

轮斗挖掘机轮斗部焊接质量控制与缺陷预防技术研究

孙刚

中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司 辽宁沈阳 110066

摘要: 轮斗挖掘机作为大型连续采掘装备的重要组成部分,其轮斗部承担着物料切削、破碎和输送的关键任务,在强冲击、高磨损和复杂工况下运行,因此结构强度、焊缝致密性及疲劳寿命直接决定整机性能。轮斗部由多种厚板、异形构件及受力集中的焊接节点组成,焊接过程中极易出现裂纹、未熔合、未焊透、气孔、夹渣及焊接变形等缺陷,严重影响结构安全性。本文基于轮斗部结构特点,从材料属性、焊接工艺复杂性及缺陷形成机理等方面展开系统分析,探讨焊材选用、焊接参数设计、预热和后热制度、焊接顺序优化、应力控制及先进检测技术在焊接质量保证中的作用,构建了适用于轮斗部的焊接质量控制体系。同时结合现代焊接自动化、数字化监测及智能管理技术,对未来焊接缺陷预防与质量提升方向进行展望。研究表明,通过完善焊接工艺体系、严格过程控制与全过程质量管理,可显著降低焊接缺陷发生率,提升轮斗部焊缝可靠性,为大型连续采掘装备制造提供技术支持。

关键词: 轮斗挖掘机;轮斗部;焊接质量控制;缺陷预防;高强钢

引言

轮斗挖掘机在大型露天矿山、堆取料系统和基础设施工程中广泛应用,其运行效率和工作可靠性对整个工程系统具有决定性作用。轮斗部是挖掘机中直接参与物料切削、破碎及输送的核心装置,需承受冲击载荷、循环弯曲载荷、扭矩和长期磨损等多重作用,因此对焊接结构的整体强度、疲劳性能与耐磨性提出了更高要求。轮斗部通常由高强度低合金钢、耐磨钢等构件通过多焊缝连接建成,结构曲面复杂、板厚差异明显、焊缝空间交错繁密,使其焊接工艺设计和质量控制呈现高难度、高风险的特点。焊接缺陷一旦产生,不仅会削弱接头承载能力,还易成为疲劳裂纹萌生源,继而导致组件断裂或整机停机事故,带来严重经济与安全风险。因此,从结构、材料、工艺和管理多方面构建系统化的焊接质量控制体系,减少焊接缺陷发生,提升焊缝可靠性,是提升轮斗部制造质量的关键。本文将围绕轮斗部焊接特点、缺陷类型、形成机制以及控制与预防技术进行系统阐述,以期工程实践提供可操作的技术路径。

作者简介: 孙刚(1986.02-)男,满族,辽宁桓仁,本科,工程师,研究方向:露天矿用快速移置式带式输送机研究与工程建设、紧凑型轮斗挖掘机轮斗部制造与安装关键技术。

一、轮斗部结构与焊接工艺需求分析

(一) 轮斗部结构组成与受力特点

轮斗部由轮体、斗盘、斗齿座、隔板、侧板及加强板等构成,各构件通过多道焊缝连接形成整体空间结构,其受力路径复杂,焊缝大多位于应力集中的关键部位。在运行过程中,斗齿切削物料过程中产生的冲击载荷作用于斗盘与齿座连接区域,而轮体结构在旋转过程中承受离心力、弯曲力、扭矩和物料重力的综合作用,使得焊缝在长时间交变载荷下处于持续高应力环境。焊缝易在焊趾、焊根或焊缝交汇处产生疲劳裂纹,尤其在存在几何缺口或质量缺陷情况下,裂纹扩展速度明显加快。此外,轮斗部结构刚度大、焊接约束强,使得焊接过程中产生的大量残余应力无法有效释放,进一步增加了裂纹萌生风险。因此,轮斗部结构特点决定了其焊接工艺需高度关注焊缝疲劳强度、抗裂性及焊接应力控制。

(二) 轮斗部材料特性与焊接性要求

轮斗部通常采用高强度低合金结构钢及耐磨钢,这些材料虽然具有高屈服强度和优异抗冲击能力,但碳含量相对较高,焊接时易出现淬硬组织,导致冷裂纹或脆化倾向增强。耐磨钢中含有较多合金元素,焊接过程中的热循环会影响其耐磨组织稳定性;若热输入控制不当,可能导致韧性降低甚至形成脆性裂纹。此外,厚板焊接需较大热输入以确保熔深,但过大热输入可能引起晶粒粗化,进而影响力学性能。因此,需通过合理预热、控

制热输入、选择匹配性高的焊材等措施，确保焊缝及热影响区组织稳定，避免产生脆性结构和硬度过高区域，使接头性能满足复杂工况需求。

（三）焊接工艺复杂性与质量控制难点

轮斗部焊缝数量多、覆盖面广、焊接位置复杂，往往涉及仰焊、横焊、斜焊及立焊等多种焊接姿态，对焊工操作技术要求极高。厚板焊接需采用多层多道工艺，热循环次数多，焊缝金属组织反复变化，增加了裂纹发生风险。此外，轮斗部整体刚性高，焊接过程中受热不均易造成变形，大尺寸构件在焊接顺序不当时可能出现严重错边、扭曲，影响装配精度和服役稳定性。施焊环境多在大型厂房或露天场地，温湿度、风速等因素可能导致保护气体流场紊乱、焊材吸潮等问题，进一步增加焊接缺陷发生概率。因此，需对焊接工艺制定、执行细节和环境控制进行严格管理，才能有效保障焊接质量。

二、轮斗部焊接常见缺陷类型及形成机理

（一）裂纹类缺陷及其形成机制

轮斗部焊接中最严重的缺陷为裂纹，包括冷裂纹、热裂纹和延迟裂纹。冷裂纹通常发生在高强度焊缝和热影响区，主要由焊接硬化倾向、氢含量过高、结构约束强和残余拉应力大等条件共同作用而形成。当焊接接头冷却速度快、组织硬化严重时，氢在应力集中区域聚集，极易形成裂纹，且裂纹多沿晶界扩展；热裂纹主要发生在凝固末期，由于金属偏析产生低熔点共晶或晶界薄膜，受收缩应力作用形成沿晶开裂；延迟裂纹往往在焊后较长时间出现，与氢扩散、硬化组织和残余应力叠加有关。各类裂纹均对轮斗部结构安全性造成极大威胁，一旦形成，极易在循环载荷作用下持续扩展，导致灾难性失效。

（二）未焊透、未熔合与夹渣气孔等体积缺陷

未焊透和未熔合多发生在厚板对接焊缝根部、T形接头及焊缝交汇部位，其形成原因包括坡口开设不当、钝边过大、焊接电流偏小或焊接速度过快等操作不当因素。未焊透或未熔合会使焊缝截面有效承载面积显著降低，并形成尖锐缺口，显著削弱疲劳寿命。夹渣多因多层多道焊中渣皮清理不彻底或熔池金属流动性差引起，气孔则与焊材吸潮、施焊环境湿度大或保护气体稳定性不足有关。体积性缺陷虽不一定立即导致结构破坏，但将显著降低轮斗部焊缝韧性和疲劳性能。

（三）咬边、焊缝成形缺陷与焊接变形

咬边是焊缝金属未充分填充母材边缘造成的凹槽，通常由电流过高、运条速度不稳、焊接角度不正确等操

作不当引起，咬边会形成应力集中区域，加速裂纹萌生。焊缝成形不良如余高过大、焊缝宽度不均、焊趾过渡尖锐等，将影响应力分布，降低抗疲劳性能。焊接变形则由不均匀加热冷却导致，应力集中与结构刚性差异使大型构件更易出现弯曲、扭曲及错边，若未及时矫正，将影响后续装配及服役安全性。

三、轮斗部焊接质量控制关键工艺技术

（一）焊接材料与坡口形式的匹配与优化

焊接材料选择需要保证焊缝强度、韧性与母材匹配，并具备低氢扩散特性，以减少氢致裂纹风险。高强度焊接应选用低氢型焊条或高韧性焊丝，同时严格执行焊材烘干制度，避免吸潮。坡口形式设计需结合板厚、焊接类型与施焊空间确定，对厚板结构可采用双面焊接、X形坡口或合理控制坡口角度与钝边，以降低焊接截面积与热输入，提高熔透率并优化焊缝成形。

（二）焊接参数、热输入与预热后热控制

通过合理控制电流、电压及焊接速度，可确保熔池稳定、熔深适中、焊缝组织均匀。高强度焊接需适当降低热输入，以避免晶粒粗化和脆性组织形成，但熔深必须达到设计要求，因此需要通过多层多道工艺均衡热输入。预热及层间温度控制对避免冷裂纹至关重要，可降低冷却速度，使硬化组织减少。焊后缓冷或后热处理可减少残余应力，提高裂纹抵抗能力。

（三）焊接顺序规划与残余应力控制

合理安排焊接顺序可避免结构产生不均匀热应力，减小变形与应力集中。应采用对称焊、跳焊、分段退焊等工艺方式，使焊接热收缩均匀分布。对大型构件辅助使用夹具固定或临时加强结构，可进一步降低变形风险。必要时可采用机械矫直、火焰矫直或振动时效技术处理焊后变形和残余应力，使结构达到更稳定状态。

四、轮斗部焊接缺陷预防技术与质量管理体系构建

（一）焊接前技术准备与工艺评估

焊接前需通过工艺试验验证焊材匹配、坡口设计、预热参数和热输入范围的科学性，形成焊接工艺文件并对焊工进行技术交底，使施焊人员清楚了解关键焊缝的构造特点和质量要求。通过工艺评估可提前发现可能引发裂纹、未熔合和变形的风险因素，为实焊提供可靠依据。

（二）焊接过程环境控制与质量监控

施焊过程中需严格监控焊接参数、焊材状态、层间温度、熔渣清理情况等，通过专用测控设备记录关键参数，确保实际施焊与工艺文件一致。环境因素如湿度、

风速和温度需进行控制，必要时搭建防风棚及局部加热设施，保证保护气体效果稳定，减少气孔产生。

（三）无损检测与全过程质量管理

焊后需采用超声波、射线、磁粉或渗透检测等方法，对内部与表面缺陷进行系统检查，检测结果进行记录和数字化管理，通过大数据分析识别缺陷重复出现的规律，从而不断优化工艺。建立焊接质量数据库，形成可追溯体系，实现焊前、焊中、焊后的全流程质量管理闭环，提高整体焊接可靠性。

五、轮斗部焊接技术发展趋势与应用展望

（一）自动化焊接技术的发展

自动焊接、机器人焊接等智能化装备在工业生产中的应用，显著提升了焊缝的一致性与整体焊接效率，特别适用于轮斗部长焊缝和重复劳动强度高的焊接区域。这些区域对焊接精度和稳定性要求较高，人工操作容易出现误差和质量波动，智能装备的介入有效弥补了这些不足。依托焊缝跟踪系统、视觉识别系统与智能控制技术，焊接过程可以根据实时信息自动调整参数，确保焊接轨迹与工件的匹配，从而提升焊缝成形质量与结构强度。整个焊接流程的自动化不仅大幅减少了人为干预带来的不确定性，也降低了操作者的劳动强度，在提高产品一致性的同时，促进了焊接工艺的标准化和智能制造水平的提升。

（二）焊接仿真与数字化技术应用

通过有限元仿真手段对轮斗部焊接过程中的温度场、应力场与变形场进行建模分析，可在施工前精准评估潜在问题，有效指导焊接顺序设计与工艺参数设定。这种仿真方法能够动态呈现热输入对材料微观结构及力学响应的影响，为控制残余应力和焊接变形提供了量化的依据。在复杂结构或多道焊接场景下，仿真结果有助于提前规划施焊路径、制定合理的夹紧方案，减少后续修复成本。数字化质量管理体系的融入，使焊接全过程实现参数采集、过程控制与质量追溯一体化管理，系统可实时监控电流、电压、焊速等关键指标变化，焊缝状态及缺陷风险实现可视化管理，便于快速识别异常并采取应对措施。每一道焊缝的工艺数据和检测结果都可自动归档，为后期分析与产品生命周期管理提供数据支撑。基于大数据分析模型，系统还能预测常见缺陷出现的概率，辅助工艺持续优化，焊接质量逐步从依赖人工经验

转向依靠数据驱动的智能决策，推动制造过程更加科学、高效与可控。

（三）高性能焊材与新型焊接工艺的应用

未来的焊接技术将更加强调高强钢与耐磨钢的适配性，高性能焊材的开发将围绕提升焊缝韧性与抗裂性展开。新一代焊材在成分设计和冶金匹配性方面会更加精细，以满足轮斗部厚板在重载工况下的长期稳定需求。焊接工艺也将进一步升级，激光-电弧复合焊通过能量场的协同作用实现更深的熔深和更高的成形质量，热输入显著降低，结构变形得到有效控制。窄间隙焊在厚板制造中表现出更高的材料利用率和生产效率，焊缝金属性能更加均匀，适用范围不断扩大。绿色制造理念推动焊接行业持续改进，从源头减少烟尘、飞溅和有害气体的焊材正在被广泛关注，节能型焊接装备的应用也在加快。企业在提升焊接质量的同时，将更加注重对环境的友好性与资源消耗的降低，未来的焊接技术将向高性能、高效率与低污染的综合方向发展。

结论

轮斗挖掘机轮斗部焊接质量对整机性能和服役寿命至关重要，其焊接工艺受结构复杂性、材料特性及环境因素共同影响，焊接缺陷类型多样且危害严重。通过对轮斗部结构特点、焊接缺陷形成机制及工艺控制重点的系统研究，可为焊接质量控制提供明确方向。焊接材料匹配、坡口设计、热输入控制、预热与后热制度、焊接顺序规划和应力控制是提高焊接质量的关键措施；全过程质量管理与无损检测是预防缺陷的重要环节；自动化焊接、仿真分析及数字化管理代表着未来技术发展趋势。只有综合应用多维度技术手段，构建从焊前评估到焊后检测的完整质量控制体系，才能有效提高轮斗部焊缝可靠性，保障设备安全稳定运行。

参考文献

- [1] 李强. 大型采掘设备焊接结构可靠性分析[J]. 焊接技术, 2021.
- [2] 王志华. 高强钢焊接缺陷机理及控制策略研究[J]. 金属加工, 2020.
- [3] 陈伟. 重型机械焊接过程质量控制与优化[J]. 机械工程, 2022.