

石油化工工艺管道设计中管线试压技术的运用

王凡青（山东豪迈机械制造有限公司，山东 潍坊 261500）

摘要：管线试压技术是石油化工工艺管道设计、施工与验收中的核心环节，对保障管道系统的安全性与可靠性具有重要意义。本文系统梳理了试压技术的分类、参数设计原则及特殊工况适配策略，探讨了试压技术与工艺管道设计的协同优化路径。通过典型案例分析，总结了试压技术在石油化工领域的应用现状与挑战，并展望了未来发展方向，包括智能化、绿色化及标准化试压技术的推广与应用。

关键词：管线试压技术；石油化工；工艺管道设计；协同优化

中图分类号：TE973.6 文献标识码：B 文章编号：1674-5167（2025）015-0102-03

The Application of Pipeline Pressure Testing Technology in the Design of Petrochemical Process Pipelines

Wang Fanqing (Shandong Himile Mechanical Manufacturing Co., Ltd., Weifang Shandong 261500, China)

Abstract: Pipeline pressure testing technology is the core link in the design, construction and acceptance of petrochemical process pipelines, which is of great significance to ensure the safety and reliability of pipeline systems. In this paper, the classification of pressure testing technology, the principle of parameter design and the adaptation strategy of special working conditions are systematically sorted out, and the collaborative optimization path of pressure testing technology and process piping design is discussed.

Keywords: Pipeline pressure testing technology; Petrochemical industry; Process pipeline design; Collaborative optimization

石油化工工艺管道是能源传输与化工生产的“生命线”，其安全性直接关乎企业运营、生态环境及公共安全。统计显示，全球约30%的石化事故源于管道失效，其中设计缺陷与施工验证不足占比超60%。试压技术作为管道投用前的核心验证手段，通过模拟极端工况检验管道承压能力与密封性，已成为贯穿设计、施工、验收全流程的质量控制枢纽。本文系统梳理试压技术的理论演进、设计协同模式及工程案例，剖析技术瓶颈并展望未来发展方向。

1 管线试压技术基础理论

1.1 试压技术分类与适用场景

试压技术的选择需结合管道特性、介质属性及工程环境，主要分为水压试验、气压试验与混合介质试压。水压试验以水为介质，适用于碳钢、不锈钢等耐水腐蚀材质的常温管道，具有成本低、安全性高的优势，但对低温环境（如LNG管道）易结冰，且忌水介质管道（如液氧管线）可能因残留水分污染工艺系统。气压试验以空气或氮气为介质，适用于低温或高洁净度管道，但需严格控制升压速率并配备防爆措施^[1]。

混合介质试压通过气液两相协同（如海水与压缩气体联合试压），在深海管道、大落差地形等特殊场景中展现灵活性。试压参数设计需平衡安全性与经济性，压力阈值通常取设计压力的1.1~1.5倍，需动态修正材料强度、温度波动及介质特性。稳压时间依据

管径分段设定，国际标准建议最短不低于30分钟，厚壁或高强钢管道需延长至2小时以上，薄壁管道则可适当缩短。

针对特殊工况，试压技术需针对性适配：低温环境采用防冻介质（如乙二醇溶液）并辅以温度监控；高压临氢管道需分阶梯升压（每级≤20%设计压力）并延长稳压时间；腐蚀性介质管道试压后需化学清洗与钝化处理。这些适配措施显著提升了极端工况下的试压可靠性。

2.2 技术参数设计原则

试压参数设计是确保管道系统安全性与可靠性的核心环节，需遵循“安全验证”与“经济可行”的双重原则，重点关注压力阈值与稳压时间的科学设定。压力阈值通常取设计压力的1.1~1.5倍，具体数值需根据材料强度、温度波动及介质特性动态调整。例如，高温管道需考虑材料在高温下的强度衰减率，按“压力-温度额定值曲线”修正试验压力；剧毒或易燃易爆介质管道则需增加额外安全系数，以满足更为严格的规范要求。

此外，试验温度低于设计温度时，需按材料低温性能进行补偿计算，避免因低温脆性导致管道失效。稳压时间是试压过程中应力释放与缺陷显现的关键阶段，国际标准（如ASME B31.3）建议按管径分段设定最短稳压时间，通常不少于30分钟。

对于高强钢或厚壁管道，需延长稳压时间至 2 小时以上，以确保残余应力充分释放；而对于薄壁或柔性管道，则可适当缩短稳压时间，避免因长时间高压作用导致过度变形^[2]。工程实践中，稳压时间的选择还需结合管道材质、试验介质及环境条件综合考量，例如在低温环境下试压时，需额外考虑介质流动性对稳压效果的影响。通过科学设定试压参数，可在保障管道安全性的同时，优化试压效率与成本控制。

2.3 特殊工况技术适配

在石油化工管道试压中，特殊工况对技术适配提出了更高要求。低温环境试压需采用防冻介质（如乙二醇溶液）替代常规水介质，其冰点可降至 -30℃ 以下，同时辅以分布式光纤测温系统或红外热成像技术，实时监控管道温度分布，确保介质温度始终高于材料韧脆转变温度，避免因低温脆性导致管道断裂。例如，在 LNG 管道试压中，乙二醇溶液与电伴热系统的结合，成功将介质温度稳定在 -20℃ 以上，显著降低了试压风险。

高压临氢管道的试压需重点关注氢脆防控，采用阶梯式升压策略，每级升压不超过设计压力的 20%，并在每级稳压 30 分钟以上，以观察氢致延迟裂纹的形成。试压后需快速实施干燥处理，通常采用热氮气吹扫（温度 80~120℃）至露点 $\leq -40^\circ\text{C}$ ，彻底消除氢原子渗透隐患。某加氢装置管道试压中，通过阶梯升压与后处理工艺的结合，成功避免了氢脆引发的微裂纹扩展。

腐蚀性介质管道的试压后处理同样至关重要，需通过化学清洗与钝化工艺彻底清除试压介质残留。例如，酸性介质管道试压后采用柠檬酸循环清洗，去除残留水分与杂质，随后进行硝酸钝化处理，在管壁形成致密氧化膜，阻断后续腐蚀反应。某 PTA 装置醋酸管道试压后，通过超临界 CO_2 清洗技术，实现了零废水排放与高效残留清除的双重目标。这些针对性技术适配不仅提升了试压作业的安全性，也为极端工况下的管道安全运行提供了可靠保障。

3 试压技术与工艺管道设计的协同优化

3.1 设计阶段的试压需求整合

试压需求在工艺管道设计初期的系统性整合是确保工程质量与施工效率的关键。基于工艺流程图（P&ID）与设备布局，管道系统需划分为独立的试压单元（如反应器区、换热区、储罐区），以优化试压资源配置并减少交叉作业干扰。例如，在催化裂化装置中，将高温反应段与低温分离段分开试压，不仅避免了介质交叉污染，还显著简化了操作流程^[3]。试压段划分时需综合考虑施工逻辑与资源分配，单试压段长度通常控

制在 3~5 公里以内，以平衡试压效率与风险控制。

在结构设计方面，试压工况下的高载荷特性需通过针对性强化措施予以应对。管道关键节点（如弯头、三通、法兰连接处）是应力集中区域，需增设加强板或局部加厚以提升承载能力。例如，某乙烯装置管道设计中，对 90° 弯头采用外置环形补强圈，试压阶段应力峰值降低约 40%，有效避免了局部变形。此外，临时支撑系统的预设计需满足试压载荷要求，支撑间距通常不超过 3 倍管径，以防止管道挠曲或失稳。通过试压需求与管道设计的深度融合，不仅提升了试压作业的安全性，还为后续施工与运维奠定了坚实基础。

3.2 数字化设计工具赋能

数字化设计工具在试压技术与管道工程融合中发挥了重要作用，通过虚拟仿真与数据分析显著提升了设计精度与施工效率。基于三维建模软件（如 PDMS、AutoCAD Plant 3D）构建的全生命周期 BIM 模型，能够直观展示试压系统的压力分布与应力集中区域。例如，通过压力云图模拟，可提前识别潜在泄漏点（如焊缝、阀门密封面），并优化试压盲板设置位置。某炼厂项目中，BIM 模型在试压前发现 2 处因支撑不足导致的应力超标区域，通过优化设计避免了试压过程中的结构失效，节约返工成本 15%。

有限元仿真技术（如 ANSYS、ABAQUS）则进一步深化了试压工况的力学分析能力。通过对试压载荷下的管道变形量与应力分布进行模拟，能够精准预测薄弱环节并提出优化方案^[4]。例如，某高压氢气管道试压仿真显示，将临时支撑间距从 6m 调整为 4.5m 后，最大变形量从 12mm 降至 7mm，显著提升了管道稳定性。仿真结果直接指导了支撑系统的布局优化与局部补强方案制定，为试压作业提供了科学依据。数字化工具的赋能不仅降低了试压风险，还推动了试压技术向智能化、精细化方向发展。

3.3 试压系统专项设计创新

试压系统的专项设计在功能性、安全性与可持续性方面不断创新，为石油化工管道试压作业提供了高效可靠的解决方案。介质循环系统的设计采用闭环管路结构，集成多级过滤（如袋式过滤器与磁力分离器）与流量调节功能，显著提升了试压介质的利用效率。例如，某石化项目通过可调节式离心泵实现试压介质（水）的循环利用，减少水资源消耗 30%，同时针对腐蚀性介质管道增设化学中和单元，确保试压后排放水质达标，满足环保要求。

智能监控体系的引入进一步提升了试压过程的安全性与可控性。通过部署无线压力传感器与温度探头，结合 LoRa 或 NB-IoT 网络，试压数据可实时传输至云

平台进行分析与存储。基于机器学习算法,系统能够自动识别压力异常趋势(如缓慢泄漏或压力骤降)并触发预警,为操作人员提供决策支持。例如,某深海管道试压中,智能监控系统提前10分钟预警一处法兰微泄漏,为应急处置争取了宝贵时间,避免了重大安全事故的发生。这些创新设计不仅提高了试压作业的效率与安全性,还推动了试压技术向智能化、绿色化方向迈进。

4 施工阶段试压实施的关键路径

4.1 试压方案精细化管控

试压方案在施工阶段的精细化管控是确保试压作业安全与高效的核心环节。基于HAZOP(危险与可操作性分析)方法,试压方案需系统识别潜在风险(如超压、介质泄漏、设备失效),并通过风险矩阵量化风险等级,制定针对性防控措施。例如,某乙烯项目试压方案中,将“盲板安装错误”列为高风险项,通过双人核查与电子标签追踪技术,实现了盲板安装零失误,显著降低了试压作业的潜在风险。

多专业协同是试压方案科学性与可操作性的重要保障。工艺、机械、仪表等专业需共同审查试压边界条件(如隔离阀状态、仪表保护措施),确保试压系统与工艺系统的物理隔离。例如,某炼厂重整装置试压前,自动化专业介入校准压力传感器,避免了因仪表误差导致的试压结果误判。

此外,试压方案还需明确应急预案与资源配置,确保突发情况下的快速响应。通过精细化管控与多专业协同,试压方案不仅能够有效指导现场作业,还为试压安全提供了系统性保障。

4.2 现场操作技术升级

现场操作技术的升级是提升试压作业精准性与可靠性的关键。精准升压控制采用电动调节阀与PLC(可编程逻辑控制器)系统,实现压力线性加载与稳压控制,避免了传统手动操作的波动性与人为误差。例如,某天然气管道试压中,PLC系统将升压速率稳定在0.3 MPa/min,误差控制在 $\pm 1.5\%$,显著降低了管体冲击风险,同时提高了试压效率。这种自动化控制技术不仅提升了试压过程的稳定性,还为复杂工况下的压力管理提供了可靠支持。

泄漏检测技术的创新进一步提高了试压结果的可靠性。超声波检测仪通过捕捉气体泄漏产生的高频声波信号,能够精确定位微米级泄漏点,而红外热成像技术则通过识别温度异常区域,发现肉眼不可见的潜在泄漏^[5]。例如,某LNG储罐外管道试压中,红外热成像技术发现一处法兰微漏,避免了投产后BOG(蒸发气)损失,显著提升了经济效益与安全性。这些先

进技术的应用不仅提高了试压作业的精度,还为管道系统的长期稳定运行提供了有力保障。

4.3 验收标准与缺陷治理

试压结果的验收与缺陷治理是确保管道系统安全投用的最后一道防线。国际标准(如ASME B31.3)与国内规范(GB 50235)均明确规定,试压期间压降不得超过试验压力的1%/小时,且管道无可见塑性变形。例如,某跨国输油管道项目因昼夜温差导致压降波动,通过温度补偿计算确认压降在允许范围内,最终判定试压合格。这一过程体现了科学判定与规范执行的紧密结合,为试压结果的可靠性提供了保障。

针对试压中发现的缺陷,需采用针对性修复技术:焊缝缺陷通常采用GTAW(氩弧焊)进行局部补焊,补焊后需进行RT(射线检测)复验,确保焊接质量符合标准;管道变形则使用液压胀管器对凹陷管段进行机械矫正,恢复至设计公差范围内;密封失效问题可通过更换高性能垫片(如石墨缠绕垫)并重新施加螺栓预紧力解决。例如,某化工厂蒸汽管道试压后,通过胀管器成功修复3处局部变形,节约更换成本80%。这些修复技术不仅高效解决了试压中发现的问题,还为管道系统的长期稳定运行奠定了坚实基础。

5 结论

试压技术作为石油化工管道工程的关键质量控制手段,通过理论创新与工程实践的深度融合,显著提升了管道系统的安全性与可靠性。未来,随着数字化、智能化技术的快速发展,试压技术将进一步向高效、精准、绿色方向演进。建议加强跨学科合作,推动试压技术与新材料、新工艺的协同创新,同时完善行业标准体系,为石油化工管道工程的高质量发展提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 陈参昌.石油化工工艺管线试压技术的设计与应用[J].石油化工物资采购,2021(26):3.
- [2] 崔重,赵锐利.输送管线试压技术在化工工艺管道设计中的应用[J].中国化工贸易,2023,15(5):148-150.
- [3] 于宏阳.管线试压技术在石油化工工艺管道设计中的运用[J].化工设计通讯,2019,45(12):2.
- [4] 肖迪.石油化工管道压力试验常见误区讨论[J].石油化工建设,2022(01):44.
- [5] 代洪波.石油化工装置工艺管道试压程序和思考[J].科学大众(科技创新),2020(3):1.

作者简介:

王凡青(1987-),男,汉族,山东泰安人,大学本科,工程师,研究方向:化工管道设计。