

压力容器应力集中区域有限元分析及结构优化

孙贤涛 贾振朋

青岛畅隆重型装备有限公司 山东 青岛 260000

摘要: 在压力容器运行过程中,应力集中是影响安全性的关键因素。本文详细阐述了压力容器应力集中的理论基础,包括概念、常见部位及影响因素。介绍了有限元分析方法,涵盖基本原理、模型建立与求解过程。探讨了应力集中区域的识别方式,涉及系数计算与可视化。针对应力集中问题,提出几何形状优化、材料选择与布局优化以及局部加强等结构优化策略,以降低应力集中系数,提升压力容器性能,保障其安全稳定运行。

关键词: 压力容器; 应力集中; 有限元分析; 结构优化

引言: 压力容器作为工业领域广泛应用的重要设备,承担着储存和运输各类介质的重任,其安全性直接关系到工业生产的稳定与人员生命财产安全。在压力容器结构中,应力集中现象普遍存在,局部区域的应力显著高于周围均匀区域,这种应力状态的异常极易引发疲劳裂纹萌生,进而导致容器失效。因此,深入研究压力容器应力集中区域的有限元分析方法,并基于分析结果提出有效的结构优化策略,对于提升容器的安全性、可靠性和使用寿命具有重要的现实意义。

1 压力容器应力集中理论基础

1.1 应力集中概念

应力集中是压力容器结构分析中不可忽视的力学现象,指在容器局部区域因几何不连续或载荷分布异常导致应力值显著高于周围均匀区域的特殊状态^[1]。这种现象的本质是应力流的重新分布,当容器壁面存在几何突变时,原本均匀传递的应力线被迫发生偏转或收缩,在突变区域形成应力密集区。应力集中并非独立存在的应力状态,而是与整体应力场相互作用的局部效应,其峰值应力与名义应力的比值反映了集中程度。产生应力集中的根本原因在于结构连续性的破坏,这种破坏既可能源于制造过程中的几何缺陷,也可能是设计要求的必要结构特征,如开孔用于安装检测仪表、接管用于介质输送等。在弹性力学框架下,应力集中区域虽范围有限,但对容器整体强度产生决定性影响,尤其在交变载荷作用下可能成为疲劳裂纹的萌生点。

1.2 压力容器应力集中常见部位

容器中应力集中现象多发生于几何形状发生突变的区域。筒体与封头的连接部位因曲率半径的急剧变化,导致环向应力分布出现显著梯度。开孔边缘是典型的应力集中区,无论是圆形孔还是非圆形孔,孔边应力均呈现明显的非均匀分布特征。接管与筒体的相贯线区

域因涉及两个不同直径圆柱体的交接,几何复杂性使该区域应力状态异常复杂。材料不连续区域同样可能引发应力集中,如复合材料层合结构的界面处、堆焊层与基材的过渡区等。载荷作用的特殊位置,如支撑结构与容器壁的接触点、外部附件的安装部位,因局部载荷集中也会产生应力升高现象。这些部位的应力状态往往具有三维特征,单纯依靠平面应力分析可能低估实际集中程度。

1.3 应力集中影响因素

几何参数对应力集中的影响具有决定性作用。开孔尺寸与筒体直径的比值是关键参数,该比值增大时孔边应力集中系数呈非线性增长趋势。开孔形状的影响同样显著,椭圆形孔的长短轴比值越大,最大应力集中点越偏向长轴端部。接管的插入深度和倾斜角度会改变相贯线区域的应力分布特征,适当的插入深度可使应力峰值降低。载荷条件通过改变应力场的整体分布影响局部集中程度,内压载荷作用下开孔边缘的环向应力集中明显强于轴向应力,而外压工况下则呈现相反规律。温度载荷通过产生热应力与机械应力叠加,可能使原有应力集中区域进一步恶化。材料属性对应力集中的影响主要体现在非线性阶段,弹性模量较高的材料在相同几何条件下产生更大的应力集中,而泊松比的变化会改变应力场的三维分布特征。对于塑性材料,屈服行为可使应力重新分布,在一定程度上缓解峰值应力,但这种缓解作用受材料硬化指数和延展性的制约。

2 有限元分析方法

2.1 有限元法基本原理

有限元法的核心思想是将连续体离散化为有限个简单几何形状的单元组合,通过单元间的节点传递力学信息,将无限自由度问题转化为有限自由度问题求解。离散化过程需根据结构特征选择合适的单元类型,一维问题常用杆单元或梁单元,二维问题多采用三角形或四边

形单元, 三维问题则以四面体、六面体单元为主^[2]。单元选择需综合考虑计算精度与效率, 复杂几何区域可采用混合单元类型进行过渡。节点自由度定义取决于单元类型, 低阶单元仅包含节点位移参数, 高阶单元则引入导数项以描述更复杂的变形场。位移模式通过形函数构造, 将单元内任意点的位移表示为节点位移的插值函数, 形函数的构造需满足完备性与协调性要求, 确保位移场的连续性与收敛性。

2.2 压力容器有限元模型建立

几何建模需准确反映压力容器的实际结构特征, 对于对称结构可建立半模型或轴对称模型以减少计算量。建模过程中需特别注意几何突变区域的细节处理, 如开孔边缘的倒角、接管相贯线的过渡等, 这些细节对应力集中分析至关重要。材料属性定义需涵盖弹性模量、泊松比、密度等基本参数, 对于涉及非线性分析的问题, 还需定义屈服强度、硬化规律等塑性参数。边界条件施加应符合实际工况, 固定支撑需约束全部自由度, 弹性支撑则通过弹簧单元模拟。载荷施加需区分面载荷、体载荷与集中载荷, 内压载荷通常转化为等效面力作用于容器内壁。网格划分策略直接影响计算精度, 应力集中区域需采用高密度网格, 单元尺寸应小于特征长度的十分之一, 远离关键区域的网格可适当稀疏以控制计算规模。单元类型选择需平衡精度与效率, 三维分析中六面体单元因计算精度高、抗畸变能力强而优先采用, 复杂区域可采用扫掠网格技术生成结构化六面体网格。

2.3 有限元求解过程

刚度矩阵组装通过单元刚度矩阵叠加形成整体刚度矩阵, 该过程需考虑节点编号的连续性与单元连接关系。载荷向量形成需将离散化的载荷条件转化为等效节点力, 对于分布载荷通常采用积分方法计算等效节点力。方程组求解方法选择取决于问题规模与矩阵特性, 小规模问题可采用直接法如高斯消元法, 大规模问题则需采用迭代法如共轭梯度法或预条件共轭梯度法。求解过程中需监控残差与迭代次数, 确保结果收敛至允许误差范围内。结果提取需关注关键区域的应力、应变与位移分布, 应力集中区域应输出节点应力与单元应力, 通过应力云图直观显示应力分布特征。应变分析可揭示局部变形规律, 位移分析则用于验证结构刚度是否满足设计要求。后处理阶段需对计算结果进行合理性检查, 排除奇异点或网格畸变导致的异常值, 确保分析结论的可靠性。

3 压力容器应力集中区域识别

3.1 应力集中系数定义与计算

应力集中系数是衡量局部应力升高程度的核心指标,

定义为应力集中区域最大应力与参考名义应力的比值。应力集中系数的准确计算对于评估压力容器的安全性至关重要^[3]。该系数反映了结构几何突变或载荷分布不均导致的应力放大效应, 数值越大表明集中程度越显著。名义应力法通过选取远离几何突变区域的均匀应力作为参考值, 适用于简单工况下的初步评估; 热点应力法则聚焦于应力梯度变化剧烈的局部区域, 通过外推或插值方法获取峰值应力附近的代表性应力值, 更能准确反映实际危险点的应力状态。计算过程中需确保名义应力与热点应力的选取位置具有可比性, 避免因参考点选择不当导致系数失真。对于复杂结构, 可结合有限元分析结果与理论解进行交叉验证, 提高计算结果的可靠性。

3.2 不同工况下应力集中分析

内压工况下, 应力集中主要出现在开孔边缘、接管相贯线等几何突变区域, 环向应力集中系数通常高于轴向应力, 且随孔径增大而显著升高。不同工况下应力集中的特点和规律不同, 需分别进行分析。外压工况的应力分布特征与内压相反, 局部屈曲风险使应力集中区域呈现不同的失效模式, 需重点关注封头与筒体连接部位的压缩应力状态。温度载荷通过产生热应力与机械应力叠加, 可能改变原有应力集中区域的分布规律, 尤其在材料不连续或约束边界处, 热梯度导致的变形不协调会引发新的应力集中。组合载荷工况需综合考虑内压、外压、温度及机械载荷的耦合效应, 通过叠加原理或非线性分析方法评估综合应力状态, 此时应力集中系数可能因载荷相互作用而呈现非线性变化特征, 需采用增量分析或全量分析方法进行精确计算。

3.3 应力集中区域可视化

应力云图绘制是识别应力集中区域最直观的方法, 通过色彩梯度变化展示应力分布特征, 高应力区通常以红色或亮色标示, 可快速定位潜在危险点。应力集中区域的可视化有助于工程师直观地了解容器的应力状态。应力路径分析则沿特定路线提取应力数据, 生成应力变化曲线, 揭示应力集中程度随位置变化的规律, 尤其适用于分析相贯线或过渡圆角等复杂区域的应力分布。关键点应力提取通过选定几何突变处的特征节点, 输出其应力分量与主应力值, 为疲劳评估或强度校核提供精确数据支持。可视化过程中需结合结构特点选择合适的显示比例, 避免因色彩过渡或数据缩放导致高应力区被掩盖, 同时可通过等值线或矢量图进一步细化应力分布细节, 提升分析结果的解读效率。

4 压力容器结构优化策略

4.1 结构优化目标

压力容器结构优化的核心目标在于平衡安全性与经济性。降低应力集中系数是首要任务,通过减少局部应力峰值可延缓疲劳裂纹萌生,延长容器使用寿命^[4]。提高结构强度与刚度需确保容器在额定工况下不发生过度变形或塑性屈服,尤其在高温或交变载荷环境下需保留足够的安全裕度。减轻结构重量不仅能降低制造成本,还可减少运输与安装难度,对大型容器或移动式设备尤为重要。改善结构疲劳性能需从应力分布均匀性入手,通过优化几何形状或材料布局降低高应力循环区域的损伤累积速率,提升容器在长期服役中的可靠性。这些目标相互关联,需在优化过程中综合权衡,避免单一目标过度优化导致其他性能下降。

4.2 几何形状优化

开孔形状对应力集中影响显著,圆形孔因几何连续性最佳,应力集中系数低于椭圆形或长圆形孔,但后者在空间布局受限时更具灵活性。椭圆形孔的长短轴比值需控制在合理范围,通常不超过2:1,以避免长轴端部应力过度集中。接管结构优化需协调长度与壁厚参数,适当增加接管插入深度可改善相贯线区域的应力分布,但过长的接管会增大局部热应力风险;壁厚调整需与筒体壁厚匹配,避免因刚度突变引发新的应力集中。封头与筒体连接处的过渡圆角半径是关键参数,增大圆角半径可显著降低连接部位的环向应力峰值,但半径过大会影响容器整体尺寸,需根据设计规范选取最优值,通常圆角半径不小于筒体内径的10%。

4.3 材料选择与布局优化

高强度材料的应用可提升容器整体承载能力,但需注意材料韧性指标,避免因强度过高导致脆性断裂风险。复合材料布局设计通过合理分配不同材料属性,实现应力重分布,例如在开孔周边布置高模量材料可降低局部变形,在远离危险区采用轻质材料可减轻重量。功能梯度材料构思基于材料属性连续变化原理,通过逐层调整成分或微观结构,消除传统材料界面处的应力突变,尤其适用于高温或腐蚀环境下的压力容器,但制造工艺复杂度较高,需结合成本与性能需求审慎选择。材料优化需考虑加工性能与焊接特性,避免因材料不兼容导致制

造缺陷。

4.4 局部加强措施

补强圈设计是传统且有效的局部加强方法,通过在开孔周边附加金属环提升局部刚度,补强圈宽度与厚度需根据开孔尺寸与压力等级确定,通常宽度不小于开孔直径的1.5倍,厚度与筒体壁厚相近。局部增厚处理直接增加危险区域的材料厚度,适用于应力集中系数较高的局部区域,但需注意增厚过渡区的平滑性,避免因厚度突变引发新的应力集中^[5]。筋板加固方案通过在容器外壁设置纵向或环向筋板,提升整体抗弯刚度,尤其适用于大直径薄壁容器,筋板布局需与主应力方向一致,间距需通过有限元分析优化,以避免筋板间区域出现应力反弹。局部加强措施需与整体结构协调,避免因加强局部导致其他区域应力水平升高。

结束语

通过对压力容器应力集中区域的有限元分析以及结构优化策略的研究,明确了应力集中的产生机理、常见部位和影响因素,掌握了有限元分析的具体方法和应力集中区域的识别手段。在结构优化方面,从几何形状、材料选择与布局以及局部加强等多个角度提出了针对性的优化措施。这些研究成果为压力容器的设计、制造和维护提供了理论依据和技术支持,有助于提高压力容器的整体性能,降低事故风险,保障工业生产的安全有序进行。

参考文献

- [1]张东晓.有限元分析下的在用压力容器强度评估研究[J].品牌与标准化,2025(1):107-109.
- [2]王天锡.基于有限元的含未熔合缺陷压力管道应力分析[J].中国特种设备安全,2024,40(12):7-13,22.
- [3]续俊.基于ANSYS的压力容器有限元分析及优化设计[J].石化技术,2024,31(04):317-318.
- [4]张倩,刘义.有限元方法在压力容器强度分析与疲劳寿命计算中的应用[J].化工机械,2021,07:5-7.
- [5]薛光磊,陈璐,范国伟,等.压力容器设计及制造过程中降低应力集中的策略[J].产业与科技论坛,2023,22(17):54-55.