

# 高压燃气管道应力分析及强度设计核心理论研究

于 森 ( 济南能源工程集团有限公司, 山东 济南 250000 )

**摘要:** 高压燃气管道作为能源输送的“生命线”, 其应力状态与强度设计直接关系到能源供应安全与公共安全。在城镇化快速推进与能源需求激增的背景下, 高压燃气管道正朝着长距离、高压、大口径方向发展, 对应力分析与强度设计提出更高要求。本文基于弹塑性力学、断裂力学等理论基础, 系统构建高压燃气管道应力分析体系, 深入探讨内压应力引发的环向与轴向应力分布规律, 剖析因温度变化产生的热应力作用机制, 解析机械载荷 (如自重、风载、地震荷载) 对管道结构的叠加效应, 以及焊接缺陷、支吊架约束等因素导致的局部应力集中现象。结合管道泄漏、开裂、屈曲等典型失效模式, 创新性提出涵盖安全性 (满足极限状态设计要求)、适用性 (适应复杂服役环境)、经济性 (优化材料与结构选型) 与可持续性 (延长全生命周期) 的四大强度设计核心原则。研究通过建立应力分析与强度设计的定量耦合模型, 揭示二者协同作用逻辑, 为高压管道工程设计提供完整理论框架, 对构建科学合理的管道安全保障体系、推动行业技术标准升级具有重要指导意义。

**关键词:** 高压燃气管道; 应力分析; 强度设计; 安全原则; 失效控制

**中图分类号:** TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0123-03

## Core theoretical research on stress analysis and strength design of high-pressure gas pipelines

Yu Sen (Jinan Energy Engineering Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

**Abstract:** As the lifeline of energy transmission, the stress state and strength design of high-pressure gas pipelines are directly related to energy supply security and public safety. Against the backdrop of rapid urbanization and surging energy demand, high-pressure gas pipelines are developing towards longer distances, higher pressures, and larger diameters, posing higher requirements for stress analysis and strength design. This article is based on the theoretical foundations of elastic-plastic mechanics, fracture mechanics, etc., and systematically constructs a stress analysis system for high-pressure gas pipelines. It deeply explores the distribution laws of circumferential and axial stresses caused by internal pressure stress, analyzes the mechanism of thermal stress caused by temperature changes, and analyzes the superposition effect of mechanical loads (such as self weight, wind load, earthquake load) on pipeline structures, as well as the local stress concentration phenomenon caused by welding defects, support and hanger constraints, and other factors. Based on typical failure modes such as pipeline leakage, cracking, and buckling, innovative four core principles of strength design are proposed, covering safety (meeting ultimate state design requirements), applicability (adapting to complex service environments), economy (optimizing material and structural selection), and sustainability (extending the entire life cycle). The study establishes a quantitative coupling model between stress analysis and strength design, revealing the synergistic logic between the two, providing a complete theoretical framework for high-pressure pipeline engineering design, and has important guiding significance for building a scientific and reasonable pipeline safety guarantee system and promoting the upgrading of industry technical standards.

**Keywords:** high-pressure gas pipeline; Stress analysis; Strength design; Safety principle; Failure control

随着能源结构转型的深入推进, 高压燃气管道作为长距离能源输送的核心载体, 其运行安全性面临复杂工况的严峻挑战。高压环境下, 管道承受内压、温度变化、地质载荷等多重应力耦合作用, 因应力设计不当引发的泄漏、断裂等事故频发, 凸显出应力分析与强度设计理论研究的重要性。本文聚焦高压燃气管道的应力构成特性, 结合材料力学与工程设计规范, 构建系统化的强度设计理论框架, 为管道全生命周期安全提供理论支撑。

### 1 高压燃气管道应力分析的核心理论体系

#### 1.1 内压应力的基础作用机制

内压作为高压管道的主要载荷, 引发环向与轴向

两类基本应力。环向应力是管道周向的拉伸应力, 由内压对管壁的径向扩张作用产生, 其大小与管道直径、壁厚及内压等级直接相关。对于薄壁管道, 环向应力可近似认为沿壁厚均匀分布; 而厚壁管道的环向应力则呈现内壁高、外壁低的非均匀分布特征, 需通过弹塑性力学理论进行精确分析。轴向应力主要由内压的轴向分量引起, 同时受管道约束条件影响——当管道两端自由伸缩时, 轴向应力以薄膜应力为主; 若存在温度约束或固定支撑, 轴向应力将叠加热膨胀受阻产生的附加应力。

#### 1.2 温度载荷下的热应力特性

介质输送过程中的温度波动会导致管道产生热胀

冷缩效应，当变形受到约束时即形成热应力。热应力的大小与温度变化幅度、管材热膨胀系数及约束条件密切相关。在温差较大的管段（如跨区域输送管道），热应力可能成为主导应力分量，引发管道轴向拉伸或压缩变形。工程中需通过自然补偿、安装膨胀节等措施释放热变形，避免热应力超限导致材料失效。

### 1.3 机械载荷应力的复杂耦合效应

机械载荷包括管道自重、土壤载荷、地震载荷及第三方载荷等。自重与土壤载荷共同构成管道的静态机械应力，在埋地管道中表现为沿管道轴线的分布载荷，易在跨距较大或地质不均匀地段形成弯曲应力。地震载荷作为动态载荷，通过惯性力与土体位移作用于管道，可能引发轴向拉压应力与弯曲应力的交变循环，加剧材料疲劳损伤。此外，施工不当或外部机械碰撞产生的局部载荷，会导致应力集中现象，成为裂纹萌生的初始诱因。

### 1.4 局部应力集中的失效风险

管道几何不连续部位（如弯头、三通、焊接接头）因截面突变或材料性能差异，易形成局部应力集中。弯头在弯曲变形过程中，外侧管壁承受拉伸应力，内侧承受压缩应力，应力分布呈现明显的非均匀性；焊接接头的余高与熔合线缺陷会改变应力传递路径，形成应力集中区域。

应力集中程度通常以应力集中系数衡量，其值越高，材料发生疲劳破坏或脆性断裂的风险越大，需在设计阶段通过优化几何参数（如增大弯曲半径、控制焊缝成型）降低应力集中效应。

## 2 高压燃气管道强度设计的核心原则

### 2.1 安全性原则：基于失效模式的风险控制

安全性是强度设计的首要准则，需针对管道主要失效模式建立防控体系。常见失效模式包括韧性断裂、脆性断裂与疲劳破坏：

**韧性断裂：**作为高压燃气管道在正常运行工况下的典型失效形式，其本质是环向应力超过材料屈服强度导致的塑性变形失稳。根据胡克定律与薄壁圆筒应力公式  $(\sigma_{\theta} = \frac{pD}{2t})$ ，其中  $p$  为内压， $D$  为管道外径， $t$  为壁厚），设计时需通过 ASME B31.8 等标准规范，结合管道工作压力、输送介质特性，选择合适的管材强度等级（如 X52-X80 钢级）与壁厚参数。通常需将工作应力控制在材料最小屈服强度的 80% 以下，并通过引入安全系数（一般取值 1.2-1.5）预留足够的安全裕度。此外，需考虑焊接热影响区对材料性能的弱化作用，通过无损检测（NDT）技术确保焊缝质量。

**脆性断裂：**该失效模式常伴随低温环境或应力集

中现象发生，其特点是裂纹扩展速度极快且无明显塑性变形。在  $-20^{\circ}\text{C}$  以下的低温区域，钢材的韧脆转变温度（DBTT）成为关键参数，需选用具有足够夏比冲击功（如  $-40^{\circ}\text{C}$  时  $\geq 47\text{J}$ ）的管线钢，并通过优化管道几何结构（如采用圆滑过渡的弯管、避免尖锐棱角）降低应力集中系数。根据断裂力学理论，需严格控制材料内部初始缺陷尺寸，通过超声波检测（UT）和磁粉检测（MT）技术对裂纹进行监测，并在设计中采用止裂结构（如增加止裂环）抑制裂纹扩展。

**疲劳破坏：**主要由管道启停、压力脉动、地震荷载等引起的交变应力导致。疲劳分析需基于 Miner 线性累积损伤理论，通过应力谱分析确定不同应力幅对应的循环次数。设计中需遵循 ASME BPVC Section III NB-3213 等疲劳设计准则，限制应力幅在疲劳极限范围内，并采用 Paris 公式  $(\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m)$ ，其中  $da/dN$  为裂纹扩展速率， $\Delta K$  为应力强度因子范围）预测裂纹扩展寿命。对于高应力区域（如三通、阀门连接处），可通过补强结构设计或表面强化处理（如喷丸处理）提高疲劳寿命。

**强度校核需结合材料失效理论：**对于脆性材料，采用最大主应力准则（第一强度理论），当最大主应力超过材料的抗拉强度时即判定失效；对于韧性材料，则遵循第四强度准则（畸变能准则），该理论考虑了材料在复杂应力状态下的形状改变比能，通过计算等效应力，当等效应力超过材料屈服强度时判定失效。实际工程中，常结合有限元分析（FEA）软件对管道复杂应力状态进行仿真校核，确保设计满足安全性要求。

### 2.2 适用性原则：多工况耦合的设计裕度构建

管道运行面临正常运行、启停过渡、极端载荷等复杂工况组合，强度设计需涵盖基本工况与特殊工况的载荷组合分析。基本工况以持续内压与静态载荷为主，特殊工况需考虑地震、极端温度、第三方破坏等偶然载荷的叠加效应。设计中通过载荷分项系数与组合系数加权计算应力，确保管道全服役周期适用性。

**腐蚀环境下的强度设计需引入腐蚀余量概念，**根据介质腐蚀性、设计寿命及检测维护能力，预留管壁减薄裕度，避免腐蚀导致壁厚不足引发应力超限。实际工程中，还需结合土壤应力分布、管道支撑约束条件进行动态模拟分析，通过有限元软件反复校核应力集中区域，同时建立腐蚀速率监测模型，将实时检测数据与设计参数比对，动态调整安全阈值。

### 2.3 经济性原则：全生命周期成本优化策略

经济性原则要求在满足安全性能的前提下，实现管道建设与运维成本的优化平衡。管材选型需综合考

量强度等级、耐腐蚀性、加工性能与成本效益，高强度管线钢（如 X70、X80）的应用可减少钢材用量、降低建设成本，但需同步评估其焊接性能与韧性储备。例如，在高地震活动区域，需额外关注钢材的抗震韧性指标，避免因局部应力集中引发破坏。

壁厚设计需在安全系数与材料消耗间寻求最优平衡，过大安全系数导致材料浪费，过小则增加失效风险。现代设计借助可靠性理论与优化算法，建立以失效概率为约束条件的成本优化模型，实现安全性与经济性协同提升。同时，引入全生命周期成本分析，将防腐维护、检测检修等长期费用纳入计算，使设计方案更贴合实际运营需求。

#### 2.4 可持续性原则：低碳化与智能化融合发展

结合“双碳”目标，高压管道设计需融入低碳理念。采用高强度、耐腐蚀的新型材料（如纳米合金管线钢），可减少钢材消耗与防腐维护需求，降低全生命周期碳排放；管道布局与路由设计应契合生态保护要求，避免破坏自然环境。

智能化是可持续性设计的重要方向，通过在管道关键部位部署光纤光栅、应变片等应力监测传感器，实时采集数据并构建数字孪生模型，实现应力状态动态评估与预测。智能监测系统可提前识别应力异常区域，指导维护决策，延长管道服役寿命，推动技术创新与可持续发展深度融合。同时，利用 AI 算法优化数据处理，能更精准挖掘潜在风险，助力高压燃气管道的绿色低碳运营。

#### 3 应力分析与强度设计的协同逻辑

应力分析是强度设计的前提，二者通过“载荷识别—失效预判—参数优化”形成闭环：

**载荷识别：**高压燃气管道运行中需精准解析内压、温度梯度及机械振动等多源载荷。内压作为核心载荷，通过 Lamé 公式计算环向与轴向应力，同时考虑压力脉动对管道的疲劳累积效应；温度载荷需结合热膨胀系数与约束条件，建立热—结构耦合模型，量化温差导致的热应力分布；机械载荷涵盖管道自重、风载及地震作用，需运用有限元分析（FEA）模拟动态载荷下的应力集中区域。此外，通过多物理场耦合仿真，明确各载荷间的协同作用机制，为后续强度设计提供数据支撑。

**失效预判：**基于材料的力学性能（如屈服强度、断裂韧性）与载荷工况组合，采用失效模式与效应分析（FMEA）方法，系统识别潜在失效风险。针对弯头区域，结合 ASME B31.8 规范，通过应力强度因子计算评估疲劳裂纹萌生概率；对于焊接接头，利用相控阵超声检测（PAUT）与金相分析，预判热影响区

的脆化倾向与裂纹扩展路径。通过建立失效概率评估模型，量化不同工况下的失效风险等级，从而确定壁厚裕量、焊接工艺参数等关键设计指标。

**参数优化：**采用多目标优化算法（如遗传算法、粒子群优化），以安全系数、材料成本、施工难度为优化目标，对管材选型（如 X70/X80 管线钢）、壁厚分布及结构形式进行协同设计。例如，在应力集中显著区域采用渐变壁厚设计，或通过增设波纹补偿器、弹簧支吊架等柔性结构，优化管道的应力路径。同时，结合全生命周期成本分析（LCCA），平衡初期投资与后期维护费用，确保设计方案在满足 API 579 等安全标准的前提下，实现工程经济性与可靠性的最优解。

工程实践中，需借助有限元分析等数值模拟技术，对复杂结构（如穿跨越段、站场管件）进行精细化应力仿真，验证理论分析的准确性，为强度设计提供数据支撑。

#### 4 结论与展望

高压燃气管道的应力分析与强度设计是涵盖材料力学、工程设计、可靠性理论的系统性工程。本文构建的理论框架强调：

应力分析需全面考量内压、温度、机械载荷的耦合作用及局部应力集中效应；

强度设计应遵循安全性、适用性、经济性与可持续性相统一的原则，建立多目标优化设计体系；

理论研究需与数值模拟、监测技术相结合，形成“分析—设计—验证—调控”的闭环控制模式。

未来研究可聚焦极端工况（如超高压、极寒环境）下的应力演化规律，探索基于断裂力学的缺陷容限设计理论，开发智能化应力监测与寿命预测技术，推动高压燃气管道设计向精准化、绿色化方向发展。

#### 参考文献：

- [1] 屠博, 李立瑶, 程勇明, 等. 高温高压蒸汽管道应力分析及优化调整 [J]. 节能, 2025, 44(04): 142-144.
- [2] 高建林, 邱廷东, 蔡志强, 等. 应用 CAESAR II 软件进行埋地玻璃钢管道应力分析 [J]. 化工设备与管道, 2025, 62(02): 94-98.
- [3] 唐永进. 压力管道应力分析 [M]. 中国石化出版社. 2003.
- [4] 张亮, 张明, 刘军平. 压力管道应力分析的内容及特点 [J]. 化学工程与装备, 2024, (01): 87-89.
- [5] 郭扬立, 齐亮, 朱培鑫. 基于管道应力分析的原油输送管路布置优化 [J]. 船舶, 2023, 34(05): 83-89.
- [6] 冯廷勇, 李洋飞, 于霞, 等. 高压输送燃气管道 II 型补偿器应力分析 [J]. 石油化工设备, 2023, 52(04): 1-6.