

火电厂高压管道焊接常见问题及处理措施

叶昭继

贵州鸭溪发电有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i4.21753

[摘要] 本文系统剖析了焊接裂纹成因,从冷裂纹的氢致延迟断裂机理、热裂纹的晶间液膜脆化特征及再热裂纹的敏感温度区间出发,提出对应防控策略。针对焊接变形与应力,阐明了残余应力分布规律及角变形、错边量的超标诱因,并结合工艺参数优化与夹具应用给出控制方案。同时,归纳了未熔合、气孔、咬边等典型缺陷的检测与修复措施,强调焊前预热、层间温度及焊后热处理参数的精确监控。最后,结合无损检测方法建立全过程质量管控体系,旨在为火电厂高压管道焊接提供可靠技术参考。

[关键词] 焊接裂纹; 变形控制; 质量检验

中图分类号: TG406 **文献标识码:** A

Common Issues and Remedial Measures in High-Pressure Pipeline Welding for Thermal Power Plants

Zhaoji Ye

Guizhou Yaxi Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] This paper provides a systematic analysis of the causes of welding cracks. Starting from the hydrogen-induced delayed fracture mechanism associated with cold cracks, the intergranular liquid film embrittlement characteristics of thermal cracks, and the sensitive temperature range for reheating cracks, it proposes corresponding prevention and control strategies. Addressing welding deformation and stress, the study elucidates the distribution patterns of residual stresses as well as the factors contributing to excessive angular deformation or misalignment; it also presents a control scheme based on process parameter optimization and the application of specialized fixtures. Additionally, the paper summarizes detection and repair measures for typical defects such as incomplete fusion, porosity, and bevel undercutting, emphasizing the importance of precise monitoring of pre-welding preheating, interpass temperature, and post-weld heat treatment parameters. Finally, by integrating non-destructive testing methods, a comprehensive quality control system is established, aiming to provide a reliable technical reference for the welding of high-pressure pipelines in thermal power plants.

[Key words] Welding cracks; Deformation control; Quality inspection

引言

高压管道具有一定特殊性,对焊接工艺有着较高的标准。高压管道一般处于高温高压环境,并且内部介质具有易燃易爆、有毒以及腐蚀性强等特性,需要严格控制焊接质量,确保焊接工艺的标准化和规范化。火电厂高压管道系统长期承受复杂载荷,其焊接接头是结构薄弱环节。实际工程中,冷裂纹、热裂纹及再热裂纹频发,同时焊接残余应力与角变形常导致装配精度下降,严重时引发泄漏事故。传统工艺依赖经验调整,缺乏对机理的定量认识,致使缺陷重复出现。随着机组参数提升,对焊接质量要求愈加严格,必须从成因根源入手,结合过程监控与检测手段,形成系统性防控方案^[1]。本文围绕裂纹、变形和典型缺陷三大

核心问题,梳理其物理机制,总结现场处理措施,并强化检验环节,旨在提升焊接一次合格率与长期服役可靠性。

1 焊接裂纹成因与防控

1.1 冷裂纹产生机理与影响因素

冷裂纹一般出现在马氏体钢或者低合金钢焊缝以及热影响区,实质上是氢致延迟开裂,需要同时具备敏感组织、高氢含量和拉伸应力这三个条件。火电厂高压管道焊接过程中,熔池中氢在凝固之后向粗晶区扩散,在局部氢浓度大于临界值的时候,在淬硬组织(马氏体)、拘束应力的作用下产生显微裂纹并发展。影响因素有母材碳当量、扩散氢含量、冷却速度和接头刚度。控制要点就是降低氢源,使用低氢焊条并严格烘干,提高预热温度来

减缓冷却速率,让氢有足够的机会逸出^[2]。另外,火电厂高压管道焊后立即热处理可以有效地驱氢、提高组织的韧性,防止应力集中处成为裂纹的发源地。

1.2 热裂纹的形态特征与诱因

火电厂高压管道热裂纹产生在凝固温度范围内或者固相线上方,典型的形状是沿着晶界的锯齿形张开,一般出现在焊缝中间或者弧坑部位。根本原因就是晶界低熔点共晶物在凝固后期形成液膜,在收缩拉应力的作用下被拉开并且不能得到液态金属的填充。焊缝形状深宽比大、弧坑填充不良、硫磷含量过高都会引起。奥氏体不锈钢、镍基合金更易发生腐蚀反应,因为它们的导热性较差,并且膨胀系数较大^[3]。预防措施应控制焊缝的成型系数,减小凹面度,用收弧电流衰减或者多次收弧来填充弧坑。同时限制母材和焊材中容易偏析的元素,适当提高焊接速度,降低热输入,缩短脆性温度区间停留的时间。

1.3 再热裂纹的敏感温度区与预防

火电厂高压管道再热裂纹产生在焊后消除应力热处理或者高温服役期间,一般出现在粗晶区沿晶开裂,主要是含Cr、Mo、V等沉淀强化元素的钢种。它的敏感温度范围大约是550到700℃,这时析出细小碳化物强化晶内,晶界比较弱化,应力松弛造成的蠕变变形集中在晶界上,当累计应变超过晶界的塑性极限的时候就产生了裂纹。预防的关键就是不要在敏感温度区长时间停留,可以采用分段加热快速通过危险区的方法。同时选用屈服强度低的焊材或者减小残余应力峰值,用中间热处理代替最终高温处理^[4]。必要时做模拟试件试验来确定热处理的升温速度以及加热是否均匀。

2 焊接变形与应力控制

2.1 焊接残余应力的分布规律

火电厂高压管道焊接残余应力是由不均匀热循环造成的,在焊缝以及近缝区表现为拉应力,最大值达到屈服强度,在距离焊缝较远的地方变成压应力来实现自身的平衡。厚度方向有梯度,表面一般为双向拉伸,心部应力比较复杂,并且和层道顺序有关。多层多道焊时,后面的焊道会对前面的焊道产生热拉伸、局部回火的作用,从而使得最终的应力场出现波动。从实测结果可知,根部焊道和盖面焊道的应力集中系数较大。控制可以采用减小线能量、对称施焊的方式,防止局部过热。用温差拉伸法或者振动时效可以减小峰值,但是需要根据具体的管径和壁厚做有限元预分析。

2.2 角变形与错边量的超标原因

角变形是由于焊缝横向收缩在厚度方向上分布不均所引起的,单面焊更为严重,根部收缩比表面大得多,造成坡口面转动。错边量超标一般是由组对间隙不一致、夹具刚度不够或者焊接顺序不对称等原因造成的。大直径厚壁管的重力加上热胀冷缩后,对口偏移就更大了。超标后果就是会加大附加弯曲应力,缩短疲劳寿命,并且会给无损检测造成麻烦。原因分析要分开装配误差和焊接动态变形,前者可以用准确的下料以及定位焊来控制,后者同热输入序列和约束条件有关。现场测量用直

尺、塞尺等工具,但是需要增加火电厂高压管道焊接过程中动态监测^[5]。

2.3 预防变形的工艺措施与夹具应用

预防变形要从刚性固定、反变形法做起,设计专用卡具和拉筋,把工件强制固定在预定的位置上,但是要注意约束力过大可能会增加裂纹的敏感性。合理安排火电厂高压管道焊接顺序,用分段退焊或者跳焊的方法来使收缩均匀分布,同时配合对称施焊来抵消角变形的趋势。预热可以减小温度梯度,减小瞬时变形。夹具设计要留有收缩余量,并且容易拆装,防止焊后卡死。实际中可以利用千斤顶或者楔铁进行实时调节,对于厚壁管来说,内撑圈和外抱箍一起使用的效果最好。工艺参数上,适当减小焊接速度,采用小直径焊条,可以减少单层熔敷金属的含量,从而控制总的变形量。

3 典型缺陷分析与处理

3.1 未熔合与未焊透的检测与返修

未熔合指坡口面或者层间母材没有与熔敷金属完全结合,其线状影像在射线底片上表现为黑线或者带状,在超声检测中会出现界面波异常。火电厂高压管道未焊透一般发生在根部,由于间隙小或者钝边大,导致熔滴不能到达根部。检测应该首先用双壁双影或者相控阵超声来提高检出率。返修时要用碳弧气刨把缺陷全部去除干净,磨到金属光泽后按照原来的工艺重新焊接,但是返修次数不能超过两次,返修前要提高预热温度^[6]。为了减少复发,应该检查坡口角度、组对精度,在打底焊时采用内送丝或者氩弧焊来保证根部熔透。

3.2 气孔与夹渣的工艺控制措施

气孔大多为氮气孔或者氢气孔,呈球形或者条虫状,是由于熔池保护不好或者焊材受潮造成的。夹渣是由于硅酸盐、氧化物等残留而形成的,形状不规则,一般出现在层间或者坡口处。控制的核心就是净化熔池,使用高纯度氩气并且严格控制流量,防止风的干扰。焊条或者焊剂要严格烘干,并且层间清理干净,用不锈钢钢丝刷去除氧化皮。火电厂高压管道的焊接参数中适当增大焊接电流可以促进熔渣上浮,但是不能太大以免造成过热。已经产生的气孔如果数量不多,单个直径小于规定值时可以打磨后补焊,如果密集或者超标就需要整段切除重新施焊。

3.3 咬边与弧坑裂纹的现场修复

咬边是指母材边缘被电弧熔化但没有得到良好填充而产生的沟槽,会降低接头的有效厚度,造成应力集中。其原因大多是因为焊接速度太快、电流太大或者焊条角度不对。火电厂高压管道的弧坑裂纹是在收弧时由于熔池急剧冷却收缩而产生的。现场修复时,咬边深度小于0.5mm且不连续时可打磨圆滑过渡,若超深则需用细焊条堆焊填充,并降低电流以避免二次咬边。弧坑处理要使用收弧板或者电流衰减功能,如果已经出现了裂纹就要先用角磨机将裂纹末端去除,然后进行补焊并锤击消除应力。加强焊工技能培训,规范收弧动作^[7]。

4 焊接质量检验与过程管控

4.1 焊前预热与层间温度的监控

火电厂高压管道的预热温度根据母材的淬硬倾向以及壁厚来决定,一般用电阻加热或者火焰加热的方式进行预热,测温点应该位于坡口两侧50mm处。层间温度要高于最低要求,但是不能超过最高限值以防止晶粒长大。监控应该用热电偶测温仪加红外线测温枪做交叉检测,然后画出实时温度曲线。预热区要包含坡口两边至少3倍壁厚的部分,保温时间要保证整个温度一致。中途停止时需要重新预热。记录表上要有预热的时间、温度和操作人员,可以做到有章可循。

4.2 焊后热处理工艺参数的控制

火电厂高压管道的焊后热处理主要是为了消除残余应力和软化淬硬组织,主要参数有升温速率、保温温度、保温时间和冷却速率。对于P91等高合金钢,升温速率应该控制在60~120℃/h之间,保温温度一般为730~770℃,保温时间为壁厚25mm/h,降温速率不大于150℃/h到300℃后空冷。控制需要将多支热电偶绑在管件外壁上,用自动记录仪来跟踪。温度偏差控制在±10℃以内。如果热处理后硬度超标,则需要重新处理,但是重复次数不宜过多^[8]。操作前要确认热处理设备校准有效,防止出现超温或者欠温的情况。

4.3 无损检测(RT/UT/MT)的缺陷评定

射线检测主要是针对体积性的缺陷,比如气孔、夹渣等,它的评价按照底片黑度以及缺陷大小来参照标准级别;超声检测对于平面状的未熔合和裂纹比较敏感,要采用直探头和斜探头联合扫查的方式,并且根据DAC曲线来进行判断。磁粉检测专门用来探测表面或者近表面的缺陷,对咬边和冷裂纹特别适用^[9]。三种方法应该互相配合,UT发现可疑反射波之后再用RT来验证,MT用来查找表面开口缺陷。评定必须依照DL/T869等规程执行,对超标缺陷要给出准确的位置和当量,给返修赋予依据。检测前要清除表面飞溅物和氧化皮,保证耦合良好,检测报告要有典型的波形或者底片图像。

5 结语

火电厂高压管道焊接质量是多因素耦合结果,需从裂纹机理、应力变形、缺陷处理及检验管控四维度协同发力。冷裂纹、

热裂纹和再热裂纹有各自的敏感条件以及微观特性,应该根据不同的情况来选择预热、缓冷、控温以及选材等方法。同时残余应力和角变形可以通过对称工艺以及刚性夹具来有效地加以控制,但是未熔合、气孔、咬边等缺陷只能依靠过程中的精细操作和层间的清理^[10]。检验环节并非终点,而是反馈改进的关键,预热、热处理及无损检测数据应形成闭环。未来可结合数字孪生技术实现实时预测,进一步提升焊接一次合格率。

[参考文献]

- [1]于森.高压燃气管道应力分析及强度设计核心理论研究[J].中国化工贸易,2025,17(35):123-125.
- [2]王鹏.热力管道安装中焊接技术的应用研究[J].科技纵横,2025,(23):127-129.
- [3]韩乾宇.火电厂高温高压管道焊接残余应力的控制与消除技术[J].中国高新科技,2025,(13):48-49+52.
- [4]刘傲.自适应高压管道焊缝打磨系统设计与研究[D].安徽理工大学,2025.
- [5]孙戡,潘晨阳,刘福广,等.超超临界机组主蒸汽管道焊接接头失效与评估研究综述[J].热加工工艺,2025,54(18):9-20.
- [6]王国辉,姜小昆,闵伟忠,等.极寒条件下的石化装置高压管道施工关键技术[J].安装,2023,(8):32-34.
- [7]张晶.焊接工艺对复合管接头残余应力的影响规律研究[D].西安石油大学,2023.
- [8]潘小征.TP321不锈钢高压管道的焊接探讨[J].硫磷设计与粉体工程,2022,(4):8-11+5.
- [9]张振连.混合气体半自动焊在P22高压管道焊接中的应用[J].焊接技术,2020,49(7):39-41.
- [10]马锦锋.压力管道安装焊接工艺质量控制策略探讨[J].化学工程与装备,2020,(4):201-202.

作者简介:

叶昭继(1988--),男,汉族,贵州省遵义市人,职称中级,本科,电厂焊接。