

焊装作业中焊缝气孔、夹渣缺陷的检测与预防技术研究

赵学兵 翟 伟

山东唐骏欧铃汽车制造有限公司 山东 淄博 255000

摘 要：气孔与夹渣是焊装焊缝中十分常见的典型缺陷，这类问题会破坏金属接头的组织连续性，削弱构件力学性能，大幅缩短构件服役周期，长期以来都是焊接质量管控的核心关注点。本文结合现场作业实际，梳理主流焊接工艺与两类缺陷的形成规律，对比各类检测技术的应用特点，同时构建覆盖焊前、焊中、焊后的全流程防控方案，可为一线焊装质量管控提供有效参考。

关键词：焊缝气孔；夹渣缺陷检测；预防技术

引言：焊装是金属构件成型加工的重要工艺形式，焊缝质量直接决定构件整体使用可靠性与服役年限。气孔与夹渣会直接损害焊接接头结构，影响构件运行状态。目前各类检测与防控技术已得到普及，但不同作业场景下的缺陷管控效果仍存在差距。梳理技术原理与应用要点，能够帮助作业人员规范操作，切实改善焊缝成型品质。

1 焊装焊缝气孔与夹渣缺陷基础概述

1.1 焊装作业常用焊接工艺类型

现代化焊装作业体系依托金属连接成型相关技术完成构件拼接加工，不同焊接工艺的操作原理与作业特性存在明显区别，工艺选型也会间接影响焊缝成型质量，是诱发各类内部焊接缺陷的底层影响因素。目前工业焊装场景内应用范围较广的焊接技术包含电阻焊、电弧焊、钎焊以及激光焊几大主流类别。电阻焊依托电流流经焊件接触面产生的电阻热熔化母材金属，辅以压力作用完成构件连接，整体作业流程简洁，成型效率较高，多用于薄板类构件的批量焊装加工。电弧焊依靠电弧释放的热能熔化母材与填充材料，适配绝大多数金属材质与复杂结构焊件，凭借适配性优势成为现阶段焊装领域的核心工艺。钎焊作业过程中不会熔化基础母材，仅通过熔点更低的填充金属浸润焊件缝隙，实现构件的紧密结合，该工艺更适合精密小型构件的焊接处理。激光焊借助高密度激光束集中释放热能，局部熔化焊件材料完成焊接，热影响区域覆盖范围小，能够有效把控焊件形变幅度，适配高精度焊装生产场景。各类工艺的热源形式、作业参数与操作逻辑各有差异，焊接人员需结合焊件材质、结构规格及生产标准选定适配工艺，以此降低焊缝缺陷的出现概率。

1.2 焊缝气孔与夹渣缺陷形成机理

焊接成型阶段内部材料发生复杂的物理与理化反

应，各类不稳定作业条件都会干扰熔池凝固进程，促使气孔与夹渣两类高频缺陷生成，直接削弱焊接接头的整体结构性能。熔池内部气体元素是催生气孔缺陷的核心诱因，母材表层附着的杂质、填充材料内部含有的活性成分，会在高温焊接环境下发生分解反应并生成气态物质。金属熔液处于高温状态时具备较强的气体溶解能力，熔池温度出现快速回落之后，气体在金属溶液中的溶解能力会逐步下降，多余气体无法及时从凝固的熔池中向外析出，滞留于焊缝内部就会形成大小分布不均的空洞结构。夹渣缺陷的产生多和熔池净化程度不足相关，焊接过程中母材氧化产物、焊材反应生成物会构成固态非金属残渣。熔池凝固速度超出残渣上浮排出的速度时，这类固态杂质会直接封存于焊缝截面内部^[1]。两种缺陷的生成条件虽存在差异，但本质都源于熔池热力学状态失衡，把控熔池凝固节奏、净化焊接介质，能够从根源上抑制缺陷滋生，提升焊缝成型的完整度。

1.3 两类缺陷对焊装构件性能的影响

完整致密的焊缝组织结构是保障焊装构件综合使用性能的核心前提，焊缝内部潜藏的各类结构缺陷，会从多维度破坏金属接头的组织完整性，改变构件原本的力学承载状态。气孔与夹渣会直接占用焊缝内部有效承载面积，破坏金属基体组织的连续性，弱化焊接接头本身的抗拉强度与韧性指标。构件处于载荷作用状态时，缺陷周边会出现应力集中的现象，金属内部应力分布状态失去平衡，细微裂纹易从缺陷位置萌生并逐步延展扩散，大幅缩减焊装构件的服役使用周期。夹渣相较于气孔，对焊件的负面影响更为突出，杂质材质和母材金属的物化属性存在明显差异，二者结合界面稳定性较差，长期受力状态下极易出现结构分离的情况。疲劳工况的作业环境中，两类缺陷还会持续放大外力带来的损耗，降低构件抵御交变载荷的能力。针对焊缝缺陷造成的性

能损耗开展深层分析,能够帮助作业人员清晰认知缺陷危害程度,为后续检测手段优化、防控方案制定提供对应的理论支撑。

2 焊缝气孔与夹渣缺陷主流检测技术

2.1 焊缝表面缺陷检测方法

焊缝表层存在的破损、凹坑及浅层孔洞类缺陷,会直接暴露接头成型质量问题,表层检测也是焊后质量筛查工作中最基础的实施环节。现阶段适配于焊缝表层缺陷识别的技术手段种类丰富,可依照操作形式划分为目视筛查与辅助设备检测两大主流类别。直接目视筛查依靠操作人员感官能力,完成焊缝外观状态的直接判别,该类操作执行门槛较低,多用于初步筛查作业,能够快速甄别成型偏差较为明显的表层问题。单纯依靠人力判别存在局限性,常规作业条件下人工筛查对0.2mm以下细微开口缺陷的漏检率可达20%左右,无法适配高精度焊装构件的质检需求。现代化质检体系中会搭配专业化辅助设备完成深度检测,渗透检测与磁粉检测应用范围最为广泛。渗透检测依托特种渗透介质的附着特性,捕捉焊缝表层细微开口型缺陷,适配绝大多数金属材质焊件。磁粉检测仅适用于具备导磁属性的金属构件,利用磁化处理后的表面磁痕分布状态,定位浅层隐藏缺陷^[2]。多样化的表层检测方式能够覆盖不同作业场景的质检需求,完善表层缺陷筛查体系,为深层内部缺陷检测提供前期参考依据。

2.2 焊缝内部缺陷无损检测方法

隐藏于焊缝结构深层的气孔与夹渣缺陷无法通过外观筛查方式识别,此类隐蔽性缺陷会潜藏于构件内部,长期影响焊接接头的使用稳定性,无损检测技术就此成为内部缺陷筛查的核心手段。这类检测技术能够在不破坏焊件整体结构与使用性能的基础上,完成焊缝深层组织结构的全方位排查,适配高标准焊装构件的质检工作。现阶段焊缝内部缺陷检测常用的无损技术包含射线检测、超声波检测以及涡流检测几类主流方式。射线检测依托特殊射线介质穿透焊件结构,根据成像画面的明暗差异,判别焊缝内部气孔、夹渣的分布状态与缺陷位置,整体识别精度较高,适合结构厚实的焊接构件。超声波检测依靠声波在金属内部的传播反馈信号,依据信号波动特征判断内部组织异常,操作流程简便且整体适配性极强,现阶段约70%的常规生产场景都会优先选用该方式。涡流检测以电磁感应原理为基础,多用于捕捉焊缝表层及浅层内部的隐蔽缺陷,常作为辅助检测手段完善质检流程。依据焊件结构属性以及加工需求挑选适配的无损检测手段,能够深层次挖掘焊缝内部隐蔽缺陷,

助力工作人员完善整体质检流程。

2.3 检测技术适用场景与优劣对比

不同类型的焊缝检测技术依托专属工作原理搭建运行模式,各项技术自身的运行属性存在明显差异,所能适配的焊件结构、作业环境也有着明确的适用边界。表层检测相关技术整体操作门槛偏低,执行周期较短,更适合完成大批量焊件的初步筛查工作,针对开口型缺陷能够发挥理想检测效果,但无法识别深埋于焊缝内部的气孔与夹渣,质检覆盖范围存在局限性。各类无损检测技术的应用侧重点各有不同,射线检测能够精准定位深层缺陷,可直观呈现缺陷分布形态,复杂厚壁焊件的内部质检工作多依托该技术完成,设备操作流程相对繁琐。超声波检测整体运行成本更低,对封闭式内部缺陷具备良好识别能力,薄壁与中等厚度焊件均可适配,只是技术运用过程中对操作人员经验有着较高要求,人员熟练度差异会导致缺陷识别准确率出现15%-25%的波动。涡流检测更偏向浅层缺陷排查,整体作业效率出众,仅能作用于具备导电特性的金属焊件^[3]。深入剖析各类检测手段的优缺点与适配范围,能够帮助质检人员匹配最优检测方案,完善焊缝整体质检体系,全面提升焊装构件缺陷排查的整体质量。

3 焊缝气孔与夹渣缺陷全过程预防技术

3.1 焊前准备环节缺陷源头防控

焊接质量管控体系需要贯穿完整作业流程,前置化管控手段能够从根源减少杂质与不稳定因素,大幅降低气孔、夹渣两类缺陷的生成概率,也是现阶段高质量焊装作业的核心管控思路。前期准备阶段的防控工作主要围绕母材处理、焊材管理以及作业环境筹备三个核心层面展开。母材处理环节需要清理焊接区域表层附着的氧化物质、油污及各类杂质,此类附着物在高温焊接环境下会发生理化反应,生成气态与固态残渣,直接诱发焊缝缺陷。焊材储存与管理工作的落实需落实标准化管控模式,维持储存环境的干燥状态,规避焊材受潮氧化,受潮的焊接材料在熔池反应阶段会持续释放气体,增加气孔出现的概率。相关人员还需开展物料抽样核验工作,甄别物料品质优劣,从源头阻断不合格物料投入生产。工作人员还需要依据母材材质结构、焊接工艺属性完成焊材选型匹配,从基础物料层面优化焊接适配性。正式施焊之前,还需完成设备调试、坡口修整等基础工作,排查焊接设备运行隐患,规整焊件坡口形态,保障熔池成型质量^[4]。完善焊前阶段各项防控举措,能够最大程度剔除影响焊缝成型的负面因素,为后续施焊环节营造稳定的作业基础。

3.2 焊接过程工艺参数优化管控

施焊阶段是焊缝缺陷产生的高发阶段,各项工艺参数的匹配状态会直接干预熔池热力学反应与金属凝固节奏,参数配置失衡会直接引发气孔、夹渣等各类成型缺陷。焊接作业涉及的管控要素涵盖热输入量级、焊接行进速度以及电弧运行状态多项核心内容,各项参数之间相互制约,单一参数出现偏差便会打破熔池内部的平衡状态。热输入数值的把控尤为关键,热输入水平过低会造成熔池熔化不充分,残渣无法顺利排出金属熔液,热输入水平过高则会改变熔池凝固速率,气体析出流程受阻并滞留于焊缝内部。工作人员需要结合母材材质特性,匹配适配的焊接行进速度,维持熔池内部化学反应的稳定性,保障残渣与内部气体能够有序排出。作业人员需依托焊件厚度、焊材属性综合调配参数,规避参数错配引发的连锁负面反应。电弧长度的动态调控同样不容忽视,不合理的电弧状态会加剧焊接区域金属氧化程度,扩大缺陷滋生概率。在实际焊装作业中,精细化校准工艺参数区间,可将参数偏差导致的缺陷率降低40%左右,稳固焊接接头成型质量,完善全过程缺陷防控体系。

3.3 焊后质量追溯与持续改进

完整的缺陷防控体系不能仅局限于前期准备与施焊阶段,焊接作业结束后的质量复盘与信息梳理,能够补齐质量管控闭环,从长期层面优化缺陷防控整体水平。焊后质检环节筛查出的气孔与夹渣缺陷,都对应特定的作业诱因,对缺陷信息进行系统化梳理与溯源分析,能够挖掘施焊环节潜藏的各类质量隐患。相关工作人员可结合焊缝缺陷的分布位置、缺陷类型以及成型特征,反向拆解作业流程,锁定问题根源,涵盖物料处理、参数设定以及人员操作习惯等多个层面。完成溯源工作后,

需要对现有焊接作业模式做出针对性优化,修正不合理的操作方式,更新适配性较差的作业标准,以此降低同类缺陷重复出现的概率。长期积累缺陷溯源相关信息,逐步完善焊接作业质量数据库,同步归纳不同工况下缺陷诱发的共性特征与内在规律,丰富质量管控层面的数据储备,能够帮助作业团队深化对缺陷生成规律的认识。作业团队还可定期组织内部技术交流,共享缺陷治理经验与优化方案^[5]。依托积累的作业经验优化防控策略,逐步完善全流程防控体系,能够循序渐进提升焊装作业整体质量,实现焊接工艺稳定性的长效提升。

结束语:未来,可依托现场作业积累的实践数据,持续迭代焊缝缺陷检测方式,细化各类工艺的管控标准。结合不同焊件结构与生产工况调整防控策略,兼顾加工效率、生产成本与成品稳定性,让技术方案适配多元化生产需求。不断细化全流程质量管控细节,持续压缩缺陷产生空间,推动焊装加工领域的整体质量实现稳步提升。

参考文献

- [1]王德芬,姚军伟,张春兰,等.汽车焊接常见缺陷类型与预防措施研究[J].汽车测试报告,2025(24):76-78.
- [2]李萌,陈芳,熊俊.焊缝典型缺陷的超声波检测实验分析[J].水利建设与管理,2023,43(4):21-27.
- [3]于策.地铁车站钢管柱焊缝气孔缺陷无损检测技术[J].焊接技术,2024,53(02):113-116.
- [4]汪朝阳.某壳体组合环焊缝气孔缺陷的预防与修复[J].山西冶金,2022,45(04):186-188+193.
- [5]孙远,石端虎.T形接头角焊缝气孔缺陷空间位置数据的自动提取[J].盐城工学院学报(自然科学版),2023,36(02):25-31.