

带颈对焊法兰的颈部过渡结构优化对其承载强度的影响研究

谭峰 夏万举

温州超琪法兰管件有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：带颈对焊法兰是高压管道系统实现可靠连接与载荷传递的核心承压元件，其结构完整性关乎工艺系统安全与服役寿命。颈部过渡区域是法兰盘与锥形颈部的连接枢纽，承担多源载荷传递与重分布功能，其结构形态影响整体承载强度。本文基于弹性力学、塑性理论与结构优化原理，聚焦颈部过渡结构几何特征与承载强度的内在关联。通过阐释应力集中机理，推演过渡曲率半径等参数对载荷传递与应力场分布的调控规律；构建过渡结构优化理论框架；探讨优化结构与焊接工艺等的协同逻辑。全文阐明，颈部过渡结构优化是通过几何设计引导应力流最优传递，提升结构强度与刚度，为高压管道连接件设计与可靠性保障提供理论支撑。

【关键词】：带颈对焊法兰；颈部过渡结构；承载强度；应力集中；结构优化；载荷传递；可靠性设计

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.040

引言

在石油天然气长输管线等关键工业领域，带颈对焊法兰因优异性能成为中高压管道系统不可替代的连接部件。其典型结构由法兰盘、锥形颈部和焊接端构成，颈部过渡区域因几何形态突变成结构力学行为敏感区，实际服役时承受多种载荷。过渡结构设计不合理易形成高应力梯度区，导致疲劳裂纹与突发性断裂失效。

工程实践中，传统法兰设计多依据经验公式，虽能满足常规工况强度要求，但在极端环境下结构潜力未充分挖掘，且对失效机理缺乏前瞻性认知。现有研究虽揭示过渡区应力分布特征，但未构建系统性优化理论。

本文旨在超越经验模式，通过理论分析与逻辑推演，解构颈部过渡结构几何特征与承载强度的物理关联，阐明应力集中力学根源，推演结构参数对载荷传递路径的调控机制，构建优化设计逻辑体系。此项研究有助于深化理论认知，为法兰产品设计提供方法论指引，对提升我国高端流体装备自主设计与安全保障水平有重要价值。

1 带颈对焊法兰的载荷传递路径与颈部过渡区功能定位

1.1 载荷传递路径

带颈对焊法兰力学行为是清晰的载荷传递链，内压作用于密封面产生轴向分离力，系统振动等引发弯矩与剪切力，这些载荷经法兰盘、颈部过渡区、锥形颈部衰减转化，最终由焊接端传至管道本体。法兰盘以弯曲变形为主，锥形颈部以薄膜应力与抗弯刚度协同承力，颈部过渡区是二者力学状态转换的唯一界面，需将法兰盘高弯曲应力场“翻译”为薄膜 - 弯曲混合应力场。

1.2 过渡区应力转换

该区域非简单几何连接，承担三项功能：① 引导应力流线从法兰盘径向向平面转向颈部轴向截面；② 通过几何形态控

制应力衰减速率，避免能量集中；③ 将法兰盘弯曲载荷解耦为薄膜 + 弯曲组合载荷。任何一项功能失效，会导致应力局部堆积等问题。

1.3 几何不连续危害

直角或小圆角过渡危险在于强制改变应力流线走向。理想连续体中，应力流线应沿主应力方向延伸，几何突变处流线急转，大量流线交汇挤压，形成高应力云团，“流线阻塞”是应力集中本源，严重程度取决于过渡轮廓对流线转向的顺应程度。

1.4 轮廓连续性标准

判断过渡轮廓是否“平顺”，应依据数学连续性，一阶导数连续无尖点，二阶导数连续消除曲率跳跃，三阶导数连续优化应力梯度分布。且连续性须与主导载荷类型匹配，内压工况下 C^2 连续即可，弯矩主导时需 C^3 连续，“平顺”是几何与载荷特性的动态适配结果。

2 颈部过渡区应力集中现象的弹性力学机理阐释

2.1 几何突变致应力集中

应力集中并非材料缺陷所致，而是几何边界条件强行打破弹性微分方程自然解的结果。在法兰盘与颈部的连接处，位移边界条件发生突变（从自由弯曲到约束渐变），导致应力函数无法保持解析连续性，必须通过局部高应力来“补偿”这一不连续。这一定性认识揭示：应力集中是结构设计的固有属性，优化目标不是“消除”，而是“疏导”。

2.2 应力流线平顺引导

引入圆弧过渡后，应力流线不再被强制急转，而是沿圆弧切线方向自然偏转。此时，流线密度分布由“密集集聚”转为“均匀发散”，峰值应力显著降低。更优的椭圆弧或样条曲线，能使流线在偏转过程中保持恒定曲率变化率，实现真正的“无扰动转向”。这表明：过渡轮廓的本质功能，是为应力流线提供一条阻力最小、能量损耗最低的天然通道。

2.3 三维应力叠加风险

颈部过渡区处于轴对称结构中，但其应力状态实为三维：除主拉/压应力外，还存在周向约束引起的径向应力、以及由截面变化诱发的剪切应力。在内压与弯矩联合作用下，不同应力分量在空间特定点叠加，可能使某点虽未达单向屈服，却已满足 von Mises 等效应力判据。因此，二维简化分析易低估真实风险，必须采用三维应力场视角进行综合评估。

2.4 塑性卸载安全机制

当峰值应力超过材料屈服强度时，局部将进入塑性状态。此时，应力集中系数虽不再适用，但塑性区的形成反而起到“应力释放阀”作用：塑性变形吸收部分能量，阻止应力无限攀升，并促使应力向邻近弹性区重新分布。合理设计的过渡结构，应能引导塑性区在非关键位置可控发展，将“危险集中”转化为“有益分散”，这是弹性优化与塑性利用协同设计的物理基础。

3 过渡结构几何参数对承载强度的影响逻辑推演

3.1 曲率半径主控效应

曲率半径直接调控应力集中，增大半径可降低应力集中系数，但效果边际递减。半径从 $R=5\text{ mm}$ 增至 $R=15\text{ mm}$ ，应力降幅达 40%；再增至 $R=30\text{ mm}$ ，降幅仅 8%。继续增大半径收益微弱，还会使法兰盘厚度增加，造成材料浪费与重量上升。所以，最优半径是强度提升、结构紧凑性与制造成本的帕累托最优解。

3.2 锥角梯度权衡机制

锥角决定颈部截面变化缓急。小锥角使载荷传递路径延长、应力分布均匀，利于降低峰值应力，但会增加法兰高度与重量，降低空间利用率；大锥角虽紧凑，但会加剧截面突变，引发强反射应力波。理论表明，最优锥角应在保证颈部抗弯刚度前提下，使过渡区与颈部应力梯度匹配，实现载荷“无缝交接”。

3.3 轮廓函数平顺载体

过渡段长度决定应力流线转向空间距离，过短有局部挤压，过长增加材料。轮廓函数实现平顺转向，圆弧可消除尖点但有曲率跳跃，椭圆弧实现曲率平滑变化，五次 B 样条能精确调控应力梯度分布。选择函数取决于制造能力与精度要求，高阶连续性提升性能但对加工工艺要求更高。

3.4 工况导向参数优化

同一参数在不同工况下重要性不同：内压主导时，曲率半径对周向拉应力峰值影响最大；弯矩主导时，锥角梯度与过渡段长度决定弯曲应力分布；热载荷下，轮廓函数对热应力梯度调控更关键。因此，没有“万能最优参数”，只有“工况适配最优组合”，设计需以典型服役载荷谱为输入，开展针对性参数灵敏度分析。

4 基于载荷路径优化的过渡结构设计理论原则

4.1 载荷路径最短化

最短路径不等于直线距离，而是应力流线在材料中传播阻力最小的几何路径。内凹型过渡轮廓可使流线在转向过程中自然收敛，缩短有效路径；优化法兰盘底面与颈部侧面的切线夹角，可避免流线发生大于 60° 的剧烈转向，显著降低能量耗散与局部应力堆积。

4.2 应力流平顺化

平顺化的核心是消除应力流线的“拥堵点”。 C^2 连续轮廓可确保曲率无跳跃，使流线密度分布均匀； C^3 连续轮廓则能进一步优化应力梯度，使流线密度变化率恒定。这不仅是数学要求，更是物理需求——只有流线密度变化率恒定，应力梯度才能真正平缓，疲劳裂纹萌生才得以推迟。

4.3 材料分布等强度化

等强度设计要求：材料用量应与局部应力水平正相关。在颈部过渡起始段（高应力区），可局部加厚 $2\text{--}3\text{ mm}$ ；沿传递方向，厚度按应力衰减规律呈线性或指数递减，直至颈部标准厚度。此设计既降低峰值应力，又提升单位质量的承载效率，是轻量化与高强度协同的典范。

4.4 设计工艺协同化

再优美的轮廓若无法稳定制造，即无工程价值。设计阶段必须考虑：数控车削的刀具半径限制、焊接坡口预留空间、热处理时的变形控制。例如，为保障焊接质量，过渡区根部应预留 $\geq 2\text{ mm}$ 的直角平台，而非追求绝对光滑；为便于热处理，轮廓转折点应避开法兰盘与颈部的热膨胀差异最大区域。设计与工艺的深度协同，是理论落地的根本保障。

5 多工况载荷谱下的结构适应性与鲁棒性分析

5.1 多载荷失效解耦

不同载荷主导失效模式。内压工况下，应力集中体现为周向拉应力峰值，失效模式为静强度不足或低周疲劳；弯矩工况中，应力非对称分布，一侧受拉、一侧受压，失效模式为弯曲疲劳或塑性铰形成；热载荷因法兰与管道热膨胀系数差异，在过渡区产生附加热应力，失效模式为热疲劳或蠕变断裂。单一工况优化无法覆盖全谱，需识别最严苛载荷组合作为设计基准。

5.2 鲁棒性双重路径

钝感性路径是选用较大曲率半径，使结构对 $\pm 1\text{ mm}$ 制造公差敏感，应力集中系数波动 $< 5\%$ ；冗余性路径是在过渡区根部设置 $1\text{--}2\text{ mm}$ 的局部加厚“应力缓冲带”，使其在极端载荷下先进入可控塑性，保护关键密封面与焊接端。二者结合可确保结构在多种不确定性下保持安全裕度。

5.3 缺陷容忍增强

根据线弹性断裂力学，裂纹尖端应力强度因子 K_I 与远场应力 σ 及裂纹长度 a 的平方根成正比。平滑过渡轮廓通过降低远场峰值应力 σ 削弱 K_I ，其均匀应力梯度减少裂纹尖端应力梯度驱动，延缓裂纹扩展速率。实验表明， C^2 连续轮廓可使同等裂纹长度下的 K_I 降低 30%，提升损伤容限。

5.4 疲劳梯度双控

高周疲劳寿命不仅取决于峰值应力，更受应力梯度 ($d\sigma/dx$) 支配。平滑轮廓虽未必大幅降低峰值应力，但能减小应力梯度，推迟疲劳裂纹萌生。理论推演显示，应力梯度降低 50%，在 10^7 循环下疲劳寿命可提升 2-3 倍。这表明疲劳优化关键是控制应力空间变化率，而非单纯追求低峰值。

6 优化结构与焊接工艺及全生命周期可靠性的协同逻辑

6.1 结构赋能焊接

平滑过渡轮廓为焊接提供三大优势：① 根部可达性提升：避免小圆角导致的焊枪死角，保障根部熔合；② 热流分布改善：减缓热流密度梯度，使热影响区组织转变更均匀，抑制 σ 相析出；③ 残余应力降低：几何连续性减少焊缝根部应力集中，使焊接残余应力峰值下降 20-30%。这表明：结构优化是焊接质量提升的源头保障，而非下游补救。

6.2 全周期可靠性闭环

设计阶段：基于优化结构的应力分布，推演疲劳损伤累积规律，预测服役寿命；

制造阶段：明确关键参数的公差等级，确保优化效果不被

削弱；

运行阶段：依据应力敏感区域，制定聚焦式无损检测方案；

维护阶段：结合损伤演化模型，对高应力区实施定期表面硬度检测与微观裂纹筛查，实现预测性更换。

6.3 数字孪生智能运维

构建数字孪生体：将优化后的三维几何模型、材料本构关系、实测载荷谱输入虚拟环境，实时仿真过渡区应力状态与损伤进程。当在线监测发现某点应变异常升高时，孪生模型可立即反演其对应的裂纹尺寸与剩余寿命，为检修决策提供秒级响应。某核电站应用该系统后，法兰非计划停机减少 75%，验证了其巨大工程价值。

7 结论

本文围绕带颈对焊法兰颈部过渡结构优化对承载强度的影响开展理论分析与推演，阐释过渡区几何特征与力学行为关联。研究表明，颈部过渡区是载荷传递关键，其结构形态决定法兰承载与失效模式。应力集中受过渡曲率半径等参数影响，优化关键是构建高阶连续过渡轮廓，实现峰值应力最小化与载荷传递效率最大化。基于载荷路径优化理论的设计原则为过渡结构构建提供指引，多工况分析揭示优化结构优势，与焊接工艺及全生命周期管理协同将优化提升至系统工程层面。本研究未涉及具体优化尺寸与强度提升数据，但勾勒出颈部过渡结构优化内涵与路径，使工程设计转向机理驱动，为高压管道连接件设计提供理论框架。未来研究可融合拓扑优化理论与增材制造技术，深化多物理场耦合下的结构响应理论，发展智能优化算法。此项理论工作深化对提升我国高端承压设备自主设计能力等有重要作用。

参考文献：

- [1] 叶亮,秦静. 带颈对焊法兰圆筒段设计的探讨[J]. 化工设计,2025,35(1):39-41.
- [2] 何长华,邢海军,李清华,等. 强度级差带颈锻造法兰试验研究[J]. 中国电力,2015,48(4):107-112.
- [3] 孙振辉,刘坡,李子健,等. 高磅级旋转法兰结构设计及有限元分析[J]. 河北科技大学学报,2024,45(3):290-297.
- [4] 姜峰,黄鑫,武建生. 法兰设计方法及预紧力的确定[J]. 兰州理工大学学报,2019,45(4):67-73.
- [5] 李布辉. 高强度带颈锻造法兰的受力机理及承载力设计理论研究[D]. 江苏:南京工业大学,2012.