

石油化工管道设计影响因素与对策分析

夏 婧 (九江石化设计工程有限公司, 江西 九江 332000)

摘要: 为促进石油化工系统高质量高效化运行, 预防管道开裂、堵塞、腐蚀等问题, 本文采取案例分析法、文献研究法, 结合X石油化工项目基本情况, 依据管道设计原则, 分析了影响管道设计的多元因素, 如应力、温度、腐蚀因素, 再针对性提出有效对策。研究结果表明, 通过从项目基本情况提出管道设计影响因素解决对策, 不仅能深度融合生产设备与技术工艺, 还能有效规避安全隐患, 增强生产成效。

关键词: 石油化工; 管道设计; 应力设计

中图分类号: TE973 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 027-0160-03

Analysis of influencing factors and countermeasures of petrochemical pipeline design

Xia Jing(Jiujiang Petrochemical Design and Engineering Co., LTD., Jiujiang Jiangxi 332000, China)

Abstract: To enhance the high-quality and efficient operation of petrochemical systems while preventing pipeline issues such as cracking, blockage, and corrosion, this study employs case analysis and literature review methods. Based on the X Petrochemical Project's operational context and pipeline design principles, we analyze multiple influencing factors including stress, temperature, and corrosive elements, then propose targeted solutions. The research findings demonstrate that addressing these pipeline design challenges through project-specific analysis not only achieves deep integration of production equipment and technological processes but also effectively mitigates safety risks while boosting operational efficiency.

Key words: petrochemical industry; pipeline design; stress design

在石油化工行业持续发展背景下, 生产规模日渐扩大, 装置设备类型多种多样, 显著提高管道设计难度, 极易受到应力、温度、腐蚀等因素的影响。这就需结合管道设计目标、内容与基本原则, 根据各项因素影响特点、性质, 采取可行性较高的解决对策, 提高石油化工管道运行的安全性、稳定性。对此, 文章围绕石油化工管道设计影响因素与对策展开深入分析, 明确管道设计侧重点。

1 石油化工管道设计

1.1 项目概况

X石油化工项目中, 总占地面积为4.2km², 主要加工生产原油、聚丙烯、合成氨、尿素等, 配备常减压、催化重整、催化裂化等60多套装置。其中, 管道设计属于重点, 需根据石油化工装置生产工艺流程设计管道, 大幅提升生产效能, 促进各项生产工作稳步推进。主要设计内容包含: 综合考虑应力、温度以及腐蚀等影响因素, 优先选择防腐性良好的合成材料、金属材料, 并分析运行条件、温度、地势地貌, 科学规划管道布置路线, 合理安装管道设备, 还需优化管道应力设计, 涵盖一次应力、二次应力、峰值应力等, 分析不同应力对管道完整性的影响, 完善管道应力设计方案, 促使管道安全运输^[1]。

1.2 设计原则

管道设计具有工作量大、耗时长的特点, 需在考

虑应力、温度、腐蚀等因素的基础上, 遵守可操作性、因地制宜、全面性的基本原则, 提高设计方案的合理性, 预防各类管道问题。具体为: 可操作性原则, 以满足石油化工生产需求为核心, 设计阀门标高与手轮方向, 但显著增加操作者的动作难度, 对此需增设附属装置, 构建安全化的作业环境, 如操作站台等; 因地制宜原则, 结合工厂地形地势、布置图、生产装配布置等, 规划管道布置路线图, 再依据气候特征、大气腐蚀性, 选择高性能的材料, 优化应力设计; 全面性原则, 多视角入手关注管道运行状态, 精准识别潜在运行隐患, 并结合管道供需情况, 优化并完善管道耐腐蚀增强方案。对此管道设计期间, 需从石油化工生产工艺技术原理、设备配置情况入手, 按照各类装置运行规定, 科学布置管道, 并组织其他专业人员共同探讨管道布置的合理性, 汇总实际问题进行考证分析, 不断改进优化, 使其在符合行业规范、设计规定的基础上, 缩短管道布置长度。

2 石油化工管道设计影响因素

2.1 应力影响

石油化工管道设计时, 需依据应力分析结果管控管道强度与刚度, 包含一次应力、二次应力、峰值应力, 关系到生产设备运行的稳定性、安全性。

一次应力, 从管道荷载入手分析内外应力, 包括人为荷载、荷载装置、内部压力、管道自重等, 运输

期间当管道承受外力荷载超过屈服强度,将引发管道变形问题;二次应力,从管道约束力入手分析由热胀冷缩、位移形成的应力,计算应力变化允许范围,判断是否超过变形强度,避免产生安全隐患,其中允许变化范围计算表达式为:

$$\delta_E = f \{1.25([\delta] + [\delta_t]) - \delta_L\}$$

式中: δ_E 为应力允许范围, δ_L 为管道纵向应力之和, $[\delta]$ 为热态时允许应力, $[\delta_t]$ 为冷态时允许应力, f 为减小系数。

峰值应力,需分析并计算管道最大应力,影响管道穿孔^[3]。

通过以上分析可知,石油化工管道设计阶段,一次应力影响形式为内压和外界荷载,导致管道变形、断裂;二次压力影响形式为热胀冷缩与位移,导致管道变形、断裂;峰值应力影响形式为应力叠加、环境温湿度,导致管道穿孔。

2.2 温度影响

温度影响石油化工管道的运行寿命,需在管道设计阶段深度考虑,掌握温度影响机制,具体为:处于低温运行环境下,管道韧性降低,一旦超过脆性极限温度,出现明显损坏的质量问题,而处于高温运行环境下可能产生回火脆化问题,诱发渗透事故,并且若发现生产温度呈周期性变化,则会导致管道整体性破损,产生重大的安全事故^[2]。

2.3 腐蚀影响

腐蚀也会影响石油化工管道综合设计质量,如管道内部腐蚀、外部损坏,若未能充分考虑腐蚀因素对管道安全稳定运行的影响,将极易产生重大安全隐患,缩短管道运行寿命。主要表现为:管道材料选择,石油化工介质的腐蚀性较强,设计阶段需优先选择玻璃钢、不锈钢等耐腐蚀性高的材料;管道壁厚,在腐蚀因素影响下,管道壁厚变薄,承压能力降低,进而缩短运行寿命;工程成本,管道出现腐蚀现象,诱发介质泄漏事故,为企业带来较高的经济损失。

3 石油化工管道设计有效策略

3.1 采取基于应力分析的柔性设计

为有效降低局部应力的影响,维护石油化工管道安全运行,应根据石油化工生产环境、运输介质特点,采取基于应力分析的柔性设计理念,通过增加自然补偿、引入弹簧支吊架、合理优化管道几何布置方案的方式,进一步完善管道柔性设计方案^[3]。

3.1.1 增加自然补偿

石油化工管道设计时,应充分考虑到安装作业阶段的补偿作用,若管道内应力与外应力超过补偿作用,

需增加自然补偿,实行柔性设计,如安装螺纹管补偿器。实践安装阶段,根据运输介质类型、温度等,针对性选择自然补偿类型,再计算管道膨胀量,核心表达式为:

$$W = pL\Delta t$$

式中: L 为管道长度, W 为膨胀量, p 为膨胀系数, Δt 为温度变化量。

再确定自然补偿位置,正常情况下可选定管道两端固定位置的中心点,有序安装螺纹管补偿器,之后计算分析管道应力,判断其是否满足安全运行标准。

3.1.2 引用弹簧支吊架

在弹簧支吊架作用下,平衡管道自身重力与外部应力,有效规避管道弯曲现象。实践阶段,汇总一次应力、二次应力分析结果,计算并确定弹簧支吊架的使用数量。其中,需仔细计算管道最大承载弯曲应力,核心表达式为:

$$\delta_A = m(1.25\delta_1 + 0.25\delta_2)$$

式中: δ_1 为加热期管道可承受应力, δ_2 为冷却时管道可承受应力, δ_A 为最大承受弯曲应力。

3.1.3 优化管道几何布置

管道几何布置优化期间,以增加弯头为主,结合二维平面、三维空间的基本情况,灵活设置弯头,达到改变管道走向、提高柔性的目的^[4]。

根据 X 石油化工项目基本情况,设计储罐、离心泵进出口位置的管道参数与布局,基本性能参数如表 1 所示。其中,泵入口位置管道受力情况未满足技术规范,需实行柔性设计,但考虑到该区域内管道较短,无转弯,难以改变管道走向,加之对轴度要求较高,无法引用弹簧支吊架。为此柔性设计期间应合理优化管道几何布置方案,以水平管段为载体放置出口管道中的 2 根操作阀,再调节管道走向,平衡管道受力情况,降低建造成本。

表 1 管道技术参数

项目	技术参数
管道规格	6.625*0.28mm
保温厚度	1.5mm
工作温度	86.7℃
设计压力	69MPa
水压试验压力	103MPa

3.2 掌握温度变化规律,实行伴热设计

石油化工管道设计阶段,需结合温度影响机制,做好前期资源调查,采取互联网调查、实地检测的方式,掌握地方气候变化规律,分析温度异常变化对管道的影响,并统计全年温度最大值、最小值、平均值,为管道伴热设计提供数据支撑。实践过程中,依次测

量最高、最低温度环境下不同类型材料性能变化，检测其稳定性，避免采用恶劣材料布置管道，其中对于一些温度特殊的区域，应加强管道防护，做好伴热设计，起到保温隔热效果，补充所散失的热量^[5]。

管道伴热设计过程中，需掌握伴热介质、温度选择要点。正常情况下，若管道输送温度超过150℃，且0.9MPa蒸汽无法满足工艺生产标准时，伴热介质选择热载体；管道介质温度在95–150℃之间，选择0.7–0.9MPa的蒸汽；管道介质温度小于95℃，选择0.3–0.6MPa的蒸汽。再根据石油化工生产需求，选择内伴热管、外伴热管、电伴热、夹套伴热设计形式，X石油化工管道项目选择外伴热管伴热设计形式，以热水、蒸汽为主要伴热介质，伴热管运行期间一部分热量补充主管内介质热损失，一部分以保温层为载体散失于大气环境。其中，考虑到传热量需求，需安装至少3根伴热管，且在外伴热管与主管之间填充高传热系数的伴热胶泥。值得注意的是，管道伴热设计期间，若输送有毒介质且含有夹套管，需采用焊缝外露型夹套管，并且当介质凝固点在50–100℃内，采用夹套管。

3.3 采取全生命周期防腐蚀措施

结合腐蚀因素对石油化工管道的综合影响，需在设计阶段采取全生命周期的防腐蚀措施，多方面入手展开防腐蚀设计。

3.3.1 合理选材

管道设计人员应参照行业技术规范，编制管材登记表，着重考虑腐蚀环境对管道材料的影响，再选择材料。其中规范指出，运行温度≥200℃时，对于运输介质中包含氢气的合金钢或碳钢管道，需在管道最高运行温度基础上增加20–40℃的余量，并针对氢气实行分压处理，再选择抗氢钢材。之后依据管材腐蚀特性，计算腐蚀余量，判断是否消除应力。

3.3.2 合理设计管道结构

以腐蚀机理为基础，合理设计管道结构，从源头上避免腐蚀现象。如，将管托利用隔热层完全包裹，防止形成腐蚀性的冷凝液，并仔细分析各类设备是否存在腐蚀性介质，重点观察底部管口，评估设备、管口有无积液腐蚀现象。

3.3.3 管道外部防腐设计

设计管道外部防腐措施时，应掌握大气腐蚀、土壤腐蚀的特点，分析土壤类型、含水量、硫化物含量、pH值、电阻率、氧化还原电位、微生物以及植物根系等因素的影响程度，再参照《石油库节能设计导则》，设定大气与土壤腐蚀的防腐指标。之后，综合评估腐蚀环境、运行条件，参照防腐寿命要求，选择涂料品种，并考虑不可控因素，确定除锈等级。

选择防腐涂料时，因材料市场中涂料类型多种多样，适用范围、性能差异化明显，关系到涂层防腐蚀效果、寿命。鉴于此，设计人员应明确涂料选择注意事项，实行综合分析，主要包含：物体表面材料的性质，若为黑色金属可采用红丹或铁红底漆，但红丹底漆将损坏有色金属；使用环境，依据介质温度、浓度、类型以及生产设备运行状态等环境因素选择涂料；作业环境，若作业现场通风条件较差，可优先选择高固体份、无溶剂或水性的防腐涂料，若无烘干燥设备则以自干型涂料为主；技术与经济性，分析技术性能、经济合理性，综合计算材料价格、表面处理费用、涂层性能、施工费用、维修费用等。而在分析管道防腐设计阶段的不可控因素时，可从涂料产品质量、管道质量、焊接、技术水平入手，组织设计人员、施工人员深入沟通，结合外部环境特征优化管道防腐设计方案，大幅提升管道的防腐能力。

4 总结

纵观近年来石油化工领域持续变革与发展，管道设计成为一项重难点工作，关系到企业生产效益。鉴于此，应立足于石油化工项目的基本情况，遵循可操作性、因地制宜的基本原则，分析影响管道设计质量的影响因素，再采取合理化的解决措施。其中，针对应力影响因素，采取基于应力分析的柔性设计理念，增加自然补偿，引入弹簧支吊架，合理优化管道几何布置方案；针对温度影响因素，采取掌握温度变化规律、实行伴热设计的对策；针对腐蚀影响因素，采取合理选择、设计管道结构、涂料品种选择的措施。未来发展过程中，可引入人工智能、BIM技术，搭建管道三维立体模型，模拟设计方案的可行性。

参考文献：

- [1] 刘路通, 姜洪磊. 石油化工管道设计的影响因素与对策 [J]. 中国化工贸易, 2024, 16(4):130-132.
- [2] 杨鹤. 石油化工管道应力设计关键因素分析 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(1):109-111.
- [3] 张晓. 石油化工装置工艺管道设计的影响因素和设计要点分析 [J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(2):0005-0008.
- [4] 王大朋, 邢述, 王十. 石油化工系统管道隐患治理及对策 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(2):50-55.
- [5] 韦近平. 石油化工管道设计的影响因素及解决措施 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(04):25-27.

作者简介：

夏婧(1988-)，女，汉族，江西武宁人，硕士研究生，工程师，研究方向：石油化工工程设计。