头,但已规定为 A 类的焊接接头除外;

- c) 球冠形封头、平盖、管板与圆筒非对接连接的接头,法兰与壳体或接管连接的接头,内封头与圆筒的搭接接头以及多层包扎容器层板层纵向接头,均属 C 类焊接接头,但已规定为 A、B 类的焊接接头除外;
- d) 接管(包括人孔圆筒)、凸缘、补强圈等与壳体连接的接头,均属 D 类焊接接头,但已规定为 A、B、C 类的焊接接头除外。

5.6.2 非受压元件与受压元件的连接接头为 E 类焊接接头,如图 1 所示。

5.7 耐压试验

5.7.1 通用要求

5.7.1.1 耐压试验包括液压试验、气压试验和气液组合试验。

5.7.1.2 容器制成后应经耐压试验,试验的种类、要求和试验压力值应在图样上注明。

5.7.1.3 耐压试验一般采用液压试验,试验液体应符合 TSG 21 或 TSG R0005 的规定。

5.7.1.4 对于不适宜进行液压试验的容器,可采用气压试验或气液组合试验。进行气压试验或气液组合试验的容器应满足 GB/T 4732.6 的要求。

5.7.1.5 采用气液组合试验时,试验用液体和气体应分别满足 5.7.1.3 和 5.7.1.4 的要求,试验压力按气压试验的规定。

5.7.1.6 外压容器以内压进行耐压试验,试验压力按 5.7.2.3 的规定执行。

5.7.2 耐压试验压力

5.7.2.1 耐压试验压力的最低值按 5.7.2.2 和 5.7.2.3 的规定,并考虑:

- a) 对于立式容器采用卧置进行液压试验时,试验压力应计入立置试验时的液柱静压力;
- b) 工作条件下内装介质的液柱静压力大于压力试验的液柱静压力时(气压试验时液注静压力为零,液压试验或气液组合试验时按实际液柱静压力考虑),应相应增加试验压力。

5.7.2.2 内压容器进行耐压试验时,其试验压力的最低值按以下规定确定:

- a) 液压试验的试验压力应按公式(4)确定:

$$p_T = 1.25p \frac{S_m}{S_t^t} \dots\dots\dots (4)$$

- b) 气压试验或气液组合试验的试验压力应按公式(5)确定:

$$p_T = 1.1p \frac{S_m}{S_t^t} \dots\dots\dots (5)$$

注 1: 容器铭牌上规定有最高允许工作压力时,公式中以最高允许工作压力代替设计压力 p 。

注 2: 容器各主要受压元件,如圆筒、封头、接管、设备法兰(或人手孔法兰)及其紧固件等所用材料不同时,取各元件材料 $\frac{S_m}{S_t^t}$ 值中的最小者。

5.7.2.3 外压容器进行耐压试验时,其试验压力的最低值按以下规定确定:

- a) 液压试验的试验压力应按公式(6)确定:

$$p_T = 1.25p \dots\dots\dots (6)$$

- b) 气压试验或气液组合试验的试验压力应按公式(7)确定:

$$p_T = 1.1p \dots\dots\dots (7)$$

5.7.2.4 对于由 2 个或 2 个以上压力室组成的多腔容器,每个压力室的试验压力按其设计压力确定。当分隔两压力腔的共用元件非按压力差进行设计时,其各压力腔单独进行压力试验;当分隔两压力腔的共用元件按压力差进行设计时,确定该分隔两压力腔的共用元件试验压力时,应按压力差替代公式(4)~公式(7)中的 p ,各腔在进行压力试验时,另一腔应保持压力,使分隔两压力腔的共用元件所受压

力差不超过规定的试验压力值。

5.7.3 耐压试验应力校核

5.7.3.1 对于采用公式法设计的容器,试验时容器任意点上的压力(包括液注静压力)超过公式(4)、公式(5)规定的试验压力时,应校核各受压元件在试验条件下的应力水平,例如对壳体元件校核 S_I 。校核要求应符合如下规定:

- a) 液压试验时, $S_I \leq 0.9R_{cl}$;
- b) 气压试验或气液组合试验时, $S_I \leq 0.8R_{cl}$ 。

5.7.3.2 对于采用应力分类方法设计的容器,试验时容器任何点上的压力(包括静压头)超过公式(4)、公式(5)规定的试验压力的 6% 时,应按表 4 校核各承压元件在试验条件下的当量应力 S_I 和 S_{III} ,其中对于多腔容器分隔两压力腔的共用元件,应按 5.7.2.4 施加压力计算其应力,并按表 3 校核其当量应力 S_I 和 S_{III} 。

表 3 耐压试验下的应力校核

耐压试验类型	S_I	S_{III}	
		当 $S_I \leq 2/3R$ 时	当 $S_I > 2/3R$ 时
液压试验	$\leq 0.9R$	$\leq 1.35R$	$\leq 2.35R - 1.5S_I$
气压试验、气液组合试验	$\leq 0.8R$	$\leq 1.2R$	$\leq 2.2R - 1.5S_I$
注:表中 R 代表 $R_{cl}(R_{p0.2})$ 。			

5.7.3.3 对于采用弹塑性分析方法设计的容器,试验时容器任何点上的压力(包括液注静压力)超过公式(4)、公式(5)规定的试验压力时,试验压力上限的应力核算应满足 GB/T 4732.5 的要求。

5.7.3.4 对于多腔容器的耐压试验,当其分隔两压力腔的共用元件需承受外压作用时(凸面受压),应校核其稳定性,使其满足外压稳定性要求。整个试验过程(包括升压、保压和卸压)中的任一时刻,共用元件需承受的外压不应超过许用外压,且图样上应注明该要求和许用外压。

5.8 泄漏试验

5.8.1 泄漏试验包括气密性试验以及氨检漏试验、卤素检漏试验和氦检漏试验等。

5.8.2 介质毒性程度为极度、高度危害或者不允许有微量泄漏的容器,应在耐压试验合格后进行泄漏试验。介质毒性程度应按 TSG 21 的相关规定确定。

5.8.3 设计单位应提出容器泄漏试验的方法和技术要求。

5.8.4 需进行泄漏试验时,试验压力、试验介质和相应的检验要求应在设计文件中注明。

5.8.5 气密性试验压力等于设计压力。

5.9 焊接接头结构设计要求

容器的焊接接头的结构设计参照 GB/T 4732.3 的要求。

5.10 超压泄放装置

GB/T 4732 适用范围内的容器,当操作过程中有可能出现超压时,应按 GB/T 150.1 的规定设置超压泄放装置。

附 录 A
(规范性)
风险评估报告

A.1 一般要求

A.1.1 本附录规定了风险评估报告的基本要求。

A.1.2 容器设计者应根据相关法规或设计委托方要求编制针对容器预期使用状况的风险评估报告。

A.1.3 设计者应根据第4章,充分考虑容器在各种工况条件下可能产生的失效模式,在材料选择、结构设计、制造检验要求等方面提出安全措施,防止可能发生的失效。

A.1.4 设计者应向容器用户提供制定容器事故应急预案所需要的信息。

A.2 制定原则和程序

A.2.1 设计阶段风险评估主要针对危害识别和风险控制。

A.2.2 设计阶段风险评估按以下程序进行:

- a) 根据用户设计条件和其他设计输入信息,确定容器的各种使用工况;
- b) 根据各使用工况的介质、操作条件、环境因素进行危害识别,确定可能发生的危害及其后果;
- c) 针对所有危害和相应的失效模式,说明应采取的安全防护措施和依据;
- d) 对于可能发生的失效模式,给出制定事故应急预案所需要的信息;
- e) 形成完整的风险评估报告。

A.3 风险评估报告内容

风险评估报告应至少包括:

- a) 压力容器的基本设计参数:压力、温度、材料、介质性质和外载荷等;
- b) 操作工况条件的描述;
- c) 所有操作、设计条件下可能发生的危害,如爆炸、泄漏、破损、变形等;
- d) 对于标准已经有规定的失效模式,说明采用标准的条款;
- e) 对于标准没有规定的失效模式,说明设计中载荷、安全系数和相应计算方法的选取依据;
- f) 对介质少量泄漏、大量涌出和爆炸状况下如何处置的措施;
- g) 根据周围人员的可能伤及情况,规定合适的人员防护设备和措施;
- h) 风险评估报告应具有与设计图纸一致的签署。



参 考 文 献

- [1] NB/T 47002.1 压力容器用复合板 第1部分:不锈钢-钢复合板
 - [2] NB/T 47002.2 压力容器用复合板 第2部分:镍-钢复合板
-

