

天然气高温含硫化氢工况下管道材质选择研究

张鹏飞（四川科宏石油天然气工程有限公司，四川 成都 610000）

摘要：针对天然气输送系统在高温含硫化氢环境中面临的腐蚀失效与材料性能退化难题，本文构建了基于腐蚀-力学耦合损伤理论的管道材质选择框架。通过解构硫化氢电化学腐蚀与应力协同作用机制，揭示高温环境对硫化物膜动态演变及氢渗透行为的非线性放大效应，提出了涵盖抗腐蚀性能、高温力学稳定性与经济可行性的多维度评价模型，为高含硫天然气管道的材料优化设计与全生命周期管理提供了理论支撑与技术路径。

关键词：天然气管道；硫化氢腐蚀；高温工况；材质适应性；多目标优化

中图分类号：TE832 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）025-0106-03

Research on Pipeline Material Selection under High Temperature and Hydrogen Sulfide Containing Conditions of Natural Gas

Zhang Pengfei(Sichuan Kehong Petroleum and Natural Gas Engineering Co., Ltd. Chengdu Sichuan 610000,China)

Abstract: In response to the challenges of corrosion failure and material performance degradation faced by natural gas transportation systems in high-temperature hydrogen sulfide environments, this paper constructs a pipeline material selection framework based on the theory of corrosion mechanical coupling damage. By deconstructing the synergistic mechanism of hydrogen sulfide electrochemical corrosion and stress, the nonlinear amplification effect of high temperature environment on the dynamic evolution of sulfide membrane and hydrogen permeation behavior is revealed. A multidimensional evaluation model covering corrosion resistance, high temperature mechanical stability, and economic feasibility is proposed, providing theoretical support and technical path for material optimization design and full life cycle management of high sulfur natural gas pipelines.

Keywords: natural gas pipeline; Hydrogen sulfide corrosion; High temperature working conditions; Material adaptability; Multi-Objective Optimization

天然气输送系统在高温含硫化氢工况下面临严峻的腐蚀失效风险，其材质选择直接关乎能源运输安全与运营成本的经济性平衡^[1]。硫化氢在高温环境下的电化学反应活性增强，易诱发应力腐蚀开裂、氢致开裂等复合损伤机制，对传统碳钢及低合金钢构成显著性能瓶颈。

1 天然气高温含硫化氢工况分析

1.1 硫化氢腐蚀机理研究

硫化氢在天然气输送环境中的腐蚀行为本质为多相耦合的电化学-力学交互作用^[2]。在液相水膜存在条件下， H_2S 分解释放 H^+ 和 HS^- 离子，与金属表面发生阳极溶解反应，同时阴极析氢反应生成原子氢向金属晶格渗透。高温环境显著增强该过程的动力学活性：一方面，温度上升加速硫化氢电离速率，提升腐蚀介质的质子供给能力；另一方面，钢材表面硫化物腐蚀产物膜的生成速率与致密性呈现非线性关系，高温促使硫化物膜孔隙率增加并诱发局部剥落，形成“活化-钝化”震荡的加速腐蚀区^[3]。应力腐蚀开裂与氢致开裂构成高温含硫工况下材料失效的典型模式。当管道承受拉伸应力时，硫化氢吸附于金属缺陷部位，通过氢原子在应力梯度作用下的定向扩散，引发裂纹尖

端氢浓度富集，导致材料韧性断崖式下降^[4]。

1.2 高温对管道材质的影响分析

高温环境通过热力学与动力学双重路径加剧管道材质的性能劣化。当温度超过 $200^{\circ}C$ 时，金属晶格振动能显著增强，位错运动激活能降低，导致材料屈服强度与抗蠕变能力系统性衰减。微观层面，碳化物析出相的热稳定性差异引发晶界弱化，奥氏体不锈钢中 δ 铁素体含量随温度波动发生相变重组，形成局部应力集中源。高温与硫化氢腐蚀存在协同放大效应。热激活作用加速硫化氢分子解离，提升氢原子在金属中的扩散系数。温度梯度诱导的管道径向应力场与硫化氢吸附产生的表面压缩应力耦合，诱发非对称塑性变形，促使硫化物膜发生屈曲剥离。剥离界面处新生金属暴露于腐蚀介质，形成“腐蚀-力学损伤-再腐蚀”的正反馈循环^[5]。

2 管道材质选择的要求

2.1 抗腐蚀性能要求

在高温含硫化氢环境中，管道材质的抗腐蚀能力需满足多尺度损伤抑制要求。微观层面，材料应具备硫化物应力腐蚀开裂临界应力阈值高于工况最大拉应力的冗余设计，并通过晶界净化处理降低硫元素偏析

风险。氢致开裂敏感性需控制在标准氢渗透压阈值以下,要求材料氢陷阱密度与位错结构能有效阻滞氢原子扩散路径。宏观腐蚀速率需满足年均壁厚减薄量小于0.1mm的设计裕量,这取决于材料表面钝化膜的动态稳定性及其再修复能力。合金元素配比需兼顾腐蚀抑制与工艺可行性。铬元素通过形成致密 Cr_2O_3 氧化膜提升耐硫化物腐蚀能力,但过量添加将加剧碳化物析出倾向;钼元素可增强钝化膜的高温稳定性,但其与硫的亲合性可能诱发局部点蚀。

2.2 力学性能要求

在高温含硫环境下,管道材质的力学性能需满足多轴应力场下的复合载荷适配性。

首先,高温屈服强度衰减率需低于临界阈值,确保材料在热力耦合作用下的塑性变形可控性。抗蠕变性能要求通过Larson-Miller参数模型量化,以服役温度-时间等效关系预测蠕变断裂寿命的降幅边界。

其次,断裂韧性需兼顾静态与动态载荷响应特性,采用CTOD试验评估氢致脆化对裂纹扩展阻力的抑制效应,其门槛值应高于硫化氢环境下的最大应力强度因子。焊接接头的力学适配性构成关键约束。热影响区的硬度梯度需控制在HV250以内,以避免残余应力与硫化氢吸附的协同致裂风险。循环载荷作用下的低周疲劳寿命需通过应变能密度准则重新标定,动态应变时效导致的循环硬化/软化行为需通过扫描电镜原位观察明确其微观机制。

2.3 经济性与可行性要求

管道材质的经济性需在全生命周期成本框架内权衡初始投资与长期运维损耗。高合金材料虽具备优异抗腐蚀性能,但采购成本与加工能耗显著高于碳钢,需通过壁厚优化设计或局部增强方案平衡性能冗余与经济负荷。同时应考虑材料对酸性介质缓蚀剂的敏感性差异,优选可降低化学药剂投加频次的材质以压缩后期维护开支。

供应链稳定性亦为核心考量点,特殊合金的全球产能分布与地缘政治风险可能制约大规模工程应用的可行性。工艺可行性聚焦于工业化生产的边际条件。双相不锈钢的热处理窗口狭窄性要求精准控温设备支持,而镍基合金的冷加工硬化倾向需匹配多道次退火工艺,二者均显著提升制造成本及技术门槛。

3 常见管道材质及其适用性分析

3.1 碳钢与低合金钢

碳钢与低合金钢在高温含硫化氢环境中的适用性受限于其固有材料特性与腐蚀响应机制。碳钢因成本低廉、加工便捷,在低硫分压或短周期项目中仍被有限采用,但其晶界硫偏析倾向与氢陷阱密度过高,易

诱发硫化物应力腐蚀开裂及阶梯型氢致裂纹。低合金钢通过添加微量铬、钼等元素,虽能提升基体强度并延缓均匀腐蚀速率,但合金元素与硫化氢的交互作用可能加速局部腐蚀,例如钼富集区因硫化钼优先溶解形成的点蚀核。高温环境下,两类材料的失效风险呈非线性放大趋势。碳钢表面硫化物膜在热震荡下频繁破裂再生,动态平衡的破坏导致腐蚀速率较常温环境提升数倍;低合金钢中析出的碳氮化物因高温回溶效应,削弱晶界抗氢脆能力。

3.2 不锈钢及耐蚀合金

奥氏体不锈钢与双相不锈钢凭借其钝化膜稳定性,在含硫环境中展现出优于碳钢的抗均匀腐蚀能力。铬、镍元素形成的致密氧化膜可有效阻隔硫化氢与基体接触,但氯离子共存时易触发点蚀及缝隙腐蚀的协同损伤。双相不锈钢通过铁素体-奥氏体双相结构抑制裂纹扩展,其抗硫化物应力腐蚀开裂临界应力值较传统奥氏体钢提升,但焊接热影响区的相比比例失衡可能削弱该优势。

镍基合金因高钼含量及钝化膜自修复特性,成为极端高温高硫工况的优选材料。其抗氢渗透能力源于晶格结构的低扩散系数,可有效阻断氢致开裂的原子迁移路径。然而,材料成本呈指数级增长,且冷加工硬化现象显著增加成型与焊接工艺难度。

3.3 双金属复合管及其他新型材质

双金属复合管通过异质材料层状复合实现性能梯度优化,内衬耐蚀合金与碳钢基体的结合,兼具经济性与抗腐蚀优势。爆炸复合或冶金结合工艺形成的界面结合强度需满足高温下热应力循环的稳定性,界面扩散层厚度超过临界值可能诱发电偶腐蚀敏感性。柔性复合管采用聚合物-金属叠层结构,可适应地质变形但受限于长期高温下的层间剥离风险,其耐硫渗透性能依赖阻隔涂层的纳米孔隙率控制。非晶合金因无晶界结构展现出优异的均匀腐蚀抗力,其原子密堆特性可阻断氢扩散通道,但大尺寸构件的非晶形成能力与热稳定性制约工程应用。

4 管道材质选择方法与流程研究

4.1 材质选择的基本步骤与流程

4.1.1 工况条件与腐蚀环境的确定

管道材质选择的首要环节在于系统界定服役环境的边界约束参数。需量化天然气的硫化氢分压、温度波动区间、介质流速及多相流耦合作用强度,同时识别二氧化碳、氯离子等协同腐蚀因子的浓度阈值。温度场分布需结合管道热力学模型,明确稳态与瞬态工况下的热应力幅值及梯度变化频率。

腐蚀环境表征需整合电化学腐蚀与力学损伤的双

向作用路径,建立多因子加速效应关联矩阵。动态环境参数的跟踪监测构成精细化分析的基础。需通过在线腐蚀探针、氢通量传感器及应力应变监测装置,捕捉工况波动对腐蚀速率的非线性扰动规律。最终形成涵盖介质组分、热力学条件、力学载荷及时间维度的四元参数空间,为材质适应性评价提供动态输入边界。

4.1.2 材质数据的收集与分析

材质数据采集需覆盖材料基因库、腐蚀实验数据库及工程服役案例库三维度。通过材料基因工程平台提取合金元素配比、微观组织特征与抗硫性能的关联规律,整合高温高压釜模拟实验的腐蚀速率、氢渗透通量等动态响应参数。采用主成分分析法筛选关键性能指标,构建材料性能矩阵以量化不同合金体系的工况适配度。

数据验证需结合多尺度表征技术,例如同步辐射CT扫描解析硫化物膜的三维孔隙网络结构,电子背散射衍射(EBSD)捕捉晶界工程处理后的氢扩散路径阻隔效应。现场挂片监测数据与实验室加速实验结果的映射校正,可消解单一数据源的模型外推偏差。

4.1.3 材质性能的评估与比较

材质性能评估需建立多目标耦合的决策矩阵,整合抗腐蚀性、力学强度、经济性及工艺适配性四大核心维度。针对抗腐蚀性能,采用腐蚀电流密度、氢脆敏感系数及裂纹扩展速率三参数构建动态损伤指数,通过电化学噪声分析捕捉钝化膜破裂的瞬态特征;力学性能评估引入高温蠕变断裂寿命与动态应变时效因子的协同标定模型,量化材料在交变载荷下的性能退化轨迹。

比较逻辑需嵌入多属性决策理论,运用逼近理想解排序计算候选材质与理想解的贴近度,结合熵权法动态分配指标权重以反映工况优先级差异。对于性能冲突项,采用帕累托前沿分析法识别非劣解集,并通过决策树模型映射至工程约束边界。

4.2 材质选择的评估指标与方法

4.2.1 抗腐蚀性能评估指标体系

高温含硫工况下管道材质的抗腐蚀性能评估需构建多尺度动态评价体系。微观层面聚焦钝化膜再生速率与硫化物膜孔隙率演变规律,通过电化学阻抗谱与扫描电镜原位观测量化表面保护层失效阈值;介观尺度引入氢渗透通量及裂纹扩展速率双参数,表征材料对氢致开裂与硫化物应力腐蚀的协同抗力。宏观腐蚀速率评估需整合高温高压釜模拟实验与现场挂片监测数据,建立温度-硫化氢分压-流速三因子加速腐蚀模型。评估结果需通过失效模式映射矩阵验证,确保实验室结论与工程实际损伤机制的拓扑一致性。

4.2.2 力学性能评估方法与标准

管道材质的力学性能评估需构建热力耦合场下的本构响应模型。高温拉伸试验结合数字图像相关技术,解析材料在硫化氢环境中的屈服强度动态衰减特性与颈缩行为异质性;低周疲劳试验通过应变控制模式,量化裂纹萌生寿命与硫化氢吸附导致的闭合效应抑制程度。断裂韧性评估采用双悬臂梁试样,捕捉氢致裂纹扩展速率与应力强度因子的非线性关联规律。针对焊接接头,需开发多轴应力状态下的各向异性修正模型,整合残余应力分布图谱与氢陷阱密度梯度数据,建立热影响区脆化倾向的预测方程。

4.2.3 经济性评估模型与工具

管道材质的经济性评估需构建全生命周期成本优化模型,整合直接成本与间接成本。基于腐蚀速率预测方程,通过蒙特卡洛模拟量化不同材质在动态工况下的维护周期与更换概率,生成成本概率密度分布曲线。供应链稳定性评估引入地理政治风险指数与产能波动系数,结合材料可获得性建立多级库存优化模型。环境合规成本需耦合区域性法规约束,采用影子价格法量化环保附加成本。评估工具开发需集成多目标优化算法,例如非支配排序遗传算法平衡成本-性能矛盾目标,生成帕累托最优解集。通过敏感性分析识别关键影响因子,建立成本驱动力的动态权重分配机制。

5 结语

高温含硫化氢环境对天然气管道材质的严苛要求,本质上是材料科学、腐蚀机理与工程经济学的多学科耦合命题。双相不锈钢的相平衡调控、镍基合金的钝化膜自修复机制及复合管材的界面优化策略,为极端工况提供了差异化的解决方案。未来需融合数字孪生与材料基因组技术,开发具备实时反馈能力的智能选材系统,同时探索非晶合金、梯度功能材料等前沿方向,推动高抗硫管道材质从经验试错向机理驱动的范式跃迁。

参考文献:

- [1] 王洋,马鑫,王治锦,等.天然气管道安全运行及质量管理[J].石化技术,2025,32(4):317-319.
- [2] 张明.天然气管道腐蚀主要原因分析与防护措施[J].化工管理,2024,(10):119-121.
- [3] 张明.天然气长输管道运行安全风险及预防措施[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(4):87-89,92.
- [4] 魏丽波.天然气长输管道运行安全风险及措施研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(10):10-11,14.
- [5] 赵帅,廖柯熹,周飞龙,等.CO₂/H₂S共存条件下集输管道选材的新方法及应用[J].科学技术与工程,2021,21(31):13313-13318.