

焊接工艺参数优化对焊缝成形质量影响分析

陆 忠

中电建宁夏工程有限公司 宁夏 银川 750000

【摘要】：焊缝成形质量直接关系到焊接结构的强度、稳定性与使用寿命。焊接电流、电弧电压、焊接速度、热输入等工艺参数对熔池形态、焊缝宽度、余高、熔深及缺陷形成具有重要影响。围绕焊接工艺参数优化与焊缝成形质量之间的关系展开分析，探讨不同参数变化对焊缝外观、内部质量和力学性能的作用规律，提出参数匹配与优化控制思路，为提升焊接质量、降低焊接缺陷率、促进焊接工艺稳定化提供参考。

【关键词】：焊接工艺参数；参数优化；焊缝成形；焊接质量；热输入

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.012

引言

焊接作为金属结构制造中的关键连接技术，其成形质量直接影响构件的承载能力和服役安全。实际生产中，焊接电流、电压、焊接速度及热输入控制不当，容易导致咬边、未焊透、焊瘤、气孔等质量问题。开展焊接工艺参数优化研究，有助于明确参数变化对焊缝成形的影响规律，提升焊接过程稳定性和产品质量，为工程焊接工艺制定提供依据。

1 焊接参数与焊缝成形的关联基础

1.1 焊接电流对熔深与余高的影响

焊接电流是决定电弧热量集中程度和母材熔化能力的重要参数，对焊缝熔深、余高以及截面形态具有直接影响。电流偏小时，电弧能量不足，熔池温度难以达到稳定熔化状态，母材与填充金属之间的熔合深度有限，容易形成熔深不足、根部未焊透等问题，使焊缝截面呈现浅而窄的形态，接头承载能力受到削弱。电流逐渐增大后，电弧穿透力增强，热量向焊件厚度方向传递更加充分，熔池金属流动性提高，焊缝熔深随之增加，有利于改善坡口根部熔合效果，提高焊接接头的整体连接强度。

电流过大时，熔池温度升高过快，液态金属体积明显增加，熔池边缘稳定性下降，焊缝表面可能出现余高过大、焊瘤、烧穿或咬边等成形缺陷。余高并非越高越好，适当余高能够增强焊缝截面承载面积，但余高过大容易造成应力集中，使焊缝与母材过渡不平顺，影响后续加工和服役安全。电流参数优化应结合焊件厚度、坡口形式、焊丝直径和焊接位置进行综合确定。对于厚板焊接，电流需满足根部熔透要求，避免形成未焊透缺陷；对于薄板焊接，则应控制电流强度，防止局部过热、烧穿或变形。坡口角度较大时，可适当调整电流以保证侧壁熔合充分；焊丝直径较大时，也需匹配相应电流范围，使熔滴过渡稳定。合理控制电流，可使熔深达到设计要求，将余高保持在合理范围内，保证焊缝截面形态饱满、过渡平滑、熔合充分。

1.2 电弧电压对焊缝宽度的调节

电弧电压主要影响电弧长度、弧柱扩展范围以及热量在焊

缝表面的分布状态，是调节焊缝宽度和表面成形的重要参数。电压偏低时，电弧长度较短，电弧燃烧空间不足，热量集中在较小区域内，焊缝宽度往往偏窄，焊道表面容易呈现凸起明显、两侧铺展不足的形态。低电压状态下，熔滴过渡稳定性也会受到影响，飞溅增多，焊缝边缘成形不均，局部位置可能出现熔合不良^[1]。电压适当提高后，电弧长度增加，热量横向扩散范围扩大，熔池表面铺展能力增强，焊缝宽度随之增加，焊趾与母材之间的过渡更加自然，外观成形质量得到改善。

电压过高时，电弧稳定性下降，弧柱摆动范围扩大，热量分散明显，熔池受力不均，容易导致焊缝过宽、余高降低、边缘咬边以及气孔倾向增加。过宽的焊缝会扩大热影响区，使晶粒粗化和变形风险上升，不利于接头性能稳定。电弧电压的优化不能单独进行，需要与焊接电流、焊丝伸出长度和焊接速度协调匹配，在保证电弧稳定燃烧的基础上，使焊缝宽度符合工艺要求，避免因电压失衡造成焊道铺展不足或过度扩散。

1.3 焊接速度对熔池稳定性的制约

焊接速度决定单位长度焊缝所获得的热输入量，对熔池存在时间、液态金属凝固过程和焊缝连续性具有明显制约。速度过快时，电弧在单位焊缝长度上的停留时间缩短，母材吸收的热量不足，熔池体积偏小，液态金属尚未充分铺展便快速凝固，容易出现焊缝窄小、熔深不足、未熔合和焊道间断等问题。快速焊接还会使熔池后方金属补充不足，焊缝表面形成尖锐纹路或不规则波纹，降低焊缝外观均匀性。速度适中时，电弧热量输入与熔池金属流动保持协调，熔池前端熔化、后端凝固过程相对平稳，焊缝表面纹理清晰，宽度和余高变化较小，有利于形成连续、均匀、致密的焊缝。

速度过慢时，单位长度热输入增加，熔池停留时间延长，液态金属体积过大，熔池边界难以保持稳定，可能造成焊缝过宽、余高塌陷、烧穿、夹渣或较大焊接变形。过慢速度还会扩大热影响区，使接头组织性能发生不利变化。焊接速度的确定应围绕熔池稳定控制展开，并根据板厚、坡口间隙、焊接层数和热输入限制进行动态调整。板厚较大时，焊接速度不宜过快，

以免热量输入不足,造成根部未焊透或侧壁未熔合;板厚较小时,应适当提高速度,减少热量集中导致的烧穿和变形。坡口间隙较大时,需要控制行进速度,使填充金属能够充分覆盖间隙并形成均匀焊道。多层多道焊接中,还应考虑层间温度和前一道焊缝成形状态,避免速度失衡造成焊道搭接不良、夹渣或局部凸起。合理控制焊接速度,可使熔池始终处于可控流动状态,保证焊缝成形连续、尺寸稳定,并减少内部缺陷。

2 参数失配下的焊缝质量偏差

2.1 热输入失衡引发的成形缺陷

热输入是焊接电流、电弧电压和焊接速度共同作用形成的综合结果,其大小直接决定焊缝金属熔化程度、熔池尺寸和冷却速度。热输入偏低时,焊接区获得的能量不足,坡口两侧母材不能充分熔化,填充金属与母材之间难以形成稳定冶金结合,焊缝内部容易出现未焊透、未熔合等缺陷。此类缺陷通常隐藏在焊缝根部或侧壁位置,外观上不一定明显,但会削弱接头有效承载面积,在受拉、受弯或交变载荷条件下形成裂纹扩展源。

热输入过高时,熔池体积增大,液态金属停留时间延长,焊缝表面容易出现下塌、焊瘤、烧穿和边缘咬边等问题。过大的热输入还会扩大热影响区,使晶粒粗化,降低接头韧性,并增加焊接变形量。薄板焊接中,热输入过高更容易导致局部塌陷和变形失控;厚板焊接中,热输入不足则会造成层间熔合不充分。热输入控制需要结合材料厚度、坡口尺寸、焊接层道和焊接方法进行协调,使熔池既能满足充分熔合要求,又能避免过度熔化带来的外观缺陷和组织性能劣化。

2.2 多参数耦合造成的质量波动

焊缝成形质量并非由单一参数决定,电流、电压、焊接速度、焊丝伸出长度、保护气体流量和坡口间隙之间存在明显耦合关系。某一参数发生变化后,其他参数即使保持不变,也可能引起焊缝尺寸和熔池状态的连锁波动。电流增大能够提高熔深,但若电压和焊接速度没有同步调整,熔池金属可能因热量集中而出现余高异常、边缘过渡不平整等问题^[2]。电压提高能够改善焊缝铺展效果,但在焊接速度偏慢的情况下,过宽的热作用范围会导致焊缝宽度失控,热影响区扩大。

焊接速度加快可以降低单位长度热输入,但若电流不足,熔池补充能力下降,焊缝连续性和根部熔合质量会受到影响。多参数耦合还会导致同一工艺参数在不同板厚、不同焊接位置和不同坡口条件下表现出不同结果,使工艺稳定性难以单靠经验判断。实际生产中,参数调整缺少系统匹配时,焊缝表面波纹、宽度、余高和熔深会产生较大离散性,同批次焊件之间质量一致性下降。参数优化应重视变量之间的匹配关系,通过试验数据、成形尺寸检测和缺陷分析确定合理组合,减少参数相互干扰造成的质量波动。

2.3 工艺控制薄弱导致的性能下降

工艺控制薄弱主要表现为参数设定不规范、焊前准备不足、焊接过程监测不连续和焊后检验反馈不及时,这些因素会使焊缝质量从外观成形逐渐影响到接头力学性能。焊前坡口清理不彻底时,油污、铁锈和氧化皮会进入熔池,增加气孔、夹渣和未熔合风险;装配间隙不稳定时,焊缝熔敷金属分布不均,局部位置可能出现熔深不足或余高突变。焊接过程中,电流、电压波动未被及时发现,会使熔池受热状态反复变化,造成焊道形貌不规则、焊趾过渡生硬和内部组织不均。

保护气体流量控制不当时,熔池金属容易受到空气侵入,形成氧化夹杂和气孔,降低焊缝致密性。层间温度控制不到位时,多层多道焊中的组织转变和残余应力分布会受到影响,导致接头硬度异常、韧性下降或裂纹敏感性增加。焊后检验若只关注表面缺陷,未结合无损检测和力学性能验证,隐蔽性缺陷难以及时暴露。工艺控制需要贯穿焊前、焊中和焊后各环节,使参数记录、过程监测、质量检验和缺陷反馈形成闭环管理,避免成形偏差进一步转化为强度、塑性和疲劳性能下降。

3 参数优化与成形质量提升路径

3.1 正交试验下的参数组合筛选

正交试验能够在多因素、多水平条件下减少试验次数,提高焊接工艺参数筛选的针对性。焊接参数优化过程中,可将焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊丝伸出长度等作为主要考察因素,并根据材料厚度、焊接方法和坡口形式设置不同水平,通过正交表安排试验组合。试验完成后,需要对焊缝宽度、余高、熔深、焊趾过渡状态以及内部缺陷情况进行测量与记录,使参数变化与成形质量之间形成对应关系。

极差分析可用于判断各因素对焊缝成形指标的影响强弱,方差分析能够进一步识别显著性因素,避免仅凭经验选择参数造成结果偏差。在参数组合筛选中,不能单独追求某一项指标最优,熔深增加可能伴随余高异常或焊缝过宽,因此需要对外观成形、尺寸稳定性、缺陷率和力学性能进行综合评价。通过正交试验获得的优选组合,可使焊缝截面形态更加协调,减少盲目调参带来的材料浪费和返修成本。参数筛选结果还可作为焊接工艺规程制定的依据,为不同板厚、不同焊接位置和不同结构形式提供可复制的参数范围。

3.2 过程监测下的焊缝质量控制

过程监测强调对焊接运行状态进行连续跟踪,使焊缝质量控制由焊后检验转向焊接过程控制。焊接过程中,电流、电压、送丝速度、焊接速度、保护气体流量和层间温度均会影响熔池状态,任何参数波动都可能引起焊缝尺寸变化或内部缺陷。通过电信号采集装置、焊缝跟踪系统、红外测温设备和视觉检测装置,可实时获取电弧稳定性、熔池形态、焊道偏移和表面成形信息。

当电流出现异常波动时，系统能够判断熔滴过渡是否稳定；当焊缝轨迹偏离坡口中心时，可及时调整焊枪位置，避免单侧未熔合或焊缝偏斜^[3-5]。温度监测能够控制层间热积累，防止过热造成组织粗化和变形增加。过程监测数据还可以与焊缝检测结果建立关联，用于分析缺陷产生的具体时段和参数条件。与单纯依赖人工观察相比，过程监测能够提高质量控制的及时性和准确性，减少隐蔽缺陷在焊后集中暴露的风险。通过参数记录、异常报警、动态调节和质量追溯，可使焊接过程保持稳定状态，提升焊缝成形的一致性。

3.3 智能焊接下的成形精度提升

智能焊接将传感检测、自动控制、数据分析和机器人执行结合起来，为焊缝成形精度提升提供了新的技术路径。在复杂结构焊接中，构件装配误差、坡口间隙变化和焊接热变形会使固定参数难以满足全过程成形要求。智能焊接系统可通过视觉传感识别坡口边缘、焊缝中心线和熔池轮廓，根据实时图像判断焊枪姿态与焊缝位置之间的偏差，并自动调整焊接轨迹。对于间隙不均或焊缝转角区域，控制系统能够根据熔池宽度、熔

深需求和焊道高度变化，动态修正焊接速度、送丝量和摆动幅度，使填充金属分布更加均匀。

数据模型还可利用历史焊接参数与质量检测结果进行学习，预测不同参数组合下的成形趋势，减少人工试错次数。机器人焊接具备轨迹重复精度高、运行稳定性强和抗疲劳能力突出的特点，适用于批量化生产中对焊缝尺寸一致性要求较高的场景。智能焊接并非简单替代人工操作，而是通过感知、判断和调节增强工艺执行精度，使焊缝宽度、余高、熔深和焊趾过渡更加稳定，降低因人为操作差异造成的质量离散。

4 结语

焊接工艺参数优化是提升焊缝成形质量的重要途径。焊接电流、电弧电压、焊接速度及热输入共同影响熔池状态、焊缝尺寸和接头性能。通过正交试验筛选参数组合，结合过程监测控制焊接波动，并引入智能焊接技术提高执行精度，可有效减少未焊透、咬边、焊瘤、气孔等缺陷，增强焊缝成形稳定性与质量一致性，为焊接结构安全服役和工艺标准化提供可靠支撑。

参考文献：

- [1] 闫旺,陈芙蓉,曹四龙,等.焊接空间位置对接头性能影响的研究进展[J].焊接学报,2025,46(10):132-144.
- [2] 陈严冬.钢节点焊缝缺陷相控阵超声检测参数优化[C]//中国智慧工程研究会.2025 可持续工程设计与实践经验交流会论文集.思欧工程技术有限公司勐腊分公司,;2025:94-96.
- [3] 赵海林,甘正红,张坤鹏,等.焊管焊缝成形及其对质量性能的影响机制研究[J].钢管,2025,54(05):56-62.
- [4] 黄荣,丁东红,梁炯洪,等.电弧增材制造成形控制研究进展与挑战[J].制造技术与机床,2025,(11):103-119.
- [5] 黄智泉,李长久,贺定勇,等.堆焊及热喷涂领域关键技术进展及应用[J].中国表面工程,2026,39(01):275-297.