基于安全运行的石油化工管道应力设计分析

梁明明
广东华锦达新材料股份公司，广东 茂名 525000
DOI:10.61369/ERA.2026090027

摘　　要： 石化管道安全运行依托应力设计，应力超标极易引发管道破损。文章依托应力分析基础理论，梳理一次、二次及峰值应力的产生规律与校核要求，对照 ASME B31.3–2024、GB 50316–2000（2008 版），分析管道柔性布设、支吊架选型与管口载荷管控要点。借助 CAESAR Ⅱ等应力计算软件，依照规范逐项核验，能够定位管线应力隐患，减少塑性形变与疲劳开裂，保障石化生产管线平稳运转。

关 键 词： 安全运行；石油化工管道；应力分析

Stress Design Analysis of Petrochemical Pipeline Based on Safe Operation

Liang Mingming
Guangdong Huajinda New Materials Co., Ltd., Maoming, Guangdong 525000

Abstract: The safe operation of petrochemical pipelines relies on stress design, and excessive stress can easily cause pipeline damage. The article relies on the basic theory of stress analysis to sort out the generation rules and verification requirements of primary, secondary, and peak stresses. It compares ASME B31.3–2024 and GB 50316–2000 (2008 edition) to analyze the key points of flexible pipeline layout, support and hanger selection, and pipe mouth load control. By using stress calculation software such as CAESAR II and verifying each item according to specifications, it is possible to locate potential stress hazards in pipelines, reduce plastic deformation and fatigue cracking, and ensure the smooth operation of petrochemical production pipelines.

Keywords: safe operation; petrochemical pipelines; stress analysis

引言

石油化工管道安全运行依赖合理的应力设计，应力超标将引发管道破损。基于应力分析基础理论，梳理一次、二次及峰值应力的产生规律与校核要求，对照 ASME B31.3–2024、GB 50316–2000（2008版）等规范，分析管道柔性布设、支吊架选型及管口载荷管控要点。借助 CAESAR Ⅱ等软件逐项核验，可定位应力隐患，减少塑性形变与疲劳开裂，保障管线平稳运转。

一、管道应力分析理论基础

（一）应力分类体系

管道应力按其产生原因和性质可分为一次应力、二次应力和峰值应力三类。这一分类体系是管道应力分析的理论基础，各类应力的特征不同，校核准则也各有差异。

一次应力是由压力和重力等持续载荷作用下产生的正应力，其特征是非自限性的，即应力必须与外力保持平衡。当一次应力超过材料的屈服极限时，管道将产生塑性变形而不能自限恢复。防止一次应力超过许用值是管道壁厚设计的核心任务。二次应力是由热胀冷缩、端点附加位移等位移荷载受约束而产生的应力，其最显著的特征是具有自限性——当局部应力超过材料屈服极限时，管道局部发生少量塑性变形即可使应力下降，重新达到平衡。因此二次应力主要以疲劳破坏为失效模式，而非塑性失稳。许用应力范围是二次应力校核的核心指标。峰值应力由应力集中区域（如三通、阀门、法兰连接处）的几何不连续性引起，其特征是局部性极强，虽不直接导致管道整体失稳，但在循环载荷条件下是疲劳裂纹的萌生源，危害不容忽视。

（二）应力计算基本公式

管道应力计算以材料力学为基础。内压作用下的环向应力计算公式为 $\sigma_\theta = PD_o/(2t)$，轴向应力计算公式为 $\sigma_\theta = PD_o/(4t)$，其中 P 为设计内压，$D_o$ 为管道外径，t 为管道壁厚。许用应力 $[\sigma]$ 的确定遵循最大剪应力理论，取 $[\sigma]=\min\{\sigma_s/n_s, \sigma_b/n_b\}$，其中 σ_s 为材料屈服极限，σ_b 为材料抗拉强度极限，n_s 和 n_b 分别为对应安全系数（$n_s=1.5$，$n_b=3$）。强度条件表达为 $\sigma_{max} \leq [\sigma]$，校核不通过时需增加壁厚或调整管径。ASME B31.3–2024 中规定的许用应力范围计算公式为 SA=0.75iM，其中 i 为应力增大系数，M 为计算弯矩，该公式体现了管道附件对局部

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

应力的放大效应。

二、管道应力分析方法与规范要求

（一）静力分析与动力分析

管道应力分析分为静力分析和动力分析两大类。静力分析是分析工作的主体，主要包括五个方面：一是压力荷载和持续荷载作用下的一次应力计算，目的是防止管道塑性变形破坏；二是管道热胀冷缩及端点附加位移等位移荷载作用下的二次应力计算，目的是防止疲劳破坏；三是管道对设备作用力的计算，目的是保证设备正常运行，防止设备接口因受力过大产生变形或失稳；四是管道支吊架受力计算，为支吊架设计提供依据；五是管道上法兰受力计算，防止法兰因受力不均导致泄漏[1]。

动力分析针对往复式压缩机、泵等振动源附近的管道，主要内容包括：管道自振频率分析，防止管道系统与外部激励频率共振导致振幅急剧放大；管道强迫振动响应分析，控制管道振动位移和动应力幅值；往复机械气（液）柱频率分析，防止气柱固有频率与激励频率吻合引发共振；往复机械压力脉动分析，控制介质压力周期性波动导致的附加应力。

（二）分析方法的确定原则

并非所有管道均需进行详细应力分析。根据工程实践经验和规范要求，符合以下条件的管道系统可采用目测法或简化分析方法：公称直径小于DN50的管道；设计温度高于-46℃且低于150℃的管道；设计温度在150℃至200℃之间、公称直径在DN50至DN400范围内的管道。对于与敏感机器设备相连的管道、高温高压管道或循环当量数大于7000的重要管道，必须采用计算机程序进行详细应力分析，常用软件为CAESAR II，该软件被国内外石油化工工程公司广泛采用。

（三）现行主要规范体系

石油化工管道应力分析涉及的主要规范包括：ASME B31.3-2024《工艺管道》，该标准由美国机械工程师协会发布，是国际石化行业应用最广泛的管道设计规范，对应力分析条文有系统性规定；GB 50316-2000（2008版）《工业金属管道设计规范》，是我国管道设计的基础性国家标准；GB/T 20801-2006《压力管道规范——工业管道》，对工业管道的设计、制造和检验提出了全面要求；HG/T 20645-1998《化工装置管道机械设计规定》，是化工行业管道设计的重要行业标准；SH 3073-95《石油化工企业管道支吊架设计规范》，规定了支吊架设计的技术要求；TSG D0001-2025《压力管道安全技术监察规程——工业管道》，明确了管道安全监察的技术要求[2]。

三、管道柔性设计与应力控制方法

（一）管道柔性设计原理

管道柔性设计，首要控制管道各类工况下的应力数值。温差带来的热胀冷缩、支座沉降、设备端口位移，都会让管线产生附加应力，超标后极易破坏管路结构。

刚度调配是柔性设计的核心思路。管线刚度偏低，运行形变超标会干扰介质输送；刚度偏高，热变形无法释放，局部位置容易形成应力集中。现场优化管线柔性有多种落地方式。调整管路敷设路线、更改弯头规格与曲率、加装膨胀补偿元件、更换支吊架选型，都是常用优化措施。工程优先选用L型、Π型、Z型自然补偿结构消化热伸长，补偿效果随管段臂长增加稳步提升。自然补偿达不到需求时，再加装波纹管膨胀节，安装阶段需严控受力，防止荷载挤压设备管口。CAESAR II可核算多工况管线形变与应力数据，依托计算结果反复调整方案，成为管线柔性优化常用计算软件。

（二）支吊架设计对应力分布的影响

支吊架是管道系统的支撑骨架，其设计合理与否直接影响管道应力分布状态。支吊架设计需综合考虑管道自重、压力推力、热膨胀位移和振动控制等多方面因素。管道支吊架分为固定支架、滑动支架、导向支架和恒力吊架等多种类型。固定支架约束管道三个方向的线位移，用于限制管道热伸长；滑动支架允许管道沿轴向滑动，约束径向位移；导向支架仅约束特定方向的位移，其余方向允许自由变形。

支吊架的位置设置需结合管道柔性分析结果确定。若支吊架间距过大，管道自重引起的弯曲应力可能超过许用值；若间距过小，管道约束过于刚性，热膨胀应力难以释放。根据SH 3073-95规范要求，支吊架设计应确保管道系统在各种工况下的应力均在校核准则允许范围内，且管道对设备接口的作用力矩不超过设备制造厂提供的允许值，一般要求设备管口受力在三个方向上的分量均不超过制造厂规定限值[3]。

（三）设备接口载荷控制

管道系统与设备（塔器、容器、换热器、泵、压缩机等）的连接处是应力集中和载荷传递的关键节点。管道对设备接口的作用力过大，将导致设备接口变形、密封面失效或壳体局部应力超限，危及设备安全运行。因此，管道应力分析中必须进行设备接口载荷计算，并将计算结果与设备允许受力值进行比对。

设备接口载荷控制的主要方法包括：在管道布置设计中预留足够的柔性空间，使管道变形主要发生在管段自身而非设备接口；通过调整管道走向和弯头配置，将热膨胀位移引导至对设备接口受力最小的方向；在设备接口附近设置弹簧支吊架或恒力支吊架，对管道自重载荷进行补偿，减少持续作用在设备接口上的力矩。ASME B31.3-2024和GB 50316-2000均对设备接口允许受力的计算方法和限值作了明确规定，设计中必须严格遵循[4]。

四、管道应力校核与安全评定

（一）一次应力校核准则

一次应力校核是确保管道强度的基本要求。校核准则为管道在工作状态下由内压、持续外载（重力、风荷载等）产生的组合应力不超过材料的许用应力[σ]。计算时需考虑应力增大系数i对管道附件（三通、法兰、弯头等）处应力的放大作用。当校核结果不满足要求时，可通过增加管道壁厚、选用更高强度材料或调

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

整管道布置方案来改善。

（二）二次应力校核准则

二次应力校核以许用应力范围为判据。ASME B31.3-2024规定的许用应力范围SA按公式SA=Sh（其中Sh为热态许用应力）计算，实际应力范围（由热胀冷缩和端点位移产生）与许用值进行比较。当实际应力范围超过许用值时，应通过增加管道柔性或调整支吊架方案来降低位移应力。对于循环载荷工况，还需考虑应力范围折减系数f（取决于循环次数），循环次数越多，允许的应力范围越低。当量循环次数大于7000次时属于高频循环，应采用更为保守的校核准则。

（三）耐压试验与应力验证

耐压试验是管道应力设计的实体验证环节。根据TSG D0001-2025及GB 50253-2014《输油管道工程设计规范》要求，管道强度试验压力不应小于设计内压的1.25倍，通过人口稠密区的管段不应小于1.5倍；强度试验稳压持续时间不小于4小时，确认无泄漏后降至设计压力进行严密性试验，持续稳压时间不小于24小时。耐压试验过程中，任意一点的试验压力与静水压力之和产生的环向应力不应超过钢管最低屈服强度的90%。《工业金属管道工程施工质量验收规范》（GB 50184-2011）规定，液压试验应缓慢升压至试验压力后稳压10分钟，再降至设计压力检查，以无渗漏、无压降为合格[5]。

五、工程应用与设计建议

（一）设计阶段风险识别

管道应力设计应贯穿设计全过程。在方案设计阶段，应结合装置平面布置，初步判断管道柔性是否满足要求，识别高温高压等高应力风险区域；在详细设计阶段，应采用计算机辅助分析软件进行详细应力计算，逐管段校核应力水平，优化支吊架配置方案；在设计文件校审阶段，应重点审查设备接口受力计算书和应力分析报告，确保所有校核准则均满足规范要求后方可出图。

（二）高温高压管道的特殊处理

高温管道（设计温度高于200℃）面临蠕变和热膨胀双重挑战，在选材时应优先考虑耐热合金钢，并核算高温下的材料许用应力值。对于设计温度超过材料蠕变温度阈值的管道，还应进行蠕变极限校核。高压管道（设计压力大于10MPa）的应力集中问题更为突出，管道壁厚的微小负偏差可能导致局部应力显著增加，设计中应将壁厚负偏差作为壁厚计算的安全裕量纳入考量。

（三）设计质量持续改进

管道应力设计质量的提升需要设计与运行环节的协同反馈机制。设计单位应建立典型管道应力分析案例库，总结归纳不同类型管道系统的应力分布规律和常用优化措施；运行单位应将管道振动监测数据和疲劳损伤评估结果反馈至设计环节，为后续工程提供改进依据。此外，随着有限元分析技术的成熟，三维实体有限元方法在复杂管道系统应力分析中的应用将越来越广泛，有助于识别传统梁单元分析方法难以捕捉的局部应力集中问题。

六、结束语

综上，管道应力分析是石油化工安全运行的关键环节。一次、二次及峰值应力分类明确，各有校核准则。柔性设计与支吊架合理配置可有效降低超限风险，设备接口载荷控制不容忽视。遵循ASME B31.3-2024、GB 50316等规范，借助CAESAR Ⅱ等软件逐项验算，能够精准定位隐患。高温高压管道需特殊处理，设计阶段应充分识别风险。耐压试验验证最终安全。设计与运行协同反馈，持续改进，方能保障管线长期平稳运行。

参考文献

[1] 苏航，李倩. 石油化工管道应力设计要点分析[J]. 造纸装备及材料，2022,51(1):145-147.

[2] 丁健，沈文骏，王飞，等. 石油化工管道应力设计要点探究[J]. 中国石油和化工标准与质量，2023,43(12):111-113.

[3] 郝旭博. 石油化工管道应力设计要点探究[J]. 工程建设与发展，2025,4(6):72-74.

[4] 杨鹤. 石油化工管道应力设计关键因素分析[J]. 化工设计通讯，2025,51(1):109-111.

[5] 张蕾. 石油化工管道应力设计研究[J]. 化工管理，2021(30):200-202.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.