

高温蠕变工况下压力容器开孔结构可靠性的探讨及对比分析

李 颀

安徽华东医药工程有限责任公司上海分公司 上海 201315

摘 要：本文探讨了高温蠕变工况下压力容器开孔结构的可靠性问题，介绍了高温蠕变的基本概念及其对压力容器开孔结构的影响。分析了影响开孔结构可靠性的因素，包括材料性能、结构参数、工况条件以及制造与维护质量。在此基础上，探讨了基于蠕变损伤理论、数值模拟和试验测试的评估方法，对比了各方法的优缺点和适用场景。提出结构设计优化、材料选择建议以及制造与维护工艺优化等多方面的改进建议，旨在提高高温蠕变工况下压力容器开孔结构的可靠性。

关键词：高温蠕变；压力容器；开孔结构；可靠性；对比分析

1 高温蠕变工况下压力容器开孔结构的基本理论

1.1 高温蠕变的基本概念

高温蠕变是指材料在高温和恒定应力作用下，随着时间的推移发生缓慢而持续塑性变形的现象。对于金属材料而言，当温度超过其熔点的一半时，蠕变现象会变得较为明显。高温蠕变通常分为三个阶段：初始蠕变阶段，材料的变形速率随时间逐渐减小；稳态蠕变阶段，变形速率保持相对稳定，是蠕变过程中持续时间最长的阶段；加速蠕变阶段，变形速率急剧增加，最终导致材料断裂。在高温蠕变过程中，材料内部会发生一系列微观结构变化，如位错运动、晶界滑移和空洞形成等。这些微观变化积累到一定程度，会使材料的力学性能逐渐退化，影响其承载能力。对于压力容器而言，长期处于高温蠕变工况下，其结构部件尤其是开孔等应力集中区域，容易因蠕变变形累积而出现失效，因此深入理解高温蠕变的基本概念和规律，是研究压力容器开孔结构可靠性的基础。

1.2 压力容器开孔结构分析

压力容器的开孔结构是为了满足工艺要求，如物料进出、测量、检修等而设置的，常见的有圆形开孔、椭圆形开孔等，且通常配备接管与外部管道连接。开孔结构的存在破坏了压力容器壳体的连续性，导致在开孔边缘出现应力集中现象。应力集中系数往往是衡量应力集中程度的重要指标，其值越大，表明该区域的应力水平越高，越容易发生失效。不同的开孔结构参数对其受力状况影响显著。开孔尺寸方面，开孔直径越大，对壳体连续性的破坏越严重，应力集中系数也越大；开孔位置不同，应力分布也存在差异，如在筒体与封头连接处附

近开孔，应力集中情况更为复杂。接管与壳体的连接方式多样，平齐式连接施工简便，但应力集中较大；插入式连接能在一定程度上改善应力分布；法兰连接式便于拆卸，但增加了泄漏风险^[1]。另外，为降低应力集中，通常会采用补强结构，如整体补强和局部补强，通过增加开孔周围的壁厚来分散应力。

1.3 高温蠕变与开孔结构的相互作用

高温蠕变与压力容器开孔结构之间存在复杂的相互作用。一方面，开孔结构的应力集中特性会加剧高温蠕变现象。在开孔边缘的高应力区域，材料在高温作用下更容易发生蠕变变形，且变形速率较其他区域更快，导致应力集中部位的蠕变损伤累积更为迅速。随着时间的推移，这种累积损伤会使开孔结构的承载能力逐渐下降，甚至出现裂纹等缺陷。另一方面，高温蠕变引起的变形会改变开孔结构的应力分布。在蠕变过程中，开孔结构的塑性变形会使局部应力得到一定程度的松弛，但同时也可能导致结构几何形状发生改变，如开孔边缘出现鼓包、接管发生弯曲等，进而引发新的应力集中。这种相互作用使得高温蠕变工况下压力容器开孔结构的可靠性问题更为复杂，需要综合考虑两者的影响。

2 高温蠕变工况下压力容器开孔结构可靠性影响因素分析

2.1 材料因素

材料的高温蠕变性能是影响开孔结构可靠性的关键因素之一，不同材料的高温蠕变特性差异很大，例如，低合金钢在高温下具有较好的蠕变强度和抗蠕变断裂性能，而一些高合金钢和镍基合金则具有更高的使用温度和更优异的高温蠕变性能。材料的化学成分、组织结

构、晶粒度等都会对其高温蠕变性能产生影响。例如,合金元素的添加可以改善材料的晶界结构,提高晶界的强度,从而抑制晶界滑动和扩散蠕变,提高材料的高温蠕变抗力。此外,材料在长期高温使用过程中会发生老化现象,如碳化物析出、相变等,导致材料的性能退化,降低开孔结构的可靠性。

2.2 结构因素

开孔结构的尺寸、形状和位置等结构参数对可靠性有重要影响,如开孔直径与容器壁厚的比值(d/t)越大,应力集中系数越大,开孔部位的应力水平越高,蠕变损伤和裂纹萌生的风险也越大。开孔的形状也会影响应力分布,椭圆形开孔和矩形开孔的应力集中程度通常比圆形开孔更严重。开孔的位置也是一个重要因素,在筒体的环向应力较大区域或封头的高应力区域开孔,会增加开孔结构的失效风险。另外,开孔补强结构的设计是否合理也会直接影响开孔部位的强度和刚度,补强不足或补强方式不当都会降低开孔结构的可靠性^[2]。

2.3 工况因素

温度、压力和加载历史等工况参数对高温蠕变工况下开孔结构的可靠性有着显著影响。温度是影响高温蠕变的关键因素,温度越高,材料的蠕变速率越快,蠕变损伤和裂纹萌生的时间越短。压力的大小会影响开孔部位的应力水平,压力越大,应力集中区域的应力越高,蠕变变形和损伤的发展也越快。加载历史也会对蠕变行为产生影响,例如,循环加载会导致材料的疲劳蠕变交互作用,加速裂纹的扩展,降低开孔结构的可靠性。

2.4 制造与维护因素

制造工艺的质量对开孔结构的可靠性至关重要。在开孔加工过程中,如果加工精度不高,会产生毛刺、裂纹等缺陷,这些缺陷会成为蠕变裂纹的萌生点,降低开孔结构的强度和可靠性。焊接质量也是影响可靠性的重要因素,焊接缺陷如气孔、夹渣、未熔合等会导致焊接接头的强度降低,在高温蠕变作用下容易产生裂纹扩展。此外,压力容器的维护状况也会影响其可靠性,定期的检验、检测和维护可以及时发现开孔部位的蠕变损伤和裂纹缺陷,并采取相应的修复措施,防止缺陷的进一步发展。

3 高温蠕变工况下压力容器开孔结构可靠性评估方法探讨

3.1 基于蠕变损伤理论的评估方法

基于蠕变损伤理论的评估方法是通过建立蠕变损伤模型来预测开孔结构的剩余寿命和可靠性。该方法的核心是引入损伤变量来描述材料在高温蠕变过程中的损伤

程度,损伤变量通常在0到1之间变化,0表示无损伤,1表示材料发生断裂。常用的蠕变损伤模型有Kachanov-Rabotnov模型等,该模型考虑了材料的蠕变应变和损伤累积之间的关系,通过理论推导和实验数据拟合确定模型参数。评估过程主要包括:确定开孔结构的应力分布,结合材料的蠕变性能参数,计算不同时刻的损伤变量;根据损伤变量的变化规律,预测开孔结构的剩余寿命。该方法具有较强的理论基础,能够从微观损伤机制出发分析结构的可靠性,但模型参数的确定较为复杂,需要大量的实验数据支持。

3.2 数值模拟评估方法

数值模拟评估方法主要采用有限元分析软件,对高温蠕变工况下压力容器开孔结构的应力应变场和蠕变寿命进行模拟预测。首先建立开孔结构的三维有限元模型,根据实际工况设置边界条件,如温度、内压等;然后选择合适的蠕变本构关系,将材料的蠕变性能参数输入模型;通过有限元计算,得到开孔结构在不同时刻的应力应变分布和蠕变变形量;最后根据一定的寿命判断,预测开孔结构的蠕变寿命。这种方法能够直观地展示开孔结构的应力应变分布和蠕变演化过程,适用于复杂结构的可靠性评估。其优势在于可以模拟不同工况和结构参数对开孔结构可靠性的影响,为结构优化设计提供依据。但数值模拟的准确性依赖于模型的简化程度、本构关系的合理性和参数的准确性,且计算过程较为复杂,需要较高的计算成本。

3.3 试验测试评估方法

试验测试评估方法通过开展高温蠕变试验,获取开孔结构在高温蠕变工况下的性能数据和失效信息,进而评估其可靠性。常用的试验包括单轴蠕变试验和缺口蠕变试验等,单轴蠕变试验可以得到材料的基本蠕变性能参数,如蠕变强度、持久强度等;缺口蠕变试验则更接近开孔结构的实际受力状态,能够模拟应力集中对蠕变行为的影响。试验过程中,通过测量试样在不同时刻的蠕变应变和断裂时间,分析材料的蠕变规律和断裂机制。该方法得到的结果真实可靠,能够验证理论模型和数值模拟结果的准确性。但试验测试需要专门的设备和试样,成本较高,且试验周期较长,尤其是对于长寿命的开孔结构,难以在短期内获得评估结果^[3]。

3.4 不同评估方法的对比与适用性分析

三种评估方法各有优缺点,适用场景也有所不同。基于蠕变损伤理论的评估方法理论性强,能够深入分析结构的损伤演化机制,但模型参数确定困难,适用于对结构可靠性进行理论分析和长期预测。数值模拟评估

方法能够模拟复杂结构和工况下的蠕变行为,具有较高的灵活性,但对模型和参数的依赖性较强,适用于结构设计阶段的可靠性评估和参数优化。试验测试评估方法结果准确可靠,但成本高、周期长,适用于验证其他评估方法的结果和获取关键的材料性能数据。在实际应用中,通常需结合多种评估方法,以提高评估结果的准确性和可靠性。例如,通过试验测试获取材料的蠕变性能参数,为数值模拟和理论分析提供数据支持;利用数值模拟分析不同结构参数对可靠性的影响,为结构优化提供方向;基于蠕变损伤理论对优化后的结构进行长期可靠性预测。

4 高温蠕变工况下压力容器开孔结构可靠性优化建议

4.1 结构设计优化

结构设计优化是提高高温蠕变工况下压力容器开孔结构可靠性的重要途径。在开孔形状选择上,椭圆形开孔相较于圆形开孔,应力集中系数更小,在高温蠕变下的变形和损伤累积更为缓慢,因此在条件允许的情况下,可优先采用椭圆形开孔;开孔尺寸应根据工艺要求和强度计算合理确定,在满足使用功能的前提下,尽量减小开孔直径,以降低应力集中程度。接管与壳体的连接方式推荐采用插入式,插入深度应根据计算确定,以改善应力分布;对于高压高温工况,可采用整体锻造的接管与壳体连接结构,减少焊接缺陷的影响;补强结构设计要合理,整体补强虽然材料消耗较多,但应力分布均匀,在高温蠕变下性能稳定,适用于重要的开孔结构;局部补强如厚壁接管补强,应保证补强区域与壳体的过渡平滑,避免出现新的应力集中。此外,在开孔结构的设计中,应尽量避免尖角和突变,采用圆角过渡,以降低应力集中。

4.2 材料选择建议

材料选择应根据高温蠕变工况的具体要求,综合考虑材料的蠕变强度、持久强度、蠕变断裂韧性等性能。对于温度较高、应力较大的工况,应选择高温蠕变性能优良的材料,如奥氏体不锈钢、镍基合金等。奥氏体不锈钢具有较好的抗氧化性和高温强度,在化工、能源领域得到广泛应用;镍基合金具有更高的蠕变强度和持久强度,适用于超高温、超高压工况;在选择材料时,还应考虑材料的焊接性能和加工性能,确保材料能够满足制造工艺的要求。要关注材料的成本,在满足性能要求的前提下,选择性价比高的材料^[4]。对于一些重要的开孔

结构,可采用复合板材,即基层采用强度较高的材料,复层采用耐腐蚀性和高温性能优良的材料,以兼顾结构强度和使用性能。

4.3 制造与维护工艺优化

制造工艺优化方面,应加强焊接质量控制。焊接前要对坡口进行清理,选择合适的焊接材料和焊接参数,采用先进的焊接技术如氩弧焊等,减少焊接缺陷的产生。焊接后应进行适当的热处理,如消除应力退火,以降低焊接残余应力,改善材料的组织和性能。加工过程中要提高加工精度,严格控制开孔尺寸和表面粗糙度,确保开孔边缘光滑过渡。对于重要的开孔结构,可采用无损检测技术如超声波检测、射线检测等,对制造过程进行全程质量监控,及时发现和修复缺陷;维护工艺优化方面,制定完善的定期检查计划,采用目视检查、超声波检测、磁粉检测等方法,对开孔结构进行全面检查,及时发现蠕变变形、裂纹等缺陷。对于发现的缺陷,要采用合理的修复工艺进行处理,如补焊时要选择与母材匹配的焊接材料,控制好焊接参数,避免产生新的缺陷。同时,要做好维护记录,为开孔结构的可靠性评估和寿命预测提供依据。

结束语

高温蠕变工况下压力容器开孔结构的可靠性问题是一个复杂而重要的课题。本文通过系统的探讨和分析,提出了多项针对性的优化建议,为相关工程设计和实际应用提供了有益的参考。随着技术的不断进步和新材料的不断涌现,仍需进一步深入研究,以不断提高压力容器开孔结构在高温蠕变工况下的安全性和可靠性。未来的研究可以更加注重实验验证和多学科交叉融合,以推动该领域技术的持续进步。

参考文献

- [1]王晓明.高温高压条件下材料性能研究及应用[J].材料科学与工程,2021,39(2):45-56.
- [2]张伟,李小红.高温高压环境下压力容器材料选择与性能分析[J].工程材料科学与工程,2020,28(4):72-83.
- [3]王高彬,刘瑶.压力容器开孔结构补强设计的优化策略研究[J].百科论坛电子杂志,2025(6):136-138.
- [4]马忠明,杨哲,郝胜杰.高温蠕变工况下压力容器开孔结构可靠性的探讨及对比分析[J].化肥设计,2025,63(3):4-8,22.