

高强钢机械构件焊接工艺的参数优化与性能表征

王海美

西北骏马电机制造股份有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19257

[摘要] 本文针对高强钢机械构件焊接工艺参数优化及接头性能表征开展实操性研究,明确关键焊接参数的优化范围与性能表征核心流程。采用单因素调控与协同优化结合的方式,确定焊接电流、电压、速度及热输入的合理区间,通过拉伸、冲击、硬度测试完成性能表征,建立参数与性能的关联关系。研究表明,合理调控焊接参数可有效提升接头力学性能,避免焊接缺陷产生。

[关键词] 高强钢机械构件; 焊接工艺; 参数优化; 性能表征

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A

Parameter Optimization and Performance Characterization of Welding Process for High-Strength Steel Mechanical Components

Haimei Wang

Northwest Steed Electric Motor Manufacturing Co., Ltd.

[Abstract] This paper conducts practical research on parameter optimization and joint performance characterization of the welding process for high-strength steel mechanical components, clarifying the optimization range of key welding parameters and the core process of performance characterization. Using a combination of single-factor control and collaborative optimization, the reasonable ranges of welding current, voltage, speed, and heat input are determined. Performance characterization is completed through tensile, impact, and hardness tests, establishing the correlation between parameters and performance. Research shows that reasonable control of welding parameters can effectively improve the mechanical properties of joints and avoid welding defects.

[Key words] high-strength steel mechanical components; welding process; parameter optimization; performance characterization

引言

高强钢机械构件广泛应用于工程机械、轨道交通等重载领域,焊接质量直接决定构件服役安全性与使用寿命。焊接工艺参数的不合理设置易导致焊缝未熔透、气孔、裂纹等缺陷,降低接头力学性能,影响构件正常服役。焊接性能表征可精准反映接头质量,为参数优化提供数据支撑。本文聚焦焊接参数优化实操流程、性能表征具体方法及二者关联性调控,通过具体操作步骤、数据范围,完成高强钢机械构件焊接工艺参数优化与性能表征研究,满足生产实操中的技术需求,确保内容具体可落地。

1 高强钢机械构件焊接工艺参数优化

1.1 焊接电流优化

焊接电流是调控高强钢焊缝熔深、熔宽及成形质量的核心参数,取值过大易导致焊缝咬边、烧穿,取值过小则会产生未熔透、未焊满等缺陷,需结合构件厚度、焊丝直径及焊接位置进行精准优化。优化过程采用单因素调控法,固定焊接电压、速度、

热效率等参数,仅改变焊接电流取值,范围设定为160~240A,每20A设置一个试验组,每组制备3个标准焊接试样。优化过程中需控制试样焊接环境温度为 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$,湿度不超过60%,避免环境因素对优化结果产生干扰,确保电流优化数据的准确性与重复性,每个试验组的焊接操作需保持一致,减少人为误差^[1]。焊接电流与焊缝熔深的关联可通过简单公式进行量化计算,便于精准调控电流取值,公式如下:

$$h = k_1 I - b_1 \quad (1)$$

式中: h 为焊缝熔深,单位为毫米(mm); k_1 为电流影响系数,取值为 $0.05\sim 0.07\text{mm/A}$,由焊丝直径与焊接材料决定; I 为焊接电流,单位为安培(A); b_1 为修正系数,单位为毫米(mm),取值为 $2.5\sim 3.5\text{mm}$,根据构件厚度进行调整,构件厚度越大,修正系数取值越大。

1.2 焊接电压优化

焊接电压直接影响电弧长度与能量分布,进而改变焊缝成

形与接头质量,需与焊接电流协同优化,避免电压与电流不匹配导致的电弧不稳定、飞溅过大等问题。同组内3个试样焊接电压取值完全一致(如24V组3个试样均采用24V施焊,26V组3个试样均采用26V施焊),保证单一变量试验条件。

施焊过程中实时观测并记录对比数据:电弧稳定性(稳定/轻微波动/剧烈波动)、飞溅量(少量/中等/大量,按飞溅颗粒直径 $\leq 1\text{mm}$ 、 $1\sim 3\text{mm}$ 、 $> 3\text{mm}$ 分级);焊后对同组3个试样的检测结果进行平行对比,检测内容包括焊缝熔宽、余高等成形精度、表面粗糙度 R_a 值及内部缺陷情况,采用超声波检测法排查内部气孔、裂纹等隐性缺陷,以3个试样数据的平均值作为该电压组的有效结果,剔除偏差超过5%的异常试样,确保检测结果全面、可重复地反映电压对焊接质量的影响。焊接电压与电弧长度的对应关系可通过以下公式计算,为电压优化提供量化依据,公式如下:

$$L = k_2 U - b_2 \quad (2)$$

式中: L 为电弧长度,单位为毫米(mm); k_2 为电压影响系数,取值为 $0.1\sim 0.12\text{mm/V}$,由焊接方法决定; U 为焊接电压,单位为伏特(V); b_2 为修正系数,单位为毫米(mm),取值为 $1.8\sim 2.2\text{mm}$,根据焊接环境风速进行调整,风速越大,修正系数取值越大,确保电弧稳定性。

1.3 焊接速度与热输入协同优化

焊接速度决定焊接热输入在焊缝上的分布密度,速度过快会导致热输入不足,产生未熔透缺陷,速度过慢则会增加热输入量,导致焊缝晶粒粗大、接头韧性下降。优化过程需结合焊接热输入进行协同调控,固定焊接电流、电压及热效率,焊接速度取值范围设定为 $8\sim 16\text{cm/min}$,每 2cm/min 设置一个试验组,每组制备3个标准焊接试样。焊后检测焊缝成形质量、晶粒尺寸及接头韧性,结合热输入计算结果,确定焊接速度与热输入的最优匹配关系,确保接头既无焊接缺陷,又具备良好的力学性能^[2]。焊接热输入的计算采用行业通用简化公式,便于实操过程中快速计算与调控,公式如下:

$$Q = \frac{\eta U I}{v} \quad (3)$$

式中: Q 为焊接热输入,单位为千焦每厘米(kJ/cm); η 为焊接热效率,无单位,气保焊取值为 $0.6\sim 0.8$,根据焊接设备性能调整; I 为焊接电流,单位为安培(A); U 为焊接电压,单位为伏特(V); v 为焊接速度,单位为厘米每分钟(cm/min),计算时需将速度单位换算为厘米每秒(cm/s),确保单位统一。

2 高强钢焊接接头性能表征方法

2.1 拉伸性能表征

拉伸性能表征核心是检测焊接接头的抗拉强度与伸长率,反映接头抵抗拉伸载荷的能力,采用万能材料试验机完成检测,检测流程严格遵循GB/T 2651-2023标准要求。将焊接合格的试样加工为标准拉伸试样,试样截面尺寸根据构件实际厚度确定,确保试样加工精度符合标准,避免加工误差影响检测结果。检测

前需校准试验机,设定加载速度为 2mm/min ,加载过程中实时记录载荷与位移数据,直至试样断裂,停止加载,通过数据计算得出接头抗拉强度与伸长率。抗拉强度的计算采用简单量化公式,计算过程便捷,可快速得出检测结果,公式如下:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A} \quad (4)$$

式中: σ_b 为焊接接头抗拉强度,单位为兆帕(MPa); F_b 为试样断裂时的最大载荷,单位为牛顿(N); A 为试样横截面积,单位为平方毫米(mm^2),计算时需准确测量试样横截面的长度与宽度,确保面积计算精准,误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。

2.2 冲击性能表征

冲击性能表征用于检测焊接接头的韧性,反映接头抵抗冲击载荷的能力,避免接头因韧性不足导致脆性断裂,采用夏比冲击试验机完成检测,检测温度设定为 -40°C ,贴合高强钢构件的实际服役环境。将焊接试样加工为标准V型缺口冲击试样,缺口尺寸与加工精度严格遵循GB/T 2650-2022标准要求,每组检测3个试样,确保检测结果具备代表性。检测时将试样固定在试验机砧座上,调整冲击锤高度与冲击速度,释放冲击锤,分别记录3个试样试验过程中吸收的冲击功(对应冲击力转化值,单位: J),结合高强钢冲击试验规范,单个试样冲击功偏差需控制在 $\pm 10\%$ 以内,取3个试样的平均值作为接头冲击韧性指标,剔除偏差过大的异常数据^[3]。该平均值计算需在试验环境与试样温度均稳定控制在 $-40\pm 2^\circ\text{C}$ 的条件下完成,该温度控制范围贴合高强钢构件低温服役实际,参考Q690E级高强钢冲击检测要求及GB/T 2650-2022标准中低温冲击试验规定,为行业内高强钢冲击性能检测的通用温度控制标准,可有效避免温度波动对冲击功(冲击力)测量结果的干扰;同时试样安装时需确保缺口对准冲击锤冲击方向,防止安装偏差导致检测数据失真。

2.3 硬度性能表征

硬度性能表征用于检测焊接接头不同区域的硬度分布,反映接头组织均匀性,采用HVS1000型显微硬度仪完成检测,检测流程遵循GB/T4340.1-2024标准要求。将焊接试样沿横截面切开,经过打磨、抛光、腐蚀处理,露出焊缝区、热影响区及母材区,确保观察面平整、无划痕,便于精准定位检测点^[4]。检测时采用 0.3kg 试验载荷,载荷保持时间为 15s ,在焊缝中心、热影响区及母材区分别选取5个检测点,测量各点硬度值,取平均值作为对应区域的硬度指标,绘制硬度分布曲线如图1所示。为清晰呈现硬度性能表征的核心内容,便于实操参考,整理形成如下表格,明确表征项目、检测方法及判定指标,表格内容简洁明了,贴合实操需求:

表1 表征项目、检测方法及判定指标表

表征项目	检测方法	判定指标(\geq)
焊缝区硬度	HVS1000型显微硬度仪, 0.3kg 载荷, 15s 保载	280HV
热影响区硬度	HVS1000型显微硬度仪, 0.3kg 载荷, 15s 保载	260HV
母材区硬度	HVS1000型显微硬度仪, 0.3kg 载荷, 15s 保载	250HV

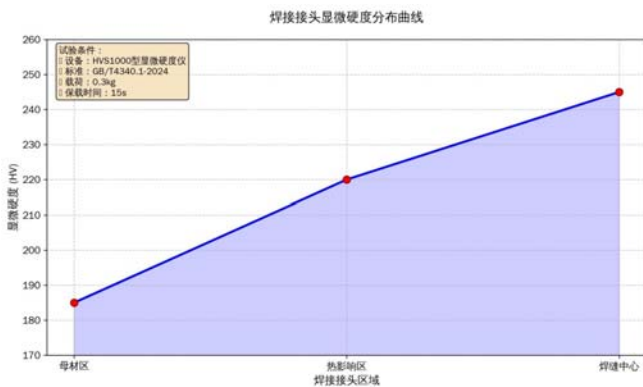


图1 曲线图

3 焊接参数与焊接性能的关联性调控

3.1 焊接电流对性能的调控规律

焊接电流作为核心参数,其变化直接影响接头力学性能、显微组织及缺陷产生概率,关联性调控需以性能指标为目标,实现电流参数的精准匹配。电流参数过低时熔深不足,焊缝与母材未实现有效熔合,接头抗拉强度显著下降,易出现夹渣、未焊透等缺陷,显微组织中未熔合区域,组织过渡不均匀,硬度分布差异较大。关联性调控过程中需结合熔深公式与热输入量计算,将电流参数控制在240A-260A的最优区间,确保熔深与热输入量处于合理范围,使接头力学性能与显微组织达到最优状态。

3.2 焊接电压对性能的调控规律

焊接电压与电流协同作用,其变化通过影响电弧长度与熔宽,间接调控接头性能与缺陷状态,关联性调控需确保电压与电流的匹配精度,避免参数失衡导致性能下降。电压参数过低时电弧长度过短,熔宽不足,焊缝成形狭窄,易出现夹渣缺陷,接头受力面积减小,抗拉强度下降,显微组织中焊缝区宽度较窄,组织分布不均匀,硬度偏高。电压参数过高时电弧长度过长,飞溅量增加,焊缝余高不足导致接头表面平整度下降,易出现气孔缺陷,电弧燃烧不稳定造成焊缝成形不均,显微组织中未熔合区域,硬度分布不均,韧性下降。关联性调控过程中需结合熔宽公式,将电压参数控制在24V-26V区间,确保熔宽与熔深的比值处于1.3-1.4的最优范围,实现焊缝成形与性能的协同提升^[5]。

3.3 焊接速度与热输入的协同调控规律

焊接速度通过影响热输入量,直接调控接头显微组织与力学性能,同时影响焊接效率与缺陷产生概率,关联性调控需兼顾性能与效率,实现速度参数的合理匹配。速度参数过低时热输入量过大,热影响区晶粒粗大导致接头韧性下降,焊缝区组织出现粗大马氏体,硬度升高但塑性不足,易引发开裂缺陷,焊接效率过低也会增加生产成本。速度参数过高时热输入量不足,熔深与熔宽均无法达到要求,焊缝与母材未实现有效熔合,易出现未焊透、未熔合等缺陷,接头抗拉强度显著下降,显微组织中未熔合区域,组织过渡不均匀,无法满足服役要求。关联性调控过程中需结合热输入量公式,将速度参数控制在0.5m/min-0.7m/min区间,确保热输入量稳定在190J/mm-210J/mm,实现显微组织与力学性能的最优匹配。

4 结语

本文围绕高强钢机械构件焊接工艺参数优化与性能表征开展实操性研究,通过单因素调控与协同优化结合的方式,明确焊接电流、电压、速度及热输入的最优区间,建立参数与性能的关联关系,提出切实可行的性能表征方法。研究表明,合理调控焊接参数可有效提升接头综合力学性能,避免焊接缺陷产生。可为高强钢机械构件焊接生产提供技术指导,确保构件焊接质量符合服役要求。

[参考文献]

- [1]刘晟,常云峰,白海明,等.焊接工艺参数对Q690D高强钢多层多道焊缝缺欠的影响[J].电焊机,2023,53(10):36-44.
- [2]王成霞,邱春彦,张伟.综采液压支架用Q550低焊接裂纹敏感性高强耐蚀钢的焊接工艺[J].焊接技术,2021,50(5):74-76.
- [3]赵小康,张海燕,屈海东,等.Q355B钢与Q345B钢MAG焊接接头力学性能对比研究[J].金属加工(热加工),2024(12):30-33.
- [4]韩蓬辉,郭超,刘娇.基于机械手焊接的不锈钢墙板制造工艺优化与效率提升研究[J].河南科技,2025,52(17):29-34.
- [5]邓立军,李庆松,董人瑞.不锈钢围护结构自动焊接机械臂的稳定控制技术研究[J].自动化仪表,2024,45(11):74-78,84.