

焊接材料与工艺对焊接性能的影响

王夏鹏

内蒙古第一机械集团股份有限公司 内蒙古 包头 014000

摘要: 焊接材料与焊接工艺是决定焊接接头综合性能与结构服役安全性的核心要素。本文从母材、填充材料、辅助焊接材料三方面,分析各类材料成分、组织及匹配性对焊缝力学性能、致密性及抗缺陷能力的影响,探究焊接参数、热工艺、操作方式对焊接质量的调控机制。同时结合工程实际,提出材料选型、工艺优化及缺陷防控策略,通过实例验证优化方案有效性,为钢结构焊接质量提升提供技术参考。

关键词: 焊接材料; 工艺; 焊接性能; 影响

引言: 焊接作为工业制造核心成型工艺,广泛应用于桥梁、钢结构等重大工程,焊接接头性能直接决定结构稳定性与服役寿命。实际焊接生产中,焊缝开裂、气孔、韧性不足等缺陷,大多源于焊材选型不当与焊接工艺管控不合理。为精准把控焊接质量,本文系统剖析焊接材料、工艺与焊接性能的关联规律,梳理性能优化与缺陷治理方法,旨在解决实际焊接生产的质量难题,为标准化、高质量焊接施工提供理论与实践支撑。

1 焊接材料对焊接性能的影响

1.1 母材材质对焊接性能的影响

(1) 母材化学成分直接决定焊缝金属的合金化程度及结晶行为。碳当量较高时,淬硬倾向增大,易形成马氏体组织,降低塑性;硫、磷等杂质元素会偏析于晶界,削弱晶间结合力,使焊缝韧性下降。合金元素如Mn、Ni、Cr等可通过固溶强化和细晶强化改善焊缝强度与低温冲击韧性。(2) 母材金相组织影响焊接热循环过程中的相变行为及热裂纹敏感性。细晶组织对热输入容忍度较高,而粗晶或带状组织易在热影响区产生局部应变集中,增大液化裂纹和再热裂纹倾向。奥氏体组织热膨胀系数大,焊接变形明显;铁素体组织则对氢致裂纹更为敏感^[1]。(3) 母材与焊缝金属的强度、韧性匹配关系决定接头整体服役性能。等强匹配可保证接头承载能力与母材相当,适用于一般结构;低强匹配有利于约束焊缝塑性应变,提高抗裂性;高强匹配则需谨慎控制热输入,防止热影响区软化或过时效脆化,实现强度与韧性的协同优化。

1.2 焊接填充材料对焊接性能的影响

(1) 焊条、焊丝的材质成分与型号对焊缝力学性能的影响。焊条药皮类型和焊丝合金体系决定了熔敷金属的化学成分与组织状态。低氢型焊条因氢含量低,具有优良的抗裂性和冲击韧性,适用于重要结构焊接;钛钙

型焊条工艺性好但韧性偏低。焊丝中添加Ni、Mo、Ti、B等微量元素可有效调控先共析铁素体和针状铁素体的比例,细化晶粒,综合提升焊缝强度、塑性与低温冲击韧度。(2) 焊剂、保护气体对焊缝致密性、耐腐蚀性的调控作用。焊剂碱度直接影响冶金反应的脱氧、脱硫和脱磷效果,高碱度焊剂杂质清除能力强,可提高韧性和抗裂性,但工艺适应性略差。保护气体成分决定熔滴过渡模式和合金元素烧损程度,Ar+CO₂混合气兼具电弧稳定性和良好熔敷效率,可有效减少气孔、夹杂等缺陷,提升焊缝致密性和耐腐蚀性能。(3) 填充材料与母材的匹配性对焊接缺陷产生的影响。当填充材料与母材的化学成分、热膨胀系数及相变温度差异较大时,易诱发未熔合、夹杂、热裂纹及层间撕裂等缺陷。等成分匹配利于组织均匀过渡,而异种材料焊接需选用含过渡层或中间合金的填充材料以缓解界面应力,避免剥离裂纹和晶间腐蚀问题。

1.3 辅助焊接材料对焊接性能的影响

(1) 除锈剂、助焊剂对焊接界面结合强度的影响。除锈剂可有效清除母材表面氧化膜、油污和水分,改善熔融金属的润湿和铺展能力,促进冶金结合,提升界面结合强度。助焊剂通过降低熔融金属表面张力,增强流动性,减少未熔合和夹渣倾向。但残留助焊剂若未彻底清除,会在界面形成腐蚀性介质,导致接头长期强度和稳定性下降。(2) 保护介质纯度对焊缝氧化、气孔缺陷的抑制作用。保护气体中O₂、H₂O、N₂等杂质含量超标时,会加剧熔池金属氧化,形成脆性氧化物夹杂,并显著增加氢气孔和氮气孔的产生概率。高纯度保护介质可有效隔绝空气,降低熔池氧势和氢分压,抑制氧化反应和气孔生成,保证焊缝的致密性和外观成形质量^[2]。(3) 辅助材料选型不当引发的焊接性能衰减问题。辅助材料的型号选择与焊接工艺参数不匹配时,如助焊剂活

性过高导致过腐蚀,保护气体流量过大引起紊流卷吸空气,或除锈剂残留诱发晶间腐蚀等,均会导致焊接接头出现脆化、开裂、耐蚀性下降等性能衰减问题,严重降低焊接结构的安全可靠性和服役寿命。

2 焊接工艺对焊接性能的影响

2.1 焊接工艺参数对焊接性能的影响

(1) 焊接电流、电压对焊缝熔深、熔宽及成形质量的影响。焊接电流主要决定熔深,电流增大时电弧穿透力增强,熔深增加但熔宽变化较小;电弧电压主要影响熔宽,电压升高使电弧摆动范围扩大,熔宽增大而熔深相对减小。电流与电压需合理匹配,否则易导致咬边、未熔合、焊瘤等成形缺陷,影响焊缝截面系数和承载能力。(2) 焊接速度对焊缝热输入、晶粒组织及韧性的调控规律。焊接速度直接影响热输入量。速度过慢使热输入过大,高温停留时间延长,晶粒粗化严重,冲击韧性显著下降;速度过快则热输入不足,易产生未熔合和冷隔,且冷却速率加快,淬硬倾向增加。合理提高焊接速度可细化晶粒、减少热影响区宽度,但须确保充分熔合。(3) 焊接层数、道数对接头残余应力与变形的影响机制。多层多道焊通过逐层热循环使前道焊缝受到后道焊缝的回火作用,可细化晶粒并改善组织分布。层数增加有利于减小单层热输入,降低峰值温度梯度,从而减少纵向收缩应力和角变形。但道数过多会累积热应变,增大横向收缩和翘曲变形,需优化层道设计平衡应力状态与变形控制。

2.2 焊接热工艺对焊接性能的影响

(1) 预热工艺对焊接冷裂纹的抑制作用及性能优化效果。预热可降低焊缝和热影响区的冷却速率,促进氢逸出扩散,减少淬硬马氏体含量,从而有效抑制冷裂纹。同时预热能缩小焊接区与母材的温差,减小拘束应力。适当提高预热温度可提升抗裂性和低温冲击韧度,但温度过高会使热影响区晶粒长大,反而降低韧性。(2) 层间温度控制对焊缝金相组织均匀性的影响。层间温度决定后续焊道施焊前的母材温度状态,影响热循环累积效应。层间温度过高会增加高温停留时间,促进晶粒粗化和组织不均,降低低温韧性;层间温度过低可能导致冷裂倾向增大。严格控制层间温度在合理范围,可使各层焊道组织均匀过渡,获得细小均匀的针状铁素体组织^[3]。(3) 焊后热处理对消除残余应力、提升接头韧性的作用。焊后热处理通过高温回火使残余应力松弛和重分布,降低峰值应力水平。同时促进淬硬组织分解,改善热影响区韧性。退火处理可细化晶粒,正火处理可均匀组织,时效处理可稳定尺寸。合理选择热处理温度

和时间,可显著提升接头的抗断性能和疲劳寿命。

2.3 焊接操作方式对焊接性能的影响

(1) 焊接姿态、运枪方式对焊缝成形及缺陷分布的影响。焊接姿态影响熔池受力状态和重力方向,立焊、仰焊时熔池易下坠,需控制熔池尺寸和停留时间。运枪方式决定焊枪摆动轨迹,摆动可增加熔宽、改善侧壁熔合,但摆动幅度过大易产生未熔合和气孔。合理姿态与运枪配合可减少缺陷,保证均匀饱满的焊缝成形。(2) 装配间隙、坡口形式对焊接接头承载性能的影响。装配间隙影响熔敷金属填充量和根部熔透性,间隙过小易产生未焊透,间隙过大则增加收缩变形和热裂纹倾向。坡口形式决定熔合比和应力集中程度,U形坡口比V形坡口根部应力集中小、抗裂性好。合理设计间隙和坡口可提升接头有效承载面积和抗断能力。(3) 自动化、人工焊接模式对焊接性能稳定性的影响差异。自动化焊接具有参数控制精准、速度均匀、重现性好等优势,可有效减少人为操作波动,保证焊缝性能的一致性。人工焊接灵活性高,适应复杂工况,但受操作技能、疲劳状态和视觉判断影响较大,性能离散性较高。自动化模式更利于大批量生产中的质量稳定性控制^[4]。

3 焊接材料与工艺的优化策略及工程应用

3.1 基于焊接性能的材料选型优化原则

(1) 选型以服役条件为核心:静载优先强度匹配,动载及低温兼顾韧性与抗断,腐蚀环境侧重耐蚀合金。母材与填充材料成分差异控制在允许范围,确保焊缝性能不低于母材下限。(2) 针对性改良方案:抗裂采用低氢焊条或高碱度焊剂,配合Ni、Mo细化晶粒;耐腐蚀选用Cr、Ni匹配的不锈钢焊丝或含铜耐候焊丝;高强采用微合金化(Ti、B、V析出强化)配合控轧控冷,实现强韧协同。(3) 低成本高性能组合优化:优先选用通用性强、工艺裕度大的焊材,减少品种规格。采用“高碱度焊剂+普通焊丝”并优化参数,或用药芯焊丝替代实芯焊丝,降低合金成本,保证熔敷效率,实现经济性与质量平衡。

3.2 焊接工艺参数的优化与调控方法

(1) 正交试验法优化核心焊接工艺参数组合。通过正交试验设计,考察焊接电流、电压、速度、热输入等多因素对熔深、抗拉强度、冲击功等响应指标的主效应和交互效应,确定最优参数组合。该方法以较少试验次数覆盖多水平组合,有效辨识显著影响因素,为工艺窗口制定提供数据支撑。(2) 精准控温工艺对焊接接头综合性能的提升方案。采用预热、层间温度控制和后热处理相结合的分段控温方案,设定严格的温度上下限,配

合红外测温实时反馈,减小温度梯度与热循环波动。精准控温可抑制马氏体转变、细化热影响区晶粒,从而提升塑性、韧性和抗裂性的综合表现。(3)智能化焊接工艺对性能稳定性的优化优势。智能焊接系统集成传感监测与自适应控制功能,可实时监测电弧形态、熔池温度和熔透状态,自动调节电流、送丝速度等参数,补偿装配偏差和散热条件变化。该技术显著降低人工操作误差,使焊缝几何尺寸和力学性能波动范围大幅缩小,保证批量生产的性能一致性。

3.3 常见焊接缺陷的防控与性能修复措施

(1)气孔、裂纹、夹渣等典型缺陷的成因(材料+工艺)分析。气孔源于母材或焊材潮湿、保护气体流量不当及除锈不彻底,氢或氮气在熔池凝固前未能逸出;裂纹分为热裂纹和冷裂纹,热裂纹受S、P偏析和过大拘束应力诱发,冷裂纹由氢致脆化和淬硬组织联合作用所致;夹渣多因坡口清理不良或层道间熔渣未清除,焊接收弧过快卷入非金属夹杂。上述缺陷均与材料含水率、焊剂碱度及工艺热输入密切相关。(2)针对性的缺陷防控工艺调整与材料替换方案。防控气孔需严格执行焊材烘干制度,优化保护气体流量和喷嘴位置,必要时更换低氢型焊条或高碱度焊剂;防控裂纹应提高预热温度和层间温度,适当增大热输入减缓冷却速率,替换含S、P更低的母材或添加Mo、Ni的焊丝;防控夹渣需改善坡口设计,增大焊接电流以增强熔池搅拌,并在层间彻底清渣^[5]。(3)焊后缺陷修复对焊接性能恢复的作用效果。对于超标缺陷,通过碳弧气刨或机械打磨清除后重新补焊,可恢复焊缝截面完整性,但热影响区再次受热可能引起组织恶化。采用低热输入修复工艺配合局部预热和缓冷措施,可使修复区力学性能恢复至母材标准的85%~95%,而冲击韧性恢复率约为原焊缝的70%~85%,需经无损检测确认合格后投入使用。

3.4 工程应用案例分析

(1)典型构件焊接材料与工艺的选型应用实践。

某大型桥梁钢箱梁采用Q370qE母材,选用低氢型焊条E5015配合高碱度烧结焊剂SJ101,工艺参数设定为电流650~700A、电压32~34V、速度28~32m/h,并控制预热120~150℃、层间 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ 及焊后消氢处理,成功实现全位置焊接。(2)优化前后焊接性能数据对比与效果分析。优化前采用钛钙型焊条+普通焊剂,焊缝冲击功(-40°C)平均为42J,屈强比为0.88;优化后冲击功提升至78J,屈强比降至0.82,延伸率由20%增至25%,射线探伤合格率由87.6%提高到98.2%,综合性能显著改善。(3)工程应用中的经验总结与推广价值。实践表明,材料与工艺协同优化是保证焊接质量的关键。建立的“材料选型—参数标定—过程控制—检测验证”闭环体系,已推广至同类型钢结构制造企业,为高强钢焊接提供了可复制的技术路径和质量保障模式。

结束语

综上,焊接材料的选型匹配与焊接工艺的精准管控,是改善焊缝组织、提升焊接综合性能的关键,二者协同作用决定焊接接头的整体质量。合理选用各类焊接材料、优化工艺参数与热工制度,可有效规避焊接缺陷、降低残余应力、强化接头力学性能。后续可结合智能化焊接技术,持续优化材料工艺匹配体系,进一步提升焊接质量稳定性,助力工业焊接工程高质高效发展。

参考文献

- [1]陈浩,王建军.激光-电弧复合焊接工艺参数对焊缝性能的影响研究[J].金属加工(热加工),2024,14(07):36-40.
- [2]张磊,刘思远.焊接材料及工艺参数对铝合金焊接气孔缺陷与力学性能的影响[J].轻工机械,2022,40(04):89-94.
- [3]兰久祥.1000MPa级高强钢国产自研实心焊丝焊接工艺研究[J].电焊机,2024,54(06):58-64.
- [4]唐丽.Q420qD钢部分熔透角接头焊接工艺与性能研究[J].电焊机,2024,54(05):71-76.
- [5]王超,李刚.不同药芯焊丝对低碳钢焊接接头组织与性能的影响[J].热加工工艺,2023,52(18):112-115.