

电站锅炉管道焊接缺陷成因及预防措施

黄 彪

中电建湖北电力建设有限公司 湖北武汉 430070

摘 要：电站锅炉管道的焊接缺陷可能导致设备故障和安全隐患，严重威胁运行安全。本文分析了焊接缺陷的类型及其对锅炉运行的影响，并探讨了成因及预防措施。通过优化材料选择、严格工艺控制、改善环境适应性及强化设备管理，可以有效降低焊接缺陷的发生，保障锅炉系统的安全运行。

关键词：电站锅炉管道；焊接缺陷；成因分析；预防措施

引言

电站锅炉是能源系统的核心设备，其管道系统因其高温度和复杂环境面临严峻的腐蚀挑战。尽管采用无损检测等先进技术，焊接缺陷仍是潜在风险。因此，深入分析焊接缺陷的成因及采取有效预防措施，对于提升锅炉系统的安全性至关重要。

一、电站锅炉管道焊接缺陷类型及危害

1. 缺陷分类与特征

(1) 未焊透：膜式水冷壁管在工地进行管子对接安装时，由于间隙窄，障碍操作，容易产生未焊透。此外，组对间隙不一致，多个焊口不能同时焊接，导致部分焊口间隙缩小甚至为零，也容易出现未焊透。未焊透的特征是焊缝根部未完全熔化，存在未连接的空隙。

(2) 气孔：气孔可能分散在焊缝各处，呈点状；也可能沿焊缝方向呈链状或条状；或聚集在焊缝内部形成密集气孔。其产生原因包括焊材或母材表面有污染物、焊材潮湿或药皮变质、保护气体不纯或流量不足、焊接速度过快等。

(3) 裂纹：裂纹是焊接结构中最危险的缺陷，可分为热裂纹和冷裂纹。热裂纹多由于焊材或母材成分不当、焊接参数导致焊缝形状不良、焊接应力大等因素引起；冷裂纹则与钢材淬硬倾向大、焊前预热不足或焊后冷却过快、焊缝含氢量高、焊接残余应力等有关。裂纹可能出现在焊缝表面、内部，沿焊缝长度或垂直于焊缝方向，管道焊缝根部和焊趾是裂纹高发区。

(4) 未熔合：焊接时电流过小或焊速太快，热量不够，使母材坡口或先焊的焊缝金属未得到充分熔化；选用的电流过大，使后半根焊条发红而造成熔化太快，在母材边缘还没有达到溶化时焊条的熔化金属已覆盖上去；

焊件散热速度太快，或起焊处温度低，使母材的开始端未熔化；焊条、焊丝或焊炬火焰偏于坡口一侧，或因焊条偏心使电弧偏于一侧；母材坡口或前一层焊缝金属表面有锈或脏物等，都会导致未熔合的产生。未熔合的特征是焊道与焊道、焊道与母材之间未完全熔合。

(5) 夹渣：操作时未分清熔液与熔渣，使熔渣混合于熔池内；焊接电流过小，速度过快，熔渣来不及浮起；被焊边缘和各层焊缝清理不干净；焊缝熔宽与熔深比过小等，都会产生夹渣。夹渣是焊后残留在焊缝中或熔合线上的熔渣，呈黑穗状于焊缝表面的非金属物质。

2. 缺陷对安全性的影响

(1) 降低承载能力：未焊透、未熔合等缺陷会减少焊缝的有效截面积，使管道的承载能力下降，在压力作用下容易发生破裂。

(2) 影响密封性：气孔、夹渣等缺陷会破坏焊缝的致密性，导致管道泄漏，影响电站的正常运行。

(3) 引发裂纹扩展：裂纹是应力集中源，在压力、温度变化、振动、腐蚀等作用下极易扩展，导致穿透性缺陷或突然断裂，造成严重泄漏甚至爆炸事故。

二、焊接缺陷成因分析

1. 材料与结构设计因素

电站锅炉管道焊接中，材料与结构设计因素对焊接质量影响深远。材质选择不达标，如采用非耐热钢管，其高温蠕变特性难以满足长期受热需求，晶界处易萌生裂纹，降低管道使用寿命与安全性。焊材选用同样关键，错用焊材会使两种金属在特定工况下膨胀系数差异超出允许范围，交变工况下极易诱发横向裂纹，威胁管道结构完整。结构设计不合理也会埋下隐患，管子周围壁厚不均、组对错边量过大等问题，增加了焊接操作难度，使得热量分布不均，部分区域难以达到充分熔合，导致

未焊透、未熔合等缺陷频发。这些问题相互交织，共同作用于焊接过程，影响焊缝质量，进而对电站锅炉管道的安全稳定运行构成潜在威胁，必须从材料与结构设计源头严格把控，确保焊接质量可靠。

2. 工艺参数失控

电站锅炉管道焊接时，工艺参数失控会引发诸多焊接缺陷。焊接电流与电压搭配不当，若电流过小、电压偏低，电弧能量不足，难以使母材充分熔化，易造成未焊透、未熔合，让焊缝存在薄弱区域；电流过大、电压过高，热量过度集中，可能烧穿焊缝，还使焊缝金属晶粒粗大，降低力学性能。焊接速度把控也至关重要，过快时，熔池冷却迅猛，气体来不及逸出便被困在焊缝中，形成气孔；过慢则热输入量超标，焊缝金属过热，晶粒严重长大，韧性变差，且可能因长时间受热出现烧穿、塌陷。层间温度同样不容忽视，温度过高，焊缝金属晶粒持续粗化，韧性下降；温度过低，焊缝冷却过快，氢气易聚集，在应力作用下易引发冷裂纹，给电站锅炉管道安全运行带来极大隐患。

3. 环境与操作干扰

电站锅炉管道焊接作业中，环境与操作干扰是引发焊接缺陷的常见因素。环境方面，若在穿堂风较大、低温或有风的场所焊接，空气流动会加速焊缝冷却，使焊缝金属快速收缩，易产生裂纹；湿度较大时，空气中的水分易附着在焊材和母材表面，焊接过程中水分分解产生氢气，在焊缝中形成氢气孔。操作层面，焊工技能水平参差不齐，运条方法不当，如直线形运条速度不均，会导致焊缝宽窄不一、高低不平；焊条角度不正确，会使电弧吹力方向改变，影响熔池形状和焊缝成形；引弧和收弧操作不规范，引弧时在母材上随意敲击，收弧时未填满弧坑，易产生气孔、裂纹等缺陷。这些环境与操作因素相互交织，严重干扰焊接过程，降低焊缝质量，给电站锅炉管道的安全运行埋下隐患。

4. 设备与材料问题

电站锅炉管道焊接中，设备与材料问题对焊接质量影响显著。焊接设备性能不稳定是常见隐患，若焊机电流输出波动大、电压调节不精准，焊接时电弧难以稳定燃烧，易造成焊缝成型不良，出现咬边、未熔合等缺陷。设备老化、零部件磨损也会使焊接参数偏离正常范围，影响焊接质量。材料方面，焊材质量至关重要，潮湿的焊条药皮易变质，焊接时水分蒸发产生氢气，形成气孔；油污、锈蚀的焊丝会污染焊缝金属，降低焊缝性能。母材若存在裂纹、夹层等缺陷，焊接时易扩展，引发严重

质量问题。此外，设备与材料的匹配性也不容忽视，不匹配会导致焊接工艺参数难以调整，无法达到最佳焊接效果。所以，要定期检修维护焊接设备，保证其性能良好；严格把控材料采购、储存和使用环节，确保材料质量合格，为高质量焊接提供保障。

三、焊接缺陷预防措施

1. 材料与结构设计优化

在电站锅炉管道焊接中，材料与结构设计优化是保障焊接质量、提升管道安全性的关键环节。材料选择上，需严格依据管道的工作温度、压力及介质特性来精准选材。对于高温高压工况，应选用具有良好高温强度、抗蠕变性能和耐腐蚀性的合金钢，如P91、P92等马氏体耐热钢，其能在高温环境下保持稳定的力学性能，有效减少因材料性能不足而引发的裂纹、变形等缺陷。同时，要确保材料质量符合相关标准，对进场的管材和焊材进行严格的检验检测，检查其化学成分、力学性能等指标，杜绝不合格材料进入施工现场，从源头上消除材料隐患。

结构设计优化同样不容忽视。合理的管道布局能减少焊接接头数量，降低焊接缺陷产生的概率。在设计时，应尽量避免管道出现急弯、异径等复杂结构，减少应力集中点。对于必须设置的焊口，要合理确定坡口形式和尺寸，保证坡口加工精度，使焊接时能充分熔合，避免未焊透、未熔合等缺陷。此外，还需考虑管道的热膨胀和冷缩问题，合理设置补偿装置，防止因温度变化产生的应力对焊缝造成破坏。在管子组对方面，要严格控制错边量和间隙大小，确保组对质量符合规范要求，为焊接创造良好条件，进而提高焊接质量，保障电站锅炉管道长期安全稳定运行。

2. 工艺参数精准控制

在电站锅炉管道焊接作业里，工艺参数精准控制是决定焊接质量优劣的核心要素。焊接电流与电压的搭配犹如烹饪时火候与调料的精准调和，需依据管材的材质、厚度以及所采用的焊接方法细致调整。当焊接薄壁管时，电流与电压应相对较小，避免因热量输入过大使焊缝烧穿，导致管道泄漏；而焊接厚壁管时，则要适当增大电流与电压，确保母材能够充分熔化，实现良好的熔合，防止出现未焊透、未熔合等缺陷。

焊接速度的把控恰似行车的节奏，过快时，熔池冷却速度犹如疾驰列车骤然刹车，气体来不及逸出便被困在焊缝中，形成密密麻麻的气孔，破坏焊缝的致密性；过慢时，热输入量超标，焊缝金属如同在高温下长时间烘烤的面包，晶粒变得粗大，力学性能大幅下降，还可

能因局部过热出现烧穿、塌陷等严重问题。

层间温度的控制也不容小觑，它如同给焊接过程设置了一个“温度缓冲带”。层间温度过高，焊缝金属晶粒持续粗化，韧性如同被不断拉扯的橡皮筋，逐渐失去弹性；层间温度过低，焊缝冷却过快，氢气易在焊缝中聚集，在应力作用下如同埋下的定时炸弹，随时可能引发冷裂纹，给电站锅炉管道的安全运行带来极大隐患。只有将各项工艺参数精准控制在合理范围内，才能确保焊接质量稳定可靠，为电站锅炉管道的长久安全运行奠定坚实基础。

3. 环境适应性改进

在电站锅炉管道焊接工作中，环境适应性改进是保障焊接质量不可或缺的环节，焊接现场的环境条件复杂多变，对焊接过程有着直接且显著的影响。

在温度方面，低温环境下焊接，焊缝冷却速度加快，金属的收缩应力增大，容易导致裂纹的产生。为此，当环境温度较低时，需对焊接部位进行预热处理，通过加热使母材达到适宜的温度，减缓焊缝冷却速度，降低裂纹产生的风险。而在高温环境下，焊接热量不易散发，可能使焊缝金属过热，晶粒粗大，影响焊缝的力学性能。此时，应采取有效的散热措施，如增加通风设备、使用冷却装置等，及时带走多余热量，保证焊接质量。

湿度对焊接的影响也不容忽视。湿度较大时，空气中的水分易附着在焊材和母材表面，焊接过程中水分解产生氢气，融入焊缝形成氢气孔，破坏焊缝的致密性。因此，在湿度较高的环境下焊接，要做好防潮措施，对焊材进行严格烘干处理，并妥善保管在干燥的环境中；对母材表面进行清理，去除油污、锈蚀和水分等杂质。

此外，焊接现场的风速也会干扰焊接过程。穿堂风或大风天气会使电弧不稳定，保护气体流失，导致焊缝被氧化，产生气孔等缺陷。在这种情况下，应搭建防风棚或采取其他挡风措施，为焊接创造一个相对稳定的环境，确保焊接过程顺利进行，从而提升电站锅炉管道的焊接质量。

4. 设备与材料管理

在电站锅炉管道焊接工作中，设备与材料管理是保障焊接质量、确保管道安全稳定运行的重要基础。设备管理方面，焊接设备是焊接作业的核心工具，其性能和状态直接影响焊接质量。要建立完善的设备维护保养制度，定期对焊接设备进行检查、清洁、润滑和调试，确保设备始终处于良好的运行状态。例如，对于氩弧焊机，要定期检查氩气流量计的准确性，保证氩气供应稳定；检查焊枪的导电嘴是否磨损，及时更换，以确保电弧稳定燃烧。同时，要关注设备的更新换代，及时引进先进

的焊接设备，提高焊接效率和质量。在每次焊接作业前，要对设备进行试运行，检查各项参数是否正常，如焊接电流、电压是否稳定，送丝速度是否均匀等，发现问题及时处理，避免因设备故障导致焊接缺陷。

材料管理同样关键。焊材的质量直接关系到焊缝的性能，要严格把控焊材的采购、验收、储存和使用环节。采购时，要选择信誉良好、质量可靠的供应商，确保焊材符合相关标准和设计要求。验收时，要对焊材的规格、型号、质量证明文件等进行严格检查，必要时进行抽样检验。储存焊材时，要按照焊材的种类、规格和批次进行分类存放，保持储存环境的干燥、通风，避免焊材受潮、生锈。在使用焊材前，要对其进行烘干处理，严格按照焊材说明书规定的烘干温度和时间进行操作，确保焊材的性能稳定。对于母材，也要做好表面清理工作，去除油污、铁锈、氧化皮等杂质，为焊接创造良好的条件。

结论

电站锅炉管道焊接缺陷的成因是多方面的，包括材料与结构设计因素、工艺参数失控、环境与操作干扰、设备与材料问题等。这些缺陷会严重影响电站锅炉管道的安全性和可靠性，必须采取有效的预防措施加以解决。通过材料与结构设计优化、工艺参数精准控制、环境适应性改进、设备与材料管理等措施的综合应用，可以有效提高电站锅炉管道的焊接质量，保障电站的安全稳定运行。同时，应不断加强对焊接技术的研究和创新，进一步提高焊接工艺水平，为电站锅炉的建设和发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 章丽虎, 毛剑锋, 卢喜杰. 电站锅炉水冷壁焊接缺陷产生及预防措施浅析[J]. 现代焊接, 2016(1): 4.
- [2] 莫肯堂, 郑云琴, 覃予春. 电站锅炉水冷壁焊接缺陷产生及预防对策[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022.
- [3] 孙越, 杨八虎, 曹云龙, 等. 某电站锅炉高温再热器异径管焊缝开裂原因分析[C]// 吉林省电机工程学会2023年学术年会. 1. 大唐东北电力试验研究院有限公司; 2. 内蒙古大唐国际锡林浩特发电有限责任公司; 3. 大唐吉林发电有限公司长春第三热电分公司, 2023.
- [4] 周文, 夏尚, 王涛, 等. 电站锅炉用焊接节流式流量计的焊缝缺陷检测及分析[J]. 工业锅炉, 2020(4): 4.
- [5] 张宇. 电站管道焊缝超声波检验缺陷指示长度的测定[J]. 2020.