

农业机械割刀的激光熔覆技术应用与管理优化

赵莹莹 王文君*

山东理工大学

DOI:10.32629/as.v9i6.4075

[摘要] 农业机械割刀在复杂田间工况下易出现磨损崩刃与腐蚀失效,传统强化工艺难以满足长效作业需求。本文围绕割刀失效特征与工况要求,开展激光熔覆技术适配性分析,确定适用材料体系与工艺方案,建立性能检测与田间验证体系,构建生产加工质量检验及运维成本全流程管理模式。研究表明激光熔覆可显著提升割刀综合使用性能,配套管理优化能够推动技术稳定落地,为农机易损件的长效强化与规模化应用提供可行路径。

[关键词] 农业机械割刀; 激光熔覆; 表面强化; 失效分析; 工艺参数; 管理优化

中图分类号: S23 **文献标识码:** A

Application and Management Optimization of Laser Cladding Technology for Agricultural Machinery Cutting Blades

Yingying Zhao Wenjun Wang*

Shandong University of Technology

[Abstract] Cutting blades of agricultural machinery are prone to abrasive wear, edge chipping and corrosion failure under complicated field working conditions, and conventional strengthening processes fail to meet the requirements for long-term service. Centering on the failure characteristics of cutting blades and practical operating demands, this paper analyzes the adaptability of laser cladding technology, determines applicable material systems and processing schemes, establishes a system for property testing and field verification, and develops a full-process management framework covering production quality inspection as well as operation and maintenance cost control. The research results demonstrate that laser cladding can remarkably improve the comprehensive service performance of cutting blades, and optimized supporting management facilitates the stable industrial implementation of this technology. This study provides a feasible approach for long-term strengthening and large-scale popularization of vulnerable agricultural machinery components.

[Key words] agricultural machinery cutting knife; Laser cladding; Surface strengthening; Failure analysis; Process parameters; Management optimization

引言

近些年国内稻麦、玉米规模化种植持续扩容,大中型联合收割机保有量连年攀升,农机割刀消耗量常年居高不下,成为农机运维成本主要支出项。据农机配件市场统计,常规淬火割刀年均更换次数可达6~8次,频繁换刀耽误农时收割。传统堆焊、火焰喷涂、整体淬火受工艺原理制约,强化后的割刀依旧易出现刃口磨损、冲击崩裂问题。现有激光熔覆相关研究大多聚焦粉末配方与单组工艺参数试验,很少结合田间不同地块工况配套落地细则与落地管控办法。为此本文先梳理割刀三类失效诱因,择优匹配熔覆粉末与加工参数,通过理化检测和田间对比试验验证强化效果,再从生产、质检、运维三个细分维度细化配套管理细则,补齐技术落地配套短板,助推熔覆强化割刀落地量产使用。

1 农业机械割刀失效形式与传统修复工艺缺陷

1.1 割刀工况对性能的要求

小麦、水稻、玉米等农作物收割工况差异大,对割刀性能提出明确要求。力学性能上,需具备高硬度(HRC52~55)、高耐磨性及良好抗冲击疲劳强度,避免刃口快速磨损与崩裂。工艺性能上,要求加工变形小、涂层结合强度高,保证修复后尺寸精度与结构稳定性。使用性能上,需耐受田间潮湿腐蚀环境,延长使用寿命,适配高频次、长时间连续作业。经济性能上,要求修复成本低、可重复强化,降低农机运维投入。明确这些要求,可为后续激光熔覆工艺选型、参数设计及材料匹配提供工况依据。

1.2 割刀主要失效形式

农机割刀长期在复杂田间环境作业,失效问题突出,主要分

为三类。一是磨粒磨损,田间土壤、泥沙、秸秆等硬质颗粒持续摩擦刀口,造成刀口钝化、尺寸减薄,据统计该失效占比超60%,是最主要形式。二是冲击疲劳失效,收割时石块、土块等硬物撞击,加上高频往复振动,刀体易产生微裂纹,进而引发崩刀、断裂,断裂位置多集中在刀口向内15-25mm区域。三是腐蚀失效,田间潮湿环境与化肥、农药残留形成电化学腐蚀,加速刀体表层剥落,降低结构强度。三种失效叠加,直接缩短割刀寿命,导致收割质量下降、作业故障率升高。具体可见表1:

表1 农机割刀典型失效形式及危害统计表

失效形式	占比(%)	失效部位	主要危害
磨粒磨损	62	刀口及刃面	刀口钝化、切割效率降低
冲击疲劳失效	25	刃角、淬火过渡区	崩刀、刀体断裂、停机故障
腐蚀失效	13	刀体表面、焊缝处	表层剥落、强度下降、加速磨损

1. 3传统修复工艺存在缺陷

农机割刀常用堆焊、喷涂、整体淬火三种传统强化工艺,实际应用缺陷明显。堆焊热输入大,刀体易变形、产生残余应力,疲劳强度下降,修复后易再次断裂。喷涂操作简单,但涂层与基体结合力差,田间作业时容易脱落,耐磨效果无法持久。整体淬火的硬化层分布不均,刃口硬度提升有限,还会增大刀体脆性,抗冲击能力变差。堆焊和喷涂因变形大、结合不可靠,已逐渐被行业淘汰。因此本文后续仅对比仍在使用的传统淬火工艺。整体来看,传统工艺在成型质量、使用寿命、成本与返修率上都不理想,难以满足现代农业长时间、高强度作业需求。

2 激光熔覆技术适配割刀的工艺原理与优势

2. 1激光熔覆核心工作原理

激光熔覆实质是利用高能激光束照射,使丝或粉末全熔并伴随基体微熔后快速凝固,形成冶金结合的熔覆层过程^[1]。激光熔覆是当下主流的金属表面强化技术,十分适合农机割刀的表面处理工作。该技术依靠高能激光束作为加热热源,工作时把预先放置或是同步输送的合金粉末,连同割刀基体表层一同熔化,冷却后就能在工件表面形成冶金结合的强化涂层,具体结构如图1所示:

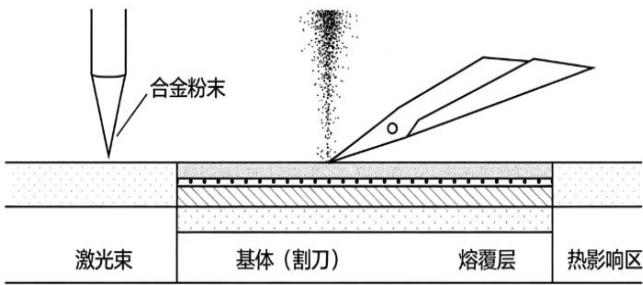


图1 激光熔覆技术工艺原理示意图

整个过程具备快熔、快凝的特点,熔池存在时间短,涂层内部组织排列紧密,基本不会出现气孔、夹渣等缺陷,涂层和基体的结合强度也远高于普通表面处理工艺。农机割刀厚度小、加工精度要求高,而激光束能量集中、作用范围可控,热作用区域很小,能够有效避免薄型刀体出现形变,这也是该技术可以针对性应用在割刀强化上的关键原因。

2. 2熔覆材料选型与适配要点

结合农机割刀耐磨、抗冲击、抗腐蚀的实际使用需求,目前行业内主要选用铁基、镍基、钴基三类合金粉末作为熔覆材料,不同材料的使用场景存在明显区别,详细对比情况如表2所示:

表2 不同熔覆合金材料性能及适配农机割刀工况对比

材料类型	核心性能特点	适用工况	综合成本
铁基合金粉末	耐磨性良好,抗冲击一般	旱地小麦、玉米收割农田	低
镍基合金粉末	耐腐蚀性强,耐磨性中等	水田、盐碱地等潮湿腐蚀环境	中
钴基合金粉末	耐磨、抗冲击、耐腐蚀性能优异	大型农机高强度连续作业场景	高

采用激光熔覆技术在部件表面沉积含有微米碳化物颗粒的耐磨薄层能有效提升耐磨性,但微米碳化物颗粒尺寸较大,其可能对涂层的耐冲击性能产生不利影响^[2]。铁基合金粉末价格低廉,耐磨性能完全满足常规农田作业要求,是普通耕地、大田作业割刀的首选材料。镍基合金粉末耐酸碱、抗潮湿腐蚀能力突出,多用于南方水田、盐碱地等腐蚀问题严重区域的割刀强化。钴基合金综合力学性能最佳,耐磨、抗冲击能力更强,适合长时间连续作业的大型收割设备。在实际选材时,除了材料本身成分,还要控制粉末粒径在100~200目之间,保证送粉顺畅与熔覆效果,兼顾使用性能与生产成本

2. 3相较于传统工艺的应用优势

对照前文提到的堆焊、喷涂、整体淬火等传统工艺,激光熔覆在多个方面展现出明显优势。从结合性来看,熔覆层与割刀基体形成冶金结合,在田间高强度摩擦、撞击下不会出现涂层脱落问题^[3]。从成型精度来讲,这项技术热输入量小,热影响区域范围有限,加工完成后的割刀不会发生形变,也不会残留内部应力。在力学性能上,熔覆处理后的割刀表面硬度、耐磨性和抗疲劳能力,都大幅超过传统工艺加工的产品。同时激光熔覆设备自动化程度较高,能够实现批量加工,整体生产效率更高,产品返修率也控制在较低水平^[4]。综合来看,该技术有效弥补了传统工艺的各类短板,和现代农业机械的作业模式高度匹配。

3 激光熔覆在割刀上的实际应用实践

3. 1割刀表面熔覆工艺参数设定

农机割刀多采用65Mn弹簧钢制作,激光熔覆的参数设置直接影响涂层质量与刀体变形程度。激光功率、扫描速度、送粉量和搭接率是影响最大的四项关键参数^[5]。功率过大会造成基

体过热烧蚀,刀体出现明显变形,功率不足则粉末熔化不充分,涂层偏薄且结合力差。扫描速度过快会降低涂层致密性,速度过慢则容易出现过熔与裂纹。送粉量决定涂层厚度,送粉不均会导致表面高低不平。搭接率直接影响表面平整度,搭接不足易出现接缝与漏熔。经过多组试验对比,确定适用于农机割刀的稳定工艺区间,可保证涂层均匀致密、刀体不变形,形成可批量复制的标准化加工方案。

3.2 熔覆后割刀性能检测分析

熔覆后对割刀开展硬度、耐磨性、微观组织及结合强度检测,数据化验证强化效果。硬度检测采用显微硬度计,从涂层表面至基体逐层测试,结果如图2所示:

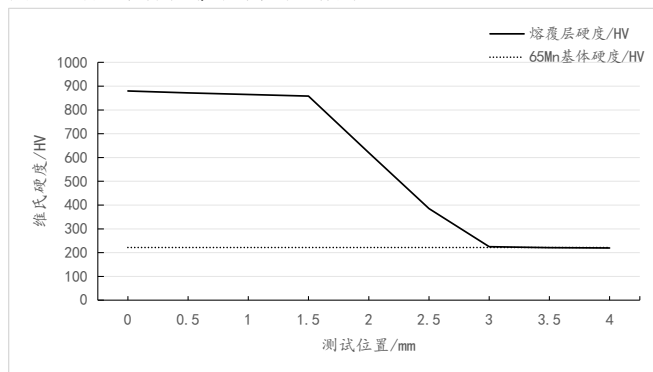


图2 熔覆层与基体硬度对比曲线图

65Mn基体硬度约220HV,熔覆层硬度可达850~900HV,提升近4倍。耐磨检测通过摩擦磨损试验进行,按下述公式计算损失率:

$$\eta = \frac{\Delta m}{m_0} \times 100\%$$

式中: Δm 为磨损质量损失, m_0 为试样初始质量,试验显示熔覆层损失率仅为基体的1/5,耐磨性显著提升。通过扫描电镜观测微观组织,熔覆层致密均匀,无气孔、裂纹等缺陷,与基体形成良好冶金结合^[6]。结合强度测试表明,熔覆层与基体结合可靠,能够承受田间冲击与摩擦而不脱落,有效解决割刀易磨损、易失效的问题。

3.3 田间实地作业应用效果

本次田间试验选用普通未处理割刀、传统淬火割刀、激光熔覆割刀三组进行对照。堆焊、喷涂因变形大、涂层易脱落,已逐步退出主流应用,故未纳入对比。三组割刀统一作业200小时后统计数据,结果如表3所示:

表3 不同工艺处理割刀田间作业性能对比试验数据

割刀类型	刃口磨损量(mm)	崩刃故障率(%)	连续作业时长(h)	使用寿命延长倍数
普通未处理割刀	1.20	28	200	1.0
传统淬火割刀	0.70	15	350	1.8
激光熔覆割刀	0.15	0	820	4.1

传统淬火割刀性能有所提升,但仍存在明显磨损与局部崩角现象,无法满足长时间连续作业需求。激光熔覆割刀依靠表层致密耐磨涂层,有效抵抗磨粒磨损与冲击损伤,刃口保持完整,未出现崩刃与涂层脱落情况。激光熔覆割刀磨损量显著降低,连续作业时时长大幅提升,使用寿命较普通割刀提升明显,更换频次与停机损耗大幅减少。试验结果证明,激光熔覆技术可大幅提升割刀的田间适应性与作业稳定性,能够切实解决传统割刀易磨损、寿命短、故障多的实际问题,完全契合现代农业机械高强度、高效率、低成本的作业需求。

4 激光熔覆应用全流程管理优化策略

4.1 生产加工环节管理优化

由于65Mn薄钢板割刀薄壁易变形特性,需要精简落地型标准化加工细则^[7]。投产前依据旱地、水田两种主流作业环境锁定用料,旱地统一选用经济型铁基粉末,水田腐蚀工况固定镍基粉末,提前录入对应功率、扫描速率、搭接比例基础参数,小型加工厂无需反复试调参数。原料预处理仅固化三道必做工序:砂轮打磨去除刃口氧化皮、有机溶剂除油污、压缩空气吹扫粉尘,减少多余工序浪费工时。熔覆加工时仅定点监控熔道宽窄与表面光斑状态,出现局部过熔、粉末积堆即刻小幅微调设备,不用全程全维度测温。针对小批量代工生产场景划定变形管控阈值,刀体整体变形超0.08mm直接剔除返修,以精简管控条款控制产品不良率,适配中小配件加工厂家量产条件。

4.2 质量检验环节管控提升

来料抽检环节按批次抽检65Mn母材厚度与表面锈蚀情况,母材硬度随机抽检10%,剔除形变、锈蚀超标毛坯即可,取消全件普查要求。生产巡检仅聚焦熔覆关键区段,重点查看刃口熔覆层有无漏覆、粉末未熔结块问题,每加工50件做一次现场抽样,及时修正送粉偏移故障。成品检测优先使用便携硬度计核验表层硬度,控制在HRC52~55区间,批量产品每百件抽取3件做简易渗透探伤排查表层微裂纹,无需全件无损检测。逐项记录抽检数据建立简易台账,仅留存不合格产品数据归档,精简台账记录内容,在控制产品质量的同时压缩质检人工与耗材成本。

4.3 运维与成本管理优化

农户收割完工后采用清水冲刷配合毛刷清理割刀表面秸秆泥沙,潮湿水田作业结束后薄涂防锈油,简易操作延缓涂层电化学腐蚀^[8]。旧刀返修前目视检查刀体断裂、严重扭曲缺陷,肉眼无破损工件再做小范围硬度抽检,合格工件才可二次熔覆翻新,裂纹、严重变形割刀直接报废不再返修。对比单件加工成本,熔覆割刀单件制造成本较淬火割刀高出35%左右,但田间服役寿命提升4倍以上,大幅减少农忙期配件采购、停机拆装费用。从农户年度开销测算,单台收割机割刀年采购费用可下降60%,依托可翻新特性进一步摊薄单件使用成本,兼顾种植户实际经济承受能力。

5 结语

本文系统分析农业机械割刀失效形式与传统工艺短板,阐明激光熔覆应用于割刀强化的技术原理与材料适配性,形成稳

定可行的工艺方案并完成性能与田间验证,建立覆盖生产质检运维的全流程管理优化策略。研究成果可为农业机械关键易损部件的表面强化提供技术参考,有助于提升农机装备作业可靠性降低运维成本,推动激光熔覆技术在农机零部件再制造与长效强化领域的实用化与标准化,对支撑农业机械化高效低碳发展具有实际应用价值。

[参考文献]

- [1]刘颖,董丽虹,王海斗.激光熔覆成型的各向异性表征方法研究现状[J].材料导报,2019,33(21):3541-3546.
- [2]李云峰,石岩.激光熔覆耐磨耐冲击复合涂层组织与性能研究[J].机械工程学报,2021,57(12):237-246.
- [3]史亚盟,李景彬,张杰,等.工艺参数对65Mn基熔覆Ni60a/SiC涂层的微观组织与耐磨性能影响[J].机械工程学报,2022,58(16):197-205.

[4]耿家源,王鑫怀,黄有杰,等.基于激光熔覆功率优化的旋耕刀表面强化工艺与性能研究[J].中国农机装备,2026,(3):13-15.

[5]赵越,路松林,尚修盛,等.激光熔覆工艺检验要求与评定[J].造纸装备及材料,2026,55(1):108-110.

[6]王鑫怀,黄有杰,姜帆,等.激光熔覆Ni60/WC涂层对65Mn钢旋耕刀耐磨耐蚀性能的影响[J].中国农机装备,2026,(1):62-65.

[7]彭耀军,张建林,李宇航,等.激光熔覆Stellite6涂层工艺优化及组织性能研究[J].应用激光,2023,43(2):11-19.

[8]肖林林,任雁,高秋华,等.浅谈激光熔覆技术研究进展[J].新技术新工艺,2021,(7):5-7.

作者简介:

赵莹莹(1990--),女,汉族,山东滨州人,硕士研究生在读,研究方向:农业管理专业。