

电厂金属焊接技术及质量控制

杨宏伟

华电新疆发电有限公司乌鲁木齐分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：火电厂金属材料焊接技术与管理是非常重要的，对于电厂的稳定运行和安全至关重要。掌握好金属材料焊接技术的相关要点并进行科学合理的管理，可以提高焊接质量，降低安全风险，保障电厂可靠、连续、高效运行。焊接质量控制：对于焊接过程中质量的控制要求非常严格，建立良好的质量管理体系可以保证焊接质量。常见的管理方法包括质量记录、检验和验证、质量分析、错误校正等。

关键词：电厂金属；焊接技术；质量控制

火电厂的结构中，使用了大量的金属材料，如碳钢、不锈钢、铜等，这些材料的焊接对于电厂的运行和安全都有重要意义。电力需求的增加，电厂的压力也随着增加，电厂运作与电厂的焊接施工有着密切关系，因而重视电厂的焊接质量，是保证电厂运作的重要环节。

1 电厂金属焊接材料选择

1.1 材料选择基本原则。等强度原则：焊接低碳钢和低合金钢时，应选择熔敷金属抗拉强度等于或稍高于母材的焊材（如Q235钢选用E4303焊条，Q345钢选用E5015焊条）。成分匹配原则：耐热钢（如12Cr1MoV、P91）需选用与母材Cr、Mo含量相近的焊材（如R307焊条），奥氏体不锈钢则需匹配Ni、Cr元素（如A102焊条）。环境适应性：高湿度或低温环境下优先选用低氢型焊条（如E5015），露天作业时推荐抗风能力强的自保护药芯焊丝。焊接方法与材料匹配。手工电弧焊（SMAW）：适用焊材：低氢型焊条（E5015、R307）。要点：短弧操作，焊缝宽度 $\leq$ 焊条直径3倍。钨极氩弧焊（TIG）：适用焊材：实心焊丝（ER50-6、ER308）。要点：纯氩保护，流量12-15L/min，直流正接。埋弧焊（SAW）：适用焊材：H08MnA焊丝+SJ101焊剂。要点：焊剂含水量 $\leq$ 0.1%，层间清渣彻底。

1.2 质量控制要求。材料复验：焊材需检测化学成分（如S/P含量 $\leq$ 0.030%）、扩散氢含量（低氢焊条 $\leq$ 5ml/100g）。工艺参数控制：预热温度：耐热钢 $\geq$ 200℃，异种钢按高合金侧要求执行。热输入：低合金钢限制在15-25kJ/cm，防止过热脆化。焊后检测：耐热钢焊缝需100%RT检测+20%UT抽检，冲击功 $\geq$ 41J（P91钢）。

2 电厂金属常用焊接方法及应用

2.1 手工电弧焊（SMAW）。应用场景：适用于低合金钢管道、支架等非精密部件的连接，尤其在维修和短缝焊接中具有灵活性。技术要点：采用低氢型焊条（如

E5015）降低氢致裂纹风险，焊前需350℃烘干保温1小时；典型电流参数：Q345钢焊接时电流范围180-220A，焊缝宽度 $\leq$ 焊条直径的3倍。

2.2 钨极氩弧焊（TIG）。应用场景：用于高压蒸汽管道打底焊、奥氏体不锈钢薄壁管焊接等要求高精度的场景。技术要点：纯氩气保护（纯度 $\geq$ 99.99%），气体流量12-15L/min，直流正接操作；适用于铝、镁等易氧化金属，热输入控制严格（如304不锈钢焊接电流80-120A）。

2.3 埋弧自动焊（SAW）。应用场景：锅炉汽包纵缝、大口径管道环缝等厚板（ $\geq$ 10mm）拼接作业。技术要点：匹配H08MnA焊丝与SJ101焊剂，焊剂含水量 $\leq$ 0.1%，焊速控制在25-35cm/min；熔深大、效率高，但需彻底清除层间焊渣防止夹渣缺陷。

2.4 气电立焊（EGW）。应用场景：大型储罐立缝焊接，实现单面焊双面成型，效率较手工焊提升3倍以上。技术要点：CO₂或混合气体保护，垂直向上焊接，控制熔池流动性；适用于碳钢及低合金钢，焊后需检查焊缝余高（0-3mm）。

2.5 电阻焊。应用场景：电厂电气接头、薄板结构件（ $\leq$ 3mm）的点焊或缝焊，如水冷壁管板连接。技术要点：通过电极压力（1-5kN）和电流（5-20kA）实现瞬时熔核形成；无填充材料，需定期清理电极表面氧化层保证导电性。

2.6 工艺选择原则。材料匹配：耐热钢优先选用TIG焊或低氢焊条电弧焊，不锈钢采用氩气保护焊；效率与质量平衡：批量厚板焊接用埋弧焊，精密薄壁部件选用TIG焊；环境适应性：露天作业时采用抗风型药芯焊丝气保焊，低温环境增加预热措施。

3 电厂金属焊接焊前质量控制要点

3.1 材料检验与准备。母材与焊材检验：母材需符

合化学成分及力学性能标准（如Q345钢要求屈服强度 $\geq 345\text{MPa}$ ），表面应无裂纹、油污及氧化层残留；焊接材料（焊条、焊丝等）需核对型号、批次及有效期，低氢焊条需烘干至 350°C 并保温1-2小时（如E5015焊条）。材料存储：焊材存放环境湿度 $\leq 60\%$ ，避免吸潮导致氢致裂纹风险。

3.2 坡口加工与组对。坡口精度控制：坡口形式（如V型/U型）需按工艺文件加工，角度误差 $\leq \pm 5^{\circ}$ ，钝边厚度偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ；坡口表面粗糙度 $R_a \leq 25\mu\text{m}$ ，两侧20mm范围内需打磨至金属光泽。组对要求：错边量 $\leq 10\%$ 壁厚（如 $\Phi 325 \times 20\text{mm}$ 管道错边量 $\leq 2\text{mm}$ ），间隙需符合焊接工艺评定（WPS）要求。

3.3 焊接设备与环境控制。设备校准：焊接电流表、电压表需定期校验，误差 $\leq \pm 5\%$ （如埋弧焊电源电压波动 $\leq \pm 3\%$ ）；氩弧焊机保护气体纯度 $\geq 99.99\%$ （如TIG焊用氩气）。环境管理：风速 $> 2\text{m/s}$ 时需设置防风棚，环境温度 $< 5^{\circ}\text{C}$ 时需预热母材（如低合金钢预热温度 $\geq 100^{\circ}\text{C}$ ）；相对湿度 $> 90\%$ 时禁止施焊（不锈钢焊接需湿度 $\leq 70\%$ ）。

3.4 焊工资质与工艺文件。人员资质：焊工需持有ASME IX或ISO 9606认证，且每6个月进行实操复评（如耐热钢P91焊接需专项考核）；工艺文件确认：焊接工艺评定（PQR）需覆盖实际工况，工艺卡（WPS）明确参数范围（如12Cr1MoV钢焊接电流180-220A）。

3.5 预热与清洁度控制。预热规范：耐热钢（如P91）预热温度 $\geq 200^{\circ}\text{C}$ ，异种钢焊接按高合金侧要求执行（如12Cr1MoV+304异种钢预热 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ ）；预热宽度 ≥ 3 倍母材厚度，采用电加热片或火焰均匀加热。清洁措施：坡口及周围50mm区域需用丙酮或酒精去除油污、水分，不锈钢焊接前需专用砂轮清理（避免碳钢污染）。

3.6 典型问题预防。氢致裂纹：采用低氢焊材+焊前烘干+后热消氢（200-250 $^{\circ}\text{C}$ 保温2h）；未熔合风险：控制焊接电流下限（如 $\Phi 3.2\text{mm}$ 焊条电流 $\geq 90\text{A}$ ），优化运条角度（60-80 $^{\circ}$ ）。

4 电厂金属焊接焊前准备质量控制要点

4.1 材料管控。母材与焊材检验。母材需进行化学成分分析（如耐热钢Cr、Mo含量检测）及力学性能测试（如屈服强度 $\geq 345\text{MPa}$ ），表面应无裂纹、氧化层和油污残留；焊材需核验质量证明文件，低氢型焊条（如E5015）需 350°C 烘干保温1小时，焊剂含水量 $\leq 0.1\%$ 。匹配性选择：耐热钢选用Cr-Mo系焊材（如R307焊条），异种钢焊接时按高合金侧成分匹配。材料存储。焊材存放环境湿度 $\leq 60\%$ ，避免吸潮导致氢致裂纹风险。

4.2 坡口加工与组对。坡口精度控制。按WPS要求加工坡口形式（V型/U型），角度误差 $\leq \pm 5^{\circ}$ ，钝边厚度偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ，表面粗糙度 $R_a \leq 25\mu\text{m}$ ；坡口两侧20mm区域打磨至金属光泽，异种钢接头需设计过渡层坡口（稀释率 $\leq 30\%$ ）。组对要求。错边量 $\leq 10\%$ 壁厚（如 $\Phi 325 \times 20\text{mm}$ 管道错边量 $\leq 2\text{mm}$ ），间隙符合工艺评定要求。

4.3 设备与环境控制。设备校验。焊机电流/电压表精度误差 $\leq \pm 5\%$ ，氩弧焊机氩气纯度 $\geq 99.99\%$ （气体流量计误差 $\leq \pm 0.5\text{L/min}$ ）。环境管理。风速 $> 2\text{m/s}$ 时设置防风棚，低温环境（ $< 5^{\circ}\text{C}$ ）需预热母材（如Q345钢预热 $\geq 100^{\circ}\text{C}$ ）；湿度 $> 90\%$ 或雨天禁止施焊，不锈钢焊接区域湿度需 $\leq 70\%$ 。

4.4 人员与工艺文件。焊工资质。焊工需持有ASME IX或EN 287-1资质证书，每6个月进行实操复评（含平、立、仰焊位考核）。工艺文件。完成焊接工艺评定（PQR），制定焊接工艺卡（WPS），明确预热温度（如P91钢200-250 $^{\circ}\text{C}$ ）、层间温度等参数；建立材料追溯档案，记录母材炉批号、焊材批次及烘干记录。

4.5 预热与清洁度。预热规范。耐热钢（如12Cr1MoV）预热温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ ，预热宽度 ≥ 3 倍母材厚度，采用电加热片均匀加热。清洁措施。坡口及周围50mm区域用丙酮清除油污、水分，不锈钢焊接前用专用砂轮打磨防止碳钢污染。

4.6 风险预防措施。氢致裂纹控制：采用低氢焊材+焊前烘干+后热消氢（200-250 $^{\circ}\text{C}$ 保温2小时）；未熔合预防：控制焊接电流下限（如 $\Phi 3.2\text{mm}$ 焊条电流 $\geq 90\text{A}$ ），优化运条角度（60-80 $^{\circ}$ ）。

5 电厂金属焊接焊后检测内容

5.1 外观检测。目视检查。检查焊缝表面是否存在裂纹、气孔、咬边、焊瘤等缺陷，需在自然光或强光下进行观测；焊缝余高、宽度、错边量等尺寸需符合GB/T 3375标准（如余高 $\leq 3\text{mm}$ ，错边量 $\leq 10\%$ 壁厚）。工具辅助检查。使用焊缝检验尺测量焊缝尺寸偏差，如角焊缝焊脚尺寸误差 $\leq \pm 1.5\text{mm}$ 。

5.2 无损检测（NDT）。射线检测（RT）。采用X/ γ 射线透视焊缝内部，识别未熔合、气孔、夹渣等体积型缺陷，灵敏度可达2%壁厚；执行标准NB/T 47013.2，Ⅱ级及以上为合格。超声波检测（UT）。利用高频声波检测内部裂纹、未焊透等线性缺陷，适用于厚度 $> 8\text{mm}$ 的焊缝；灵敏度要求能检出 $\Phi 2\text{mm}$ 平底孔当量缺陷。磁粉检测（MT）。对铁磁性材料（如碳钢）焊缝施加磁场，检测表面及近表面裂纹，灵敏度达0.1mm。渗透检测

(PT)。适用于非多孔材料(如奥氏体不锈钢),通过显像剂显示表面开口缺陷,检出最小宽度0.01mm。

6 电厂金属焊接质量控制措施

6.1 材料与工艺控制。材料检验与匹配。母材需进行化学成分检测(如Cr、Mo含量验证)及力学性能测试(如Q345钢屈服强度 $\geq 345\text{MPa}$);焊材选用需与母材匹配(如耐热钢选用Cr-Mo系焊条),低氢焊条需350℃烘干并保温1-2小时;焊材存储环境湿度 $\leq 60\%$,防止吸潮导致氢致裂纹风险。坡口加工与组对。按工艺文件加工坡口(V型/U型),角度误差 $\leq \pm 5^\circ$,钝边厚度偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$,表面粗糙度 $R_a \leq 25\mu\text{m}$;组对错边量 $\leq 10\%$ 壁厚(例 $\Phi 325 \times 20\text{mm}$ 管道错边 $\leq 2\text{mm}$),坡口两侧20mm区域打磨至金属光泽。

6.2 焊接设备与人员管理。设备校验与环境控制。焊接设备电流/电压表误差 $\leq \pm 5\%$,氩气纯度 $\geq 99.99\%$ (TIG焊);风速 $> 2\text{m/s}$ 设置防风棚,环境温度 $< 5^\circ\text{C}$ 时预热母材(如低合金钢预热 $\geq 100^\circ\text{C}$)。焊工技能与资质。焊工需持ASME IX或ISO 9606认证,每6个月复评实操技能(含特殊材料专项考核)。

6.3 工艺参数与过程监控。焊接参数规范。严格执行焊接工艺评定(WPS),如12Cr1MoV钢焊接电流180-220A,层间温度 $\leq 200^\circ\text{C}$;耐热钢(如P91)预热温度 $\geq 200^\circ\text{C}$,预热宽度 ≥ 3 倍母材厚度。实时监测与记录。采用红外测温仪监控层间温度,焊机参数实时记录存档(如电流波动 $\leq \pm 5\%$);多人焊接作业时指定专职质检员全程跟踪。

6.4 焊后质量检测体系。无损检测(NDT)。外观检查焊缝尺寸(余高 $\leq 3\text{mm}$)、表面缺陷(裂纹/气孔);射线检测(RT)识别未熔合/夹渣(按NB/T 47013.2评定Ⅱ级合格);超声波检测(UT)检查内部线性缺陷(灵敏度 $\Phi 2\text{mm}$ 平底孔当量)。理化与压力试验。力学性能测试(抗拉强度 $\geq 510\text{MPa}$,冲击功 $\geq 27\text{J}$);水压试验压力 ≥ 1.5 倍设计压力,保压30分钟无泄漏。

6.5 质量管理与追溯。全流程追溯系统。建立焊材批号、焊工钢印号、热输入值等信息的数字化档案;按ASME标准对高风险焊缝实施100%无损检测抽检。持续改进机制。

6.6 典型问题对策。氢致裂纹防治:低氢焊材+焊前烘干+后热消氢(200-250℃保温2小时);未熔合预防:控制电流下限(例 $\Phi 3.2\text{mm}$ 焊条 $\geq 90\text{A}$),优化焊枪角度(60-80°)。

总之,电厂的焊接质量直接影响电厂的正常运作,因此严格把控焊接质量,是保证电厂运行和作业人员安全的重要手段。在控制焊接施工质量要从人员管理和培训、焊材的管理与选用、焊接工艺技术等方面进行严格控制的同时,还要重视焊接施工完成后的质量检测,真正从焊材来源、焊接过程和检验善后上控制其质量,只有保障了每个环节的质量,才能保障电厂的焊接质量。

参考文献

- [1]杨忠义.电厂金属焊接技术及质量控制策略.2023.
- [2]李华俊.焊接结构中常见缺陷的成因和防止措施.2022.