

# 压力容器在石油化工业设计中的相关技术分析

周柏峰

镇海石化建安工程股份有限公司 浙江 宁波 315207

**摘要:** 作为石油化工业核心装备体系的关键构成单元, 压力容器的设计技术体系直接影响到工业生产过程中的安全性、运行效率及环境友好性能。本文聚焦于石油化工业领域压力容器设计技术的研究框架, 系统阐述当前材料工程应用、结构设计理论、制造工艺体系等技术维度的发展现状, 深入剖析高温高压腐蚀环境下的材料失效机制、复杂载荷条件下的结构应力分析难题、全生命周期安全评估体系构建等关键技术瓶颈。针对上述技术挑战, 从先进材料研发与腐蚀防护技术创新、智能化设计方法与多物理场耦合分析、全流程安全监测体系构建及绿色节能设计策略等方面提出系统性解决方案, 以期对石油化工业装备领域的技术创新与工程实践提供理论参考与应用借鉴。

**关键词:** 压力容器; 石油化工业工程; 设计理论与技术; 安全评估体系; 腐蚀防护技术

石化产业向着装置大型化(百万吨级乙烯装置)、运行智能化(数字化工厂)的方向不断纵深推进, 压力容器设计要求不断提高安全性指标、更长的服役寿命周期和更加严苛的经济性能等。鉴于工程实践案例的代表性, 在系统阐述压力容器设计技术发展历程的基础上, 通过总结归纳典型工程案例经验教训, 结合案例实际情况, 聚焦于高风险区域及关键部位, 详细分析了压力容器设计的关键技术难题及其优化途径, 以期对石油化工业设备实现本质安全可靠提供理论支撑和实践经验, 促进生产活动的开展。

## 1 压力容器设计技术应用现状

### 1.1 材料选择与应用体系

众所周知, 石油化工业的压力容器材料选型是其复杂的工程任务, 不同参数和性能的选择都需要综合考虑力学性能、耐腐蚀性能、工艺性能等多个方面的技术指标, 还需要从材料的角度分为两大类: 即, 金属基材料和复合材料。对于属于金属基材料分类来说, 低合金高强钢由于其较高的强度及很好的焊接性而成为了制造中高压容器的材料主体; 奥氏体不锈钢因为耐腐蚀性强, 被应用到了接触酸碱介质的反应容器的制作过程中; 镍基合金由于在高温高压和强腐蚀等苛刻条件下工作性能良好而被用于一些重要设备的制造。

虽然纤维增强塑料的复合材料体系承压能力存在一定的缺陷, 但因其具有较低密度及较好的化学稳定性, 所以更适于用于非承压或者低压辅助设备的制作与生产, 在这方面也得到了较为广泛的应用, 在选用材料时, 应根据使用的介质、介质的温度、工作压力等各种指标, 通过系统地测试各种材料的性能和数值模拟来建立一套完整的材料服役性能评价体系, 保证了压力容器

全寿命周期的可靠性和工作的稳定性。

### 1.2 结构化设计理论与关键技术

压力容器的结构设计是实现设备安全可靠运行和使用功能的核心要素, 承压安全性和功能适用性原则并重, 包含基础结构选型、管口附件布置和密封系统设计三个部分, 根据所需耐压强度确定基本结构选型; 综合考虑各主参数工况条件下的载荷类型(内压、外压、交变载荷)以及所用材料, 在理论上借助材料力学或弹性力学计算方法对其结构力学性能进行定量校核计算或求解, 以此来确定主体结构尺寸和配筋布置, 并做好合理的优化设计。

管口附件设计要考虑工艺管道连接、仪表安装调试等多种功能, 结合标准法兰接口及密封面设计, 形成科学合理的连接可靠性保障体系。其次需要注意的是, 密封系统是防止介质泄漏的最后一道关卡, 而它的优劣将直接影响到设备运行是否安全可靠。对于中高温工况来说, 采用半金属密封件因其具有优良的热稳定性以及密封性能, 且相比金属对金属密封容易磨损这一缺点有极大的优越性; 对于高温高压等极特殊工况, 使用自紧式密封结构由于利用了压力自补偿的特点, 大大减小了密封失效的概率, 为设备提供了可靠的运行保障。

### 1.3 制造工艺体系与标准化建设

压力容器制造是典型的一个复杂系统工程, 其质控体系包括材料复验、机加工、焊接成形、热处理、无损检测等全生命周期中的所有关键工序, 每一个环节的质量控制都直接影响产品的服役安全性和结构可靠性。焊接工艺由于是联系着容器自身完整性的核心技术要素, 在利用母材成分-组织-性能关系模型的基础上, 结合服役环境力学和化学耦合载荷的特点, 建立焊接材料-工艺

参数匹配模型,并严格按照焊接工艺评定标准来开展工作,实施焊接材料-工艺参数的全过程质量追溯,确保焊缝金属力学性能、微观组织以及耐蚀性能方面均达到设计规范的要求。就制造标准体系而言,国际上ASME锅炉及压力容器规范与国内GB150《压力容器》的材料许用应力准则、焊接接头系数评价方法、检验验收指标等方面有着较大差异,在实际应用中可以根据项目的技术指标和经济约束条件,通过规范比对和利用技术等效性等方法,建立起与项目相适应的制造技术解决方案,使压力容器的制造过程能够实现安全性和经济性同步最优化。

#### 1.4 智能化设计工具的工程应用

当代压力容器设计,是以计算机辅助设计(CAD)和数值仿真为主要手段的压力容器设计。使用参数化建模理论建立的三维设计系统,采用特征驱动的几何建模方法,能够胜任压力容器开孔补强结构优化设计、支座型式变化等复杂任务;而运用有限元分析(FEA)技术,建立精度高的精细化力学模型,结合非线性材料本构关系、多物理场耦合算法等手段,可以在复杂工况条件下得到精确的应力应变场,为其结构强度校核和优化设计提供理论基础;值得一提的是,在工程应用中,一些前沿的企业开始采用基于模型的系统工程(MBSE)的方法,融合材料科学、结构力学、制造工艺等多个学科的知识进行协同设计,并利用数据驱动完成设计流程再造,达到提高设计效率、压缩项目周期的目的。

### 2 压力容器设计技术难点

#### 2.1 极端工况下的材料失效挑战

高温高压、强腐蚀等极限工况下材料失效涉及多因素、多源耦合失效,以氢致开裂(HIC)及应力腐蚀开裂(SCC)为代表的典型的失效模式均为两因素耦合失效:其中HIC的本质为氢原子在晶界聚集并扩散而使材料韧性的大幅劣化,导致材料脆性断裂;SCC则是在拉应力场与腐蚀性介质联合作用下的亚临界裂纹扩展而导致的结构失稳破坏。随着石油化工行业新技术、新工艺的发展,具有较高反应活性介质体系的不断出现,传统的金属材料已无法满足其化工生产中有关材料的要求,二者之间的化学相容性问题愈加凸显。但是由于现有腐蚀数据库未将这类新型介质的相关腐蚀行为特征参数纳入数据库,在工程选材时缺少完善的基础理论支撑体系,化工装置使用过程中难免会出现一些意料之外的腐蚀失效现象。

#### 2.2 复杂结构应力分析的技术瓶颈

容器开孔接管区、法兰连接区等部位由于存在几何形状突变,容易引起应力集中。传统的基于薄膜应力的

计算方法没有考虑到三维结构和非线性的影响,在该区域内采用传统的基于薄膜应力的方法,不能得到该处应力的准确值,只能得到近似值。为了能够得到该处更准确的应力分布情况,在本课题中利用三维有限元分析方法,应用多物理场耦合手段建立精细化的数值模型来求解其应力分布情况。

此外,针对动态载荷工作工况下,例如因管道振动引起的交变应力造成的疲劳损伤问题等,目前尚无较为完善的设计计算理论,工程上通常都是按照经验系数简化设计,这样虽然设计疲劳寿命会比实际服役寿命要多出一定时间,但是因为没有考虑到具体的工作环境、工况以及材料本身在质量上的差异等问题,因此很有可能造成设备安全不稳的风险。

#### 2.3 安全评估体系构建的关键问题

在压力容器制造过程中,焊接气孔、夹渣等微观缺陷是不可避免的。目前针对这些缺陷的无损检测标准都是定性的验收标准,并没有建立集缺陷几何参数(大小、空间位置)和服役工况条件下定量的安全评价理论模型,因此不能准确预测其对结构疲劳寿命和断裂力学性能的影响。此外,传统的离线检测存在滞后性的问题,无法对容器服役过程中缺陷的变化进行跟踪测量;虽然已经实现了在线监测技术在工程上的运用,但是由于传感器集成度不高,多源监测信号之间耦合的分析模型不够完善,所以也无法满足诊断出非正常工况下的滞后的缺点,这就不可能完全适应本质安全型企业对于设备全生命周期健康管理的技术需求。

### 3 压力容器设计技术难点对策

#### 3.1 材料技术创新与腐蚀防护升级

由于材料易遭受到极端腐蚀环境而损坏,如何开发出具有优异抗腐蚀能力的新材料,是急需突破的重点和难点之一。可重点针对纳米合金改性材料和复合增强材料体系,在晶粒细化技术的基础上改善材料微观组织,应用界面工程技术调节相界面相容性;结合表面陶瓷涂层技术和梯度复合防护技术,形成基体—过渡层—陶瓷面层多级防护体系,阻止腐蚀介质进入材料内,保证材料长时间稳定服役;并基于腐蚀影响因素参数、腐蚀性能数据和腐蚀失效数据三大类数据创建相关数据库,借助机器学习技术实现腐蚀速率预测,为新材料的选择与腐蚀防护措施的制订提供量化的参考。

#### 3.2 结构设计优化与智能化分析

利用多物理场耦合分析理论体系建立同时包含流体力学场、传热学场和固体力学场的跨学科仿真模型,并开展了高温流体介质在容器内的流场分布特性以及其

与壁面间的传热规律的研究工作,运用应变场数值计算的结果建立热—结构耦合下基于热—结构耦合效应的参数优化模型,实现了压力容器主要结构参数的多目标协同优化设计。通过模态分析法,将结构动力学方程建立起来,并通过改变接管的几何尺寸和改变支撑系统的刚度矩阵的方法,优化了结构固有频率分布;同时,采用了金属波纹管补偿器等被动式隔振装置,在进行动态响应分析的基础上建立起疲劳寿命预测模型,有效地抑制结构共振效应的发生,大大地减小了接管处的疲劳应力强度因子幅值,提高压力容器接管结构的疲劳可靠性。

### 3.3 智能化安全评估与监测体系构建

基于断裂力学理论框架和数字孪生技术体系,建立缺陷尺寸参数和剩余寿命的定量关系数学模型,以Paris公式为基本模型,结合压力容器材料特性参数,利用有限元方法求解不同缺陷形貌的应力强度因子;同时利用数字孪生技术将真实的压力容器设计参数、制造工艺数据及历史检测数据等多源数据进行数字化映射,形成与物理实体高度一致的虚拟模型。

通过引入实时工况数据流驱动虚拟模型的动态更新,来实现压力容器缺陷演化过程的高精度数值模拟以及剩余寿命的可靠预测。首先,建立基于IoT的实时数据采集系统,实现实时采集压力容器的压力、温度、介质成分等运行参数;其次,应用数据同化算法将实时监测数据嵌入到虚拟模型中,通过对模型参数的不断调整,实现实时更新和修正模型以完成缺陷扩展过程的动态模拟;最后,使用蒙特卡洛模拟方法考虑材料性能、载荷工况等因素的不确定性,对残余寿命进行概率预测,并给出各置信度水平下的寿命预测区间。

基于边缘计算架构、云端机器学习算法的AI智能风险预警模型,实现了对异常信号的提前预警和分级预警功能;在边缘侧运行轻量化机器学习模型,对采集的数据完成预处理及初级分析,迅速捕捉到明显异常信号;将处理后数据传至云端通过DNN及LSTM等深度神经网络完成历史数据和实时数据的联合分析,发现并探索数据中异常信号的风险发展演变规律;依据风险等级划定的

标准,形成红、橙、黄、蓝四个预警等级,采取不同的措施维护各个等级的压力容器设备;从压力容器全寿命周期的角度,通过上述方法保障压力容器的安全运转。

## 4 结论

压力容器设计技术作为石油化工产业的核心支撑技术,其发展进程与工况条件复杂化、安全规范严格化及节能环保指标提升的挑战紧密交织。历经长期技术积累,该领域在材料工程、结构设计、制造工艺及安全监测等方向已构建起相对完备的技术体系架构。然而,在极端环境适应性表征、复杂载荷耦合响应机制解析、智能化安全评估模型构建等关键环节,仍存在亟待突破的技术壁垒。

面向未来技术演进方向,需从以下维度开展系统性研究:其一,材料技术创新层面,应加速推进纳米合金、复合增强材料的工程化应用进程,同步构建覆盖全工况条件的腐蚀行为预测数据库;其二,设计方法革新维度,着力深化多物理场耦合分析理论与数字孪生技术的融合应用,搭建智能化设计集成平台;其三,制造工艺优化领域,重点发展增材制造(3D打印)、机器人焊接等先进制造技术,通过工艺参数精细化调控提升加工精度与生产效率;其四,安全体系完善方向,构建基于人工智能算法的全生命周期监测预警系统,实现设备缺陷演化规律的定量分析与主动防控。通过多学科交叉融合与工程实践迭代优化,有望显著提升压力容器装备的可靠性、经济性及环境适应性,为石油化工产业的高质量发展提供坚实的技术支撑。

## 参考文献

- [1]陈旭,马文江.压力容器在石油化工行业设计中的相关技术[J].装备维修技术,2020,(01):16.
- [2]石璐.压力容器在石油化工行业设计中的相关技术分析[J].化工管理,2018,(01):77.
- [3]乔辉,王建波,陈晶.压力容器在石油化工行业设计中的相关技术分析[J].中国石油和化工标准与质量,2014,34(11):69.