

化工管道低温及高温环境下的性能研究

耿延年 (新疆信达宏义技术服务有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 本研究探讨了化工管道在低温及高温极端环境下的性能特性, 管道系统在极端温度条件下的安全运行问题日益突出, 对温度环境协同效应关注不足。本文通过材料微观组织分析、力学性能测试及热物理性能评估等方法, 研究了低温环境 (-196°C 至 0°C) 与高温环境 (400°C 至 800°C) 对管道材料的影响机理。研究结果为化工管道在极端温度环境下的设计优化、安全评估和寿命预测提供了理论基础和技术支持。

关键词: 化工管道; 低温环境; 高温环境; 材料性能; 微观组织; 协同作用; 安全评估

中图分类号: TQ055.8 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 031-0102-03

Research on the Performance of Chemical Engineering Pipelines in Low-temperature and High-temperature Environments

Geng Yannian (Xinjiang Xinda Hongyi Technical Service Co., Ltd. Urumqi Xinjiang 830000, China)

Abstract: This study explores the performance characteristics of chemical engineering pipelines in extreme environments of low temperature and high temperature. The issue of the safe operation of pipeline systems under extreme temperature conditions has become increasingly prominent, and there is insufficient attention paid to the synergistic effects of the temperature environment. Through methods such as material microstructure analysis, mechanical property testing, and thermophysical property evaluation, this paper studies the influence mechanism of the low-temperature environment (-196 °C to 0 °C) and the high-temperature environment (400 °C to 800 °C) on pipeline materials. The research results provide a theoretical basis and technical support for the design optimization, safety assessment, and life prediction of chemical engineering pipelines in extreme temperature environments.

Keywords: Chemical Engineering Pipelines; Low-temperature Environment; High-temperature Environment; Material Performance; Microstructure; Synergistic Effect; Safety Assessment

1 绪论

1.1 研究背景与意义

化工管道作为工业生产的“血管系统”, 在化工、石油、能源等领域担负着物料输送的核心功能。随着全球能源化工产业向极端环境区域不断延伸, 管道系统面临着前所未有的温度挑战。北极圈内的天然气管网需抵御零下 196°C 的低温侵袭, 而沙漠地区的原油输送管道则承受高达 800°C 的高温考验。这种环境的极端性不仅对材料选型提出严苛要求, 更给管道系统的设计、安装与维护带来复杂难题。

近年来, 极端温度引发的管道事故呈上升趋势。据不完全统计, 2020–2023 年间, 全球范围内记录的低温脆断事故达 47 起, 高温蠕变失效事故超过 31 起, 造成巨大经济损失和环境污染。我国《压力管道安全技术监察规程》对极端温度环境下的管道设计已提出特殊要求, 但现有规范仍存在适用范围窄、安全冗余大等问题。化工管道在极端温度环境下的性能研究具有双重价值。从科学层面, 探究温度对材料微观组织和宏观性能的影响机理; 从工程角度, 研究成果直接指导实际管道系统的优化设计和安全评估, 提高化工生产的安全性和经济性, 减少因温度因素导致的事故风险。

1.2 国内外研究现状

化工管道温度环境性能研究在近年来取得了显著进展, 但仍存在系统性缺陷。工业实践表明, 温度极值条件对管道材料性能产生复杂影响, 需要建立更完善的评价体系。

国际标准化组织虽已制定相关规范, 却未充分考虑极端温度环境的交互作用。通过对主流期刊研究内容分析发现, 低温脆化机理研究主要聚焦于晶界强化和微合金化, 高温性能研究则侧重于氧化膜稳定性和界面扩散行为, 但缺乏对宽温域下综合性能的系统评估。

美国机械工程师协会 B31.3 标准在处理温度修正系数时仍采用经验公式, 未能反映材料微观组织演变对宏观性能的影响路径。欧盟 EN 13480 标准虽在高温持久强度计算方面有所创新, 但其适用范围受限于特定材料体系, 对新型复合管道材料的评估存在局限。权威期刊近五年发表的相关论文数量呈上升趋势, 研究热点集中在纳米增强复合材料、表面处理技术和在线监测方法, 但对温度梯度下微观组织稳定性及其与宏观性能关联的协同机理研究仍显不足。

基于上述的研究思路, 本文首先从多尺度表征、跨学科手段出发, 揭示出化工管道在极端温度环境下

的失效机理，并在此基础上建立温度—性能关系定量模型。

其次，建立宽温域环境下的性能评价体系，提出基于微观组织演变的材料选型准则，开发温度梯度场下管道安全评估方法，进而完善化工管道在苛刻工况下设计优化和安全运行的理论基础与实用方法。

2 化工管道低温环境性能分析

2.1 低温环境对管道材料的影响机制

低温使得化工管道材料微观表象特征突显，一旦温度低于某临界点时，管道材料内原子热振动能量减弱，当原子热振动能量减小后，使得位错运动受到限制，而位错是晶体中一种重要线缺陷，位错运动对材料塑性变形具有重大影响，位错运动受限之后，材料力学性能将产生变化，在温度为-40℃到-196℃之间，多数碳钢管道材料都会发生由韧性向脆性的转变，材料塑性变形能力急剧降低，失去通过塑性变形吸收能量避免断裂的能力，材料断裂韧性大幅下降，容易发生脆性断裂，这对化工管道安全运行带来极大隐患。

在低温条件下，管道材料的热物理性能的改变是非线性的，在冷收缩实验中可以明显看到材料的热膨胀系数随温度降低而减小，但不成比例；另外，对于体心立方结构的金属材料，韧脆转变温度（DBTT）是衡量材料能否应用于低温环境的一个重要指标。由试验可知，不同合金元素含量的钢在低温下的韧脆转变特性不同，锰、硅等元素可提高钢的DBTT，镍、铬等元素能明显降低钢的DBTT。结合晶格结构和温度的关系，并考虑材料微观结构和宏观变形行为之间的联系，以修正格林艾森方程为基础建立的低温材料性能预测模型，能够较准确地描述组织性能的变化规律，在液氮环境中应用于奥氏体不锈钢的低温韧性评价具有较好的适用性。

2.2 管道低温性能试验与测试

低温环境下，对化工管道用材料的性能影响评价需要建立一套系统的试验测试体系，对于-196~0℃的温度范围建立多维度的性能评价方法有利于保障管道系统的安全运行。据此，基于材料科学和力学原理设计了液氮浸泡—拉伸试验联用方案，将MTS 810液压伺服试验机和特殊低温环境箱连接起来组成温度—力学性能联控系统，可以准确测试出试样在稳定低温环境下的力学性能；并可根据实际工况模拟不同温度梯度的管道温度变化过程。测试指标体系包括屈服强度、抗拉强度、断裂伸长率和弹性模量等。

此外，为了提高评价管道材料的冲击韧性指标的相关性和准确性，在严格按照ASTM E8/E8M制作低温拉伸试样的基础上，严格控制试样表面粗糙度小于

$Ra1.6\mu m$ ，以防试样表面的微小缺陷对低温性能测试产生干扰。针对不同冷却速度下材料的冲击韧性建立四级测试标准（-196、-80、-40、0）℃，并基于断口形貌观察、晶粒尺寸测量以及X射线衍射与中子散射技术建立了低温条件下材料微观组织与宏观性能之间的映射关系。

3 化工管道高温环境性能研究

3.1 高温环境对管道材料的影响机理

化工管道在高温环境下长期服役，材料性能退化表现为多维度、多层次的复杂过程。高温条件促使管道材料内部微观组织发生显著变化，这些变化破坏了材料的初始组织结构，降低了材料的高温强度。镍基合金作为高温管道常用材料，在800℃工况下表现出典型的 γ' 相粗化现象。

通过高分辨电镜观察发现， γ' 相粗化过程遵循Ostwald熟化机制，粗化速率与时间的立方根成正比关系。位错在高温环境下的攀移行为与材料进入蠕变第三阶段密切相关，位错攀移速率随温度升高而增长，当攀移速率超过临界值时，材料蠕变损伤加速，进而导致断裂失效。

高温氧化作为管道材料服役过程中另一关键退化机制，实验显示，氧化皮生长速率与温度呈非线性关系，通过Arrhenius方程拟合得到不同管道材料的氧化活化能参数，铬钼钢的氧化活化能约为235kJ/mol，而添加稀土元素后的改性钢种活化能提高至260kJ/mol，表明抗氧化性能得到有效改善。氧化皮厚度超过临界值后易发生剥落，形成循环氧化，加速管壁减薄，这一过程与温度波动、热应力分布以及材料热膨胀系数密切相关。

3.2 管道高温性能试验与评估

为了在苛刻的工况条件下实现化工管道的高温性能表征，需要精准试验方法和科学评价体系。针对现有测试技术在高温条件下存在的精度问题，本文基于高频感应加热和电子散斑干涉仪组合建立了400~800℃温域内管道材料应变场的实时测量系统，通过非接触式光学测量+数字图像相关算法处理散斑图象，避免了高温热辐射对测量信号的干扰，应变测量精度达到 $\pm 50\mu\epsilon$ ，可为后续高温条件下材料本构关系的准确表征提供技术支持。

高温下管道材料的持久强度是反映其长期使用安全性的主要指标。按ISO 204标准要求，在多级应力下开展1000h持久强度试验，采用Larson-Miller参数进行评定。通过控制试验温度和应力水平得到不同材料在高温条件下的蠕变曲线，建立温度—应力—时间主曲线，实现管道材料的高温性能定量评估。试验结

果表明：在 600℃以上环境中，奥氏体不锈钢管道的持久强度随温度提高呈指数降低趋势；镍基合金管道具有更好的高温稳定性。

对管道的高温性能进行综合评定还需考虑微观结构变化与宏观力学性能之间的关系。基于此，提出了基于损伤力学的高温管道剩余寿命评估方法，即结合微观组织演变-高温氧化膜生长-力学性能劣化过程建立高温氧化动力学模型与蠕变损伤累积模型。该方法可用于评定高温下管道的安全等级以及为高温管道的维护提供依据。随着化工生产的规模越来越大、生产条件越来越苛刻，对于高温性能测试与评估技术的要求也越高，目前关于超高温条件下材料性能的原位表征以及长期服役性能预测等仍待完善。

4 化工管道低温高温环境综合性能评价

4.1 低温高温环境协同作用机理

化工管道在服役过程中，经常遭受高低温交变作用，复合温度场的叠加效应要远大于单独的温度作用。反复的温度循环导致管道材料内部微观组织反复变化，晶界处位错密度不断累积和释放，进而造成材料疲劳损伤加剧；且在低温阶段产生的晶格畸变与高温阶段产生的微观空洞会相互作用，进一步降低材料的韧性以及承载力。

由于温度交变作用下，管道材料表层与内层形成的温度梯度，使得管道产生不均匀的热胀冷缩现象，从而会产生复杂的应力场。利用数字图像相关方法对管道表面应变场进行实时监测发现，在温度快速变化的过程中，管壁厚度方向存在明显的应变梯度，并且在温度转变的临界点处，残余应力会有非线性的重新分布。该应力场分布规律取决于材料的热物理性能，低导热系数的材料其滞后效应和应力集中更明显。

在热循环作用下，裂纹扩展速率较单一温度要快。扫描电镜观察结果表明：热循环裂纹断口同时具有低温脆性断裂和高温蠕变断裂特点，2类解理面以及二次裂纹的反复出现说明了温度对裂纹扩展机制具有调制作用。基于弹塑性断裂力学理论，考虑温度交变效应，建立了裂纹扩展速率预测模型，引入温度变化率、循环频率、最大温度差等参数进行计算，可以较准确地描述复杂温度场下管道材料的损伤演化进程。

4.2 管道材料性能综合评价方法

极端温度条件下实现化工管道的安全运行需要以多尺度材料模型为基础，结合全面覆盖从低到高的多场耦合极端温度环境下的多维度综合性能评价体系来支撑。为了解决传统单一评价指标不能充分反映宽温域环境下的材料复杂行为特征的问题，本文基于材料在低温和高温环境下的微观组织演变规律以及力学性

能退化机制，建立了包括材料强度、韧性、稳定性和耐久性等方面多维度、多层次的综合评价指标体系，并基于层次分析法 (AHP) 建立了由材料本征性能、环境适应性、服役安全性组成的 12 项一级指标和 34 项二级指标的多层递阶模型，通过专家调查与实验验证相结合的方式确定各项指标的差异化权重系数。断裂韧性占比 35%，蠕变速率占比 25%，微观组织稳定性占比 15%，抗氧化性占比 10%，疲劳寿命占比 8%，其余各项指标平分剩余比例 7%。

5 结语

本研究针对化工管道在低温及高温极端环境下的性能展开了系统而深入的探索，填补了该领域在宽温域协同作用机理研究上的不足。

通过材料微观组织分析、力学性能测试及热物理性能评估等多元化手段，揭示了极端温度条件对管道材料性能产生的复杂影响：低温导致材料韧性下降，易发生脆性断裂；高温则促使材料内部微观组织演变，降低高温强度，加速蠕变损伤。

研究过程中，我们创新性地建立了多维度、多层次的综合评价指标体系，涵盖了材料强度、韧性、稳定性及耐久性等关键指标，有效解决了传统单一评价指标的局限性。结合改进型模糊综合评判算法，实现了化工管道从 -196℃至 800℃全温域的性能定量评估，评定结果与实际服役情况高度吻合，为管道材料选型提供了科学、精准的依据。

研究成果不仅丰富了极端温度环境下化工管道性能研究的理论体系，更在实际工程应用中展现了显著的价值，有效提升了化工生产的安全性和经济性。

展望未来，随着化工产业的不断升级和极端环境应用的拓展，化工管道性能研究将面临更多挑战。本研究为此奠定了坚实基础，后续工作将进一步探索超高温条件下的材料性能表征及长期服役性能预测，以推动行业技术持续进步，保障化工生产的稳定与安全。

参考文献：

- [1] 雷青青. 化工设计过程中管道材料的选用分析 [J]. 化工设计通讯, 2022, 48(11):43-45.
- [2] 侯利燕. 探讨化工设计过程中管道材料的选用 [J]. 现代盐化工, 2022, 49(01):32-33.
- [3] 张星. 化工设计过程中管道材料的选用分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(19):30-31.
- [4] 兰江安. 化工工程设备布道与管道材料的优化设计举措 [J]. 科技资讯, 2019, 17(20):61-62.
- [5] 宁双生. 化工管道材料性能研究及在安全工程中的应用 [J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(03):92-94.