

减速机齿轮断齿故障的焊接修复工艺改进与力学性能测试

许德强 褚建灿 熊康元
宁波钢铁有限公司 浙江 宁波 315807

摘要:为解决减速机齿轮断齿后的修复难题,本文先分析齿轮结构、断齿成因及焊接修复理论基础,指出现有工艺存在接头性能不匹配、变形控制难、稳定性与适配性差等问题。进而从焊接材料选择、工艺参数优化、辅助工艺改进及焊后处理完善四方面提出改进方案。通过力学性能测试验证,改进工艺下焊接接头静态性能与基体接近,动态性能显著提升,微观组织优良且缺陷少,为齿轮断齿可靠修复提供技术支撑。

关键词:减速机齿轮;断齿故障;焊接修复;工艺改进;力学性能测试

1 减速机齿轮断齿故障机理与焊接修复基础

1.1 减速机齿轮的结构与工作特性

减速机齿轮是传递动力和改变转速的核心部件,常见结构包括直齿、斜齿、锥齿等类型。直齿齿轮结构简单、加工方便,但传动平稳性较差;斜齿齿轮通过螺旋角设计,啮合时齿面接触面积大,传动更平稳,承载能力更强,广泛应用于中高速重载场合;锥齿齿轮则适用于相交轴传动场景。从结构组成看,齿轮由齿部、轮毂、轮辐三部分构成,齿部是受力关键区域,直接承受啮合时的冲击力和交变载荷。其工作特性表现为:在传动过程中,齿面承受接触应力,齿根处因存在应力集中易产生弯曲应力,且载荷常呈现周期性变化,同时还可能受到润滑不良、温度波动等工况影响,长期运行后易出现疲劳损伤。

1.2 齿轮断齿故障成因分析

齿轮断齿故障主要分为疲劳断齿、过载断齿、冲击断齿及材质缺陷导致的断齿四类。疲劳断齿是最常见类型,由于齿轮在交变载荷作用下,齿根处应力不断累积,当超过材料疲劳极限时,会逐渐产生微小裂纹,裂纹扩展至一定程度后发生断齿,断口通常呈现典型的疲劳条纹。过载断齿多因设备突然承受超出设计承载能力的载荷,如启动瞬间过载、卡料等,导致齿轮齿部因弯曲应力过大而快速断裂,断口较为粗糙,伴有塑性变形痕迹^[1]。冲击断齿则由突发冲击载荷引起,如设备急停、异物卷入等,断裂过程迅速,断口常呈现脆性断裂特征。此外,齿轮材质本身存在的夹杂、疏松、偏析等缺陷,会降低材料力学性能,在受力时成为裂纹源,加速断齿故障发生。

1.3 齿轮焊接修复的理论基础

齿轮焊接修复的核心理论基础是焊接冶金与材料连接原理,通过加热、加压或两者并用,使焊接材料与齿

轮基体形成牢固的冶金结合。焊接过程中,熔池内发生复杂的物理化学变化,包括熔化、冶金反应、凝固等,需控制熔合比以保证接头性能与基体匹配。从力学角度看,焊接修复需实现接头与基体在强度、硬度、韧性等方面的协调,避免因性能差异产生应力集中。同时,基于金属学理论,通过选择合适的焊接材料和工艺参数,可控制焊缝及热影响区的显微组织,减少淬硬组织、裂纹等缺陷产生。焊接应力与变形控制理论也是关键,需通过合理的焊接顺序、预热、后热等措施,降低焊接残余应力,防止修复后齿轮因变形影响装配精度。

2 现有减速机齿轮焊接修复工艺的问题分析

2.1 焊接接头性能不足

现有焊接修复工艺中,焊接接头性能不足是突出问题,主要表现为强度、硬度与韧性不匹配。一方面,若焊接材料选择不当或焊接参数控制不合理,焊缝金属强度可能低于基体,导致接头成为受力薄弱环节,在载荷作用下优先断裂;另一方面,部分工艺为追求高强度,采用高合金焊接材料,却忽视了韧性需求,使接头脆性增加,抗冲击能力下降。另外,热影响区易出现淬硬组织,尤其是对于中高碳钢齿轮,焊接时热影响区冷却速度过快,会形成马氏体组织,导致硬度升高、韧性降低,易产生冷裂纹。同时,焊缝中可能存在气孔、夹渣等缺陷,进一步削弱接头力学性能,影响修复后齿轮的使用寿命。

2.2 焊接变形与尺寸精度控制难

减速机齿轮对尺寸精度和形位公差要求较高,而现有焊接修复工艺难以有效控制焊接变形。焊接过程中,局部加热和冷却导致齿轮各部位温度不均匀,产生热应力,进而引发收缩变形、弯曲变形、扭曲变形等。对于薄壁齿轮或大型齿轮,变形问题更为严重,可能导致齿距偏差、齿形误差超出允许范围,无法满足装配要求^[2]。

目前常用的变形控制措施如夹具固定、分段焊接等,效果有限,尤其在修复断齿这类局部焊接作业时,热量集中更易引发局部变形。焊接后变形矫正难度较大,强行矫正可能导致齿轮产生新的内应力或裂纹,进一步影响齿轮精度和性能。

2.3 工艺稳定性与适配性差

现有焊接修复工艺的稳定性与适配性有待提升。一方面,工艺参数多依赖操作人员经验设定,缺乏标准化的参数体系,不同操作人员、不同设备下的焊接质量差异较大,导致修复效果不稳定,部分修复件可能在短时间内再次失效。另一方面,工艺适配性不足,针对不同材质(如45钢、20CrMnTi、40Cr等)、不同模数、不同损坏程度的齿轮,往往采用单一或相似的修复工艺,未能根据齿轮具体情况进行针对性调整。例如,对于高合金齿轮的修复,若沿用普通碳钢的焊接工艺,易出现焊接裂纹、结合不良等问题;对于严重断齿的齿轮,简单的堆焊修复难以保证修复强度,导致工艺适配性与实际需求脱节。

3 减速机齿轮断齿焊接修复工艺的改进方案

3.1 焊接材料的优化选择

焊接材料的优化需遵循“性能匹配、工艺性好、抗裂性强”的原则。针对不同材质的齿轮,采用成分匹配的焊接材料:对于45钢等碳素结构钢齿轮,选用E5015-G等低氢型焊条,其焊缝金属强度与基体接近,且抗裂性能优良;对于20CrMnTi等合金结构钢齿轮,采用H08CrMnSiMoA焊丝配合相应焊剂,保证焊缝与基体在化学成分和力学性能上的一致性。同时,引入复合焊接材料概念,如采用药芯焊丝配合合金粉末,在保证强度的同时提升焊缝韧性。另外,对焊接材料进行预处理,如焊条烘干、焊丝除油除锈,减少焊缝缺陷产生的源头。

3.2 焊接工艺参数的协同优化

建立基于齿轮材质、厚度、断齿尺寸的焊接工艺参数协同优化体系。首先,确定合理的预热温度,对于中高碳钢齿轮,预热温度控制在150-300℃,减缓冷却速度,避免热影响区淬硬;其次,优化焊接电流、电压和焊接速度,采用小电流、低电压、慢焊速的工艺参数,减少热输入量,降低焊接变形和热影响区宽度。例如,修复模数5-8mm的40Cr齿轮断齿时,焊接电流设定为180-220A,电压22-25V,焊接速度8-10cm/min。同时,采用多层多道焊接方式,每层焊接后进行锤击消除应力,并控制层间温度不超过预热温度,通过参数的协同调整,实现焊缝成形良好、性能稳定。

3.3 焊接辅助工艺的改进

改进焊接辅助工艺以提升修复精度和稳定性。一是设计专用焊接夹具,根据齿轮结构定制刚性固定装置,将齿轮可靠定位,限制焊接过程中的变形,夹具还应具备导热功能,辅助控制焊接温度场分布;二是采用局部保护气体焊接工艺,对于不锈钢或合金齿轮,使用氩气等惰性气体对熔池及热影响区进行保护,防止金属氧化,提高焊缝纯净度;三是引入激光预热与跟踪技术,通过激光对焊接区域进行精准预热,同时利用激光跟踪系统实时调整焊枪位置,保证焊缝与断齿轮廓的贴合度,尤其适用于复杂齿形的修复^[3]。

3.4 焊后处理工艺的完善

完善焊后处理工艺是保证修复质量的关键环节。首先,实施阶梯式后热处理,焊接完成后立即将齿轮放入保温炉中,以50℃/h的升温速度加热至250-350℃,保温2-3h,然后随炉冷却,有效消除焊接残余应力,降低冷裂纹风险;其次,采用机械加工与打磨相结合的方式,先通过铣床、插齿机等设备恢复齿轮齿形尺寸,再用砂轮进行精细打磨,保证齿面粗糙度符合要求;最后,进行表面强化处理,对修复后的齿面采用渗碳、淬火或喷丸处理,提升齿面硬度和耐磨性,使修复部位性能优于或等同于基体性能。

4 改进后焊接修复工艺的力学性能测试

4.1 测试样品制备

为确保测试结果能真实反映改进后焊接修复工艺的实际效果,测试样品制备严格遵循标准化流程。选取与工业常用减速机齿轮材质一致的40Cr钢作为基体材料,该材料经调质处理后硬度为220-230HBW,具备良好的综合力学性能。依据相关国家标准,将基体材料加工为标准试样:拉伸试样采用圆形横截面试样,直径10mm、标距50mm,符合GB/T228.1-2021要求;冲击试样为U型缺口试样,尺寸10mm×10mm×55mm,缺口深度2mm,满足GB/T229-2020规定;弯曲试样为矩形截面,尺寸15mm×15mm×120mm,遵循GB/T232-2010标准。模拟齿轮实际断齿缺陷,在试样待修复区域采用线切割加工出深度8mm、角度60°的V型缺口。随后采用优化后的H08CrMnSiMoA焊丝进行焊接修复,焊接参数严格控制为电流180-220A、电压22-25V、焊接速度8-10cm/min。焊接完成后按工艺要求进行250-350℃阶梯式后热处理,再通过铣床修整试样尺寸,最后用砂纸打磨表面至粗糙度 $Ra \leq 1.6\mu m$ 。同时制备3组未修复的40Cr钢基体试样作为空白对照,每组测试均设置3个平行试样,以降低偶然误差对结果的影响。

4.2 静态力学性能测试

静态力学性能测试以评估焊接接头静载荷下力学行为为目标, 全程遵循标准规范。拉伸试验采用WDW-100万能材料试验机, 加载速率2mm/min并记录载荷-位移曲线。结果显示, 改进后焊接接头抗拉强度850-880MPa、屈服强度620-650MPa、伸长率12%-15%, 与基体材料(抗拉强度860MPa、屈服强度630MPa、伸长率14%)性能基本一致, 显著优于现有工艺接头(抗拉强度750-780MPa)。弯曲试验为三点弯曲模式, 支点间距100mm、加载速率5mm/min, 试样在300MPa弯曲应力下弯曲180°未断裂, 焊缝及热影响区无裂纹, 塑性优良。硬度测试使用HB-3000布氏硬度计(试验力2942N、保压15s), 在焊缝、热影响区、基体各选10点测试, 硬度分别为220-240HBW、230-250HBW、220-230HBW, 分布均匀无淬硬区, 规避应力集中风险。

4.3 动态力学性能测试

动态力学性能测试通过冲击与疲劳试验, 评估焊接接头在交变及冲击载荷下的服役能力。冲击试验采用JB-300B摆锤式冲击试验机, 在-20°C、0°C、20°C下各测试3个平行试样并取平均值。改进后接头冲击吸收功分别为35J、42J、48J, 较现有工艺接头(20J、25J、30J)提升超50%, 低温韧性优势显著, 降低低温脆性断裂风险。疲劳试验使用PLG-200四点弯曲疲劳试验机, 设定应力比 $R = 0.1$ 、最大应力500MPa、加载频率10Hz, 应力控制循环加载至断裂或10⁷次循环。结果表明, 改进后接头平均疲劳寿命1.2×10⁶次, 接近基体的1.3×10⁶次, 远高于现有工艺的5×10⁵次, 证明其抗疲劳损伤能力大幅提升, 满足齿轮交变载荷服役需求。

4.4 微观组织与缺陷分析

微观组织与缺陷分析是揭示焊接接头力学性能优异的内在原因, 采用多种微观分析手段开展系统研究。金相分析前, 将试样沿横截面切割后经研磨、抛光, 采用4%硝酸酒精溶液腐蚀, 在AxioImagerA2m金相显微镜下

观察。结果显示, 焊缝区组织为细小均匀的铁素体和珠光体, 晶粒尺寸约为10-15μm, 无粗大魏氏组织产生; 热影响区宽度控制在0.8-1.2mm, 组织过渡平缓, 从靠近焊缝的过热区(细晶马氏体+贝氏体), 到正火区(索氏体), 再到回火区(回火索氏体), 无明显淬硬组织和微裂纹^[4]。采用Quanta200扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝与基体的结合界面, 发现二者熔合良好, 界面处无氧化层、气孔、夹渣等宏观缺陷, 元素扩散均匀。对冲击断口进行SEM分析, 断口表面分布着大量深度和尺寸均匀的韧窝, 韧窝内可见少量第二相颗粒, 呈现典型的韧性断裂特征, 进一步印证了接头优异的冲击韧性。此外, 采用XR-2000型X射线探伤仪对焊接接头进行无损检测, 按照GB/T3323-2019标准评定, 接头内部缺陷等级达到I级, 无超标气孔、裂纹等缺陷, 充分证明改进后焊接修复工艺的可靠性和稳定性。

结束语

本文围绕减速机齿轮断齿焊接修复展开系统研究, 针对现有工艺痛点提出的改进方案, 经试验验证可有效提升修复质量, 使接头力学性能与基体匹配度大幅提高。该研究为齿轮断齿修复提供了理论依据与实践指导, 有助于降低设备维护成本。后续可进一步探索不同工况下工艺参数的动态调整机制, 结合智能化技术实现修复过程的精准控制, 推动焊接修复工艺的产业化应用。

参考文献

- [1]董雪娇.减速机齿轮轴断齿原因分析[J].钢铁钒钛, 2023,44(03):191-196.
- [2]张杰.钢球磨煤机减速机齿轮断齿故障诊断及分析[J].现代制造技术与装备,2022,58(08):179-181+195.
- [3]赵密,王建华.齿轮测量中心信息化系统设计与开发[J].工具技术,2024,58(2):151-155.
- [4]黄培杰.齿轮减速机的故障分析及维护保养策略探析[J].农机使用与维修,2021,24(05):85-86.