

石油化工装置工艺管道设计的合理性分析

谢旭升 张彬钰 付丽敏 (兰州寰球工程有限公司, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 石油化工装置工艺管道设计的合理性, 直接影响到石油化工企业的安全和生产效率, 一旦发生安全事故, 不仅会影响企业的生产运行, 还会造成环境污染, 危及人员生命安全。为进一步提高石油化工装置工艺管道设计的合理性与可靠性, 文章首先阐述了石油化工装置工艺管道设计的重要性, 分析了影响管道设计合理性的主要因素, 并以某石油化工装置工艺管道工程为例, 探讨了如何依据实际生产环境进行工艺管道的设计, 实现了在复杂操作条件下管道系统的稳定运行, 显著降低了故障率, 提高了石化燃料输送的安全性。

关键词: 石油化工装置; 工艺管道设计; 耐腐蚀; 流体力学

0 前言

由于石油化工管道内主要是传输天然气、石油等物质, 因此石油化工类管道在密封性方面有较高要求。设计合理的管道系统不仅能保证生产安全, 还可以提高能源利用效率, 减少运营成本。随着科学技术的发展和对环境可持续性要求的提高, 传统的管道设计方法已经不能完全适应现代石油化工行业对于安全、高效与环保等方面的复合型需求, 因此进行石油化工装置工艺管道设计的合理性研究具有较强的现实意义。

1 石油化工装置工艺管道设计的重要性

石油化工装置工艺管道作为连接各个处理单元的物质流通渠道, 是保障生产连续性和安全性的关键。从经济效益角度分析, 管道系统直接关联到整个装置的运行效率, 优良的设计能够确保原料和产品在装置中快速且均匀地流动, 可有效提高原料转化率, 增加产品产量。例如, 在石油精炼过程中, 若管道设计合理, 可以有效减少能源损耗和压降, 从而实现节能降耗目标; 反之, 则会因非最优流动状态导致额外的泵送能耗和热能损失。而且当管道尺寸与布局符合流体力学原则时, 可以显著降低由于结垢、堵塞或腐蚀等问题引起的维护需求^[1]。

2 石油化工装置工艺管道设计的影响因素

2.1 管道材料的耐腐蚀性

石油化工产业的不同工艺管道负责输送不同的液体, 包括多种具有侵蚀性的化学品和原料, 如酸、碱、盐以及含硫化合物等。这些介质能够引起电化学反应或直接化学反应, 导致管道材质缓慢或迅速地退化。例如, 在含硫环境下使用的钢铁管道会受硫酸盐还原菌 (SRB) 引发的微生物诱导腐蚀 (MIC), 而在处理氯化物丰富流体时, 则需重点考虑点蚀和应力腐蚀开裂问题。而且不同操作条件下所需材料耐腐蚀性也

有所差异。在高温条件下, 某些材料可能加速氧化或与流体发生反应, 而低温则可能使得部分金属更为脆弱容易开裂。因此, 在选择管道材料时应综合考虑介质类型、浓度、温度以及其他影响因素来确定最合适的耐腐蚀材料^[2]。

2.2 流体力学特性

液体流动状态 (层流或湍流)、流速以及粘度和工艺管道的传输效率密切相关。例如, 在层流状态下, 流体以相对平滑且有序的方式移动, 流体压降 (流体在两个截面间的压力势能差) 较小, 而湍流则相反, 虽然传输速度较快, 但会带来更大的摩擦损失和能量消耗, 所以设计时需要根据雷诺数 (表征流体流动情况的无量纲数, Re) 评估预期内部流态, 并通过适当选择管径、长度以及弯头等几何参数来控制流态。粘度作为描述液体内部摩擦阻力大小的参数, 对于液体的泵送功率有直接影响, 高粘度液体需要更多泵送功率才能实现相同程度输送效果, 并容易引起较大压降和热损失。

2.3 温度与压力波动

温度与压力波动是影响石油化工装置工艺管道稳定运行的重要因素。温差会导致物质热胀冷缩现象, 从而引发管道线路长度变化甚至产生热应力问题, 而且温度也会直接影响到介质本身的密度、粘度等属性, 进而改变其在管线中的流动模式。同时, 过高或过低的压力均可超出设计标准范围, 导致设备故障, 如常规运转状态下, 由于阀门操作或泵启停等情形产生的瞬间压力突变, 即水锤现象, 若在工艺管道中设计中未充分考虑此现象, 则有可极易对管道造成损害^[3]。

2.4 机械振动与支撑结构

石油化工装置管道的机械振动问题源于装置内部旋转设备 (泵和压缩机等) 产生的不平衡力量, 该力

量并通过结构传递到整个管道系统中。持续振动不仅会导致噪音问题,还极易引发连接件松弛、密封圈老化甚至引起金属疲劳断裂等一系列反应。所以工艺管道设计时,会增设额外支撑结构提高管道整体的稳定性,利用支撑结构承受并平衡静态载荷(如重量)和动态载荷(如振动、风载)。如果支撑结构设计不当或规格错误,则无法提供足够支持并吸收振动能量,将直接影响整个装置运营稳定性,增加维修频率与难度。

3 基于合理性的石油化工装置工艺管道设计措施

3.1 工程概况

案例项目为我国西北部某化工企业,该装置包括原料预处理单元、裂解炉、急冷单元、压缩单元、分离单元以及相关的管道和辅助设施。该项目工艺管道设计中,面临着高温(最高达 850℃)、高压(约 2.5 MPa)和含硫化合物介质的设计难点。为确保长期稳定运行,提高管道设计的合理性,材料选择方面,主干线采用了耐高温腐蚀的镍基合金 INCONEL 625,对所有与高温流体接触的部件进行了特殊防腐处理。考虑到流体力学特性,裂解炉出口至急冷系统之间的管道设计为直径 500mm,以维持气态产物在 20m/s 以下的流速,确保有效控制压降,减少积碳风险。针对温度与压力波动问题,在管道布局上引入了膨胀弯头和波纹补偿器来吸收由温度变化引起的尺寸变化,并在关键节点安装了快速响应式压力释放阀门以抵御潜在水锤效应。在机械振动与支撑结构方面,对于连接旋转设备如主循环泵(流量达到 5000m³/h)的管道系统采用了阻尼器和加强型支架,以降低了由设备运转引起的振动传递,并增强了整个系统的稳定性。

3.2 结合操作条件,选择耐腐蚀材料

石油化工装置工艺管道材料的选择直接关系到整个系统的安全性、稳定性和经济效益。案例工程主干线采用了耐高温腐蚀的镍基合金 INCONEL 625,并对所有与高温流体接触的部件进行了特殊防腐处理。

设计中,考虑到裂解过程中的最高温度约为 850℃以及最大压力约为 2.5MPa,以此作为基础数据评估所需材料应具备的耐温和耐压标准。设计人员首先收集和分析了该装置的历史运行数据以及相似装置使用经验,确认在此类极端条件下常规碳钢材料无法满足要求,因此必须选用更加优异的耐高温合金。同时裂解单元输出物中存在硫化氢等有害化学物质,其具有较强的腐蚀性能。因此,在材料选择上需要考虑

到其对含硫化合物介质的耐受能力。设计人员通过实验室测试和文献资料查询得知 INCONEL 625 在多种含硫环境下表现出卓越抗蚀能力,并利用沸腾氯化镁试验,验证了 INCONEL 625 即便在严苛条件下也不会发生应力腐蚀开裂。确定采用该材料后,设计人员并利用计算机模拟软件模拟管道在实际工况下承受高温、高压和化学反应产生物质攻击情况下稳定性表现,结果显示该合金即使长时间暴露于 850℃高温环境和 2.5 MPa 压力下也展现出良好稳定性。根据《金属防腐蚀手册》,耐腐蚀等级可大体分为 1 级腐蚀速率<0.001mm/a,2 级腐蚀速率为 0.001 ~ 0.005mm/a,3 级腐蚀速率为 0.005 ~ 0.01mm/a,4 级,腐蚀速率为 0.01 ~ 0.05mm/a,其模拟结果如表 1,表 1 中的强度保持率为试验后的材料强度与原始材料强度的比值。最后,在施工安装过程中严格控制焊接程序,并采取超声波非破坏性检测技术对焊缝进行检查确保焊接品质符合设计规范要求,以最大限度提高管道稳定性。

表 1 材料模拟试验结果

温度(℃)	压力(MPa)	强度保持率(%)	疲劳寿命预估(小时)	腐蚀速率(mm/a)	耐腐蚀等级
25	0.1	100	10000	<0.001	1
200	0.5	99	10000	<0.001	1
400	1.0	97	9000	<0.003	1
600	1.5	95	8000	<0.003	2
800	2.0	92	7000	<0.004	2
850	2.5	90	6500	<0.004	2

3.3 加强流体动力学设计,合理选择管径

对于乙烯裂解装置而言,合理选择管径不仅影响流体的流速和压降,也直接关联到能耗、设备寿命及运行成本。过大的管径会增加材料使用和初期投资,而过小的管径则可能导致流速过快,引起更高的压降和摩擦损失,甚至可能造成积碳和侵蚀问题。结合实际需求,案例工程将裂解炉出口的产物流速维持在 20m/s 以下。案例工程裂解单元产每小时处理原料 10000kg,并且原料完全转化为目标产品(为方便计算),则 $10000\text{kg} \div 3600\text{s} \approx 2.78\text{kg/s}$ (物质流量,用 m 表示),气态产物在操作温度下(850℃)和操作压力下(2MPa)的密度(ρ)为 0.3kg/m³,再按照如下

公式计算:

$$A = \frac{m}{\rho v} \quad (1)$$

公式(1)中A是截面积(m^2), v 是流速(m/s), m 为物质流量, 已知要求产物流速维持在 $20m/s$ 以下, 根据公式(1), 计算, 管道内横截面积应控制在 $0.0463m^2$ 以下。圆形管道截面积与直径之间关系为:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

公式(2)中 d 是内径(m), A 同公式(1)。利用公式(2)反推直径为 $0.2428m$ 。同时考虑到压降方面的问题, 采用达西-威斯巴哈方程(3):

$$\Delta p = fd \cdot \left(\frac{l}{d}\right) \cdot \rho \cdot \left(\frac{v^2}{2}\right) \quad (3)$$

公式(3)中的其中 fd 为摩擦因子, l 是管道长度(m), ΔP 为压降(Pa), 案例项目裂解炉出口至急冷系统之间距离为 $200m$ (管道长度), fd 取 0.02 (典型值), 则可计算预估压降为 $24kp$ 。为确保压降值处于可接受范围内, 并结合经济成本考虑, 在满足所有技术参数, 后确认 $500mm$ 作为最终设计直径。

3.4 引入热膨胀补偿装置, 降低温度压力波动影响

由于化工生产中, 温度和压力的波动不可避免。温度升高会导致管材料膨胀, 而温度降低则会引起收缩。如果管道系统无法适应这种膨胀或收缩, 便会产生额外的应力, 从而导致管道损坏或失效。因此, 在案例工程中, 为减轻由于温度变化导致的管道热膨胀问题及其对整个系统压力稳定性的影响, 引入热膨胀补偿装置。该项目中使用了两种主要类型的补偿装置: 膨胀弯头和波纹补偿器。针对长直线段管道设计考虑到热膨胀问题时, 安装了预设角度的膨胀弯头。例如, 在 $5m$ 长、直径 $500mm$ 、工作温度可达 $450^\circ C$ 的直管段中, 根据材料热膨胀系数($12 \times 10^{-6}/^\circ C$), 可按照如下公式计算预期最大长度变化量:

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta T \quad (4)$$

其中 L 是原始长度($5m$), α 为材料热膨胀系数, ΔT 为温差(假设为 $250^\circ C$)。计算得出最大长度变化量, $0.015m$ 。为补偿该伸长量, 在每 $1m$ 设置一个角度为 90° 的L形弯头作为固定点, 并且在相邻固定点之间安装带有自由伸缩功能能够滑动或旋转接合部件以允许一定范围内移动。

波纹补偿器则安装在受热影响较大且易于发生局部热膨胀现象区域。波纹补偿器可通过其内部多层环

形波纹结构吸收轴向、横向和角向位移。例如, 在受高温影响明显并容易产生局部应力集中地区安装单个轴向型波纹补偿器。若该区域预计最大位移量为 $\pm 50mm$, 则选择标准行程至少为 $\pm 50mm$ 以上且具有足够刚性以承受设计压力等级条件的补偿器。同时, 在关键节点处加入快速响应式压力释放阀门以抵御水锤效应带来冲击载荷风险。由于水锤效应通常发生在流体突然停止或方向改变时, 所以在每个重要转折点、阀门前后及快速启闭阀上游位置布置快速排放阀门, 并通过实时监测系统与之联动。

3.5 加强预期负荷分析, 优化支撑结构

案例工程中对于连接旋转设备如主循环泵(流量达 $5000m^3/h$)的管道系统, 为确保其安全稳定运行并延长使用寿命, 加强了预期负荷分析。针对主循环泵和相关管道系统, 设计人员收集了旋转设备运行时的振动频率和幅值数据。例如, 以泵转速为 $1500r/min$ 为例, 设计人员记录此时振动特性, 并将数据与管道材料和尺寸相结合, 考虑流体动力负荷、内压、重力以及由泵引起的谐波等因素, 使用有限元分析软件模拟不同工况下管道系统受到的力学影响。根据模拟结果确定关键位置, 安装加强型支架和阻尼器。通过模拟分析, 设计人员在每个转弯处和大跨度无支撑区域均设置了支架, 并且按照受力分布调整间距和规格, 为管道提供支撑。

4 结束语

文章以某石油化工企业的化工装置工艺管道工程为主要研究对象, 以案例分析的方法, 从耐腐蚀、流体力学、温度压力、机械振动四个角度出发, 分析了如何结合实际条件, 提高石油化工装置工艺管道设计的合理性。设计实践中, 工作人员可依据相关装置的操作条件选择耐腐蚀材料, 提高管道整体寿命, 并加强流体力学设计, 合理选择管径, 最后引入热膨胀补偿装置、加强预期负荷分析, 降低温度压力波动、机械振动对管道稳定性造成的影响, 提高化工生产效率和稳定性。

参考文献:

- [1] 郑庆. 石油化工装置工艺管道设计的合理性探究[J]. 石化技术, 2023, 30(07): 288-290.
- [2] 夏志. 石油化工装置工艺管道的设计[J]. 现代盐化工, 2022, 49(02): 62-64.
- [3] 胡敏达. 石油化工装置工艺管道的设计[J]. 化工管理, 2021, (25): 145-146.