

# 海上油气田平台管道设计中的应力集中问题研究

颜仁旺 (中海油能源发展装备技术有限公司湛江分公司, 海南 海口 570300)

**摘要:** 海上油气田平台管道系统是油气开采、运输关键设施, 长期受高温、高压、腐蚀介质及复杂海洋环境载荷耦合作用。本文针对管道设计应力集中问题, 分析其形成机理、关键因素与危害, 结合典型结构应力集中特性, 探讨有限元数值模拟 (含 CAESARII 应用)、实验测试与工程经验结合的评估方法, 提出控制策略。研究成果可为管道安全设计、风险评估和寿命预测提供理论与技术支持, 对保障海上油气开发高效稳定运行意义重大。

**关键词:** 海上油气田平台; 管道设计; 应力集中; 有限元模拟

**中图分类号:** TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0095-03

## Research on Stress Concentration in Pipeline Design of Offshore Oil and Gas Field Platforms

Yan Renwang (CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd. Zhanjiang Branch, Haikou Hainan 570300, China)

**Abstract:** The pipeline system of offshore oil and gas field platforms is a key facility for oil and gas extraction and transportation, which is subject to long-term coupling effects of high temperature, high pressure, corrosive media, and complex marine environmental loads. This article focuses on the problem of stress concentration in pipeline design, analyzes its formation mechanism, key factors and hazards, and combines the stress concentration characteristics of typical structures to explore the evaluation method of finite element numerical simulation (including CAESARII application), experimental testing and engineering experience, and proposes control strategies. The research results can provide theoretical and technical support for pipeline safety design, risk assessment, and life prediction, which is of great significance for ensuring efficient and stable operation of offshore oil and gas development.

**Keywords:** Offshore oil and gas field platform; Pipeline design; Stress concentration; finite element simulation

海上油气田平台管道系统承担油气集输、水处理、化学注入等核心功能, 运行环境具高风险、高成本、高复杂度特点。应力集中是因管道几何形状突变 (如开孔、拐角、焊接缺陷)、材料不均或外载荷局部作用, 使局部应力显著高于平均应力的现象。在交变载荷与腐蚀环境协同作用下, 应力集中区域易萌生疲劳裂纹或加速腐蚀损伤, 最终引发泄漏、破裂等事故, 造成经济损失和生态破坏。近年来, 全球因管道应力集中导致的失效案例频发, 如 2010 年美国墨西哥湾深水地平线钻井平台事故, 管道焊接接头应力集中是引发连锁失效的关键因素之一。因此, 深入研究海上油气田平台管道设计中的应力集中问题, 对提升管道系统的安全可靠性具有重要的工程价值。

### 1 海上油气田平台管道应力集中的形成机理与失效模式

#### 1.1 应力集中形成机理

海上管道应力集中本质是结构不连续性引发应力场扰动。力学机制上, 管道截面突变 (如弯头曲率变化、三通支管连接、法兰螺栓孔开孔) 破坏变形协调条件, 使应力流线在不连续处弯曲、汇集, 形成局部高应力区域。材料与工艺方面, 焊接残余应力和缺陷 (如未

焊透、气孔、夹渣) 加剧应力集中;  $H_2S$ 、 $CO_2$ 、 $Cl^-$  等腐蚀介质在应力集中区吸附、扩散, 引发应力腐蚀开裂 (SCC) 或氢致开裂 (HIC), 形成“应力集中 - 腐蚀损伤”恶性循环。

#### 1.2 典型失效模式

海上管道应力集中导致的失效模式主要有:

①疲劳失效: 受波浪、海流等交变载荷作用, 应力集中区循环应力超材料疲劳极限, 裂纹萌生扩展, 最终疲劳断裂。如平台立管与海底管道连接部位、泵出口管道, 长期承受动态载荷, 应力集中系数达 3 至 5, 易引发低周疲劳失效。

②腐蚀疲劳失效: 交变应力与腐蚀环境共同作用, 加快应力集中区腐蚀速度, 裂纹扩展速度比纯疲劳条件提高约 1 至 2 个数量级。研究表明, 含  $Cl^-$  海水环境中, 管道焊接接头腐蚀疲劳寿命缩短超 50%。

③应力腐蚀开裂: 拉应力与特定腐蚀介质共同作用, 使应力集中区沿晶界或穿晶扩展形成裂纹, 具有突发性和高危害性。如高含硫油气田平台高温高压管道中,  $H_2S$  在应力集中区推动氢渗透, 导致氢脆开裂。

④塑性失稳失效: 应力集中区局部应力超材料屈服强度, 发生塑性变形累积, 导致管道过度变形或破

裂，常见于平台高压管道三通、阀门等结构不连续处。

## 2 应力集中的关键影响因素分析

### 2.1 几何结构因素

几何结构是影响应力集中的首要因素，包括：管件类型上，弯头应力集中系数随曲率半径减小而增大，如 R/D 从 1.5 降至 0.5 时，SCF 从 1.8 增至 3.2；三通的 d/D 和 t/T 对 SCF 影响显著，d/D 越大、t/T 越小，应力集中越严重。平台因管道空间布局紧凑，常用小曲率半径弯头和异径三通，易出现高应力集中。过渡圆角方面，在开孔及焊接接头等部位合理设置，可减轻应力集中，如法兰密封面边缘改圆角，SCF 可降低 40% - 60%。表面粗糙度上，管道内壁腐蚀坑、划痕等缺陷超壁厚 5% 时，SCF 提升 2 - 3 倍。

### 2.2 材料因素

材料性能方面，高强度钢（如 X80、X90）虽可降低管道壁厚，但对应力集中更敏感，疲劳缺口敏感度系数比普通碳钢高 15% - 20%，平台高温高压管道设计需严控应力集中水平。长时间处于高温环境的管道，材料高温蠕变特性会影响应力集中区域应力松弛行为，改变失效模式。

### 2.3 载荷与环境因素

载荷条件上，内压、轴向力和弯矩组合影响应力集中分布。平台高温高压管道内部压力高，与轴向力、弯矩叠加会大幅升高弯头、三通等部位 SCF，如某平台高压蒸汽管道弯头受多种力作用时，SCF 从 1.5 提升到 3.0。平台管道振动载荷可能引发共振，放大局部应力。高温会降低材料屈服强度，使应力集中区域更易进入塑性状态，加剧蠕变和变形累积；高压会增大介质对管壁作用力，在结构不连续处产生更高局部应力，如高温高压油气管道弯头 SCF 比常温常压高 20% - 30%。其他环境因素，海洋环境温度波动、海水腐蚀、海洋生物附着等，温度变化产生的热应力与机械应力叠加使总应力提高 20% - 30%，海洋生物附着改变载荷分布，形成新应力集中点。

## 3 应力集中评估方法

### 3.1 理论计算方法

理论计算主要用于快速估算简单结构的应力集中系数，常用方法包括：

①图表法：图表法是依据实验数据来绘制应力集中系数图表的，像 Peterson 图表就属于此类。通过这样的图表能够直接去查取标准管件，比如圆孔、圆角以及台阶轴等的应力集中系数（SCF），这种方法在初步设计阶段是比较适用的。

②经验公式：就焊接接头而言，美国石油协会（API）给出了经验公式，即通过公式  $SCF=1+0.85 \times (t/T)^{0.5}$

来计算对接焊缝的应力集中系数。在这里，t 所代表的是焊缝厚度，而 T 则表示管道壁厚。

③断裂力学方法：在断裂力学的相关方法运用方面，可凭借 J 积分以及应力强度因子（也就是 SIF）来对裂纹尖端处的应力场强度予以评估。与此同时，再与 Paris 公式相结合，以此对裂纹扩展寿命做出预测。如此一来，该方法在含缺陷管道的应力集中分析方面是较为适用的。

### 3.2 有限元数值模拟

有限元法是复杂管道结构应力集中分析的核心手段，其关键技术包括：

在模型建立方面，运用像 C3D8R 这样的实体单元来针对管道几何展开精细化的建模操作。在此过程中，要着重将目光聚焦在焊接接头的熔合线以及几何不连续的区域上。并且，所设置的网格尺寸必须得符合应力梯度方面的要求，也就是说，其最小单元尺寸应当控制在不超过 1mm 的范围之内。

关于材料本构方面，得考虑材料所呈现出的弹塑性行为，运用多线性随动强化模型，也就是 Misesplasticity，去模拟在循环载荷状况下材料的应力应变响应情况。要是处于高温环境当中，那就需要引入 creep 模型，就好比 Norton-Bailey 模型这样的，以此来对材料的高温蠕变特性予以反映。

载荷以及边界条件方面，施加内压、轴向力、弯矩等静载荷，与此同时还要结合谱分析（SpectralAnalysis）或者时域动态分析（TransientDynamicAnalysis）来模拟诸如波浪、地震等的动态载荷，边界条件可通过采用固定约束或者弹簧 - 阻尼系统的方式去模拟土壤支撑以及平台固定支架。

### 3.3 CAESAR II 应用分析

CAESAR II 作为专业的管道应力分析软件，在海上油气田平台管道应力集中评估中具有独特优势：

模型构建方面，能够直接把管道三维模型导入进来（比如从 PDMS、AutoCAD 这些软件中导入），如此一来便可以自动生成管道应力分析模型，还能快速对弯头、三通以及法兰等管件的几何参数加以定义，使得建模流程得以简化，这在平台上复杂管网系统的应力集中分析当中是尤其适用的。

载荷与工况的设置方面，能够较为方便地施加像内压、外压这类压力载荷，还有温度、自重这些不同类型的载荷，以及风载荷、地震载荷等等。可以专门针对高温高压管道去设置多组温度和压力相互组合的工况，以此来模拟在各不相同的运行状态之下所出现的应力集中的具体情况。

应力的计算以及评定方面，依据 ASME B31.3 这

类规范,对应地去自动算出管道所存在的一次应力、二次应力还有峰值应力,并且要把应力集中的区域精准识别出来,接着评估其能不能达到规范所设定的要求。就平台之上的那些管道来讲,能够着重去分析由于设备振动、热胀冷缩这些情况而引发的应力集中问题,同时还需给出与之相对应的支吊架优化方面的相关建议。

## 4 应力集中控制与优化设计策略

### 4.1 结构优化设计

几何参数优化可采取一些措施来降低结构不连续性。比如增大弯头曲率半径,使其达到( $R/D \geq 1.5$ )的程度;还可采用等径三通或者像整体锻制三通这类的补强三通;再者设置渐变过渡段也是可行的办法。对于处在平台上的高温高压管道而言,适当把弯头曲率半径以及三通过渡圆角增大是有必要的。就拿三通支管与主管的过渡圆角半径来说,可以将其从0.5t增大至1.0t,如此一来,应力集中系数(SCF)能够降低25%至30%左右。

在开孔补强设计方面,对于管道的开孔部位,可以运用补强圈、整体补强或者厚壁接管补强这些方式。要依据ASME B31.3规范来对补强面积加以计算,务必保证在完成补强操作之后,其应力集中系数是小于等于2.0的。这种设计方式在平台上高压管道的仪表接口、分支管等诸多开孔部位都是比较适用的。

关于轻量化设计方面,在能够满足强度相关要求的这一前提之下,去采用变壁厚这样的设计方式(就好比在应力呈现集中状态的区域适当地局部加大壁厚)。如此一来,便能防止因过度补强而致使重量出现增加的情况以及二次应力集中的问题发生,进而达到减轻平台所承受重量负担的效果。

### 4.2 材料选型

高性能材料选型时,优先选用X70、X80等高强度低合金钢,控制硫、磷含量(硫不超0.005%、磷不超0.01%),提升材料韧性与抗腐蚀能力。对于平台上高温高压管道,选用P91、P92等既耐高温高压又抗蠕变的铬钼钢,其高温力学性能稳定,可降低应力集中风险。处于高应力区域,可采用钛合金或复合材料,如碳纤维增强聚合物CFRP,其疲劳强度比传统钢材高50%以上。

就表面处理技术而言,可借助喷丸强化以及激光冲击强化(LSP)这类表面改性技术,在应力集中的区域引入残余压应力,以此来对外部拉应力予以抵消,进而提升疲劳寿命。相关实验能够表明,喷丸强化这一方式能够促使管道焊接接头的疲劳寿命实现延长,延长的幅度大概在2至3倍左右。

### 4.3 运行维护与监测

在腐蚀防护方面,可采用三层聚乙烯(3PE)防腐涂层这一方式,或者运用牺牲阳极阴极保护的手段,亦或是通过缓蚀剂注入的办法,以此来对那些应力集中区域所发生的腐蚀反应起到抑制作用。对于平台上存在高风险的一些部位,像是焊接接头以及弯头之类的地方,要开展起定期的涂层修复工作,同时也要做好相应的腐蚀检测方面的工作。

定期检测与维护需依照API 5L标准来操作。要运用智能检测设备,像漏磁检测设备、超声检测设备等,针对管道展开全尺寸的检测工作。差不多每过2至3年的时间,便要开展一回应力集中风险方面的评估活动,而且要做到全面细致。一旦发现存在裂纹或者出现严重腐蚀的部位,就得及时予以更换处理或者展开维修工作,确保管道能正常运行。

## 5 结语

综合来看,海上油气田平台管道的应力集中问题属于复杂的多因素相互耦合的情况,其形成的机理、所涉及的影响因素以及可能出现的失效模式都呈现出多样的特点。借助将理论分析、数值模拟以及实验研究融合起来的办法,能够较为全面地去评估应力集中的程度,同时也能对其潜在危害予以评估。在开展工程实践的时候,得采取综合性的控制举措,像对结构设计加以优化、合理地去挑选材料、强化运行期间的维护等手段,以此达成对应力集中状况的有效管控目标。尤其是在平台的高温高压管道系统这块,更要着重关注细节方面的设计,并且要做好全过程的管理工作,从而保证管道系统可以安全且可靠地运行下去。

### 参考文献:

- [1] 李中,文敏,邱浩,等.海上油气田双层套管射孔动力学响应规律分析[J].石油机械,2022(09):050. DOI:10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2022.09.013.
- [2] 霍宏博,刘询,刘铭,等.考虑群桩土体运移的浅海隔水导管变形分析[J].中国海上油气,2024,36(4):181-189.
- [3] 段宝生.ADCP坐底验潮数据在海上油气田开发中的应用[J].天津科技,2024,51(2):74-76.
- [4] 罗京,李金蔓,李权,钱黎庆,彭红涛.基于云计算的海上油气田智能化管理平台设计[J].工业加热,2023,52(12):66-7078.
- [5] 王维高,孙亚东,安晓龙,王家乐.海上油气田开发工程电缆选型设计[J].节能,2023,42(5):55-57.

### 作者简介:

颜仁旺(1996-),男,汉族,海南海口人,本科,助理工程师,研究方向:管道工程设计。