

化工管道设计中材料的选用研究

王珂 郑英霞 (滨化工程技术(山东)有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要: 在现代化工生产中, 管道作为连接各单元操作的核心基础设施, 其设计质量直接影响整个工艺流程的安全性、稳定性与经济性。材料的合理选用是化工管道设计中的关键环节, 对延长管道寿命、降低维修成本以及保障运行安全具有重要意义。本研究围绕化工管道设计中的材料选用展开, 重点分析了材料选用的重要性、常见材料的性能及其应用, 以及科学的材料选用方法, 以期对相关领域提供理论参考和实践指导。

关键词: 化工管道设计; 材料选用; 腐蚀防护

0 引言

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。在化工行业中, 管道不仅承担着输送物料的功能, 还起到维系生产工艺连续性的重要作用。从原料的引入到产品的输出, 管道覆盖了几乎所有的生产环节, 其安全性和可靠性直接关系到化工装置的运行效率和经济效益。然而, 化工生产中所输送的介质种类繁多, 包含高温、高压、强腐蚀性液体或气体, 这对管道材料的选择提出了极高的要求。如果材料选择不当, 可能导致管道失效、介质泄漏甚至严重的安全事故。因此, 如何在满足工艺需求的基础上, 优化管道材料选用成为化工设计领域亟待解决的问题。

1 化工管道设计中材料选用的重要性

1.1 保障运行安全的关键因素

化工管道在工业生产中不仅是物料输送的枢纽, 也是确保生产流程安全运行的重要保障。其安全性直接受到材料选用的影响。如果材料性能无法满足实际工况需求, 可能引发腐蚀、泄漏或机械失效等问题, 进而危及整个生产装置的安全。例如, 在输送高温、高压或强腐蚀性介质时, 材料的抗腐蚀性能和强度要求尤为重要。选材不当可能导致管道壁厚减薄甚至管道破裂, 从而造成介质泄漏、火灾或爆炸等严重事故。此外, 不同介质之间的相互反应也可能因管道材料的不兼容性而加剧, 对生产安全构成潜在威胁^[1]。

1.2 优化成本与效益的平衡点

化工管道的材料选用不仅是技术问题, 同时也是一个经济性权衡的过程。在化工生产中, 管道所占工程造价比例较高, 材料选用对企业的经济效益产生直接影响。一方面, 昂贵的高性能材料能够提高管道的

使用寿命, 减少因维修或更换管道而造成的停工损失。另一方面, 过高的材料成本可能超出项目预算, 因此需要在经济性和性能之间找到平衡点。例如, 在输送普通液体时, 碳钢管道因其成本低廉和良好的机械性能成为广泛应用的选择; 而对于输送高腐蚀性介质的工艺流程, 则需要使用不锈钢或衬里材料以降低长期使用中的维护成本。

1.3 绿色发展与能源效率的双驱动

现代化工行业面临着严峻的环境保护和能源消耗挑战, 这进一步突出了材料选用的关键性。一方面, 选用环保型材料可以减少资源浪费和污染排放。例如, 复合材料因其重量轻、加工能耗低, 已成为许多化工管道的新选择。另一方面, 高效节能的材料能够在运输高温介质或保持稳定压力时减少能量损失, 为企业实现节能减排目标提供助力。此外, 在材料的可回收性方面, 选择可以二次利用的材料不仅符合可持续发展的理念, 还能降低企业长期运营的环境成本^[2]。

2 化工管道常用材料的性能与应用

2.1 金属材料的性能及应用

①碳钢。碳钢是化工管道中最为常见的材料之一, 因其具有良好的机械性能和经济性, 被广泛应用于输送普通液体和气体介质。碳钢的抗拉强度和耐高温性能较好, 适用于常温和中低温环境。然而, 其抗腐蚀性能较差, 容易受到氧化、酸性和盐类介质的腐蚀, 因此通常用于输送对腐蚀性要求不高的介质, 例如冷却水、压缩空气和部分低腐蚀性化学溶液。对于含有腐蚀性的介质, 可以通过增加防腐涂层或选用耐腐蚀等级更高的合金钢代替。

②不锈钢。不锈钢以其卓越的耐腐蚀性和较高的机械强度, 被广泛用于输送高腐蚀性介质。奥氏体不锈钢, 如 304 和 316L, 因其优异的抗氧化和抗酸性能成为化工行业的常用材料。316L 不锈钢在输送含氯介

质如海水或盐溶液时表现出色，在化肥、制药和食品工业中均有重要应用。例如，在磷酸或硫酸等强腐蚀性液体的输送中，316L 不锈钢管道可有效延长设备寿命，保障工艺运行的连续性。不锈钢的价格较高，对某些强腐蚀性化学品如氢氟酸适应性不足，但通过类型优化和表面处理，其适用范围和经济性在不断提升。

③合金钢。合金钢通过添加特定元素如铬、镍、钼，具备了更高的耐高温性、耐腐蚀性和机械强度，是化工行业应对复杂工况的关键材料。它广泛应用于输送高温高压蒸汽、腐蚀性气体以及强氧化性介质的管道系统。例如，在炼油厂的裂解装置中，耐热合金钢因其在高温高压环境下的稳定性成为核心材料，确保装置长期安全运行。此外，合金钢在输送强腐蚀性气体（如氯气或氟化氢）时，其抗点蚀和抗缝隙腐蚀性能显著优于普通不锈钢，因此被广泛应用于氧化工艺的气体输送中。

2.2 非金属材料的性能及应用

①塑料管道。塑料管道是非金属材料的典型代表，常用于输送酸、碱和盐类介质。聚氯乙烯（PVC）管道以其良好的防腐性能和低成本成为输送低温、低压化学介质的理想选择，广泛应用于废水处理和化工厂的次级管网。聚丙烯（PP）管道相比 PVC 具有更高的耐热性，适用于 90℃ 以下的腐蚀性溶液输送，如化工生产中的酸洗和碱洗工艺。聚乙烯（PE）管道以其韧性强、耐磨性能优异的特点，适合含有固体颗粒的介质或长距离输送场景，如矿浆或污水输送。这些塑料管道的灵活性和轻便性显著减少了施工成本，但其耐高温性能和机械强度相对不足，需要根据实际工况选择合适的型号。

②玻璃钢管道。玻璃钢管道是另一类重要的非金属材料，由树脂基体和玻璃纤维增强材料复合而成，具有重量轻、耐腐蚀强和加工方便的特点。它特别适用于输送含酸、碱或盐类的腐蚀性液体，例如在电镀厂输送电解液或污水处理厂输送高腐蚀性废水。玻璃钢管道的内壁光滑，可有效减少流体阻力，提高输送效率，同时其抗老化性能优良，能够在复杂环境中长期使用。然而，由于其脆性较大，抗冲击能力较弱，因此不适合高压或强机械冲击场合。在实际应用中，玻璃钢管道通常被用作中低压输送系统的理想选择，结合经济性和防腐性能满足行业需求。

③复合材料管道。复合材料管道则结合了金属和非金属材料的优点，以其多功能性和高性能在化工行

业中占据重要地位。钢塑复合管通过内外覆塑料材料的钢管，兼具了金属材料的强度和非金属材料的防腐性能，广泛应用于工业废水、化工原料及中性介质的输送场景。此外，玻璃钢内衬复合管道在高腐蚀环境中表现出卓越的抗化学性能，适合输送盐卤溶液或酸性气体。这些复合材料管道在耐温、耐压、耐腐蚀性方面的表现使其成为化工行业满足多重工况需求的优选。

2.3 衬里材料的性能及应用

①衬胶管道。衬胶管道是在管道内壁涂覆一层天然橡胶或合成橡胶，形成具有高弹性和耐腐蚀性的保护层。橡胶层可以有效抵御酸、碱、盐类介质的侵蚀，同时具有一定的耐磨性能，适合输送固体颗粒含量高的介质。例如，在磷肥生产的磷酸输送系统中，管道需要长时间输送强酸性液体，而衬胶管道因其耐强酸性能和柔性缓冲能力成为理想选择。此外，衬胶管道在防震和隔音方面表现突出，广泛应用于要求减少振动和噪声的化工装置中。尽管橡胶层较软，抗机械冲击性能有限，但通过优化橡胶配方和施工工艺，可以大幅提升其耐久性。

②衬塑管道。衬塑管道是在基管内壁覆盖一层塑料材料，例如聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）或聚四氟乙烯（PTFE），兼具金属基管的机械强度和塑料材料的防腐性能。这类管道凭借优异的化学稳定性和较高的性价比，在输送腐蚀性化学品的场景中得到了广泛应用。其中，聚乙烯（PE）衬里以其耐腐蚀性和经济性，适合输送弱酸弱碱介质，例如污水处理厂的中性废水管网；聚丙烯（PP）衬里则在耐温性能上优于 PE，能够应对中等浓度酸碱溶液的输送需求，如化工生产中的酸洗和碱洗工艺。聚四氟乙烯（PTFE）衬里凭借其极高的耐腐蚀性能和耐高温性能，成为输送强酸（如浓硫酸、浓硝酸）或有机溶剂的最佳选择，广泛应用于化工厂的关键装置中。尽管 PTFE 衬里的成本较高，但其超长使用寿命和极低的维护需求使其在复杂工况下展现出显著的经济性和可靠性优势。

3 化工管道设计中材料的选用策略

3.1 根据工艺介质特性选择材料

①耐腐蚀性能的优先考虑。化工生产中常需要输送酸、碱、盐溶液以及有机溶剂等腐蚀性介质，材料的耐腐蚀性能直接关系到管道的安全性和寿命。例如，在输送浓硫酸时，碳钢管道因耐腐蚀性不足，容易发生穿孔和泄漏，而 316L 不锈钢或 PTFE 衬塑管道因其

出色的耐强酸性能成为最佳选择。在碱性介质的输送中，聚丙烯（PP）管道表现出优异的抗化学侵蚀性能，是输送强碱溶液的理想材料。此外，针对含氯离子的介质，例如海水或盐溶液，合金钢或玻璃钢复合管道因其抗点蚀性能较强，广泛应用于相关装置中。

②适应介质温度和压力。不同工艺条件下，管道需要承受的温度和压力各不相同，因此选材时需充分考虑材料的耐温性和抗压能力。输送高温高压蒸汽的管道通常选择耐高温性能优异的合金钢，而输送低温或常温的腐蚀性液体时，玻璃钢或衬塑管道是更具经济性的选择。例如，在某石化装置中，输送高温裂解气体需要管道承受 500℃ 以上的高温环境，选用耐热合金钢确保了管道的长期稳定运行。

③应对含固体颗粒的介质输送。在输送矿浆、煤浆等含固体颗粒的介质时，管道内壁会因颗粒冲刷而快速磨损，选材时需特别注重材料的耐磨性能。陶瓷衬里管道凭借极高的硬度和耐磨性，是此类场景中的首选。例如，在煤化工领域，陶瓷内衬管道能够显著降低浆液冲刷对管壁的磨损，有效延长设备使用寿命，同时减少因频繁更换而造成的停工损失。

3.2 优化成本与性能的平衡

①初始投资与长期效益权衡。在选材过程中，应同时关注材料的初始采购成本和全生命周期成本。低成本材料可能在短期内节约预算，但其耐久性和性能可能不如高性能材料，导致频繁维修或更换，增加运行成本。因此，应优先选择在使用周期内综合效益最高的材料。例如，部分耐腐蚀材料的初始成本较高，但因其较长的使用寿命和低维护需求，在长期运行中能显著降低整体费用。

②使用环境对选材成本的影响。材料选用需根据具体工艺环境优化，以避免过度选材造成资源浪费。对于腐蚀性较弱的介质，可以选择成本较低的防腐涂层碳钢或塑料管道；而在高腐蚀、高磨损环境下，则需选择性能更优异的复合材料或合金钢，以确保管道的安全性和稳定性。在满足工艺需求的基础上，合理优化选材既可降低初期投入，又能减少长期运行费用。

3.3 引入现代化选材方法

①全生命周期成本分析。全生命周期成本分析（Life Cycle Cost Analysis, LCCA）是一种综合评估工具，能够将材料的采购、施工、运行、维护及更换成本纳入整体考虑。相比仅关注初始投资，全生命周期成本分析提供了一种长远的经济视角。例如，在输送高腐

蚀性介质时，虽然不锈钢或高性能复合材料的初始成本较高，但其在减少维护和延长使用寿命方面的优势，使其在长期运行中展现出更低的综合成本。这种方法帮助工程师在性能和经济性之间找到最佳平衡点。

②数字化模拟与仿真技术。仿真技术是现代化选材中的重要手段，通过虚拟环境下的性能模拟，能够预先发现潜在问题并优化选材方案。例如，有限元分析（FEA）技术可模拟管道在高温、高压条件下的应力分布和形变情况，验证材料的承载能力是否符合设计要求。计算流体力学（CFD）则可用于模拟介质流动对管道内壁的冲刷磨损，为抗磨材料的选择提供科学依据。这些数字化工具不仅提升了选材的精度，还降低了试错成本，缩短了设计周期。

③大数据驱动的材料选择。随着工业物联网（IIoT）的应用普及，大量化工装置的运行数据被实时采集和分析。这些数据可用于评估不同材料在实际运行中的表现，为选材提供有力支持。例如，通过对已有管道失效案例的数据分析，工程师可以发现某些材料的常见问题，从而选择更适合特定工况的替代材料。同时，数据驱动的材料选择还能通过持续优化模型，提高未来选材的效率和准确性。

4 结语

化工管道作为工业生产的生命线，其材料选用直接关系到生产效率、安全性和经济效益。科学合理的选材策略不仅能应对高温、高压、强腐蚀等复杂工况，还能在长周期运行中降低维护成本，提升系统的可靠性。通过综合考虑工艺需求、环境影响和经济效益，以现代化技术和数据驱动优化选材方法，不仅为企业提供了更稳定的生产保障，也推动了化工行业向高效、安全、可持续方向迈进。管道作为连接工业生产的关键纽带，其材料选择的科学化和系统化，将持续助力现代工业向更高水平发展。

参考文献：

- [1] 郝源, 吴飞超. 煤化工项目中低温工况下管道选材研究 [J]. 天津化工, 2024, 38(06): 116-118.
- [2] 关雅楠. 化工管道设计及材料等级选用探讨 [J]. 辽宁化工, 2023, 52(08): 1165-1167+1200.

作者简介：

王珂 (1988-), 女, 汉族, 山东聊城人, 本科, 工程师, 研究方向: 化工工艺及管道设计。

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。