

浅谈化工设备压力容器和压力管道规范设计与发展前景

谢晓宇 (莱特莱德 (上海) 技术有限公司和平分公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 化工设备压力容器和压力管道在化工、石油、能源等众多工业领域中占据着极为关键的地位。其主要功能是储存、运输和处理各种具有压力的气体、液体或液化气体等介质, 在化工生产流程中起着承上启下的作用, 直接关系到整个化工生产系统的安全性、稳定性和经济性。本文详细阐述了化工设备压力容器和压力管道规范设计的重要性、遵循的标准规范以及设计的关键环节, 包括材料选择、结构设计、强度计算等方面的专业技术要点。同时, 深入探讨了化工设备压力容器和压力管道在技术创新、智能化、节能环保等方向的发展前景, 旨在为化工设备压力容器及管道的设计、制造、使用与维护等相关领域的专业人员提供全面的理论参考与技术指导, 促进该领域的科学发展与技术进步。

关键词: 化工设备; 压力容器和压力管道; 规范设计; 发展前景

0 引言

随着现代工业的快速发展, 化工生产规模不断扩大, 工艺条件日益复杂, 对化工设备压力容器和压力管道的设计要求也越来越高。规范设计化工设备压力容器及管道成为保障化工生产安全、高效运行的首要任务, 同时, 关注其发展前景有助于推动化工行业的可持续发展与技术创新。

1 化工设备压力容器规范设计

1.1 设计遵循的标准规范

化工压力容器设备的设计过程, 需严格遵循一系列国内外标准与规范。国内主要依据《固定式压力容器安全技术监察规程》(TSG21), 它规定了压力容器设计、制造、安装、使用和检验各环节的安全技术要求。《钢制压力容器》(GB150) 等标准则在材料选用、焊接工艺、无损检测等方面提供补充, 共同构建了中国化工压力容器设计的标准体系。对于化工管道, 国内有《工业金属管道设计规范》(GB 50316) 等标准, 规定了管道材料、布置、应力分析等要求, 确保管道系统在化工生产中的安全稳定运行。随着化工行业的发展, 压力容器和管道的设计规范将不断更新, 以适应新材料、新工艺和新的安全需求, 推动化工设备技术朝着更高效、更安全的方向发展。

1.2 材料选择

在化工设备压力容器的材料选择中, 需确保所选材料具备优异的力学性能, 涵盖强度、韧性及塑性等方面。屈服强度是衡量材料开始显著塑性变形时的应力指标, 而抗拉强度则揭示了材料拉伸极限下所能承受的最大应力水平。设计过程中, 必须依据容器的设计压力、温度等工况参数, 恰当设定材料的许用应力

值, 确保容器服役期间能有效承受内压、外压及多种附加荷载, 避免失效情况的发生。举例来说, 高压容器常选用高强度合金钢, 因其屈服与抗拉强度均较高, 能满足高压环境的承载需求。化工设备压力容器的制造涵盖切割、焊接、成型等多种加工工艺, 材料的可加工性对制造质量和效率具有直接影响。理想的可加工性要求材料在切割过程中不易形成裂纹, 焊接时能形成高质量的焊缝且热影响区范围小, 成型时易于变形且残余应力低。例如, 部分铝合金材料展现出良好的焊接与成型性能, 适用于制造结构复杂的压力容器部件, 但其强度相对较低, 故在实际应用中需权衡其力学性能与可加工性的平衡。

1.3 结构设计

化工压力容器设备的整体构型常见有球形、圆柱形以及圆锥形等形态。在相同体积条件下, 球形容器展现出最小的表面积且受力分布均匀, 因此在高压储存领域应用广泛, 然而, 其制造工艺相对复杂, 成本亦较高。圆柱形容器因其制造简便性而应用最为普遍, 其直径与长度的确定需综合考量工艺需求、运输限制、安装空间等多重因素。圆锥形容器则多用于容器封头与筒体的过渡连接部分, 或某些特定工艺设备, 例如蒸馏塔底部结构。容器尺寸的确定还需兼顾容积需求, 以满足化工生产中的物料储存或反应过程。

封头作为压力容器的重要组成部分, 常见形式包括椭圆形封头、碟形封头、半球形封头以及平盖。椭圆形封头受力分布较为均匀, 制造难度相对较低, 广泛应用于中低压容器。其长轴与短轴之比遵循特定标准, 以确保封头的力学性能。碟形封头由球面部分与过渡环壳构成, 深度较浅, 便于制造, 但在相同压力

与直径条件下，其应力水平相较于椭圆形封头更高。半球形封头受力状态最优，但制造难度与成本均较高，常用于高压或对容器重量有严格限制的场合。平盖结构最为简单，但受力状况最差，通常仅适用于低压、小径且有特殊结构需求的容器。

容器在使用过程中常需开设各类孔，如物料进出口、人孔、手孔、仪表接口等。开孔会削弱容器强度，导致局部应力集中。因此，在开孔设计时，需依据开孔直径、位置、数量等因素进行补强设计。补强方法主要包括补强圈补强、厚壁接管补强以及整体补强。补强圈补强通过焊接补强圈于开孔周围，增加局部强度，为常用方法。厚壁接管补强则采用壁厚较大的接管直接与容器壁连接，利用接管强度弥补开孔处的强度削弱。整体补强则通过加厚开孔处的容器壁或采用锻件等整体结构进行补强，适用于大直径开孔或高压容器等高强度要求的场合。在补强设计过程中，需精确计算开孔处的应力集中系数，并据此确定适宜的补强措施，以确保容器在开孔后仍能满足强度要求。化工管道结构设计要点包括合理选材，依据输送介质特性确定耐腐蚀、耐高温等材质。管道布置应简洁流畅，减少不必要的弯头与变径，考虑热胀冷缩并设置补偿装置。确保连接可靠，如焊接质量达标，法兰连接密封良好，同时精准计算管径与壁厚以满足流量与压力要求。

1.4 强度计算

内压容器的强度计算是化工设备压力容器设计的核心内容之一。根据薄壁容器理论，对于圆柱形内压力容器，其筒体的壁厚计算公式为：

$$t = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t\varphi - p}$$

其中： t 为筒体壁厚， p 为设计压力， D_i 为容器内径， $[\sigma]^t$ 为设计温度下材料的许用应力， φ 为焊接接头系数。该公式基于容器筒体在均匀内压作用下的环向应力和轴向应力分析得出，通过合理确定各参数的值，计算出满足强度要求的筒体壁厚。对于封头的强度计算，不同形状的封头有相应的计算公式，如椭圆形封头的壁厚计算公式与筒体壁厚计算公式有所不同，且需考虑封头的形状系数等因素。在强度计算过程中，还需考虑温度对材料性能的影响，对许用应力进行温度修正，以确保容器在设计温度范围内的安全运行。外压容器的失效形式主要是失稳，即在外压作用下容器壁发生突然的皱曲变形。外压容器的强度计算重点

在于确定其临界失稳压力。对于圆柱形外压力容器，可根据长径比将其分为短圆筒、长圆筒和刚性圆筒等不同类型，分别采用不同的计算公式计算临界失稳压力。例如，对于长圆筒，其临界失稳压力计算公式为：

$$p_{cr} = \frac{2.2E}{(D_o/t)} \left(\frac{t}{D_o} \right)^3$$

其中： p_{cr} 为临界失稳压力， E 为材料的弹性模量， D_o 为容器外径， t 为容器壁厚。在实际设计中，为保证外压容器的稳定性，通常取设计外压小于临界失稳压力，并根据计算结果确定合适的壁厚和加强圈等结构措施。加强圈的设置可提高外压容器的临界失稳压力，其间距和截面尺寸需通过计算确定，以在满足稳定性要求的前提下，尽量减少材料消耗和制造成本。

1.5 密封设计

化工设备压力容器的密封构造主要包含强制密封、自紧密封以及半自紧密封几种形式。强制密封机制依赖于螺栓预紧力，将密封垫片紧密贴合于密封面，从而阻止介质外泄，实例包括平垫密封和八角垫密封等。此类密封构造虽设计简洁，但其密封效能却高度依赖于螺栓的预紧力，且在面对压力波动或温度变化时，易发生泄漏现象。相比之下，自紧密封构造则是利用容器内部介质压力促使密封元件产生自紧效应，进而提升密封性能，如金属O形环密封和楔形环密封等。自紧密封在高压、高温操作条件下展现出良好的密封效果，然而，对密封元件的制造精度与安装标准有着较高要求。半自紧密封则介于强制密封与自紧密封之间，例如双锥环密封，它既运用了螺栓预紧力，又借助介质压力来增强密封效果，因此在中高压容器中得到广泛应用。密封垫片作为密封构造的核心组件，其材质的选择对密封性能具有直接影响。密封垫片常用的材料涵盖了非金属材料、金属材料以及金属-非金属复合材料等多个类别。

非金属材料，例如石棉橡胶板和聚四氟乙烯，具备出色的柔韧性和密封性能，适用于中低压、常温或低温操作环境，但在高温和高压条件下的耐受性较差。金属材料，诸如不锈钢、铜、铝等，则以其高强度和耐高温、高压性能著称，常用于高温、高压容器的密封，然而，金属垫片的密封性能对密封面的加工精度有着严苛要求。金属-非金属复合材料则融合了前两者的优势，例如金属缠绕垫片，由金属带与非金属填充材料组合而成，兼具良好的密封性能、强度和耐高温性，

在化工设备压力容器中得到了广泛应用。在选取密封垫片材料时,需全面考量容器的压力等级、温度条件、介质特性以及密封面的粗糙度等因素,以确保密封的可靠性和持久性。

2 化工设备压力容器的发展前景

2.1 技术创新推动设计优化

随着材料科学、计算力学及制造工艺等领域的持续进步,化工设备压力容器的设计领域正迎来诸多创新契机。新型材料的涌现为容器设计拓宽了选材范围,尤其是高强度、高韧性且耐腐蚀性能优异的新型合金材料,有望显著提升容器的承载能力及服役寿命。在计算力学领域,有限元分析等数值模拟技术的日益精进,使得容器设计计算更为精确。通过详尽模拟容器在复杂工况下的应力-应变分布,可以优化结构设计,降低材料消耗,并提升设计效率。此外,先进制造工艺,诸如增材制造(3D打印)技术,在化工设备压力容器制造领域展现出广阔应用前景。3D打印技术能够实现复杂结构的一体化成型,减少焊接等传统工艺带来的缺陷,进而提升容器的整体质量和性能。

2.2 智能化发展趋势的显现

智能化已成为当前工业发展的主流趋势,化工设备压力容器亦正向智能化方向迈进。智能传感器的应用使容器能够实时监测压力、温度、液位及应力等运行参数,并将数据传输至控制系统。控制系统通过对数据的分析与处理,实现对容器运行状态的实时评估与预测,及时发现潜在安全风险,并采取相应的调控措施,如自动调节工艺参数或发出警报通知维护人员。同时,智能化的维护管理系统应运而生,通过对容器历史运行数据、维护记录等信息的整合分析,制定个性化的维护策略,提高维护效率,降低维护成本,延长容器使用寿命。智能化化工设备压力容器的发展将极大提升化工生产的安全性、可靠性及智能化程度。

2.3 节能环保要求驱动绿色设计

在全球倡导节能环保的背景下,化工设备压力容器的设计愈发注重绿色环保理念。在制造过程中,采用节能环保的工艺技术,减少能源消耗及污染物排放,如应用新型焊接技术降低电能消耗及有害气体排放。在设计层面,优化传热结构,提高热交换效率,减少热量损失,如开发高效的换热容器,充分利用化工生产过程中的热能,降低对外部能源的依赖。对于储存及处理易挥发、有毒有害介质的容器,加强密封设计,并应用先进的泄漏监测技术,防止介质泄漏对环境造

成污染,推动化工设备压力容器的绿色设计与可持续发展。

3 压力管道规范设计和应用前景

在化工领域,压力管道规范设计依据国内的《工业金属管道设计规范》(GB 50316)以及国际上的ASME B31系列等标准。设计时,需精确计算管道壁厚,考虑压力、温度、介质腐蚀等因素,确保管道能承受内压与外力。管道布置要结合工艺流程,避免积液、积气,保证流体顺畅输送。同时,注重管道连接方式的选择,如焊接、法兰连接等,确保密封性能。

从应用前景来看,随着化工行业向大型化、精细化发展,压力管道设计将面临更高挑战与机遇。新型材料的应用有望提升压力管道的耐腐蚀性与强度,数字化技术可实现管道设计、施工与运维的智能化管理,提高效率并降低成本,推动化工管道技术不断革新与进步,在未来化工工程中发挥更为关键的作用。低建设成本。

4 结束语

化工设备压力容器和压力管道的规范设计,是化工生产安全稳定运行的核心要素。对于压力管道而言,在遵循相关标准规范时,需依据输送介质特性进行精准选材,综合考虑管径、壁厚与布局走向,严格把控焊接、法兰连接等环节的质量以保障密封性能。无论是压力容器还是管道,在材料选择上都要兼顾强度与耐腐蚀性;结构设计时,容器要注重整体稳固性与内部空间利用,管道则要确保流体输送高效且无阻碍;强度计算需结合压力、温度等复杂工况;密封设计要做到万无一失。相关专业人员应紧跟发展潮流,及时吸纳新的设计理念、技术手段与标准规范,为行业进步添砖加瓦。

参考文献:

- [1] 谌绍晨. 化工设备压力容器及管道破坏原因与预防策略探讨[J]. 中国设备工程, 2023(20):191-193.
- [2] 李彬楠. 试论化工设备压力容器及管道规范设计及发展[J]. 当代化工研究, 2023(17):147-149.
- [3] 梁富维, 金鑫, 唐好斌, 刘志鹏. 试论化工设备压力容器及管道规范设计及发展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(12):5-6.

作者简介:

谢晓宇(1990-),男,汉族,辽宁抚顺人,统招本科,工程师,研究方向:化工设备。