

高温高压工况管道焊接接头可靠性评价

于潇河(神华工程技术有限公司安徽分公司,安徽 合肥 230000)

摘要:在高温高压工况下服役的管道系统,焊接接头的可靠性是影响整体结构安全性与稳定性关键环节。接头部位作为冶金组织不均、应力集中与热循环叠加的薄弱点,极易受到蠕变、疲劳及腐蚀等多因素作用的耦合影响,其可靠性评价已成为工程领域关注的核心问题。本文围绕材料组织演变规律、力学性能衰减机理、失效模式判定方法及可靠性评价技术体系等方面展开论述。研究表明,晶粒粗化、第二相析出及界面应力集聚是组织退化的重要因素,而循环载荷与环境介质的叠加效应进一步加速了损伤积累。针对复杂工况,采用多尺度数值建模、先进无损检测与寿命预测方法相结合,可形成更为科学的可靠性评价框架。文章强调,未来应在材料改性、工艺优化与智能监测方面强化技术融合,以实现焊接接头全寿命周期的动态可靠性管理。

关键词:高温高压;管道焊接接头;组织演变;损伤机理;可靠性评价

中图分类号: TG407

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167(2025)033-0121-03

Reliability Evaluation of Welded Joints for Pipelines in High Temperature and High Pressure Working Conditions

Yu Xiaohe(Shenhua Engineering Technology Co. Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: The reliability of welded joints is the key link affecting the safety and stability of the overall structure of pipeline systems serving under high-temperature and high-pressure working conditions. Joints as metallurgical organization is not uniform, stress concentration and thermal cycle superimposed on the weak point, is very susceptible to creep, fatigue and corrosion and other factors such as the role of the coupling effect, its reliability evaluation has become a core issue of concern in the field of engineering. This paper focuses on the evolution of the material organization, mechanical properties of the attenuation mechanism, failure mode determination method and reliability evaluation technology system and other aspects of the discussion. The study shows that grain coarsening, second-phase precipitation and interfacial stress concentration are important factors of tissue degradation, and the superposition effect of cyclic load and environmental media further accelerates the accumulation of damage. For complex working conditions, the combination of multi-scale numerical modeling, advanced nondestructive testing and life prediction methods can form a more scientific reliability evaluation framework. The article emphasizes that the future should be strengthened in the material modification, process optimization and intelligent monitoring technology integration, in order to achieve the dynamic reliability management of the whole life cycle of the welded joints.

Keywords: high temperature and high pressure; pipeline welded joints; organizational evolution; damage mechanism; reliability evaluation

高温高压工况下的管道广泛应用于能源、化工及冶金等领域,其运行安全直接决定系统稳定性与经济性。在复杂服役条件下,焊接接头失效约占管道事故的相当比例,这使接头成为评价管道可靠性的核心部位。焊接接头的设计不仅需要满足使用条件下的强度与可靠性要求,还必须考虑工作应力的作用方式和温度环境,同时兼顾经济性与制造安装的可行性^[1]。由于接头区域组织与性能均异于母材,其在热力耦合环境中更易发生损伤与劣化。随着服役条件日益严苛,传统经验性评价方式在精度与时效性方面存在局限性,已难以完全满足现代工程的需求。在此背景下,亟需建立系统化、科学化的可靠性评价框架。本文将从组织特征、力学性能、失效模式及评价方法四个方面展开,旨在为焊接接头在高温高压条件下的可靠性研究提供理论支撑与工程参考。

1 材料组织演变与结构稳定性分析

1.1 高温循环下晶粒粗化与组织不均化机理

在高温高压服役条件下,焊接接头区域长期受到周期性热循环作用,晶粒结构会逐步粗化,组织均匀性被明显削弱。随着温度升高,晶界迁移速率加快,使部分区域晶粒迅速长大,而相邻区域仍保持较小尺度,最终形成明显的不均化格局。该现象表明,晶粒粗化直接削弱晶界强化效应,导致材料抵抗蠕变与疲劳的能力下降。同时,粗大晶粒区域在应力集中条件下更易演变为裂纹萌生源,微观不均一性逐渐放大为宏观力学性能的不稳定,晶粒不均化显著影响接头在高温服役下的整体稳定性。

1.2 第二相析出与界面强化/脆化效应规律

高温高压条件下的管道在能源、化工与冶金领域应用广泛,其运行安全直接影响系统稳定性与经济效

益。在此类工况中,焊接接头失效事件占管道整体事故比例的显著部分,因此接头设计必须兼顾强度、可靠性与工作温度的适配性。规范化设计要求在保证足够连接强度的同时尽可能降低残余应力,并兼顾经济性与施工可行性^[1]。

值得注意的是,焊接接头作为结构中最敏感环节,其组织与性能差异显著,服役环境复杂时极易成为损伤源。随着使用条件的苛刻化与工况的多元化,传统依赖经验的评价方式存在明显局限性,难以满足对高精度预测与实时监测的需求。因此,构建系统化与科学化的可靠性评价体系显得尤为必要。

1.3 热影响区微观结构差异对稳定性的影响

焊接接头的热影响区是组织最复杂的区域,其在快速加热与冷却作用下表现出显著的梯度化特征。靠近熔合线的部位往往发生完全再结晶,形成粗大等轴晶;中间区域则处于部分再结晶与晶粒长大并存的状态;远离焊缝的位置则多保持母材原始组织。这种梯度分布使宏观性能呈现明显不均,力学稳定性随位置变化而波动^[2]。

研究观察表明,热影响区中常伴随碳迁移现象,使不同区域强化相分布失衡,局部区域形成软化带或硬化带。软化带削弱了承载能力,而硬化带则成为脆性断裂源,两者均对服役安全构成风险。

2 力学性能退化与损伤积累过程

2.1 高温蠕变条件下的接头应力松弛与变形规律

在高温环境下长期服役的焊接接头普遍呈现蠕变特征,其主要表现为应力逐步松弛与不可逆变形的持续积累。接头区域因焊接热循环引起的组织差异,使得蠕变过程具有显著的不均一性。晶粒粗化、析出相再分布以及热影响区软化带的存在,使局部应力集中并逐渐释放,进而形成蠕变腔体与微孔隙。随着时间演化,局部应变不断扩展至宏观尺度,表现为接头整体延伸和承载能力衰减。

应力松弛同时导致残余应力场重新分布,破坏原有平衡并不断生成新的集中区。蠕变变形不仅改变了接头的几何形态,还显著加速裂纹源的形成,使后续疲劳与断裂更易发生^[3]。蠕变曲线揭示了性能退化的三阶段演化规律,即初始加速阶段、稳定阶段与终末加速阶段,为接头寿命预测提供定量依据。

2.2 疲劳载荷作用下裂纹萌生与扩展路径

在高压脉动和交变载荷条件下,焊接接头容易产生疲劳损伤,其典型特征是微裂纹在局部应力集中区的反复萌生与扩展。焊趾、焊缝根部及热影响区的硬度梯度差异,使这些位置成为疲劳裂纹的主要萌生点。裂纹在初期通常沿晶界或第二相颗粒分布带扩展,并

逐渐形成连续通道。

当进入稳定扩展阶段时,循环载荷驱动裂纹尖端发生塑性变形,伴随微区位错滑移与空位聚集,使裂纹逐步贯通接头区域。其扩展路径常表现为弯曲与分支特征,并受到微观组织差异、残余应力分布及环境介质作用的共同影响而趋于复杂化。裂纹聚合最终导致临界断裂,显著缩短焊接接头的服役寿命。

2.3 温压耦合作用对韧性与延展性的衰减特征

在高温高压条件下,焊接接头的韧性与延展性呈现逐步衰减,这一趋势主要源于温度与压力的协同影响对组织与性能的持续削弱。高温作用下,晶界扩散速率显著加快,合金元素重新分布,使二次相析出效应减弱,强化相数量下降,导致塑性储备不足并削弱局部承载能力。与此同时,高压作用限制了位错的滑移与交互,降低了塑性变形的缓冲空间,使材料在外力条件下表现出脆性扩展倾向^[4]。

在焊缝及热影响区,由于成分分布和组织特征差异,衰减表现出明显的空间非均一性。软化带区域缺乏足够承载力,在外力作用下容易产生大范围塑性变形;而脆化区因强化相聚集,在循环载荷下成为裂纹萌生的优先部位。两类区域并存,使接头在拉伸、弯曲或冲击作用下呈现局部化破坏特征。微观机制研究表明,高温促进裂纹尖端的氧化与元素迁移,高压则加速裂纹沿晶界的扩展,二者共同作用推动微裂纹向宏观裂纹的转化过程。

3 失效模式识别与可靠性控制要点

3.1 接头区域脆断、延性断裂与混合型断裂特征

焊接接头在高温高压服役条件下,其断裂模式展现出显著的多样性与复杂性。断口观察显示,脆断多发生在晶粒粗大、组织脆化或第二相聚集区域,其表面平直且缺乏明显塑性痕迹,常在瞬时应力冲击下迅速扩展,导致整体结构稳定性下降。延性断裂则以韧窝形貌为典型标识,裂纹在微孔聚合和塑性变形过程中逐步扩展,该特征反映出断裂能够耗散较多能量,从而在一定程度上延缓失效进程。混合型断裂通常由多种机理交织而成,部分区域表现出脆性特征,而另一部分则呈现延性特征^[5]。对这些断裂模式的识别不仅揭示了接头损伤的演化规律,也为失效机理判断与防控措施制定提供了重要依据。

3.2 氧化、腐蚀与应力腐蚀开裂的协同效应

焊接接头在高温高压条件下长期服役时,常处于含氧、含水蒸气或含盐介质环境中,研究显示其表面氧化与腐蚀行为呈现并行特征。氧化作用在金属表面生成氧化膜,若膜层致密且稳定,可一定程度延缓介质侵蚀,但在高温下易剥落或断裂,使腐蚀介质直接

作用于基体。

腐蚀过程由此加速,材料表面强度下降并形成局部缺陷,这些区域在应力场作用下易演化为裂纹源。外部拉应力与腐蚀效应叠加后,会显著促进应力腐蚀开裂,裂纹常在低应力水平下迅速扩展,断口形貌多表现为脆性特征^[6]。氧化、腐蚀与应力腐蚀开裂的协同效应显著加速了接头失效过程,提示在寿命预测与可靠性评价中需引入环境因素权重,以提升预测模型的适应性与准确性。

3.3 层状剥离、界面损伤与焊缝不连续缺陷的演化机理

焊接接头在制造过程中常伴随夹渣、气孔、偏析和未焊透等初始缺陷,这些不连续区域在高温高压服役条件下成为应力集中源,在循环载荷和复杂环境作用下逐步演化为严重损伤。研究显示,层状剥离的产生与夹杂物带状分布密切相关,当其沿轧制方向延展时,在交变应力作用下极易形成分层裂纹,裂纹由微小分隔逐步扩展,最终导致宏观分层破坏。

界面损伤则表现为焊缝与母材结合力的减弱,高温环境下冶金结合区的微孔隙逐渐长大并扩展,使局部区域出现剥落或开裂,从而削弱了承载路径的连续性和整体强度。不连续缺陷的演化过程还受到环境因素的放大效应,腐蚀介质沿裂纹或分层通道渗透,加剧界面处的化学反应,腐蚀产物聚集在裂纹尖端,显著促进扩展。气孔和未焊透区域在这一机制下成为局部腐蚀与应力腐蚀开裂的源点,损伤加速效应尤为突出。为应对这一复杂机制,可靠性控制需在早期阶段建立有效识别与干预手段。

高分辨率的超声相控阵、X射线断层成像与光纤传感等检测技术为早期识别提供技术支撑,结合实时监测平台,可实现对缺陷演化过程的动态追踪,使工程人员在小缺陷尚未演化为关键失效前采取修复措施,从而有效提升焊接接头在高温高压工况下的服役可靠性。

4 可靠性评价方法与技术体系构建

4.1 多尺度数值建模与寿命预测框架设计

在高温高压管道焊接接头的可靠性研究中,多尺度数值建模被视为揭示组织演变与性能退化机理的重要手段。研究表明,在微观层面可借助分子动力学与相场模拟对晶粒界面演化、位错行为以及第二相析出过程进行精细刻画,为阐释微结构与力学性能的耦合关系提供依据。

中观尺度建模则以晶粒群体与组织分布为核心,重现蠕变、疲劳及裂纹扩展的动力学路径,揭示局部损伤演化的内在规律。宏观有限元建模结合实际工况

参数,对焊接接头在复杂应力场与温压耦合作用下的整体响应进行预测,反映宏观性能的变化趋势。

4.2 无损检测方法与智能监测手段的融合应用

可靠性评价不仅依赖建模与预测,还需辅以在役状态下的实时监测。传统的超声检测、射线探伤和涡流检测技术在焊缝缺陷识别中仍发挥基础作用,可有效发现气孔、裂纹及未焊透等隐患。研究进展显示,声发射监测、红外热成像与激光全息检测等新兴方法逐步应用于现场,为管道提供更高分辨率和即时性的数据支持。进一步地,智能化监测体系通过布设光纤传感器、微型压力传感器及应变计,实现接头在高温高压环境下的应力与温度动态采集,数据经边缘计算与云端分析处理,形成在线诊断与预警机制。

5 结语

高温高压工况下管道焊接接头的可靠性评价,本质上是材料科学、力学机理与工程技术的综合议题。接头区域作为冶金与结构的过渡带,承受着复杂应力场与环境作用,其组织演变决定了微观性能,力学退化影响宏观稳定性,而失效模式识别为可靠性控制提供了基础依据。从晶粒粗化到第二相析出,从蠕变松弛到疲劳裂纹,从局部腐蚀到界面剥离,这些机理共同构成寿命演化的路径网络。研究表明,传统依赖单一理论或经验模型的方式存在局限性,难以全面揭示复杂损伤规律。通过多尺度模拟与寿命预测的结合,可在微观与宏观之间建立联系,阐释组织与性能的内在耦合。与此同时,无损检测与智能化监测技术的发展,使在役管道接头具备实时状态评估的能力,为风险预警与全寿命管理提供了有效支撑。未来,可靠性评价应进一步突出材料改性、焊接工艺优化与数据驱动诊断的融合,逐步形成“机理研究—实时监测—动态评价”的一体化体系,为高温高压工况下焊接接头的可靠性研究与工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 郑中甫,陈泉.高温高压管道焊接坡口选择及焊条用量计算[J].焊接,2006(03):55-57.
- [2] 吕天军,孟凡忠.石油化工厂高温高压管道堵漏的几种焊接方法[J].焊接技术,2001(06):53-54.
- [3] 苗兴伟.火力发电厂高温高压管道的管座焊接[J].设备管理与维修,2017,(19):66-67.
- [4] 卢方龙,黄建冲,张春雷.管道焊缝高温状态下的超声波探伤[J].广东电力,2006(09):48-51.
- [5] 赵卫雄.高压高温大口径P91合金钢管道的焊接[J].硅谷,2014,7(22):140-141.
- [6] 何涌.高温、高压管道焊接技术研究[J].四川建筑,2012,32(05):207-208.