

化工工程压力管道设计中的核心挑战与创新解决路径

郑英霞 毕松松 (滨化工程技术(山东)有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要: 在能源输送中, 管道运输占有重要位置, 尤其是输送石油、天然气的长输管道。作为现代工业的生命线, 管道输送对于保障能源供应稳定和确保国家能源安全起到了不可替代性的作用。然而, 由于复杂工况、特殊介质以及严苛的工艺要求, 压力管道设计面临着材料选择难、布置优化难、安全评估复杂等诸多挑战。随着现代技术的发展, 针对这些问题的创新解决路径逐渐显现, 包括先进材料的应用、数字化技术的引入、模块化设计的推广以及智能监测系统的嵌入等。文章聚焦压力管道设计中的核心挑战, 探讨从技术、管理和协同创新等方面入手的解决策略, 以期为提高化工工程压力管道设计的科学性和实践性提供参考。

关键词: 化工工程; 压力管道; 设计挑战; 创新路径; 安全性; 数字化技术

石油作为现代经济社会中的主要能源之一, 石油化工管道设计的合理性和科学性, 往往影响着石油的输送效率, 关系到石油运输成本。石油化工管道设计要考虑多方面因素, 既要保证合理性, 同时也要突出安全性和稳定性。但其设计往往受到多种复杂因素的制约。高温、高压和腐蚀性介质的存在, 使得材料选择成为一项充满技术难度的工作; 设备密集的厂区环境, 又对管道布置的合理性提出了更高的要求。此外, 现代化工厂对生产安全的严格要求, 进一步推动了管道设计向高精度、高可靠性方向发展。在此背景下, 如何应对技术挑战并结合现代创新手段完善压力管道的设计方案, 成为化工工程领域的重要课题。

1 化工工程压力管道设计的核心挑战

1.1 复杂介质和苛刻工况对管道材料选择的挑战

化工工程中输送的介质种类复杂, 包括高腐蚀性酸碱溶液、高温高压气体以及毒性和挥发性物质。这些介质的物理化学特性对管道材料提出了极高的要求。输送高腐蚀性介质时, 材料必须具备出色的抗腐蚀性能。例如, 浓硫酸对碳钢的腐蚀速率可达 0.1mm/a , 常规材料无法满足其使用寿命要求。高压氢气环境中的氢脆效应也对材料的韧性和强度形成威胁, 增加了材料断裂的风险。此外, 高温工况下的管道需要材料在长期暴露于 600°C 甚至更高温度时保持结构稳定和抗氧化能力, 而普通钢材在此类工况中容易发生蠕变和热疲劳失效。因此, 化工工程压力管道在材料选择上面临极为复杂的技术挑战, 不仅要求材料耐腐蚀、耐高温, 还需具备抗氢脆和抗疲劳性能, 以适应多样化的苛刻工况。

1.2 管道布置与空间优化的设计难题

管道是石油化工行业中重要的设备, 承载石油输

送的重要任务, 由于石油自身的性质比较特殊, 所以对于管道的设计水平有较高的要求。为了保证石油输送工程的正常运行, 压力管道的布置需要满足复杂的工艺要求, 这一过程中充满挑战^[1]。首先, 压力管道布置必须兼顾工艺流程的连续性和布局的紧凑性, 同时最大限度地减少压力损失。然而, 由于管道路径受限, 过多的弯管设计容易增加流体阻力, 导致能量损耗和内壁局部磨损。其次, 管道支吊架的设置也是一个难点。如果支吊架间距设计不当, 可能会引发管道的挠曲变形或应力集中, 影响管道的稳定性和寿命。此外, 管道交叉布置时, 不同工艺管道的优先顺序难以明确, 尤其是在涉及高温高压管道时, 其支撑、隔热和运行空间的协调更具挑战性。因此, 如何在空间有限的情况下, 科学合理地优化管道布置, 成为化工工程压力管道设计中亟待解决的难题之一。

1.3 管道安全性与可靠性评估中的不足

化工工程中的压力管道常处于复杂的动态工况和多变的外部环境中, 这些因素对管道的安全性和可靠性评估提出了严峻挑战。首先, 输送振动性强的介质(如气液两相流或高压脉动流)时, 管道系统容易产生振动疲劳效应, 尤其当振动频率接近管道固有频率时, 会发生振幅放大的共振现象, 导致焊缝局部开裂甚至管道断裂。其次, 传统的有限元法应力分析模型主要针对静态工况或简单的加载情况, 难以动态模拟长时间运行过程中振动、疲劳等复杂现象的积累效应。再者, 化工厂区的外部环境中, 温差变化、机械冲击和地基沉降等不确定性因素, 均可能导致管道材料性能的退化或结构的变形, 进一步增加管道泄漏、破裂的风险。总体来看, 目前的评估方法在多工况下的适用性不足, 难以全面覆盖压力管道在长期运行中的复

杂安全问题^[2]。

1.4 设计规范与标准化不足的制约

在国际化化工工程项目中，压力管道设计规范的不一致性成为重大制约因素。不同国家和地区在设计规范上存在显著差异，例如，各个国家系列标准在材料选择、焊接工艺以及强度计算方法方面的要求各不相同。这种差异往往增加了国际工程项目设计和施工的复杂性，导致跨区域实施时需要管道设计进行重复验证和调整，不仅延长了项目周期，还提高了成本。同时，缺乏统一的标准化模块设计也带来了额外挑战，如在管道组件更换或维修过程中，由于接口标准和尺寸规格不一致，可能导致施工效率低下和备件库存需求增加。这些问题反映出现有设计规范和标准化体系难以满足全球化项目实施的需求，对管道的安全性和经济性造成不利影响。

2 化工工程压力管道设计的创新解决路径

2.1 先进材料的研发与应用

新材料的研发在压力管道的优化设计中发挥了重要作用，为应对复杂工况和提高管道性能提供了技术支撑。近年来，高熵合金因其优异的抗腐蚀性、耐高温性能以及在高压环境下的稳定性，逐渐成为化工工程中的重要选择。这类材料通过多元合金化策略，形成了独特的晶体结构，显著提高了抗氧化性和抗氢脆能力。例如，在某大型石化装置中，高熵合金材料成功替代传统的 Cr-Mo 钢，用于输送高压氢气，不仅提高了抗腐蚀能力，还延长了设备运行寿命。

复合材料的应用也在化工压力管道设计中获得了广泛关注。玻璃钢(FRP)和碳纤维增强聚合物(CFRP)因其重量轻、强度高、耐腐蚀性强，逐渐在低压管道领域普及。例如，在酸性废水输送管道中，传统不锈钢管道因长期接触酸性介质容易发生点蚀，而 FRP 管道通过耐酸树脂层与玻璃纤维的复合结构，在延长寿命的同时降低了系统维护成本。某化工企业在其废酸回收系统中全面采用 FRP 管道，使用寿命从原来的 8 年提高到 15 年以上，同时减少了近 30% 的材料成本。

智能材料的引入则为管道系统的自主修复和长期可靠性提供了突破性解决方案。自愈合聚合物材料是一种能够在细微损伤发生后通过化学反应或分子重排实现自动修复的材料。在高腐蚀介质管道中嵌入此类材料后，当管道表面产生微裂纹时，自愈合层可以自动填补裂缝，防止介质泄漏。

2.2 基于数字化技术的管道设计优化

数字化技术的应用为压力管道设计带来了全面优化的可能性，使设计流程更加高效、精确，并能满足复杂工况的需求。

建筑信息建模(BIM)技术通过三维可视化设计，为管道布局优化提供了重要支持。BIM 技术直观呈现管道布局、设备布置和支吊架设计，并在设计阶段进行冲突检测和路径调整。例如，在某石化项目中，通过 BIM 技术优化高压蒸汽管道布局，发现支吊架位置与设备支撑结构冲突。调整后，不仅避免了返工，还减少了支吊架数量，提高了布置经济性和施工效率，同时为后期维护提供了更大的操作空间。

管道流体模拟(CFD)技术则在优化管道流体特性方面发挥了关键作用。CFD 通过精确分析介质流动特性，优化管径、流速及分支结构的设计，确保流体流动稳定并减少能量损耗。在某化工项目中，CFD 模拟显示原设计中管径偏小导致流速过高，增加了压力损失和能耗。调整管径后，压力损失显著降低，设备能耗减少近 15%，年运行成本降低了近百万元。这充分体现了 CFD 技术在管道优化中的技术和经济价值。

此外，大数据与人工智能(AI)技术正在为压力管道设计参数优化提供新的途径。通过挖掘大量历史运行数据，AI 技术能够快速识别设计问题并提出优化建议。例如，在某化工企业的高温高压管道设计中，AI 模型预测了不同工况下的应力分布，建议在关键位置采用多级支撑结构以分散应力，显著降低了疲劳失效风险，延长了管道使用寿命，进一步提高了设计科学性和准确性。

2.3 模块化与标准化设计的推广

模块化与标准化设计是提升压力管道设计效率和施工质量的重要手段。模块化设计通过在工厂预制标准化管段和部件，简化了施工现场的安装流程，显著缩短施工周期并降低人力与物料成本。例如，在某跨国化工项目中，团队将复杂的压力管道系统划分为多个标准模块，包括弯头模块、法兰模块及支吊架模块。这些模块在工厂完成预制和质量检测后直接运输至现场组装，与传统现场焊接方式相比，施工周期缩短了 20%，焊接工作量减少了 30%，不仅保障了管道质量和一致性，还降低了现场安全隐患^[4]。

标准化设计在国际化项目实施中同样具有重要意义。由于各国压力管道设计规范和施工标准存在差异，跨国项目中常面临设计协调和接口匹配的挑战。例如，

在某中东化工项目中，中国团队与当地工程公司合作，制定了一套通用的标准化设计方案，包括统一的管道材质、法兰接口和支吊架规格。这种标准化设计确保了管道模块在不同工地间的无缝衔接，提高了项目执行效率。

模块化与标准化的结合还显著降低了维护成本。在某大型石化工厂扩建项目中，采用可重复利用的标准化模块设计，使工程师能够快速拆卸和更换受损部件，而无需对整个系统进行大规模停产拆解。这种设计方案将停工时间缩短了 40%，维护成本大幅降低，同时提高了设备的运行效率和经济效益。通过模块化与标准化的推广，为复杂化工项目的实施提供了可靠支持。

2.4 智能监测系统的嵌入与故障预防

智能监测系统的应用为压力管道的实时状态监控和故障预防提供了强有力的技术保障。通过在管道表面安装高精度传感器，可以对温度、压力、振动等关键参数进行实时监测，并在异常情况下发出警报。例如，在某化工厂的高压输送管道系统中，采用了基于光纤布拉格光栅（FBG）技术的传感器阵列，对管道内部压力的微小波动进行实时检测。一次检测过程中，系统捕捉到压力异常上升趋势，并通过数据分析预警可能发生泄漏的风险。维护团队迅速定位问题区域并进行修复，成功避免了一次高压泄漏事故，挽回了潜在的重大经济损失。

此外，人工智能（AI）技术的嵌入显著提升了管道故障诊断的效率和准确性。基于 AI 的智能诊断平台通过对实时监测数据的分析，能够快速识别管道运行中的异常状况，例如振动频率异常或温度分布不均等问题，并生成具体的维修建议。在某大型化工园区，智能诊断平台帮助预测了一条长距离输送管道的焊缝疲劳失效风险，为维护团队提前规划维修时间提供了关键依据。

3 压力管道设计中的多维协同创新

3.1 工艺与管道设计的深度融合

化工工艺参数是压力管道设计的核心依据，管道设计必须与具体的工艺流程紧密结合，才能实现系统的高效运行^[1]。例如，某石化企业在设计其乙烯裂解装置的管道系统时，根据裂解反应的温度、压力和流速需求，优化了介质流速和温控系统。通过精确计算反应物的输送速率和热损耗，将关键管道段设计为双层保温结构，有效控制了介质温度波动，提高了工艺

效率。此外，工艺设备和管道设计的耦合优化还能够显著降低能耗。例如，在某精细化工生产过程中，设计团队采用了热交换管道系统，将高温排放气体的余热回收，用于预热原料介质。这种设计不仅减少了锅炉加热的能耗，还提高了设备的热利用效率，整体效益提升了 20% 以上。

3.2 多学科交叉合作的创新模式

材料工程、结构工程与自动化工程的协作为压力管道设计开辟了更多可能性。这种多学科交叉的创新模式，不仅增强了管道设计的技术深度，还拓展了其应用范围。例如，自动化技术与智能控制系统的结合，使管道系统能够根据实时监测数据进行自适应调整，动态响应工况变化。在某化工厂高压蒸汽输送系统中，智能控制系统通过压力传感器监测变化，自动调节管道阀门的开闭，从而保持压力稳定并优化能耗。与此同时，环境科学在管道设计中的应用越来越受到重视。通过结合环境科学的理念和方法，设计团队能够优化管道布局，以减少对周边生态环境的影响。

4 总结

化工工程压力管道的设计涉及多重挑战，包括材料选择、布置优化和安全评估等，然而，通过先进材料的研发与应用，压力管道在耐腐蚀性、抗高温和使用寿命方面得到了显著提升；数字化技术的引入，使管道设计在布局优化、流体性能分析和参数预测上更加高效和精准；模块化设计的推广显著缩短了施工周期，提升了工程质量和一致性；智能监测系统的嵌入更是实现了实时状态监控和故障预防，大幅提高了运行的可靠性和安全性。

参考文献：

- [1] 王永亮. 石油化工压力管道设计中相关安全问题分析 [J]. 当代化工研究, 2024(20):34-36.
- [2] 何杰. 压力管道设计中的安全隐患及优化措施 [J]. 石化技术, 2023,30(06):120-122.
- [3] 彭翠君. 石油化工压力管道设计过程及要点的分析 [J]. 化学工程与装备, 2023(05):104-106.
- [4] 袁红. 模块化设计在化工工程中的应用 [J]. 上海化工, 2024(05):09-11.

作者简介：

郑英霞（1989-），女，汉族，山东济南人，本科，工程师，研究方向：化工工艺及管道设计。

毕松松（1988-），男，汉族，山东滨州人，本科，工程师，研究方向：化工工艺及管道设计。