

# Analysis of Welding Technology for Diverse Metal Materials in New Energy Power Equipment and Joint Reliability

Zipu Zhang

AVIC Xi'an Aircraft Industry Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710089, China

## Abstract

In response to the problems of insufficient compatibility of welding processes for new energy power equipment, poor joint toughness, lack of corrosion resistance, and inability to guarantee reliability, the selection of welding materials was optimized, the welding methods were matched, process parameters were regulated, quality was controlled, and reliability was evaluated. The welding process qualification test verified the rationality of the process, established a joint reliability assessment model and verified it, and provided reliability improvement technical measures. After optimization, the tensile strength of the welded joint was 280-350 MPa, the corrosion resistance met the long-term service requirements of new energy equipment, and the prediction error of the assessment model was within  $\pm 5$ . The research results provide theoretical and technical support for the application of heterogeneous metal welding in engineering, and improve the safety and durability of equipment service.

## Keywords

New energy power equipment; Heterogeneous metal welding; Joint reliability

## 新能源电力设备异种金属焊接工艺及接头可靠性分析

张资普

中航西安飞机工业股份有限公司, 中国·陕西 西安 710089

## 摘要

针对新能源电力设备异种金属焊接工艺适配不足、接头易裂、耐腐蚀性欠缺及可靠性无法保障的问题, 优化焊接材料选型、匹配焊接方法、调控工艺参数、管控质量及评估可靠性, 焊接工艺评定试验验证工艺合理, 建立接头可靠性评估模型并验证, 给出可靠性提升技术措施。优化后焊接接头拉伸强度280-350MPa, 耐腐蚀性符合新能源设备长期服役需求, 评估模型预测误差 $\pm 5$ 以内。研究成果为异种金属焊接工程应用提供理论与技术支持, 提升设备服役安全性与耐久性。

## 关键词

新能源电力设备; 异种金属焊接; 接头可靠性

## 1 引言

新能源电力产业快速发展, 光伏、风电、储能设备等核心装备广泛采用异种金属连接结构, 钢与铝、铜与不锈钢的对接与搭接, 兼顾不同金属力学性能与经济性。异种金属熔点、热导率、线膨胀系数等物理化学性能差异显著, 焊接时易产生应力集中、界面脆性相析出、未焊透等缺陷, 影响接头可靠性, 缩短新能源电力设备服役寿命。系统研究异种金属焊接工艺, 建立接头可靠性评估方法, 给出可行的可靠性提升措施, 对推动新能源电力装备制造技术升级有重要工程实践意义。

## 2 新能源电力设备异种金属焊接工艺

### 2.1 焊接材料

新能源电力设备异种金属焊接材料选型需匹配母材特性、焊接方法及设备服役工况, 抑制界面脆性相生成、保证接头力学性能与耐蚀性, 避免材料不匹配引发焊接缺陷。新能源电力设备中常见 Q355 钢与 6061 铝合金对接、T2 铜与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢搭接, 焊接材料需兼顾兼容性与服役适应性。钢铝焊接优先用 ER5356 铝焊丝, 抗拉强度 240MPa, 含镁量约 5%, 改善焊缝成形, 抑制 Fe-Al 脆性相析出, 焊丝直径 1.2mm、1.6mm 两种, 适配不同厚度母材; 铜钢焊接用 ERCuNi 焊丝, 抗拉强度 320MPa, 含镍量 30%, 降低界面电偶腐蚀倾向, 提升接头耐蚀性<sup>[1]</sup>。焊接保护气体随焊接材料调整, 钢铝焊接采用纯度 99.99% 的氩气, 流量 15-20L/min, 铜钢焊接采用氩气与氦气混合气体, 防止焊缝氧化与气孔缺陷, 确保焊接材料与母材形成良好冶金结合。

【作者简介】张资普(1999-), 男, 中国陕西渭南人, 本科, 工程师, 从事航空工业研究。

## 2.2 焊接方法

新能源电力设备异种金属焊接需结合母材类型、接头结构及设备服役要求,选择适配性强、精度高的焊接方法,控制热输入、减少界面缺陷。熔化极气体保护焊(MIG)用于中厚板异种金属焊接,光伏支架钢铝对接、风电塔架异种钢连接均适用,焊接速度20-30cm/min,自动化焊接效率高,焊缝成形均匀,适配批量生产;钨极氩弧焊用于薄壁异种金属焊接,储能设备铜铝接线端子连接常用,焊接电流80-120A,热输入稳定,焊缝质量高,减少裂纹与气孔缺陷,焊接效率较低,适合精密部件焊接<sup>[2]</sup>。激光焊接用于高精度精密接头,动力电池铜铝极耳连接可采用,红外激光功率1050-1850W,焊接速度3.6m/min,非接触式焊接缩小热影响区,提升接头力学性能;电磁脉冲焊接适用于铝钢异种金属连接,无需填充材料,焊接时间短,无热影响区,避免脆性相生成,接头抗剪强度74MPa,适合热变形敏感部件。

## 2.3 焊接工艺

### 2.3.1 坡口形式

坡口形式设计结合异种金属物理特性、母材厚度及焊接方法,保证焊透、减少应力集中、便于焊接操作,符合GB50236-2011《现场设备、工业管道焊接工程施工规范》要求。Q355钢与6061铝合金对接(母材厚度6-12mm)采用V型坡口,角度60-70°,钝边2-3mm,间隙1-2mm,增大焊缝熔合面积,减少未焊透缺陷,降低焊接应力;T2铜与1Cr18Ni9Ti不锈钢搭接(母材厚度3-8mm)采用单边V型坡口,角度50-60°,钝边3-4mm,搭接长度8-12mm,防止焊接时铜液流失,确保接头结合紧密。厚度大于12mm的异种钢对接采用X型坡口,角度45-55°,钝边2-3mm,间隙1-1.5mm,减少焊接层数,降低热输入累积,避免晶粒粗大,提升接头力学性能;薄壁铝铜异种焊接采用I型坡口,间隙0.5-1mm,无需开钝边,减少热变形,适配激光焊接与TIG焊接工艺。

### 2.3.2 焊接工艺参数

焊接工艺参数调控是新能源电力设备异种金属焊接质量的关键,结合母材组合、焊接方法及焊接材料,优化电流、电压、焊接速度、热输入等参数,防止裂纹、气孔、未焊透等缺陷。MIG焊焊接Q355钢与6061铝合金时,焊接电流180-220A,电压22-25V,速度25cm/min,热输入8-12kJ/cm,保护气体流量18L/min,焊丝伸出长度10-15mm;TIG焊焊接T2铜与1Cr18Ni9Ti不锈钢时,焊接电流100-130A,电压12-15V,速度15cm/min,热输入10-15kJ/cm,保护气体流量10L/min,钨极直径2.5mm<sup>[3]</sup>。激光焊接铜铝异种金属时,红外激光功率1050W,蓝激光功率300-800W,焊接速度3.6m/min,离焦量-1mm;电磁脉冲焊接铝钢接头时,放电电压25-35kV,放电电容1000-2000μF,复板冲击速度200-300m/s。参数需结合母材实际厚度微调,确保焊缝成形良好、无明显缺陷。

## 2.4 焊接工艺评定试验

### 2.4.1 拉伸试验结果

拉伸试验依据GB/T 2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》,用CMT5205单柱式微机控制电子万能试验机,加载速度0.03mm/min,8组不同母材组合、焊接工艺的试样参与试验,尺寸100mm×20mm×6mm,环境温度25℃,记录拉伸强度与断裂位置,所有试样无明显焊接缺陷,拉伸强度符合新能源电力设备服役要求。

### 2.4.2 耐蚀性试验结果

耐蚀性试验采用中性盐雾试验,依据GB/T 10125-2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》,试验溶液为5% NaCl水溶液,温度35℃,盐雾沉降量1-2mL/(h·cm<sup>2</sup>)。选取8组与拉伸试验相同的试样,分别进行48h、72h、96h盐雾试验,记录腐蚀速率与表面腐蚀情况,试验结果如下表2所示。腐蚀速率低、表面腐蚀轻微,符合新能源电力设备户外长期服役耐蚀要求。

## 3 新能源电力设备异种金属焊接接头可靠性评估

### 3.1 接头可靠性分析方法

新能源电力设备异种金属焊接接头可靠性分析贴合设备服役工况,采取多方法融合思路,评估接头在力学载荷、腐蚀环境下的服役表现,规避单一评估方式存在的局限。失效模式与影响分析(FMEA)可识别接头潜在失效形式,覆盖焊缝裂纹、未焊透、腐蚀失效等类别,梳理失效诱因与影响程度,锁定接头可靠性薄弱位置;还原焊接过程中温度场与应力场的分布状态,判断接头残余应力数值与分布特征,钢铝焊接接头残余应力峰值可达到280MPa,应力集中区域多分布于界面位置;疲劳寿命试验衡量接头在循环载荷作用下的稳定程度,试验选用高频疲劳试验机,加载频率设定为100Hz,循环载荷区间控制在50-250MPa,完成接头疲劳寿命检测,试样疲劳寿命多处于10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup>次循环区间,适配新能源设备长期服役需求<sup>[4]</sup>。整合拉伸试验、耐蚀性试验相关数据,搭建多指标综合分析框架,完成接头可靠性的整体评价,为后续可靠性优化工作提供数据支撑。

### 3.2 评估模型构建

依托新能源电力设备异种金属焊接接头的服役特征,搭建基于应力-寿命(S-N)曲线的疲劳可靠性预测模型,模型以热力学熵为理论支撑,纳入拉伸强度与疲劳极限两类核心参数,可预判接头在不同服役时段下的可靠程度,模型公式如下:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{N}\right)^m\right)$$

式中:R(t)为接头在服役时间t时的可靠性;t为接头服役时间(h);N为接头疲劳寿命(次);m为形状参数,取值范围为2-5,根据母材组合与焊接工艺调整,钢铝焊接

取 3.2, 铜钢焊接取 3.8。构建焊接残余应力与热输入的关联模型, 用于辅助可靠性评估, 公式如下:

$$\sigma_{res} = \frac{k \cdot Q}{A \cdot h}$$

式中: 为焊接残余应力(MPa); k 为系数, 取值 0.85-0.95; Q 为焊接热输入(kJ/cm); A 为焊缝面积(mm<sup>2</sup>); h 为焊缝厚度(mm)。为验证基于应力-寿命(S-N)曲线的疲劳可靠性预测模型的准确性, 选取 6 组不同母材组合、焊接工艺的试样, 通过高频疲劳试验机测试不同应力水平下的接头疲劳寿命, 构建 S-N 曲线并验证模型适配性, 试验数据如下表 1 所示, 曲线拟合度良好, 模型可精准反映接头应力与疲劳寿命的关联关系, 验证了模型的合理性, 可用于新能源电力设备异种金属焊接接头的可靠性预测。

表 1 评估模型验证结果

试样编号	应力水平 (MPa)	疲劳寿命 (次)	S-N 曲线拟合值 (次)
1	280	125000	123800
2	300	98000	99200
3	320	86000	84700
4	290	112000	113500
5	270	138000	136200
6	310	105000	106300

## 4 提升异种金属焊接接头可靠性的技术措施

### 4.1 界面过渡层优化设计

界面过渡层优化设计可抑制异种金属焊接界面脆性相生成、提升接头可靠性, 根据母材组合选择合适的过渡层材料与厚度, 实现母材与焊缝的平稳过渡。钢铝异种焊接采用铜过渡层, 材料为 T2 紫铜, 厚度 0.5-1.0mm, 等离子喷涂工艺制备, 喷涂温度 800-900℃, 速度 5-8cm/s, 铜过渡层阻隔 Fe 与 Al 直接接触, 减少 Fe-Al 脆性相生成, 提升焊缝与母材结合强度, 接头拉伸强度提高 20-30MPa。铜钢异种焊接采用镍过渡层, 材料为纯镍, 厚度 0.8-1.2mm, 真空蒸镀工艺制备, 蒸镀温度 1000-1100℃, 真空度 10<sup>-3</sup>Pa, 镍过渡层降低界面电偶腐蚀倾向, 改善焊缝成形, 提升接头耐蚀性, 盐雾试验腐蚀速率下降 0.01-0.02mm/a。过渡层制备后需表面打磨, 确保表面粗糙度 Ra≤1.6 μm, 与母材贴合紧密, 避免两者间产生间隙影响焊接质量。

### 4.2 焊接残余应力调控

焊接残余应力易导致异种金属焊接接头产生裂纹、降低可靠性, 采用焊后处理与工艺优化结合的方式调控残余应力。焊后热处理采用消除应力退火工艺, 根据母材组合调整退火参数, 钢铝焊接接头退火温度 300-350℃, 保温 2-3h, 冷却速率 50-80℃/h, 降温至 300℃后空冷, 残余应力可降至 150-200MPa; 铜钢焊接接头退火温度 400-450℃,

保温 1.5-2.5h, 冷却速率 60-90℃/h, 残余应力降至 120-180MPa。振动时效处理辅助调控, 振动频率 20-50Hz, 时间 30-60min, 振幅 0.1-0.3mm, 进一步消除残余应力, 减少应力集中。优化焊接顺序, 采取对称焊接、分段焊接, 减少热变形与应力累积, 焊接过程中控制热输入均匀, 避免局部热输入过大导致残余应力升高, 从源头降低其对接头可靠性的影响。

### 4.3 接头表面防护处理

接头表面防护处理提升异种金属焊接接头耐蚀性, 适应新能源电力设备户外、潮湿服役环境, 延长接头服役寿命。根据接头服役环境, 采用热浸镀锌与防腐涂层结合的防护方式, 热浸镀锌工艺温度 450-500℃, 镀锌层厚度 80-100 μm, 形成致密保护膜, 隔绝空气与水分, 提升接头耐蚀性, 盐雾试验寿命达 2000h 以上。精度要求较高的接头采用喷涂防腐涂层工艺, 涂层为聚氟乙烯防腐涂料, 厚度 50-80 μm, 高压无气喷涂工艺实施, 喷涂压力 15-20MPa, 温度 25-30℃, 涂层与接头表面贴合紧密, 防腐、耐磨且抗老化, 适应户外恶劣环境。防护处理后对接头进行密封性检测, 采用水压试验, 试验压力 1.2-1.5MPa, 保压 30min, 无渗漏即为合格, 保障防护效果。

## 5 结语

本文围绕新能源电力设备异种金属焊接工艺及接头可靠性展开研究, 针对异种金属焊接工艺适配不足、接头可靠性欠缺, 优化焊接材料选型、焊接方法与工艺参数, 明确焊接过程质量控制要点, 焊接工艺评定试验验证工艺合理; 构建基于 S-N 曲线的接头可靠性评估模型, 完成验证, 实现接头可靠性精准预测; 提出界面过渡层优化、残余应力调控、表面防护处理等技术措施, 提升接头可靠性。研究成果贴合新能源电力设备实际服役需求, 为异种金属焊接工程应用提供理论支撑与技术参考。未来可深入研究新型焊接材料与智能化焊接工艺, 优化可靠性评估模型, 结合新能源设备轻量化、高效化发展趋势, 持续提升异种金属焊接接头可靠性与服役寿命。

### 参考文献

- [1] 彭骋, 张旭, 袁新宇, 等. 核电爆破异种金属焊接接头在 PWR 一回路水中 SCC 裂纹扩展行为研究[J]. 原子能科学技术, 2026, 60(02): 378-386.
- [2] 薛河, 杨超, 张雨彪, 等. 基于压入响应的异种金属焊接接头材料力学性能计算方法[J]. 机械工程材料, 2025, 49(03): 121-127.
- [3] 范凯, 乔琳. 薄壁异种金属高能束焊接结构界面区局部断裂行为研究[J]. 载人航天, 2025, 31(4): 480-492.
- [4] 黎海兵, 路全彬, 黄俊兰, Renan Siqueira, 丁宗业. 异种金属焊接结构件多轴动态力学性能测试平台设计[J]. 精密成形工程, 2025, 17(3): 31-40.