

Technical specification for manual tungsten inert gas welding process of 150MW turbine blades

Yangzheng Yang¹ Sen Yang^{2*}

1. Shangwan Power Plant of Beijing Guodian Electric Power Co., Ltd., Beijing, 017209, China
2. Daliuta Coal Mine, Shendong Company, National Energy Group, Yulin, Shaanxi, 719315, China

Abstract

As a core power equipment in the fields of energy and power generation, the blades of the steam turbine are key components for achieving energy conversion. A manual tungsten inert gas arc welding technical specification has been developed for the repair needs of 150MW turbine blades: the blade material is mostly 2Cr13 martensitic stainless steel, which needs to be preheated to 200-350 °C before welding, using V/X groove and multi-layer and multi pass welding process. Welding current 75-80A, argon flow rate 8-12L/min, back argon protection. Strictly control the interlayer temperature to ≤ 300 °C, and after welding, slowly cool it to below 100 °C for high-temperature tempering at 720-750 °C. The key control points include crack detection and positioning, special fixture anti misalignment, wire purity control, and weld seam height ≤ 1 mm. This process can effectively repair blade cracks and ensure that the strength and crack resistance of the welded joint meet the standards.

Keywords

steam turbine; Tungsten inert gas welding; welding process

150MW 机组汽轮机叶片手工钨极氩弧焊工艺技术规范

杨养政¹ 杨森^{2*}

1. 北京国电电力有限公司上湾电厂, 中国·北京, 017209
2. 国家能源集团神东公司大柳塔煤矿, 中国·陕西 榆林 719315

摘 要

汽轮机作为能源、发电等领域的核心动力设备, 其叶片是实现能量转换的关键部件。针对150MW机组汽轮机叶片修复需求, 制定手工钨极氩弧焊技术规范: 叶片材质多为2Cr13马氏体不锈钢, 需焊前预热至200-350°C, 采用V/X形坡口, 多层多道焊工艺。焊接电流75-80A, 氩气流量8-12L/min, 背面充氩保护。严格控制层间温度 ≤ 300 °C, 焊后缓冷至100°C以下进行720-750°C高温回火。关键控制点包括裂纹探伤定位、专用夹具防错边、焊丝纯度控制及焊缝余高 ≤ 1 mm。该工艺可有效修复叶片裂纹, 确保焊接接头强度与抗裂性能达标。

关键词

汽轮机; 钨极氩弧焊; 焊接工艺

1 引言

150MW 机组汽轮机叶片长期运行在高温、高压蒸汽环境中, 需同时承受高达数千转每分钟的离心力、周期性热应力、蒸汽冲蚀及介质腐蚀, 工况极为苛刻。叶片材质以含 Cr (铬)、Mo (钼)、Ni (镍) 等合金元素的耐热钢为主, 此类合金元素可通过固溶强化、析出强化等机制, 显著提升钢材的高温耐热性、抗蠕变性能及耐腐蚀能力, 其屈服强度

通常高达 600MPa 以上, 长期工作温度可达 650°C, 对材料纯净度、成分均匀性及焊接质量提出了极高要求。手工钨极氩弧焊 (TIG 焊) 因电弧稳定性好、焊缝成形美观、热输入易控制等优势, 成为 150MW 机组汽轮机叶片修复与焊接的首选方法, 需通过严格的工艺设计、操作控制及质量检测, 确保焊接接头性能与母材匹配, 保障机组安全稳定运行。

2 焊前准备: 奠定焊接质量基础

焊前准备是避免焊接缺陷、保障焊接质量的关键环节, 需从焊件清理、焊丝选择、设备调试、工装固定等多维度开展, 消除各类潜在风险。

2.1 焊件与焊丝表面清理

叶片焊接区域的油污、氧化物、锈迹等杂质, 是导致焊接气孔、未熔合、夹渣等缺陷的主要诱因, 必须进行彻底

【作者简介】杨养政 (1972-), 男, 中国陕西榆林人, 高级工程师, 从事焊接汽轮机叶片工艺研究。

【通讯作者】杨森 (1994-), 男, 中国陕西西安, 本科, 从事煤矿开采研究。

清理。具体操作如下：

焊件清理范围：以叶片焊接坡口为中心，向两侧各扩展 20mm 的区域均需纳入清理范围。首先采用蘸有酒精或丙酮的抹布擦拭表面，去除油污、灰尘等可溶性杂质；随后使用角磨机配合 120 目氧化铝砂轮片，对坡口面及两侧区域进行打磨，直至露出金属光泽，同时保证坡口角度、钝边厚度符合设计要求（通常坡口角度为 30° - 45° ，钝边厚度 2-3mm，具体需根据叶片厚度调整）。打磨过程中需控制打磨力度，避免过度打磨导致坡口尺寸偏差，且打磨方向应沿叶片长度方向，减少表面划痕对力学性能的影响。

焊丝清理要求：焊接所用焊丝需与叶片母材成分匹配，通常选择同材质或近材质耐热钢焊丝（如含 Cr12%-15%、Mo1%-2%、Ni2%-3% 的合金焊丝），以确保焊缝金属的耐热性、抗蠕变性能与母材一致。焊丝使用前，需用 240 目细纱布沿焊丝轴向进行打磨，去除表面氧化皮、油污及镀层，直至焊丝表面光滑无杂质；打磨后立即用无水乙醇擦拭，防止二次污染，并将清理后的焊丝放入干燥的密封容器中存放，避免受潮或氧化。

2.2 焊接设备选择与调试

手工钨极氩弧焊设备的性能直接影响电弧稳定性、保护效果及焊接质量，需严格按照工艺要求选型与调试：焊机选型、钨极选择、保护气体要求、设备接地与安全检查。

2.3 预热工装与温度监测

150MW 机组汽轮机叶片材质的淬硬倾向较大，焊接前需进行预热，以降低焊接区域冷却速度，减少冷裂纹风险。根据叶片厚度与材质特性，预热温度设定为 300 - 500°C ，具体操作如下：

预热方式选择：采用火焰加热与远红外加热相结合的方式，火焰加热选用中性焰，避免氧化焰或碳化焰对叶片表面造成损伤；远红外加热片覆盖焊接区域及两侧 50mm 范围，通过温控仪实时监测预热温度，确保温度均匀性（同一截面温差不得超过 30°C ）。

温度监测工具：使用便携式红外测温仪或热电偶测温仪，测温点需布置在焊接坡口两侧 10mm 处，且不少于 3 个测点，避免单点测温导致的误差。预热过程中需缓慢升温，升温速率控制在 50 - $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，防止因升温过快导致叶片产生热应力。

工装固定：叶片焊接时需采用专用工装夹具固定，夹具材质选择与叶片热膨胀系数相近的合金材料，避免焊接过程中因热膨胀差异导致叶片变形。夹具安装时需确保叶片定位准确，焊接区域无遮挡，同时预留一定的热膨胀空间，防止叶片因约束过大产生焊接应力。

3 焊接方法：精准控制焊接过程

手工钨极氩弧焊的操作过程需严格控制电弧参数、焊丝添加、层间温度等关键环节，确保焊缝成形良好、熔合充分，接头性能达标。

3.1 焊接参数设定

底层焊接控制：底层焊接的核心是确保坡口根部熔透，同时避免烧穿。焊接时采用左向焊法，焊枪与叶片表面夹角保持在 70° - 80° ，钨极伸出长度控制在 3-5mm。引弧后先在坡口一侧预热，待形成稳定熔池（熔池直径约为焊丝直径的 1.5-2 倍）后，将焊丝从熔池前方 1-2mm 处填入，焊丝与叶片表面夹角为 15° - 20° ，确保焊丝充分熔化并与母材熔合。焊接过程中需保持电弧稳定，避免弧长过长（超过 3mm）导致保护不良，或弧长过短（小于 2mm）造成钨极与熔池接触，引发夹钨缺陷。

填充层焊接控制：填充层的作用是填充坡口空间，为盖面层奠定基础，需控制焊接电流略高于底层，以提高焊接效率，同时避免热输入过大导致晶粒粗大。焊接时采用多层多道焊，每道焊缝宽度不超过焊丝直径的 3 倍，相邻焊道之间的搭接量为焊道宽度的 1/3-1/2，确保无未熔合区域。每焊完一道后，需用钢丝刷清理焊道表面的熔渣与飞溅，检查无缺陷后再进行下一道焊接。

盖面层焊接控制：盖面层直接影响焊缝外观质量与抗冲蚀性能，需严格控制焊缝高度与成形。焊接电流略低于填充层，氩气流量适当提高，以增强保护效果。焊接时需调整焊枪角度，确保焊缝表面平整，无咬边、凹陷、余高过大等缺陷；焊缝余高控制在 0-2mm，余高过大易导致蒸汽冲蚀加剧，余高过小则会降低接头强度。

3.2 层间温度与焊接中断控制

层间温度是影响焊接接头组织与性能的关键因素，需严格控制在 250 - 350°C 范围内。焊接过程中，每焊完一层后，需用红外测温仪测量焊道表面温度，若温度低于 250°C ，需采用远红外加热片进行补热，确保层间温度达标后再进行下一层焊接；若温度高于 350°C ，则需自然冷却至规定范围，避免热输入累积导致晶粒粗大，降低接头韧性。

若因设备故障、材料补充等原因导致焊接中断，需立即停止加热，待焊缝冷却至室温后，对已焊区域进行磁粉探伤，检查是否存在裂纹、未熔合等缺陷；若存在缺陷，需采用角磨机彻底清除，直至露出完好金属组织，再按照原预热工艺重新预热，恢复焊接。焊接中断后的接头处需打磨成缓坡形，避免接头处产生应力集中 [1]。

3.3 焊接保护与熄弧控制

氩气保护效果直接决定焊缝金属的纯净度，焊接过程中需确保氩气覆盖整个熔池及高温区（温度高于 400°C 的区域）。除焊枪喷嘴的正面保护外，对于叶片背面无法直接保护的区域，需采用背面充氩保护装置，通过专用导管向坡口背面通入氩气，确保背面熔池不被氧化。背面氩气流量控制在 5-8L/min，需在正面焊接前 5-10 分钟开始通氩，焊接结束后继续通氩 5 分钟以上，直至焊缝背面冷却至 200°C 以下。

4 焊接后处理：保障接头性能与质量检测

焊接后处理包括焊缝表面处理与无损检测，是验证焊

接质量、消除潜在缺陷的关键环节，需按照规范流程开展，确保焊缝质量满足机组运行要求。

4.1 焊缝表面处理

焊缝表面的飞溅、焊瘤、尖锐边缘等不仅影响外观质量，还会加剧蒸汽冲蚀与晶间腐蚀，需通过以下步骤进行处理：

初步清理：焊接完成且焊缝冷却至室温后，首先使用钢丝刷清除焊缝表面的熔渣、飞溅物，再用压缩空气吹净表面灰尘；对于焊瘤、余高超标区域，采用角磨机配合180目砂轮机进行打磨，打磨过程中需控制打磨力度，避免过度打磨导致焊缝厚度不足（焊缝最小厚度需不小于母材厚度）。

精细抛光：表面初步清理后，使用240目-400目的细砂纸对焊缝表面及过渡区域进行抛光处理，确保焊缝表面光滑，与母材过渡平缓，无尖锐棱角；抛光方向需沿叶片受力方向（即蒸汽流动方向），减少蒸汽冲蚀时的阻力，降低冲蚀损伤风险。

表面清洁度检查：表面处理完成后，采用白布蘸酒精擦拭焊缝表面，白布上无明显污渍、金属粉末即为合格；同时使用表面粗糙度仪测量焊缝表面粗糙度，要求 $Ra \leq 6.3 \mu m$ ，确保表面质量满足抗冲蚀与耐腐蚀要求[2]。

4.2 无损检测：全面排查焊接缺陷

150MW机组汽轮机叶片焊接接头需承受高温、高压与交变载荷，任何微小缺陷都可能在长期运行中扩展，引发严重事故，因此必须进行严格的无损检测，检测项目包括磁粉探伤、X射线探伤及硬度检测。

磁粉探伤（MT）：磁粉探伤主要用于检测焊缝表面及近表面（深度 $\leq 5mm$ ）的裂纹、夹渣、未熔合等缺陷。检测前需将焊缝表面清理干净，去除油污、氧化皮等；采用湿法连续磁化法，磁化电流根据叶片厚度设定为200-300A，磁悬液浓度控制在10-20g/L；检测时需在焊缝及两侧20mm范围喷洒磁悬液，同时施加磁场，观察磁痕显示，若发现线性磁痕（长度大于3mm）或圆形磁痕（直径大于1.5mm），需标记缺陷位置，进行打磨清除后重新检测，直至无超标缺陷。

X射线探伤（RT）：对于焊缝厚度大于8mm的区域，需采用X射线探伤检测内部缺陷（如气孔、夹渣、未熔合、未焊透等）。检测依据《承压设备无损检测 第2部分：射线检测》（NB/T 47013.2）执行，透照焦距控制在600-800mm，底片黑度范围为2.0-4.0；检测后由持证人员评片，要求焊缝内部缺陷等级达到I级，即无任何超标缺陷（如单个气孔直径不大于1mm，累计气孔面积不超过焊缝面积的0.5%，无未熔合、未焊透等缺陷）。

硬度检测：焊接接头的硬度直接反映其韧性与抗裂性能，需在焊缝区、热影响区及母材区各选取3个测点，采用维氏硬度计（HV10）进行检测，检测载荷为10kg，保压时间10s。

5 动平衡调试：确保机组运行稳定性

汽轮机叶片的平衡性能直接影响机组运行时的振动水平，若叶片焊接后重量偏差过大或重心偏移，会导致机组振动加剧，引发轴承磨损、密封失效等问题，因此必须进行严格的动平衡调试[3]。

5.1 焊接前后重量控制

叶片焊接前需采用精度为0.1g的电子天平进行称重，记录原始重量（记为 m_0 ）；焊接过程中需控制焊丝添加量，避免过度焊接导致重量超标，焊接后再次称重（记为 m_1 ），要求重量偏差 $\Delta m = |m_1 - m_0| \leq 5g$ ，若偏差超过规定值，需通过打磨焊缝余高（确保焊缝厚度不小于母材）或在非工作区域添加平衡块（材质与叶片一致，重量不超过3g）进行调整，直至重量偏差符合要求。

5.2 动平衡检测与调试

平衡机检测：将焊接后的叶片安装在专用动平衡机上，按照机组工作转速（通常为3000r/min）进行动平衡检测。检测时需测量叶片的不平衡量与相位，要求不平衡量不超过 $5g \cdot mm$ ；若不平衡量超标，需根据检测结果在叶片指定位置（通常为叶片根部或叶尖非工作区域）进行去重（采用钻孔或打磨方式，去重深度不超过叶片厚度的1/3）或加重（粘贴平衡块），调整后重新检测，直至不平衡量达标。

振动仪验证：动平衡机调试完成后，需将叶片安装在机组转子上，采用便携式振动仪在轴承座处测量机组运行时的振动值。测量参数包括水平、垂直、轴向三个方向的振动速度，要求在额定转速下，振动速度有效值不超过2.8mm/s（符合《汽轮机振动标准》GB/T 11348.2要求）；若振动值超标，需重新检查叶片安装精度、重量偏差及平衡状态，排查是否存在焊接变形或缺陷，直至振动值满足要求。

6 结语

150MW机组汽轮机叶片手工钨极氩弧焊工艺是一项系统性工程，需严格把控焊前准备、焊接过程、焊后处理与动平衡调试的每个环节，通过精准的参数设定、规范的操作控制及全面的质量检测，确保焊接接头性能与母材匹配，平衡性能满足机组运行要求。在实际应用中，还需结合叶片的具体工况、材质特性及修复需求，持续优化工艺参数，提升焊接质量稳定性，为汽轮机机组的长期安全、高效运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 王学栋,王德华,郑威,等. 150MW机组高背压供热改造的试验研究与分析[J]. 汽轮机技术,2012,54(5):397-400.
- [2] 周奇. 抽凝式汽轮机低压多级长叶片热力气动优化设计[D]. 山东:山东大学,2013.
- [3] 王超,王延荣,徐星仲,等. 应用三维有限元法计算汽轮机转子临界转速和模化长叶片[C]//2012年LMS中国用户大会论文集. 2012:1-5.