

# ASME规范在压力容器设计制造中的应用

王奇林

苏州利玛特能源装备有限公司 江苏 张家港 215600

**摘要:** 本文全面分析了ASME规范在压力容器设计制造中的核心应用, 涵盖其发展历程、设计原理、制造检验要求及最新发展动态。通过具体案例和文献研究, 揭示了ASME规范如何通过材料选择、结构分析、焊接工艺控制等环节确保压力容器安全, 并探讨了规范更新的行业影响。

**关键词:** ASME规范; 压力容器设计; 无损检测; 安全系数; 国际认证

## 引言

压力容器作为化工、能源等行业的关键设备, 其安全性直接影响生产安全与环境风险。ASME (美国机械工程师协会) 规范作为全球压力容器领域的权威标准, 通过系统化的设计要求与质量控制体系, 为设备全生命周期管理提供了技术保障。本文将从规范框架、设计应用、制造检验及最新发展四方面, 解析ASME规范在压力容器领域的实践价值。

## 1 ASME 规范体系概述

ASME, 美国机械工程师协会, 自1880年创立以来, 始终致力于机械工程标准的制定与推广。其锅炉与压力容器规范 (BPVC) 作为核心组成部分, 全球闻名。BPVC体系全面而详尽, 共含12个章节, 涵盖材料选用、设计原则、制造质控、检验测试等锅炉与压力容器的全生命周期管理。安全是ASME规范的核心导向, 通过设定高标准的安全系数 (通常  $\geq 3.5$ ) 和严格工艺控制, 有效预防泄漏、爆炸等事故, 对公共安全起到重要保障作用。ASME规范具有国际通用性, 被全球100多个国家和地区广泛采纳, 成为国际技术协作与贸易标准化的基石。同时, 它保持技术前瞻性, 每年修订以适应新材料、新工艺的发展, 引领行业技术进步。

## 2 ASME 规范在压力容器设计中的核心应用

压力容器作为工业生产中的核心设备, 其设计、制造和使用过程都需严格遵守相关规范, 以确保人员安全、生产顺利以及环境不受污染。ASME规范, 作为全球公认的权威标准, 在压力容器设计中具有举足轻重的地位。

### 2.1 设计参数与材料选择

#### 2.1.1 设计压力与温度

设计压力与温度是压力容器设计的两个基本参数, 它们决定了容器的结构尺寸、材料选择以及制造工艺。设计压力需充分考虑操作工况的波动, 以确保容器在极端条件下仍能保持安全。对于反应釜这类可能承受较高

内部压力的设备, 其设计压力通常需高于工艺最高压力的10%-20%。这是因为在实际操作过程中, 由于各种因素 (如温度波动、化学反应等) 的影响, 容器内部的压力可能会瞬间升高, 如果设计压力不足, 就可能导致容器破裂或爆炸。设计温度则需根据容器的实际工作环境来确定。ASME规范要求设计者考虑容器在操作过程中可能遇到的最高和最低温度, 以及这些温度对材料性能的影响<sup>[1]</sup>。特别是对于高温环境下的容器, 设计温度的选择更需谨慎。因为高温会导致材料强度下降、蠕变加速等, 从而影响容器的安全性。因此, 设计者需选择能够在高温下保持足够强度和稳定性的材料, 或者通过增加壁厚来补偿因温度升高而导致的强度衰减。

#### 2.1.2 材料分级制度

ASME规范对于压力容器的材料有着严格的分级制度。在ASME II卷中, 材料被分为SA系列和SB系列两大类。SA系列主要包括碳钢、低合金钢等材料, 如SA516低碳钢, 这类材料具有良好的焊接性和加工性, 适用于一般压力容器的制造。而SB系列则主要包括不锈钢、镍基合金等高性能材料, 如SB450镍基合金, 这类材料具有优异的耐腐蚀性和高温强度, 适用于特殊环境下的压力容器。在设计过程中, 设计者需根据容器的设计温度、压力以及介质特性等因素来选择合适的材料。特别是当设计温度超过材料的蠕变温度时, 材料需降额使用。蠕变是材料在高温下长时间承受恒定应力而发生的塑性变形现象, 它会导致容器壁厚的逐渐减薄和强度的下降。因此, 当设计温度超过蠕变温度时, 设计者需选择更高性能的材料或者增加壁厚以补偿强度衰减。例如, 某液化气储罐原计划选用SA304不锈钢, 但由于ASME VIII-2规范限制其使用温度不得超过427℃, 而实际工作温度可能超过这个限制, 因此设计者不得不通过增加壁厚来补偿因温度升高而导致的强度衰减。

### 2.2 结构分析技术

### 2.2.1 开孔补强设计

开孔是压力容器常见的结构形式,如人孔、接管等。然而,开孔会削弱容器的结构强度,因此需进行补强设计。ASME规范提供了等面积法和极限分析法两种开孔补强设计方法。等面积法是一种基于面积补偿的原理进行补强设计的方法。它要求设计者根据开孔的大小和形状,计算出需要补强的面积,然后通过增加壁厚或设置补强圈等方式来补偿这部分面积。当接管直径 $d$ 与壳体直径 $D$ 的比值小于或等于0.5时,补强面积需大于等于开孔面积,以确保开孔处的结构强度得到补偿。这种方法简单易懂,适用于大多数开孔补强设计。极限分析法则是一种更为精确的分析方法。它考虑了开孔处的应力集中、材料非线性、几何非线性等因素,通过有限元分析等方法来评估开孔处的结构完整性<sup>[2]</sup>。这种方法能够提供更准确的设计结果,特别适用于对结构安全性要求极高的容器。例如,对于高压容器或承受交变载荷的容器,设计者应采用极限分析法来进行开孔补强设计,以确保容器的安全性。

### 2.2.2 疲劳分析

疲劳是压力容器在交变载荷作用下常见的失效形式之一。ASME VIII-2规范要求对在交变载荷下工作的容器进行疲劳分析,以确保其在设计寿命内能够保持结构完整性。疲劳分析通常通过累积损伤计算来进行。设计者需根据容器的实际工作情况,确定交变载荷的幅值、频率以及作用时间等参数。然后,采用合适的疲劳损伤模型(如Miner线性累积损伤模型)来计算容器在给定循环次数下的累积损伤。如果累积损伤超过了一定的阈值(如1),就意味着容器可能会发生疲劳失效。因此,设计者需通过调整结构尺寸、选择更耐疲劳的材料或采用其他措施来降低容器的疲劳损伤。对于化工搅拌釜这类可能承受频繁启停和交变载荷的设备,设计者需特别关注其疲劳性能。他们需验证搅拌釜在 $10^5$ 次循环(或根据实际工作情况确定的循环次数)后的结构完整性,以确保其在长期使用过程中不会发生疲劳失效。

### 2.2.3 非圆形截面容器

非圆形截面容器是压力容器中的一种特殊形式,如矩形截面容器、椭圆形截面容器等。这类容器的结构分析相对复杂,因为它们的应力分布与圆形截面容器存在显著差异。对于矩形截面容器,设计者需计算封头对侧板的加强效应。封头作为容器的端部结构,其形状和尺寸对侧板的应力分布有着重要影响。设计者需通过有限元分析等方法来评估封头对侧板的加强效应,以确保容器在承受内部压力时不会发生侧板失稳或破裂。同时,

设计者还需关注非圆形截面容器在关键部位的应力集中系数。应力集中是容器中应力局部增高的现象,它可能导致容器在这些部位发生裂纹或破裂。因此,设计者需通过有限元分析等方法来验证容器在关键部位的应力集中系数,以确保其结构安全性。如果应力集中系数过高,设计者需采取相应的措施(如增加壁厚、设置过渡圆角等)来降低应力集中。

## 3 ASME 规范在压力容器制造与检验中的应用

### 3.1 制造工艺规范

#### 3.1.1 焊接工艺

焊接是压力容器制造中最常用的连接方法,其质量直接关系到容器的结构完整性和安全性。ASME规范将焊接接头分为A、B、C、D四类,其中A类接头(如纵缝)是容器中最关键的焊接接头,因此要求进行100%的无损检测,以确保其质量。在2023版ASME规范中,对焊接工艺进行了进一步的优化和更新。其中,一个显著的变化是允许在GMAW(气体金属弧焊)焊接中使用保护气体的“氧当量”来替代传统的变量控制。传统的GMAW焊接过程中,需要严格控制保护气体的成分和流量,以确保焊接质量。然而,这种方法在实际操作中存在一定的局限性,如气体成分和流量的波动可能影响焊接质量。而采用“氧当量”控制方法,则可以根据焊接材料的特性和焊接环境的要求,灵活调整保护气体的成分,从而提高焊接工艺的灵活性和适应性<sup>[3]</sup>。此外,ASME规范还对焊接过程中的其他参数进行了详细规定,如焊接电流、电压、焊接速度、焊缝形状和尺寸等。这些参数的选择和控制在确保焊接接头的质量和性能至关重要。制造商必须严格按照规范的要求进行焊接操作,并进行必要的焊接试验和检验,以验证焊接接头的质量和性能。

#### 3.1.2 热处理要求

热处理是压力容器制造过程中不可或缺的一环,它可以消除焊接过程中产生的残余应力,改善材料的组织和性能,从而提高容器的抗裂性和耐腐蚀性。ASME规范对热处理的要求非常严格,规定了热处理的温度、时间和冷却方式等参数。对于一般的碳钢和低合金钢压力容器,焊后通常需要进行应力消除热处理,如将容器加热至 $600^{\circ}\text{C}$ 并保温8小时,然后缓慢冷却。这种热处理可以有效地消除焊接过程中产生的残余应力,防止容器在使用过程中因应力集中而发生裂纹。对于马氏体钢等具有特殊组织转变的材料,ASME规范还要求增加磁粉检测来验证组织转变是否完全。马氏体钢在焊接过程中容易发生组织转变,如未完全转变为马氏体或产生过多的残留奥氏体,都可能影响容器的性能和安全性。因此,通过

磁粉检测可以及时发现并处理这些潜在的问题，确保容器的质量。

### 3.2 无损检测与验收

#### 3.2.1 检测技术应用

随着科技的进步，无损检测技术也在不断发展。2023版ASME规范将超声波相控阵技术纳入了其中，这是一种先进的无损检测技术，可以实现对复杂焊缝的全方位检测。传统的超声波检测技术通常采用单探头或双探头进行扫查，对于复杂形状的焊缝或存在遮挡物的部位，检测效果可能不佳。而超声波相控阵技术则通过多个探头的组合和相位控制，实现对焊缝的全方位、多角度检测，大大提高了检测的准确性和可靠性。举一个实际应用的案例，某热交换器的管板采用超声波检测（UT）替代了传统的射线检测（RT）。由于管板的结构复杂，存在大量的管孔和焊缝，传统的射线检测难以实现对整个管板的全面检测<sup>[4]</sup>。而采用超声波相控阵技术，通过扇形扫查方式，可以覆盖到管板6mm厚的母材热影响区，有效地发现了存在的缺陷和裂纹，确保了热交换器的质量。

#### 3.2.2 人员资质管理

无损检测人员的资质和能力直接关系到检测结果的准确性和可靠性。因此，ASME规范对无损检测人员的资质管理提出了严格的要求。随着SNT-TC-1A标准的更新，ASME规范也相应地对其进行了调整。新的规定要求无损检测人员必须通过雇主的考核，并持有II级或III级认证。II级认证表示检测人员具有独立进行检测操作的能力，并可以对检测结果进行初步的判断和分析；而III级认证则表示检测人员具有更高的专业水平和经验，可以对检测结果进行最终的判定和审核。这一规定确保了无损检测人员的专业素质和检测能力，为压力容器的质量和安全性提供了有力的保障。

### 4 ASME 规范的最新发展动态

ASME规范作为压力容器设计与制造的全球权威标准，始终保持着与时俱进的发展态势，以适应不断变化的工业需求和技术进步。

#### 4.1 2025版重大修订

在即将到来的2025版中，ASME规范将迎来一系列重大修订，其中设计方法论的调整尤为引人注目。ASME VIII-1部分将更多地引用VIII-2的设计规则，形成一个更为统一和简化的“通用规则”体系。这一调整不仅删除了原有的容器分类（Class 1/2），还统一了抗拉安全系数的要求，从而极大地简化了合规流程，提高了设计效率。此外，认证机制也得到了优化。强制附录47修订后，设计的控制权将更多地移交给制造厂，ASME仅保留对关键节点的审核。这一变化体现了对制造厂专业能力的信任，也促进了设计与制造之间的更紧密合作。

#### 4.2 技术融合趋势

在技术融合方面，ASME规范正积极整合数字化工具。例如，引入基于AI的焊接缺陷预测模型，与规范案例库实现联动，大大提升了决策效率。同时，新增的氢脆评估章节，适应了氢能储运设备的开发需求，体现了规范对可持续性的高度重视。这些技术融合趋势将推动压力容器设计与制造行业的进一步发展。

#### 结语

ASME规范通过系统化的设计理论、工艺控制和验证体系，为压力容器安全提供了技术托底。其持续演进机制（如2025版修订）和技术融合趋势，既回应了行业挑战，也为智能制造提供了规范接口。未来，随着氢能、碳捕集等新兴领域的发展，ASME规范将进一步推动压力容器技术向更高参数、更严环保要求方向演进。

#### 参考文献

- [1]李彬楠.试论化工设备压力容器规范设计及发展[J].当代化工研究,2023,(17):147-149.
- [2]唐旭丽,刘青峰,李晓峰.ASME《锅炉与压力容器规范——超压保护规则》分析研究[J].标准科学,2022,(10):75-79.
- [3]苏明.基于压力容器制造要求的我国法规标准与ASME规范对比分析[J].中国特种设备安全,2024,40(09):1-6+36.
- [4]崔跃双,左建云.浅析国内锅炉压力容器焊接标准及ASME焊接规范[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(12):10-12.