

# 基于 CAESAR II 的高温高压管道应力分析与柔性优化研究

刘锐

中国昆仑工程有限公司沈阳分公司, 辽宁 沈阳 110167

DOI:10.61369/ME.2025070004

**摘 要 :** 随着石油、化工等工业领域对高温高压管道系统的需求不断增加, 管道设计与安全性评估显得尤为重要。本文基于 CAESAR II 软件进行高温高压管道的应力分析, 研究其在复杂工况下的应力状态与变形情况。通过灵活优化管道系统的设计, 探讨了提高管道柔性、减少应力集中和延长管道使用寿命的有效方法。研究结果表明, 合理的管道布局、支撑方式及材料选择对管道的应力分布具有重要影响。本研究为高温高压管道的优化设计与安全运行提供了理论依据。

**关 键 词 :** CAESAR II; 高温高压管道; 应力分析; 柔性优化; 安全评估

## Research on Stress Analysis and Flexibility Optimization of High-Temperature and High-Pressure Piping Based on CAESAR II

Liu Rui

Shenyang Branch, China Kunlun Contracting & Engineering Corporation, Shenyang, Liaoning 110167

**Abstract :** With the increasing demand for high-temperature and high-pressure piping systems in industries such as petroleum and chemicals, piping design and safety assessment have become particularly crucial. This paper conducts stress analysis on high-temperature and high-pressure piping using CAESAR II software, investigating its stress states and deformation under complex operating conditions. Through flexible optimization of the piping system design, effective methods are explored to enhance piping flexibility, reduce stress concentration, and extend the service life of the piping. The research results indicate that reasonable piping layout, support methods, and material selection have significant impacts on the stress distribution of the piping. This study provides a theoretical basis for the optimized design and safe operation of high-temperature and high-pressure piping.

**Keywords :** CAESAR II; high-temperature and high-pressure piping; stress analysis; flexibility optimization; safety assessment

## 引言

高温高压管道是现代工业生产中不可或缺的基础设施, 其安全性直接关系到生产的稳定性与安全性。在高温高压环境下, 管道容易发生热膨胀、变形和应力集中等问题, 严重时甚至可能导致管道破裂或泄漏。因此, 开展高温高压管道的应力分析与优化研究具有重要的现实意义。CAESAR II 作为一款专业的管道应力分析软件, 已广泛应用于各种工程项目中。本文将基于 CAESAR II 对高温高压管道进行应力分析, 并通过柔性优化设计对管道的安全性与可靠性进行提升, 为管道设计提供有效的解决方案。

## 一、高温高压管道的应力分析

### (一) 高温高压管道的加载条件与应力分布

高温高压管道在实际工程中常常承受多种复杂的载荷, 包括内部压力、温度变化、外部载荷以及地震等外部因素。以常见的蒸汽管道为例, 内部压力可高达 10 - 20 MPa, 温度范围在 400 - 600 °C。内部压力作用会导致管道壁产生环向和轴向应力, 例如环向应力可按公式  $\sigma_h = p \cdot d/(2t)$  计算, 当  $p=15$  MPa、 $d=500$

mm、 $t=20$  mm 时, 环向应力约为 187.5 MPa。同时, 温度变化会导致热膨胀, 使管道发生变形, 产生附加的应力。在高温工况下, 管道的弹性模量和屈服强度会下降, 如常见的 12Cr1MoV 钢在室温下屈服强度约为 295 MPa, 而在 500 °C 时下降至 160 MPa 左右, 这会加剧应力集中现象, 增加管道发生塑性变形的风险<sup>[1]</sup>。对于弯曲部分, 外力作用下会产生更为复杂的应力状态, 如弯曲应力、扭转应力等。

## （二）CAESAR II软件的使用与功能特点

CAESAR II是一款广泛应用于管道应力分析的专业软件，特别适用于高温高压管道的设计与分析。该软件能够通过输入管道的几何参数、材料性质、工况条件等信息，进行应力、变形、振动、疲劳等方面的分析。例如在实际工程中，CAESAR II可对某长度为 120 m、直径 600 mm 的管道系统在 15 MPa 内压和 520 °C 下的应力分布进行仿真，计算结果显示最大等效应力可达到 180 MPa。CAESAR II 提供了强大的求解功能，能够模拟管道在不同载荷下的响应，并进行应力分布的可视化展示。对于高温高压管道，CAESAR II 能够考虑温度梯度对管道产生的影响，并根据热膨胀和内部压力对管道进行应力计算。

## （三）高温高压工况下的管道变形与应力分析方法

在高温高压工况下，管道会经历热膨胀、弹性变形和塑性变形等多种形式的变形。若未设置补偿装置，热膨胀将产生较大的附加温度应力。管道的变形不仅仅是单一的线性伸长，还会表现出弯曲、扭转等非线性变形形式<sup>[2]</sup>。因此，对于高温高压管道的应力分析，需要采用更为精确的非线性分析方法。常见的分析方法包括有限元分析（FEA）和结构力学分析。在实际操作中，FEA 方法可以将管道划分为多个小单元，对每个单元的应力、变形进行精细计算，并进行全局分析。尤其在弯管处，有限元计算结果往往显示局部应力比直管段高出 20 - 30%，这是应力集中区域。通过这种方法，可以有效捕捉复杂工况下的应力集中，预测管道可能出现的破坏形式，为后续的优化设计提供依据。

# 二、管道柔性设计与优化

## （一）管道柔性优化的基本原理

管道柔性设计的核心目的是降低因热膨胀、压力及外部载荷引起的应力水平，避免因过大应力导致的结构破坏。柔性设计的基本思路是通过改变管道的几何布置、引入弯头或膨胀节来吸收位移和应力。如果不进行柔性设计，热膨胀产生的附加应力可能在固定点集中并超过材料许用值，导致失效。通过在管线上布置 U 型或 L 型弯头，可显著减小热膨胀传递至固定点的应力。研究表明，合理设置弯头可使最大应力降低 30 - 40%。因此，柔性优化设计不仅提高了管道的安全性，还延长了其使用寿命<sup>[3]</sup>。

## （二）管道支撑系统的优化设计

管道支撑系统是实现柔性设计的关键环节，合理的支撑布置能够有效限制不必要的位移，同时允许必要的热膨胀补偿。常见的支撑类型包括刚性支撑、弹簧支撑和滑动支撑等。以一条直径 600 mm、长度 120 m 的高压蒸汽管道为例，若采用单一刚性支撑，固定点处应力可能达到 180 MPa。但若在管线上布置 3 - 4 个滑动支撑并在关键位置安装弹簧支撑，计算结果显示应力可降低至 110 - 120 MPa。此外，CAESAR II 等分析软件能够对不同支撑方案进行模拟，给出位移、应力和反力的对比结果，辅助设计

人员选择最优方案。通过优化支撑布置，可以在满足安全性的前提下减少支撑数量，从而降低施工成本和维护难度。

## （三）管道材料选择对柔性优化的影响

材料的选择对管道柔性优化具有重要影响。不同材料的弹性模量、线膨胀系数和高温强度差异显著，会直接影响管道的柔性和承载能力。例如，普通碳钢（Q235）的弹性模量约为  $2.06 \times 10^5$  MPa，而奥氏体不锈钢（如 304）约为  $1.93 \times 10^5$  MPa，后者更易产生位移但具有更好的耐高温性能。对于工作温度 500 °C 的管道，若选用 12Cr1MoV 钢，其高温蠕变寿命在 10<sup>5</sup> 小时下仍能保持安全，而若使用普通碳钢则寿命大幅缩短<sup>[4]</sup>。工程中往往需要在“强度”与“柔性”之间寻找平衡：强度过高的材料虽能承受更大应力，但柔性不足，可能导致支撑反力过大；而柔性过强的材料易产生过量位移，影响系统稳定性。因此，合理的材料选择与柔性设计应结合使用，以实现安全性、经济性和可维护性的统一。

# 三、CAESAR II的高温高压管道案例分析

为统一分析，本文选取一条高温高压蒸汽管道作为研究对象，利用 CAESAR II 软件对其应力分布和柔性优化效果进行计算与验证，重点研究其在不同设计方案下的受力情况与安全性差异。

## （一）管道参数与工况条件

所选管道的设计参数如下：直径 DN600 mm，长度 120 m，工作温度由 20 °C 升至 500 °C，内部压力 15 MPa，材质为 12Cr1MoV 钢。该材料在室温下的屈服强度为 295 MPa，但在 500 °C 高温下强度下降至约 160 MPa，说明其在高温工况下的安全裕度显著降低。其线膨胀系数取值  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$  /°C，根据公式  $\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$ ，计算得到热膨胀自由伸长量约为 69 mm。该数值表明，当管道在全温差条件下运行时，如果未设置补偿装置，将会在固定点产生较大的附加应力，从而可能威胁系统的安全性和可靠性。

## （二）应力分析与柔性优化结果

在未进行柔性设计的情况下，固定点处的附加热应力超过 150 MPa，已接近 500 °C 下材料的许用应力极限，安全风险较大。有限元计算结果显示，弯管部位的局部应力水平比直管段高出约 25%，应力集中现象明显，容易成为潜在的失效位置。若在长期高温高压环境下运行，极有可能出现塑性变形甚至管道破裂的风险。

在采用柔性设计方案后，即在管道系统中合理布置 U 型膨胀节、滑动支撑与弹簧支撑，热膨胀能够得到有效吸收与释放。仿真结果表明，固定点处的应力降低至 100 - 110 MPa，显著低于材料在高温下的许用应力范围。优化后的管道应力分布更加均匀，弯管区域的应力集中现象得到有效缓解。同时，CAESAR II

软件计算结果显示，该优化方案将最大等效应力降低了约 35%，不仅提高了整体安全性，还减少了支撑点的反力，降低了支撑系统的受力水平。

## 四、高温高压管道的安全性评估

### （一）管道疲劳分析与使用寿命预测

高温高压管道在长期运行过程中，受到内部压力、温度变化以及外部环境因素的影响，会经历反复的应力和变形，从而引发疲劳损伤。管道的疲劳分析主要通过研究管道在循环载荷下的应力波动，评估其在不同工况下的耐久性。通常，疲劳损伤会在管道的薄弱部位或应力集中的区域发生，尤其是在焊接接头、弯头等位置。疲劳分析通常通过累积损伤理论进行，基于不同应力幅值下的循环次数来预测管道的寿命<sup>[6]</sup>。使用寿命预测则依赖于对管道在各种载荷下的应力响应进行详细分析，并结合材料的疲劳性能、累积损伤模型等因素，计算出管道的剩余使用寿命。这一过程需要考虑温度波动、压力变化等因素对管道疲劳性能的影响，并评估管道在高温高压工况下的长期可靠性。通过疲劳寿命预测，可以有效预防管道的提前失效，优化其使用周期。

### （二）管道应力集中与破坏分析

管道在受力过程中，某些区域可能由于几何形状、材质不均匀或施工质量问题产生应力集中，导致管道局部的应力值显著高于其他区域。这些应力集中的部位，如弯头、阀门接口、支撑点附近等，常常是管道发生破坏的薄弱环节<sup>[6]</sup>。在高温高压环境下，材料的屈服强度下降，热膨胀效应更加明显，这些因素共同作用容易加剧应力集中的问题。破坏分析通常通过应力-应变曲线、断裂力学及材料本构模型等进行。通过模拟管道在不同工况下的应力分布，可以识别出应力集中区域并对其进行详细分析。破坏分析的目的在于预测管道是否会发生脆性断裂、塑性变形或疲劳破坏，从而提前采取优化设计或加固措施，防止管道破裂或发生泄漏。有效的破坏分析不仅有助于延长管道的使用寿命，还能降低维修成本并提高系统的安全性。

### （三）安全性评估标准与规范

高温高压管道的安全性评估需依据相关的设计标准和规范进行。常见的管道安全性评估标准包括《工业金属管道设计规范》（GB 50316-2000）、《压力管道规范 工业管道》（GB/T 20801-2006）、《压力容器》（GB/T 150.1—150.4-2024），以及国际上广泛采用的 ASME B31.3、API 610、API 661 等标准。这些标准对管道的设计、材料选择、焊接工艺、应力计算、支撑系统等方面提供了严格的规定，以确保管道的安全性<sup>[7]</sup>。在进行安全性评估时，需依据标准规定的安全系数和载荷容许范围进行分析，确保管道的强度、稳定性和耐久性满足工程要求。评估过程中还需要进行疲劳分析、断裂力学分析以及应力分析，确保管道在长期高温高压环境下的可靠性和安全性。此外，随着工

业技术的发展，新的安全评估方法如风险分析（RA）和失效模式分析（FMEA）逐渐被引入管道安全评估中，以进一步提高评估的准确性和前瞻性。

## 五、高温高压管道的优化方案

### （一）优化前后的管道应力对比分析

在进行高温高压管道的优化设计之前，首先需要通过详细的应力分析，评估现有管道系统在工作条件下的应力分布情况。通常，优化前的管道可能会存在应力集中、变形过大或支撑不合理等问题，导致某些部位的应力远高于设计标准。优化前的应力分析结果能为后续优化方案的制定提供依据。通过 CAESAR II 等软件工具，分析管道在不同工况下的应力状态，识别出应力集中的薄弱环节，并为优化设计提供针对性的改进措施<sup>[8]</sup>。优化后的管道系统，在管道布局、支撑方式或材料选择上进行了改进，以降低管道各部位的应力集中现象，并通过调整支撑点位置和增加柔性设计，提高管道的整体适应性和安全性。

### （二）优化方案的实施与验证

管道优化方案的实施需要综合考虑设计的可行性、施工条件和操作环境等多方面因素。在实施过程中，首先需要根据优化设计进行管道的改造，包括调整管道的支撑系统、优化管道的布局及选择更适合的材料。在此基础上，进行施工过程中的质量控制，确保优化措施能够有效实施并达到设计要求。在实施后，为了验证优化方案的效果，需要进行后续的检测与评估。常见的验证方法包括管道应力测试、变形监测以及材料疲劳试验等，确保管道在优化后的运行状态下不会出现应力集中、过度变形或疲劳失效等问题。通过现场监测数据和实验结果的比对，能够确认优化设计是否成功提高了管道的安全性和可靠性<sup>[9]</sup>。同时，管道的运行数据也可以为未来的管道优化提供宝贵的经验和参考。

### （三）优化设计的经济性与可行性分析

管道优化设计不仅要保证技术上的可行性，还要综合考虑其经济性和实施的可操作性。在经济性分析中，需要评估优化方案对管道初期投资、维护成本及运营期间的的影响。例如，采用更高性能的材料和先进的支撑系统虽然能提高管道的安全性和可靠性，但可能会增加初期建设成本。在这种情况下，优化设计的目标是通过降低长期维护和运营的风险，从而实现整体成本的优化。通过生命周期成本分析（LCC），可以比较不同优化方案的长期经济效益，选择最具成本效益的方案。此外，管道优化设计的可行性还需要考虑实施的技术难度、施工周期和现场条件等因素。在某些特殊环境下，如高温、高压或腐蚀性环境，管道的优化设计可能面临更高的技术挑战，因此在进行可行性分析时，需要综合考虑这些因素，确保优化方案能够顺利实施，并在项目实施过程中取得预期的效果。在进行经济性分析时，还应考虑节能减排与环境影响，评估优化设计对整体项目可持续性的贡献<sup>[10]</sup>。

## 六、结语

通过本文对高温高压管道应力分析与柔性优化的研究，可以得出以下结论：合理的应力分析和优化设计对于确保管道在复杂工况下的安全运行至关重要。基于 CAESAR II 软件的应力分析，结合管道柔性优化、支撑系统设计及材料选择，可以有效降低管

道的应力集中，提高其在高温高压环境下的适应性和安全性。此外，优化方案的实施不仅能够显著改善管道的运行性能，还能在经济性和可行性上提供有效保障。未来的研究可以进一步深入探索不同工况下的管道性能，持续优化设计方法，以提高管道系统的长期可靠性与经济效益。

## 参考文献

- [1] 李龙, 库伟转. 结合案例简述 CAESAR II 在管道应力分析及柔性设计中的应用 [J]. 山东化工, 2019, 48(09): 171-173. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2019.09.065.
- [2] 高凯, 罗振伟, 武俊虎, 胡铭鑫. 应用 CAESAR II 软件对电加热器进出口管路的优化设计 [J]. 机械工程师, 2018(11): 67-68.
- [3] 郑明秀. CAESAR II 在火电厂蒸汽管道应力分析中的应用 [J]. 云南化工, 2015, 42(06): 58-61.
- [4] 王静, 徐蕾. Caesar II 与 Glif 对高温高压管道静力分析的比较 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33(03): 66-68+71. DOI: 10.19464/j.cnki.cn32-1541/tm.2014.03.020.
- [5] 黄格达. 应用 CAESAR II 软件优化减压转油线的配管设计 [J]. 管道技术与设备, 2008(02): 36-38.
- [6] 陈敏平. CAESAR II 和 ANSI 的判断公式在外管设计中的应用 [J]. 广东化工, 2007(05): 93-94.
- [7] 龙忠辉. CAESAR II 管道应力分析软件开发应用 [J]. 化工设备与管道, 2001(03): 50-53+4.
- [8] 高建林, 邱廷东, 蔡志强, 高涵. 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.
- [9] 徐俊. 基于 CAESAR II 的核应急发电机组辅机系统管道应力分析 [D]. 江苏科技大学, 2016.
- [10] 张书俊, 李国斌, 陈百炼. AutoPSA 与 CAESARII 在管道应力分析中的比较 [J]. 石油化工设备, 2008(01): 67-70.