

锅炉压力容器压力管道检验中裂纹问题分析

陈 曙 毛艳伟 俸 毅
临沧市检验检测认证院 云南 临沧 677000

摘 要: 锅炉压力容器压力管道检验中, 裂纹类型多样, 包括应力腐蚀、疲劳、焊接和蠕变裂纹等, 其形成与材料、制造工艺及运行环境密切相关。裂纹检测技术包括表面和体积检测, 可精准定位裂纹。一旦发现裂纹, 需根据实际情况选择打磨消除、补焊修复或挖补更换等修复技术。裂纹预防则需从材料优化、工艺改进和结构优化入手, 并通过合理的运行维护管理, 如温度控制、介质监控和定期检验, 来延缓裂纹的形成与扩展。

关键词: 锅炉压力容器; 压力管道检验; 裂纹问题

引言: 锅炉压力容器压力管道在工业领域应用广泛, 其安全运行至关重要。然而, 在检验过程中, 裂纹问题屡见不鲜, 不仅类型多样, 如应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹等, 且形成机理复杂, 涉及材料、制造工艺及运行环境等多方面因素。为有效应对这一挑战, 需构建完善的裂纹检测技术体系, 并制定科学的处理与预防策略, 以保障设备安全稳定运行。

1 裂纹类型与特征分析

1.1 应力腐蚀裂纹

在锅炉压力容器压力管道的检验中, 应力腐蚀裂纹是常见且危害较大的裂纹类型之一。它的形成源于拉伸应力与特定腐蚀介质的共同作用, 两者相互促进, 使金属材料在远低于屈服强度的条件下就提前开裂。这类裂纹的典型特征是主裂纹走向与最大拉伸应力方向垂直, 次裂纹在主裂纹周围呈放射状分布。此类裂纹容易发生在承受较高静载应力且接触碱性或含氯离子介质的部件部位, 比如汽水管道及其与容器的连接管座。从材料敏感性来看, 奥氏体不锈钢在碱性环境中对应力腐蚀尤为敏感, 此时裂纹以树枝状形态向材料内部扩展, 分支较多。应力腐蚀裂纹的萌生往往需要一定的孕育期, 一旦形成主裂纹, 后续扩展速度较快, 而且不容易通过外观检查发现, 隐蔽性和突发性都比较高, 对压力容器的安全运行构成严重威胁。

1.2 疲劳裂纹

在锅炉压力容器压力管道的检验中, 疲劳裂纹主要分为机械疲劳裂纹、热疲劳裂纹和腐蚀疲劳裂纹。机械疲劳裂纹产生于交变应力集中区域, 常见于承受循环载荷的转动部件及管道支撑部位。其扩展规律表现为早期裂纹短而细, 随着循环次数增加进入稳定扩展期, 裂纹呈直线状向外延伸。热疲劳裂纹由温度交变引起热应力反复作用而形成, 典型部位包括经历频繁温度变化的喷

水减温器、蒸汽管道以及锅炉启停过程中的受压部件。热疲劳裂纹的扩展路径往往不规则, 裂纹表面及内部容易堆积氧化腐蚀产物^[1]。腐蚀疲劳裂纹是循环应力与腐蚀介质共同作用的结果, 在压力管道内壁较为常见, 其典型表现为穿晶断裂特征, 且裂纹宽度随着腐蚀程度加重而逐渐增大, 破坏形态更为严重, 检验中需要重点识别。

1.3 焊接裂纹

在锅炉压力容器压力管道的制造与安装过程中, 焊接裂纹是最为常见的缺陷类型之一, 根据形成温度阶段和机理的不同, 分为热裂纹和冷裂纹。热裂纹产生于焊接过程中焊缝金属或热影响区晶界熔化阶段, 此时晶间液态膜在收缩应力作用下被拉开而形成裂纹, 常见于厚壁焊缝及约束度较大的焊接接头。热裂纹的形态特征表现为沿晶界分布, 裂纹表面常呈现氧化色, 说明它在高温下形成并与空气接触。冷裂纹则形成于焊后冷却过程的较低温度阶段, 本质上是氢致开裂, 在压力容器焊缝及热影响区较为多发。冷裂纹的产生需要可扩散氢的聚集、焊接接头处的拘束应力以及淬硬组织的形成这三个关键因素共同作用。冷裂纹往往具有延迟出现的特性, 可能在焊后数小时甚至数天才被发现, 对锅炉压力容器结构安全构成较大隐患。

1.4 蠕变裂纹

在锅炉压力容器压力管道的检验中, 蠕变裂纹是高温承压部件长期运行后的典型损伤形式, 尤其在过热器管、再热器管及主蒸汽管道中较为常见。蠕变裂纹是在高温环境下材料长期承受低于屈服强度的持久应力作用而产生的破坏形式。这类裂纹的典型特征是裂纹走向与最大拉伸应力方向平行, 主裂纹两侧往往伴生有大量米粒状的微小孔洞, 这些孔洞随着蠕变过程的进行逐渐连接形成宏观裂纹。蠕变裂纹的扩展严格沿晶界进行, 属于典型的沿晶断裂形态, 检验中需要借助金相分析来识

别^[2]。在裂纹扩展过程中,材料组织会发生明显的球化现象,即原始片状或层状组织逐渐转变为球状,这是材料高温损伤的重要标志。蠕变裂纹的萌生和扩展过程较为缓慢,但一旦进入加速扩展阶段,剩余寿命会迅速缩短,需要定期监测。

2 裂纹形成机理研究

2.1 材料因素

在锅炉压力容器压力管道的检验中,材料自身的组织状态和化学成分对裂纹的形成具有决定性作用。在金属组织缺陷方面,长期高温环境下珠光体球化现象会显著降低材料的蠕变抗力,使晶界强度下降,从而增加沿晶裂纹的萌生概率,这在高温蒸汽管道检验中需重点关注。石墨化缺陷同样会破坏材料的连续性,在应力作用下成为裂纹优先形核的位置,常见于长期服役的碳钢锅炉部件。这些组织劣化过程往往缓慢进行,但在达到一定程度后裂纹敏感性急剧上升。在化学成分偏差方面,硫元素在钢中易与锰形成硫化物夹杂,这些夹杂物在热加工过程中沿晶界分布,焊接时在热应力作用下成为热裂纹的起源。磷元素则具有强烈的晶界偏析倾向,会降低晶界结合强度,使材料在焊接热循环过程中更容易产生晶间开裂。在检验中应关注材料质保书及历史成分记录,控制杂质元素含量是降低裂纹敏感性的重要途径。

2.2 制造工艺影响

在锅炉压力容器压力管道的检验中,制造工艺过程中的参数控制和工艺选择会直接影响材料内部的应力状态和组织均匀性,进而对裂纹形成产生重要影响。在焊接工艺参数方面,线能量过大会导致热影响区晶粒粗大,降低材料的韧性和抗裂性能;线能量过小则可能造成淬硬组织形成,增加冷裂纹风险。检验中常发现热影响区的脆化现象使该区域成为裂纹萌生的薄弱环节^[3]。在冷加工工艺方面,弯曲、冲压等成型过程会在材料表层引入残余拉伸应力,这种残余应力与服役过程中的工作应力叠加,在交变载荷条件下会显著促进疲劳裂纹在应力集中区域的早期萌生,压力管道弯头部位尤为明显。在热处理缺陷方面,回火不足会使材料内部保留较高的残余组织应力,这种应力分布不均匀会在后续使用过程中通过应力释放机制诱发微裂纹的形成,检验中需结合硬度检测辅助判断。

2.3 运行环境作用

在锅炉压力容器压力管道的检验中,设备在服役过程中所处的环境条件对裂纹的形成和扩展起着重要的驱动作用。在温度交变效应方面,锅炉启停、负荷变化以及压力管道温度波动过程中产生的热冲击会使材料表层

经历快速加热和冷却,由此产生的热应力反复作用会导致热疲劳损伤累积,最终在材料表面形成网状热疲劳裂纹,省煤器入口段及减温器喷头部位较为典型。在介质腐蚀特性方面,锅炉给水及蒸汽中的氯离子对奥氏体不锈钢具有强烈的点蚀诱发作用,点蚀坑成为应力腐蚀裂纹的萌生源;硫化氢介质则会在材料表面形成硫化物,降低表面膜的完整性,加速腐蚀疲劳裂纹的扩展过程,在含硫燃料锅炉的低温腐蚀区域尤为突出。在机械振动影响方面,流体流动诱导的管束振动会使支撑部位产生交变弯曲应力,这种振动疲劳损伤在长期累积下会导致裂纹萌生,尤其在管壁减薄区域更为明显,检验中需关注管道支吊架附近区域。

3 裂纹检测技术体系

3.1 表面检测技术

在锅炉压力容器压力管道的检验中,表面检测技术主要用于识别材料表面及其近表面区域的开口性或近表面裂纹,是现场检验中最基础且应用最广泛的方法。磁粉检测适用于铁磁性材料制造的锅炉汽包、压力容器壳体及大口径管道,其原理是在磁化后裂纹处产生漏磁场,通过磁粉聚集清晰显示裂纹位置与走向。该技术对表面及近表面微小裂纹具有较高灵敏度,检测结果直观可见,是检验焊缝表面裂纹的首选方法。渗透检测适用于非多孔性材料表面开口裂纹的识别,通过毛细作用将渗透液引入裂纹,再经显像剂将裂纹形貌显示出来,常用于不锈钢容器及非铁磁性管道焊缝的检验。该技术不受材料磁性强弱限制,适用范围广泛。涡流检测用于导电材料近表面裂纹的快速筛查,借助交变磁场在裂纹处引起的涡流变化来判断缺陷存在,适用于换热器管的快速扫查。三种技术互为补充,检验人员可根据被检材料属性和裂纹开口情况选择合适方法。

3.2 体积检测技术

在锅炉压力容器压力管道的检验中,体积检测技术能够深入材料内部,实现对埋藏裂纹的定位与定量评价,弥补表面检测方法的局限性。射线检测适用于锅炉受热面管焊缝及压力容器对接焊缝内部裂纹的检测,通过射线穿透被检区域后在底片上形成强度差异,从而确定裂纹的位置、走向及尺寸。该技术对体积型缺陷敏感,检测结果具有可记录性,是压力容器制造检验中的标准方法^[4]。超声波检测用于厚壁部件如锅炉汽包、高压容器壳体及大直径管道内部裂纹的深度定位,依靠高频声波在材料中传播时遇到裂纹产生的反射回波来判断缺陷存在。该技术对面积型裂纹敏感性强,能够给出裂纹深度方向的定位信息,适合现场快速检测。衍射时差法超声检测

采用一对超声探头分别发射和接收衍射波,通过信号传播时间差精确测量裂纹的高度值。

4 裂纹处理与预防策略

4.1 裂纹修复技术

在锅炉压力容器压力管道的检验中,一旦发现裂纹缺陷,需根据裂纹的深度、位置、数量以及母材状况选择合适的修复技术,以恢复结构的完整性与承载能力。打磨消除适用于浅表性裂纹的局部处理,通过机械打磨方式将裂纹连同周边受影响的金属层完全去除,并形成光滑过渡的凹坑或圆弧面,以减少应力集中。该方法操作简单,不引入焊接热循环,适合压力管道表面裂纹的现场处理,但对打磨深度有严格限制,以免过度减薄部件壁厚。补焊修复需针对裂纹清除后的凹槽制定专项焊接工艺,包括选择合适的焊接材料、控制层间温度以及采取预热和后热措施,适用于压力容器壳体及锅炉汽包的可达部位。补焊过程中应严格控制热输入,防止热影响区产生新的冷裂纹或热裂纹。对于严重组织劣化区域内出现密集裂纹群的锅炉受热面管或蒸汽管道,单纯打磨或补焊已无法保证长期安全运行,此时应采用挖补更换的方式,即将劣化区域整体切除并安装新制嵌块,通过焊接方式连接,从而实现该区域的彻底更新。

4.2 预防控制措施

在锅炉压力容器压力管道的检验中,预防控制措施从材料选用、工艺控制及结构设计三个层面入手,力求从源头降低裂纹萌生的风险。在材料优化方面,应选用具有良好抗裂纹敏感性的改进型钢材,例如通过控制杂质元素含量提高材料纯净度,或添加微量合金元素细化晶粒、改善组织均匀性,从而提升材料对热裂纹、冷裂纹及应力腐蚀裂纹的抵抗能力,对于高温部件还应注重抗蠕变性能。在工艺改进方面,焊接时应采用低氢型焊接材料以降低可扩散氢含量,同时配合适当的预热措施减缓焊后冷却速度,避免淬硬组织形成,有效预防冷裂纹的产生,尤其对于厚壁压力容器和管道焊缝。多层多道焊过程中应注意控制层间温度,避免过热导致晶粒粗大^[5]。在结构优化方面,应通过设计手段避免截面突变、尖角或急剧转向等易造成应力集中的几何特征,对于承受流体激励的管道应合理增设防振装置,降低交变应力

幅值,从而抑制疲劳裂纹的萌生。

4.3 运行维护管理

在锅炉压力容器压力管道的检验中,运行维护管理通过合理的运行控制、介质监督及检验计划来延缓裂纹的形成与扩展,是裂纹预防体系中的重要环节。在温度控制方面,对于承受温度交变的锅炉和压力容器,应严格限制启停过程中的温度变化速率,避免因升温过快或降温过急产生过大的热冲击应力。采用分阶段升温 and 缓慢冷却的方式,可有效降低热疲劳裂纹的形成概率,尤其对于厚壁部件如汽包和高加管板区域。在介质监控方面,应建立定期检测制度,对锅炉给水、蒸汽及工艺介质中腐蚀性成分的浓度进行分析,尤其是氯离子、硫离子及溶解氧等对裂纹扩展具有催化作用的物质。当介质浓度接近控制限值时,应及时采取置换或净化措施,如加强除氧或调整给水处理方式。在定期检验方面,应建立基于风险的检验体系,根据设备服役环境、历史检测数据及裂纹敏感程度确定检测部位和检测周期,对高风险区域如焊缝热影响区、弯头及管座实施重点监控,及时发现早期裂纹并采取相应处理措施。

结束语: 锅炉压力容器压力管道的裂纹问题关乎设备安全运行与人员生命财产安全。本文详细阐述了裂纹类型、形成机理、检测技术,以及处理与预防策略。从材料、工艺、环境等多方面剖析裂纹成因,介绍了多种检测手段,并给出修复技术与预防控制、运行维护管理措施。只有综合运用这些知识,才能有效应对裂纹挑战,保障设备长期稳定运行。

参考文献:

- [1]王伟.锅炉压力容器压力管道检验中裂纹问题分析[J].机械与电子控制工程,2025,7(8).
- [2]李鹏.锅炉压力容器压力管道检验中裂纹问题分析[J].工程管理与技术探讨,2025,7(24).
- [3]史秋玉.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析[J].模型世界,2024(13):106-108.
- [4]张国杰.锅炉、压力容器及压力管道检验中裂纹问题研究[J].中国高新科技,2024(8):122-124.
- [5]赵梦纯.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析[J].现代工程项目管理,2025,4(8).