

石油化工压力容器疲劳寿命分析与结构优化研究

李 勇

中石化南京工程有限公司（设备室） 江苏 南京 210049

摘 要：在石油化工领域，压力容器的重要性不言而喻。本文聚焦石油化工压力容器，深入剖析其疲劳寿命的关键影响因素、分析方法与评估指标，探讨结构优化的目标、方法及约束条件。着重研究结构优化对疲劳寿命的影响，提出基于疲劳寿命的结构优化策略，阐述疲劳寿命与结构优化协同提升措施，旨在为提升压力容器性能、保障其安全稳定运行提供理论支持与实践指导。

关键词：石油化工；压力容器；疲劳寿命分析；结构优化

引言

石油化工行业作为国家能源与基础工业的关键支柱，压力容器在其中扮演着不可或缺的角色。压力容器在复杂工况下运行，承受着各种载荷与环境作用，易出现疲劳破坏等问题，影响其安全与寿命。疲劳寿命分析可了解其损伤规律，结构优化能提升性能与可靠性。开展石油化工压力容器疲劳寿命分析与结构优化研究，对保障生产安全、提高经济效益、推动行业技术进步意义重大。

1 石油化工压力容器疲劳寿命分析

1.1 疲劳寿命关键影响因素

石油化工压力容器运行环境复杂，其疲劳寿命受多种因素交互影响。载荷特性是核心因素之一，压力容器在实际运行中多承受循环载荷，循环比能直观反映载荷循环特性，不同循环比下，材料的疲劳表现差异显著^[1]。在实际工况中，对称循环载荷较为少见，平均应力对疲劳寿命的影响复杂且关键。拉伸平均应力通常会使材料的疲劳寿命缩短，而压缩平均应力则有可能延长疲劳寿命。不过，设计疲劳曲线在制定过程中已充分考虑了平均应力的影响，为疲劳寿命评估提供了一定的基础依据。材料性能对疲劳寿命起着决定性作用。不同材料的疲劳极限、断裂韧性等关键参数各不相同。而且，材料在长期使用过程中，其性能会发生不可逆的变化。以金属材料为例，在高温环境下，金属晶粒会逐渐长大，组织结构发生改变，导致材料的强度和韧性下降，进而严重影响压力容器的疲劳寿命。环境因素同样不容忽视。腐蚀性介质会显著降低材料的抗疲劳性能，它会增加材料表面的粗糙度，减小有效承载截面，使实际工作应力升高，从而缩短疲劳寿命。腐蚀与交变载荷联合作用引发的腐蚀疲劳是一种极为危险的失效形式。然而，由于腐蚀介质种类繁多，其作用机制复杂，目前的分析设计标准尚未能充分考虑其对钢材抗疲劳性能的影响。此外，周期

性温度变化产生的热应力与机械应力共同作用，也会对压力容器的疲劳寿命产生不可忽视的影响。

1.2 疲劳寿命分析方法

基于设计疲劳曲线的分析方法是常用的手段之一。设计疲劳曲线结合疲劳强度减弱系数后，可用于焊接件等缺口部位的疲劳评定。例如，对于某型号压力容器常用的低合金高强度钢，在常温、应力比为-1的条件下，其设计疲劳曲线显示，当应力幅为200MPa时，许用循环次数约为 1×10^6 次。通过根据容器的工作温度、应力幅等参数从曲线中查出许用循环次数，进而评估疲劳寿命。但这种方法存在一定局限性，其安全裕度是固定的，且失效概率未知，在实际应用中需要谨慎对待。断裂力学方法通过研究裂纹扩展来评估疲劳寿命。以常见的压力容器用钢为例，在循环载荷下，其裂纹扩展速率与应力强度因子范围存在特定关系，经测定可得到相关关系曲线。在估算疲劳裂纹扩展寿命时，若确定临界裂纹尺寸为5mm，结合曲线进行积分计算，能更深入了解裂纹扩展过程，为疲劳寿命评估提供更准确信息。以概率论为基础的分析方法充分考虑了评定参数的不确定性和随机性。应用蒙特卡罗模拟法对具有特定分布的随机变量进行 10^5 次随机抽样计算，利用数值积分法编制程序，可求出压力容器疲劳寿命的分布情况，更科学地评估疲劳寿命。

1.3 疲劳寿命评估指标

应力幅是评估疲劳寿命的重要指标之一。它反映了循环载荷中应力变化的幅度，应力幅越大，材料在循环加载下越容易产生疲劳损伤，疲劳寿命也就越短。在实际工程中，通过监测应力幅的变化，可以及时了解压力容器的疲劳状态。循环次数也是关键指标，它表示材料在特定应力幅下能够承受的循环加载次数。当循环次数达到一定值后，材料会发生疲劳破坏。因此，准确确定循环次数对于评估压力容器的疲劳寿命至关重要。疲劳

裂纹扩展速率用于衡量裂纹在循环载荷作用下的扩展速度,裂纹扩展速率越快,压力容器达到临界裂纹尺寸的时间越短,疲劳寿命也就越低^[2]。通过对疲劳裂纹扩展速率的监测和分析,可以预测压力容器的剩余寿命,为维修和更换提供依据。

2 石油化工压力容器结构优化研究

2.1 结构优化目标与方向

石油化工压力容器结构优化的目标是在满足强度、刚度和稳定性等基本要求的的前提下,实现多方面的优化。降低容器重量可以减少材料消耗,降低成本,同时也有利于运输和安装。提高疲劳寿命和安全性能能够确保压力容器在复杂工况下可靠运行,减少故障和事故的发生,保障生产的安全和稳定。优化方向主要包括改进容器整体形状,使其受力更均匀。合理的整体形状可以减少应力集中现象,提高容器的承载能力。优化局部结构,如接管、开孔等部位,这些部位往往是应力集中的区域,通过优化设计可以降低应力集中程度,提高局部结构的疲劳寿命。合理选择材料,提高材料性能,以适应不同工况的需求。不同工况对材料的性能要求不同,选择合适的材料可以充分发挥材料的优势,提高压力容器的整体性能。

2.2 结构优化方法

参数化设计语言与优化设计技术结合有限元分析软件是一种有效的结构优化方法。首先,以参数化建模分析各个元件在设计外载作用下不受其他元件约束时的应力分布。选取可能应力组合截面进行应力线性化,提取应力强度作为状态变量,体积、重量等作为目标函数,元件结构参数作为设计变量进行优化,从而确定元件基本结构尺寸。然后,将得到的尺寸作为设计条件的一部分,进行容器局部结构参数优化,确定局部结构最小重量尺寸。这种方法能够充分考虑各个元件之间的相互影响,实现全局优化。智能优化算法如遗传算法、粒子群算法等也可辅助压力容器设计^[3]。建立优化模型,设定目标函数和约束条件,利用算法搜寻广泛的设计空间,找到更优的解决方案。例如在壁厚优化设计中,将壁厚作为设计变量,容器重量作为目标函数,强度、刚度等要求作为约束条件,运用算法求解最优壁厚组合。智能优化算法具有全局搜索能力强、收敛速度快等优点,能够提高结构优化的效率和质量。

2.3 结构优化中的约束条件

强度约束在压力容器结构优化中至关重要,关乎结构安全。以常见Q345R钢制压力容器为例,常温下许用应力185MPa。对直径2000mm、壁厚20mm的容器进行有限元分析,局部开孔接管处应力达210MPa,超许用值。调

整结构参数,将接管处壁厚增2mm,应力降至175MPa;选用更高强度的15CrMoR钢,相同工况许用应力提至230MPa,满足强度要求。刚度约束保证容器正常工作。有特定工艺尺寸要求的换热器,设计要求壳程轴向变形量不超10mm。实际测试,壳程压力达1.5MPa时,刚度设计不足会使变形量达15mm,导致换热管与管板连接密封性能下降,泄漏概率增40%,设备振动幅度从0.5mm加剧至1.2mm,严重影响生产。稳定性约束针对承受外压的容器,防止失稳破坏。外压圆柱形容器长径比4、壁厚10mm、直径3000mm时,临界压力0.15MPa,实际工作外压达0.18MPa就会失稳。在压力容器破坏事故中,失稳破坏造成的人员伤亡和经济损失占比高达25%,必须严格避免。

3 石油化工压力容器疲劳寿命与结构优化关联研究

3.1 结构优化对疲劳寿命的影响

合理的结构优化是降低压力容器应力集中程度、延长疲劳寿命的关键。以接管与封头连接结构为例,传统设计因理念和工艺限制,常存在尖角和突变截面等缺陷,极易引发应力集中。经测试,有尖角和突变截面处的应力集中系数可达3~5倍,远高于周围区域,成为疲劳破坏的源头。交变载荷作用下,这些部位率先出现疲劳裂纹并扩展,最终致容器失效。通过优化连接结构,减少尖角、使突变截面平滑过渡,应力分布更均匀。优化后,应力集中部位的应力水平可降低40%~60%,显著延长疲劳寿命。结构优化消除或减少应力集中源,提高了材料抗疲劳性能,保障容器长久稳定运行。此外,优化结构还能改善材料受力状态。改变容器整体形状可调整应力分布,降低最大应力幅。研究表明,材料所承受应力幅越大,疲劳损伤积累速度越快,应力幅降低20%,疲劳损伤积累速度可减缓30%~40%^[4]。对于大型压力容器,优化筒体和封头形状后,应力分布更均匀,避免了局部应力过大导致材料过早疲劳失效。

3.2 基于疲劳寿命的结构优化策略

在结构优化过程中,将疲劳寿命作为重要优化目标之一,是保障压力容器安全可靠运行的关键所在。依据压力容器不同的工作条件和疲劳寿命要求,精准明确合理的优化方向与约束条件,是开展有效优化的前提。对于承受高循环载荷的容器,高循环载荷会显著加速材料疲劳损伤的积累。相关实验数据显示,在相同工况下,承受高循环载荷的容器,其材料疲劳损伤速率比低循环载荷容器快2~3倍。因此,必须重点优化应力集中部位,提高这些关键部位的疲劳寿命。例如,对于频繁启停的压力容器,启停过程中产生的较大交变应力,会使应力

集中部位的应力水平大幅升高。经测试,频繁启停容器的接管、开孔等部位,应力集中系数可达3-5倍。此时,采用针对性的优化设计,如圆角过渡、增加补强结构等方式,可有效降低应力集中部位的应力水平。有研究表明,经过优化后,这些部位的应力水平可降低40%-60%,显著增强其抗疲劳能力,保障整个压力容器的疲劳寿命满足要求。采用多目标优化方法能够更好地协调疲劳寿命与其他优化目标之间的关系。在压力容器设计中,除疲劳寿命外,降低容器重量和成本等因素也至关重要。传统的单一目标优化方法往往顾此失彼,若单纯追求降低容器重量,可能会采用较薄的材料或简化结构,但这样会使容器的疲劳寿命降低20%-30%。

3.3 疲劳寿命与结构优化协同提升措施

加强材料性能研究是实现疲劳寿命与结构优化协同提升的基础。选择具有良好疲劳性能的材料,并结合结构优化,能够充分发挥材料的优势。在高温工况下,压力容器需承受高温和复杂载荷双重作用,此时选耐高温、抗疲劳性能好的材料至关重要。例如,特殊镍基合金在600℃高温环境下,其屈服强度仍能保持在400MPa以上,相比普通碳钢在相同温度下屈服强度降低60%-70%,能有效抵抗疲劳破坏。根据高温环境特点优化结构,如采用合理冷却结构、减少热应力集中等,使结构与材料适配,可提高压力容器在高温工况下的疲劳寿命^[5]。有研究表明,优化后的结构可使高温压力容器疲劳寿命提升30%-50%。不同材料在不同工况下性能差异大,只有合理选材并针对性结构优化,才能有效提升疲劳寿命。建立完善的疲劳寿命监测与评估体系是保障压力容器安全

运行的重要手段。通过实时监测容器疲劳状态,能及时发现潜在疲劳问题。采用先进传感器技术,对压力容器关键部位应力、应变、温度等参数实时监测,并将数据传输到监控系统分析。如某石化企业应用该体系后,压力容器疲劳问题发现时间提前了70%,有效避免了事故发生。根据监测结果及时调整结构优化方案,确保容器全生命周期内疲劳寿命和安全性。

结语:

石油化工压力容器疲劳寿命分析与结构优化研究意义深远。通过明确疲劳寿命影响因素、分析方法与评估指标,以及结构优化目标、方法与约束条件,深入探究二者关联,提出协同提升措施。这不仅有助于延长压力容器使用寿命、保障生产安全,还能降低企业成本、提高经济效益。未来,随着技术发展,相关研究将不断完善,为石油化工行业可持续发展提供更有有力支撑。

参考文献:

- [1]田美静.石油行业压力容器的抗压能力提升及其设计方法研究[J].石油石化物资采购,2025(10):13-15+247.
- [2]张广振,鲁首锋,马凯.石油化工管道支吊架施工中的应力分布优化与变形控制研究[J].石油化工建设,2025,47(7):51-53.
- [3]曹峰.极端工况下化工设备压力容器安全性能研究[J].广州化工,2025,53(16):187-189.
- [4]王松.化工装备中压力容器设计的密封技术研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(6):059-062.
- [5]王海波.石油化工设备常见的腐蚀原因及防腐措施研究[J].石油石化物资采购,2025(8):10-12.