

# 低温低压管道安装设计中的应力分析与优化方法

邹晔

中国航天空气动力技术研究院, 北京市, 100074;

**摘要:** 低温低压管道广泛应用于制冷、能源、化工等工业领域, 其安装设计的合理性直接关系到系统运行的安全性与经济性。低温环境易导致材料脆性增加, 而低压工况下的管道受力状态又具有特殊性, 两者共同作用使管道系统的应力问题尤为突出。本文从低温低压管道的材料特性与受力特点出发, 系统分析安装设计中温差应力、机械应力及残余应力的产生机制, 探讨基于结构优化、支撑设计及材料选择的应力控制方法, 阐述应力分析的关键技术与优化路径。研究表明, 通过综合运用有限元模拟与工程经验, 可实现低温低压管道应力的精准调控, 为管道系统的安全稳定运行提供技术保障。

**关键词:** 低温低压管道; 安装设计; 应力分析; 优化方法; 安全运行

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.03.049

## 引言

我国北方严寒地区历年来月平均最低气温往往都低于 $-20^{\circ}\text{C}$ , 有的地区甚至低于 $-30^{\circ}\text{C}$ 。对于这种寒冷地区, 如果室外没有保温、伴热等措施的碳钢管道, 即使管道正常工况的设计温度高于 $-20^{\circ}\text{C}$ , 但在冬季, 介质温度会随着环境温度的降低而逐渐降低, 最终与环境温度趋于一致。针对这种情况, 工程上为了缩短采购周期、降低施工技术难度以及工程投资等大量选用最低使用温度为 $-20^{\circ}\text{C}$ 的20#钢而不选用低温碳钢。此时, 若设计不当, 管道有脆性断裂的风险。传统安装设计中, 往往沿用常温高压管道的经验方法, 忽视了低温下材料脆性增大、热胀冷缩效应加剧等特殊问题, 难以满足系统长期安全运行的要求。

随着工业技术的发展, 低温低压管道的应用场景不断扩展, 对安装设计的精度与可靠性提出了更高要求。应力分析作为管道设计的核心环节, 通过识别应力源、评估应力水平、制定控制策略, 可有效避免因应力超标引发的故障。本文结合低温低压管道的工作特性, 深入探讨安装设计中的应力分析方法与优化路径, 旨在为工程实践提供理论参考, 推动低温低压管道设计的规范化与精细化。

## 1 低温低压管道的应力特性与影响因素

### 1.1 低温环境对材料与应力的影响

低温环境是影响管道应力状态的关键因素, 其对材料性能的改变直接作用于应力的产生与演化。金属材料在低温下会发生韧性向脆性的转变, 屈服强度与抗拉强度虽有所提高, 但冲击韧性显著下降, 材料的塑性储备减少, 对局部应力集中的敏感性增强。当管道因温度变化产生收缩变形时, 若受到约束限制, 会产生较大的温差应力, 在材料脆性增加的情况下, 这种应力易导致管

道焊缝、弯头、法兰等薄弱部位出现裂纹。

低温下的材料热物理性能变化也会加剧应力问题。多数金属材料的线膨胀系数随温度降低而略有减小, 但低温与常温之间的温差绝对值较大, 管道的总收缩量依然显著。

### 1.2 低压工况下的管道受力特点

低压工况下的管道受力状态与高压管道存在明显差异, 其应力构成与分布具有特殊性。低压管道承受的内压载荷较小, 由介质压力产生的环向应力与轴向应力通常处于较低水平, 但这并不意味着应力问题可以忽视。相反, 低压管道往往因输送低温介质需要较大的管径, 管道自重及介质重量产生的弯曲应力更为突出, 尤其在水平管道的支撑间距设计不合理时, 易因挠度超标导致局部应力集中。

低压管道的连接方式也会影响应力分布。为保证密封性能, 低温低压管道多采用法兰连接, 而法兰密封面的预紧力在低温下可能因螺栓冷缩而下降, 为维持密封需施加更大的预紧力, 这会使法兰与管道连接部位产生附加应力。

### 1.3 安装过程中的残余应力影响

安装过程中产生的残余应力是低温低压管道应力的重要组成部分, 其对系统安全性的影响常被忽视。管道焊接过程中, 焊缝及热影响区因局部高温加热与冷却, 会产生不均匀的塑性变形, 形成焊接残余应力。在常温下, 这种残余应力可能与工作应力叠加, 但材料的塑性可部分缓解其影响; 而在低温下, 材料塑性下降, 残余应力难以通过塑性变形释放, 会显著提高管道的整体应力水平, 增加脆断风险。

管道的冷态安装与热态运行之间的温差也会产生残余应力。安装通常在常温下进行, 而运行时管道处于低温状态, 若安装时未考虑低温收缩量, 强行固定管道

或过度限制其自由变形,会在管道投入运行后产生较大的约束应力。此

## 2 低温低压管道安装设计中的应力分析方法

### 2.1 温差应力的计算与评估

温差应力是低温低压管道最主要的应力源,其分析需结合管道材料的热物理性能、温度变化范围及约束条件。温差应力的基本计算基于热胀冷缩原理,通过确定管道在低温下的自由收缩量与实际允许收缩量的差值,计算因约束产生的附加应力。对于简单管道系统,可采用弹性理论公式进行近似计算,考虑管道的弹性模量、线膨胀系数、长度及约束刚度等参数,评估温差应力是否在材料许用应力范围内。

对于复杂管道系统,需采用有限元分析方法进行精细化计算。通过建立管道三维模型,模拟低温环境下的温度场分布,将温度载荷转化为结构应力。有限元分析可考虑管道的几何形状、支撑布置、附件连接等细节,准确识别弯头、三通、异径管等部位的应力集中系数,评估局部应力是否超过材料的低温许用应力。同时,通过模拟管道从安装温度到运行温度的冷却过程,可分析温度变化速率对温差应力的影响,为制定合理的预冷方案提供依据。

### 2.2 机械应力的分析与验证

机械应力的分析需涵盖管道自重、介质重量、风载荷及地震载荷等多种载荷类型,评估其对管道系统的综合影响。对于低温低压管道,自重与介质重量产生的弯曲应力是机械应力的主要组成部分,其分析需确定管道的跨度、支撑方式及载荷分布。通过计算管道在不同支撑间距下的最大挠度与弯曲应力,可优化支撑布置,避免因挠度过大导致的应力集中。

法兰连接部位的机械应力分析需重点关注螺栓预紧力与密封性能的平衡。通过计算螺栓在低温下的预紧力损失,确定合理的初始预紧力,避免因预紧力不足导致泄漏或预紧力过大产生法兰变形与附加应力。对于阀门、过滤器等重型附件,需分析其对管道的附加力矩与剪力,评估管道在连接部位的应力水平,必要时通过设置专用支架分担载荷,减少对管道主体的应力影响。

### 2.3 残余应力的检测与控制

残余应力的分析需结合安装过程的工艺参数,评估其分布特征与影响程度。焊接残余应力的检测可采用无损检测方法,如X射线衍射法、超声法等,测定焊缝及热影响区的残余应力大小与方向,识别应力集中区域。对于检测出的高残余应力部位,可通过低温时效处理、振动时效等工艺方法进行消除或降低,减少其与工作应力的叠加效应。

安装过程中的约束残余应力分析需模拟管道的安装与运行状态,评估约束条件对残余应力的影响。通过分析管道在安装时的固定方式、冷紧量设置等,确定合理的安装工艺参数。例如,对于长距离直管段,可在安装时预留一定的冷紧量,补偿低温下的收缩变形,降低运行时的约束应力。同时,通过检查管道支架的安装精度,确保支架与管道的紧密接触,避免因局部间隙导致的应力集中。

## 3 低温低压管道安装设计的优化方法

### 3.1 管道结构与布置优化

管道结构的优化旨在通过合理的几何设计减少应力集中,提高系统的柔性。对于长距离直管段,可采用波纹管补偿器、U形弯管等柔性元件,吸收低温下的收缩变形,降低温差应力。波纹管补偿器的选择需考虑其补偿量、工作温度与压力,确保其在低温环境下的密封性能与使用寿命。U形弯管的设计则需合理确定弯曲半径与长度,通过自身变形实现补偿,避免因结构刚性过大产生过高应力。

管道布置的优化应遵循短直、平缓的原则,减少不必要的弯头与阀门,降低局部阻力与应力集中。在转弯处,采用大曲率半径的弯头,避免90度急弯,减少流体冲击产生的附加力矩。管道与设备的连接部位应保持柔性,通过设置柔性短管或波纹管,减少设备振动对管道的应力传递。此外,合理规划管道的走向,避开振动源与热源,减少外部环境对管道应力状态的干扰。

### 3.2 支撑设计与固定方式优化

支撑设计的优化是控制机械应力与温差应力的关键,需根据管道的重量、温度变化及振动情况选择合适的支撑类型与布置方式。对于低温低压管道,滑动支架与导向支架应用较为广泛,可允许管道在低温下自由收缩,减少约束应力。滑动支架的滑动面需采用低摩擦系数的材料(如聚四氟乙烯),确保管道在低温下能顺利滑动,避免因卡涩产生附加应力。

固定支架的设置需谨慎,仅在必须限制管道位移的部位使用,如管道与设备连接处、补偿器两端等。固定支架的强度与刚度需满足受力要求,避免因管道收缩产生的推力导致支架变形或损坏。对于重型附件,应设置独立的承重支架,直接将载荷传递至基础,避免附件重量由管道承担产生的弯曲应力。

### 3.3 材料选择与焊接工艺优化

材料选择的优化需考虑低温环境下的力学性能与耐腐蚀性,确保材料在工作温度下具有足够的韧性与强度。对于温度低于-20℃的管道,应选用低温韧性优良的材料,如低碳素钢、奥氏体不锈钢等,避免使用在

低温下易发生脆性断裂的普通碳素钢。材料的低温冲击韧性指标（如-40℃时的冲击功）需满足设计要求，确保在应力作用下不易发生脆断。

焊接工艺的优化旨在减少焊接残余应力与焊接缺陷，提高焊缝质量。采用低氢型焊条或焊丝，减少焊接过程中的氢输入，降低氢致裂纹的风险。焊接前对坡口进行预热，控制焊接过程中的层间温度，避免因冷却速度过快产生淬硬组织与焊接应力。焊接后进行消氢处理与低温回火，消除焊接残余应力，改善焊缝的低温韧性。

## 4 应力分析与优化的工程应用要点

### 4.1 设计标准与规范的遵循

低温低压管道的应力分析与优化需严格遵循相关设计标准与规范，确保设计的安全性与合规性。目前，国内常用的规范包括《工业金属管道设计规范》《低温管道施工及验收规范》等，对低温管道的材料选择、应力计算、支撑设计等方面均有明确规定。在设计过程中，需根据管道的工作温度、压力、介质特性等参数，确定适用的规范条款，选择合适的设计方法与安全系数。

国际标准如 ASME B31.3《工艺管道》、EN 13480《金属工业管道》也为低温管道设计提供了参考，其对低温材料的选用、应力评估方法等规定更为细致。在涉外工程或采用进口设备的系统中，需结合国际标准进行设计，确保管道系统与设备的兼容性。

### 4.2 有限元模拟的合理应用

有限元模拟在低温低压管道应力分析中具有重要作用，但其应用需结合工程实际，确保模型的准确性与计算结果的可靠性。建模时需合理简化管道系统，保留关键部位的几何特征，如弯头、三通、法兰等，忽略对整体应力影响较小的细节，提高计算效率。材料参数的输入需采用低温下的实测数据，如低温弹性模量、泊松比、线膨胀系数等，避免使用常温参数导致计算误差。

边界条件的设置是有限元模拟的关键，需准确模拟管道的支撑方式、约束条件及载荷类型。对于滑动支架，需定义合理的摩擦系数与位移限制；对于固定支架，需设置刚性约束；对于设备接口，需考虑设备的刚度与允许位移。模拟过程中，需进行温度场与应力场的耦合分析，先计算管道在低温下的温度分布，再将温度载荷施加到结构模型中，求解应力分布。计算结果的评估需结合规范要求，区分一次应力、二次应力与峰值应力，分别进行校核。

### 4.3 安装与运行的协同控制

应力优化不仅体现在设计阶段，还需贯穿于安装与

运行全过程，实现全生命周期的应力控制。安装过程中，严格按照设计图纸进行管道预制与组装，确保管道的走向、支撑位置与设计一致。焊接施工需符合工艺要求，控制焊接变形与残余应力，对焊缝进行100%无损检测，确保无裂纹、未熔合等缺陷。管道安装完成后，进行冷态水压试验或气密性试验，验证系统的强度与密封性，同时通过试验发现因安装不当产生的应力问题。

运行过程中的应力控制需关注温度变化速率与系统压力波动，避免因操作不当导致应力超标。启动时，缓慢降低管道温度，控制预冷速率，使管道均匀收缩，减少温度梯度产生的附加应力。运行中，避免频繁的温度与压力波动，减少疲劳应力对管道的影响。定期对管道系统进行巡检与监测，检查支架是否松动、补偿器是否正常工作、焊缝是否有泄漏迹象，及时发现并处理可能导致应力增加的隐患。

## 5 结语

低温低压管道安装设计中的应力分析与优化是一项综合性工程，需兼顾材料特性、结构设计、安装工艺与运行条件等多方面因素。通过深入分析温差应力、机械应力与残余应力的产生机制，采用理论计算与有限元模拟相结合的分析方法，从结构布置、支撑设计、材料选择等方面进行优化，可有效控制管道系统的应力水平，确保其在低温低压环境下安全稳定运行。

未来，随着低温技术的发展与工程应用的扩展，低温低压管道的应力分析将更加依赖数字化与智能化手段，如基于BIM的全流程应力模拟、实时应力监测系统等，实现应力的精准预测与动态控制。同时，需加强低温材料性能研究与新型补偿元件开发，为应力优化提供更多技术选择。通过持续改进设计方法与工程实践，推动低温低压管道系统向更安全、更经济、更可靠的方向发展。

### 参考文献

- [1]王奎升,李增强,张宏.低温管道设计中的应力分析与补偿[J].化工设备与管道,2018.
- [2]刘孝亮,赵军,王宗明.低温低压管道支撑设计与应力控制[J].石油化工设备,2019.
- [3]张万岭,李娜,董玉华.奥氏体不锈钢低温管道焊接残余应力分析[J].焊接学报,2017.
- [4]王磊,陈明,赵红.有限元法在低温管道应力分析中的应用[J].机械工程学报,2020.
- [5]顾望平,刘艳,章兰珠.工业金属管道设计规范中低温管道的应力校核要点[J].化工设计,2018.