

30MnB5 开沟刀表面铁基合金熔覆层耐磨性与 磨损机理研究

耿冠杰^{1,2} 张艳静² 詹 华^{2,3} 吴佳鹏² 杨谨诚² 汪瑞军^{2,3} 金振林¹ 许 宁⁴

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
3. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083; 4. 山东省农业机械科学研究院, 济南 252100)

摘要: 为提升 30MnB5 开沟刀耐磨性,采用矩形光斑激光熔覆技术制备 3 种铁基合金熔覆层,通过 X 射线衍射仪和扫描电镜分析熔覆层相组成与显微组织,结合湿砂橡胶轮及自研入土部件磨损性能试验台试验测试耐磨性。结果表明:3 种熔覆层与基体呈良好的冶金结合,2 号和 3 号熔覆层均无裂纹、气孔等缺陷,熔覆层内部均存在大量的胞状晶和硬质相;熔覆层主要由 Fe-C 固溶体、 $\text{Mo}_{61}\text{C}_{39}$ 、 Mo_{18}C_7 、 V_4C_3 、(Fe, C)、WC、SiC 及 Ni_2B 等物相组成;湿砂橡胶轮磨损试验及自研入土部件磨损试验均表明 3 号熔覆层耐磨性最优,因其高 Mo 含量促成细小胞状细晶组织,且适量 V、W 元素使 VC、WC、Mo 基碳化物弥散分布,强化耐磨性能;3 组熔覆层的磨损机制均以磨粒磨损为主导,伴随粘着磨损与氧化磨损。3 号铁基合金成分可显著提升开沟刀耐磨性,结合 30MnB5 基材,为低功耗、长寿命农业链式开沟机部件制造提供技术支撑。

关键词: 开沟刀; 铁基合金; 熔覆层; 耐磨性; 失效机制

中图分类号: TH117 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0051-08

OSID:



Wear Resistance and Wear Mechanism of Fe-based Alloy Cladding Layer on Surface of 30MnB5 Ditch Knife

GENG Guanjie^{1,2} ZHANG Yanjing² ZHAN Hua^{2,3} WU Jiapeng² YANG Jincheng²
WANG Ruijun^{2,3} JIN Zhenlin¹ XU Ning⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China

4. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 252100, China)

Abstract: Aiming to improve the wear resistance of the 30MnB5 ditch knife, three types of Fe-based alloy cladding layers were fabricated on its surface using rectangular spot laser cladding technology. The phase composition and microstructure of the cladding layers were analyzed by using X-ray diffraction and scanning electron microscopy. Wear resistance was tested through wet sand rubber wheel and self-developed soil incorporation component wear tests. The results indicated that the three cladding layers exhibited good metallurgical bonding with the substrate, and there were no defects such as cracks or pores in the No. 2 and No. 3 cladding layers. There were a large number of cellular crystals and hard phases inside the cladding layers. The cladding layers were primarily composed of Fe-C solid solutions, $\text{Mo}_{61}\text{C}_{39}$, Mo_{18}C_7 , V_4C_3 , (Fe, C), WC, SiC, and Ni_2B , among other phases. Both the wet sand rubber wheel wear test and the self-developed soil incorporation component wear test demonstrated that the 3 cladding layers exhibited the best wear resistance, attributed to its high Mo content which promoted a fine cellular crystalline structure. Additionally, the appropriate amounts of V and W elements resulted in a dispersed distribution of VC, WC, and Mo-based carbides, enhancing the wear resistance. The wear

收稿日期: 2026-02-14 修回日期: 2026-02-20

基金项目: 山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202315)、农业装备技术全国重点实验室开放课题和中国机械工业集团有限公司青年科技基金项目(QNJJ-ZD-2022-19)

作者简介: 耿冠杰(1984—),男,博士生,中国农业机械化科学研究院集团有限公司正高级工程师,主要从事材料表面工程技术研究,
E-mail: whir9968@whir.net

通信作者: 汪瑞军(1967—),男,研究员,博士,主要从事表面工程和再制造工程研究, E-mail: wangrj@caams.org.cn

mechanism for all three cladding layers was predominantly abrasive wear, accompanied by adhesive wear and oxidative wear. The composition of the No.3 Fe-based alloy significantly improved the wear resistance of the ditch knife, combined with the substrate of 30MnB5, providing technical support for the manufacturing of low-power and long-life agricultural chain trenching components.

Key words: ditch knife; Fe-based alloy; cladding layer; wear resistance; failure mechanism

0 引言

链式开沟机已被广泛应用于盐碱地改造和农田水利建设等施工领域,开沟刀是链式开沟机进行农田土壤切削的关键部件^[1],耕作时受到来自土壤中石英、长石、植物硅酸体及作物秸秆、杂草等的作用,极易发生磨损失效^[2-4]。为减少开沟刀的磨损损失,提高其耐磨性、延长其使用寿命,多种表面处理技术被用于增强刀具耐磨性^[5-7]。相关表面处理技术均能提高开沟刀的耐磨性能^[8-12],延长其使用寿命。然而,感应钎涂存在结合强度低、电弧喷涂易形成缺陷、等离子喷涂孔隙率高,且 TiAlN 和 Ni-P-PTFE 等涂层脆、硬度不足等问题。

近年来,研究者也开展了以激光熔覆技术^[13-17]提升开沟刀耐磨性的相关研究,并取得了一定的研究成果。王超等^[18]在 65Mn 钢刀具表面制备了 Ni60A-WC 涂层,经田间试验测试发现,在激光能量密度为 120 J/mm²时制备的带有熔覆层的刀具相较于无熔覆层的刀具,其磨损质量降低了 63%。综上所述可以看出,表面处理技术对于提高开沟刀耐磨性与使用寿命起到积极作用^[19],但在实际应用方面,目前还存在涂层制造成本高、涂层后增大开沟阻力,需要更大的牵引动力驱动造成碳排放量增大等问题^[20-22]。

为满足农机装备高可靠、轻量化、低成本的发展需求,本研究拟采用高强硼钢材料(30MnB5)作为开沟刀基材,并通过矩形光斑激光熔覆技术在开沟刀刀口制备低成本铁基合金涂层,重点对比 3 种不同成分铁基合金熔覆层的组织、相组成、耐磨性能及磨损机制,筛选耐磨性最优的铁基合金成分,从而开发长寿命、低成本、低功耗开沟刀产品,为高质量农机装备零部件研制提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以 30MnB5 为基材,用机械抛光去除表面污染物,之后用无水乙醇清洁干燥后备用。熔覆材料选用 3 种铁基合金粉末,粉末粒度 53~150 μm,松装密度约 4 g/cm³,球化率 95%,具体成分如表 1 所示。基于结构优化设计的开沟刀如图 1a 所示,采用 30MnB5 硼钢制造,单件质量优化至 2 500 g 以下,较

传统 40Cr 材质的开沟刀质量减少至少 10%。

表 1 铁基合金粉末化学成分质量分数
Tab.1 Chemical composition of Fe-based alloy powder mass fraction %

编号	组分质量分数							
	C	Si	Cr	Mo	V	W	Ni	B
1	2.00	0.62	5.05	0.95	6.10	3.05		(余)
2	2.04	1.33	6.20	0.61	6.31		0.44	0.70
3	2.47	0.60	5.20	1.62	6.30	1.58		(余)

1.2 熔覆层制备工艺

使用 C-ECS-1500/50 型高速激光熔覆设备在 30MnB5 钢表面制备铁基耐磨层,采用光斑尺寸为 16 mm×3.7 mm 的矩形喷嘴,基于前期响应面优化^[23]获得的铁基合金激光熔覆工艺参数进行不同成分铁基合金熔覆层的制备,即激光功率 2.61 kW、送粉速率 9.12 g/min、运动速度 1.5 mm/s、送粉气体氩气的流量 4 L/min、保护气体氩气流量 17 L/min 的工艺参数制备铁基合金熔覆层。如图 1b 所示,沿开沟刀刀口按照红色箭头的方向制备长度为 15 cm、厚度为 1 mm 的熔覆层。

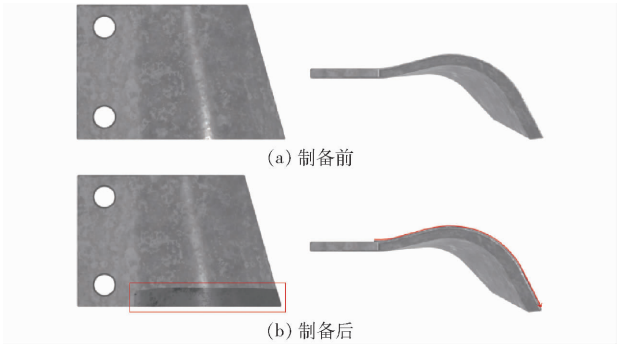


图 1 30MnB5 开沟刀熔覆层制备前后示意图
Fig.1 Schematics before and after preparation of 30MnB5 ditch knife cladding layer

1.3 试验装置与试验方法

采用 Smartlab SE 型 X 射线衍射仪(XRD)对铁基合金熔覆层进行物相分析,测试采用 Co 靶,5(°)/min,10°~120°。采用 Tescan MIRA 3 XMH 扫描电子显微镜(SEM)测试铁基合金熔覆层的微观结构和摩擦磨损形貌。根据 ASTM G105-20 标准测试 30MnB5 钢表面制备的不同铁基合金熔覆层试样的磨粒磨损性能,采用湿砂橡胶轮磨损试验机,将 40~70 目石英砂与水按照比例 3:2 配置试验砂浆,

砂浆总量 2 500 g,橡胶轮硬度为 60(邵尔硬度),试验载荷设定为 100 N,试验转速 240 r/min,预磨转数为 800 r,精磨转数为 4 000 r。每个试验重复进行 3 次,最终结果取 3 次测量的平均值,并使用精度为 0.1 mg 的分析天平进行称量。

表面制备不同铁基合金熔覆层开沟刀的磨损试验在自研的入土部件磨损性能试验台上进行,整体构成如图 2 所示。试验时将 0.5 ~ 1.0 mm 的石英砂与 5 ~ 10 mm 的石英石按照比例 4:6 混合作为磨料,将表面制备了不同铁基合金熔覆层的开沟刀安装在刀轴上,调整入土深度约 20 cm,设定转速 200 r/min,刀刃距离刀轴 300 mm。每个试验重复进行 3 次,最终结果取 3 次的平均值,试验在 60、120 min 时取下样品通过精度为 0.1 g 的天平称量开沟刀,计算不同阶段的磨损损失量。



图 2 入土部件磨损性能试验台

Fig. 2 Wear performance test equipment for soil components

2 结果与讨论

2.1 熔覆层相组成

图 3 所示为 3 种铁基合金熔覆层的 X 射线衍射图谱。物相分析结果表明,熔覆层主要由 Fe - C 固溶体、 $\text{Mo}_{61}\text{C}_{39}$ 、 Mo_{18}C_7 、 V_4C_3 、 (Fe, C) 、WC、SiC 及 Ni_2B 等相组成,各熔覆层的相组成差异与其合金成分密切相关。如表 1 所示,2 号粉末是唯一含有 Ni 和 B 元素的材料,而 1 号和 3 号粉末中未添加这两种元素。在激光熔覆的高温熔融-快速凝固过程中, Ni 和 B 通过扩散反应优先结合生成 Ni_2B 金属间化合物。这解释了为何仅在 2 号熔覆层的 XRD 图谱中检测到 Ni_2B 特征峰,而在 1 号和 3 号熔覆层中未发现该相。此外,1 号和 3 号粉末材料中均含有 W 元素,2 号粉末中则不含 W。作为强碳化物形成元素, W 在熔覆过程中与游离碳结合生成 WC 相,因此在 1 号和 3 号熔覆层的 XRD 图谱中均可见 WC 特征峰,而 2 号熔覆层中无此相。

2.2 微观组织形貌

3 种铁基合金熔覆层的微观组织形貌如图 4 所示。图 4a、4d、4g 为样品熔覆层与基体交界处截面

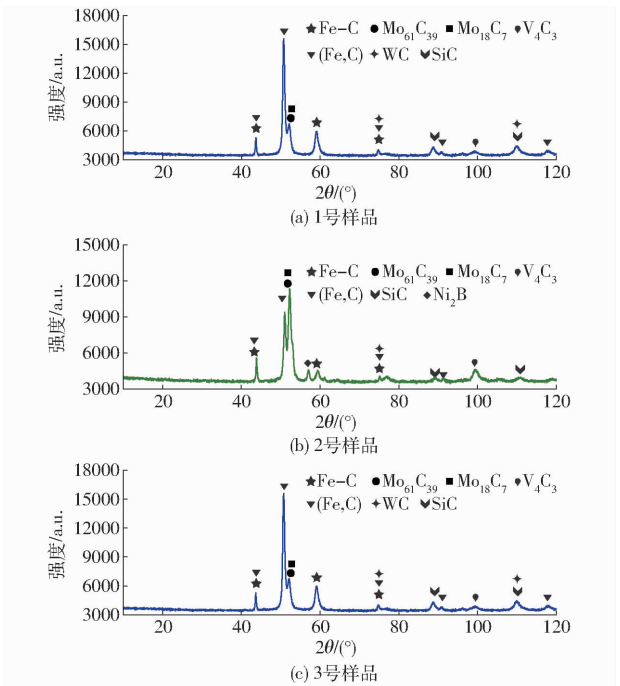


图 3 不同铁基合金熔覆层的相组成

Fig. 3 Phase composition of different Fe-based alloys cladding layers

的放大图,显示出熔覆层与基体间存在明显的界面分隔线,即融合线。在融合线附近,熔池中的金属开始结晶,并以基体晶粒作为形核点向熔覆层延伸生长。激光熔覆过程具有急冷急热的特性,导致晶粒的长大区域受到限制^[24-26]。在此生长机制下,熔覆层与基体材料之间发生了元素扩散和冶金结合,形成了无裂纹和气孔等缺陷的过渡区。

如图 4a 所示 1 号熔覆层截面放大图,熔覆层与基体的融合线清晰,不存在未熔合、气孔、裂纹等缺陷,熔覆层与基体过渡区无裂纹,但局部存在少量分散气孔(尺寸 5 ~ 10 μm)。从图 4c 可以看出,1 号熔覆层的微观组织以细小的胞状晶为主,在图 4b 中可以看出 1 号熔覆层无明显枝晶取向,分析认为这是由于铁基合金材料中的 Mo 与 C 结合生成 $\text{Mo}_{61}\text{C}_{39}$ 、 Mo_{18}C_7 相,这些碳化物在急冷过程中作为晶核,有效抑制了枝晶的生长,促使组织细化。EDS 面扫描(图 5a)显示,在 1 号熔覆层中 V 元素呈颗粒状富集,其分布与显微组织中的黑色颗粒完全重合,结合相组成中存在的 V_4C_3 相,可判定该黑色颗粒为原位生成的 VC 硬质相; Cr 元素在胞晶边界形成连续网状分布,与 Fe 元素、C 元素结合生成 Cr 基碳化物,从而进一步强化晶界。此外,1 号熔覆层中 W 元素均匀分布,可与 C 结合生成 WC 相;但由于局部 W 含量较高(3.05%),出现了少量 WC 颗粒聚集现象。值得注意的是,此类聚集区附近常伴有气孔产生,可能对局部组织的致密度造成不利影响。

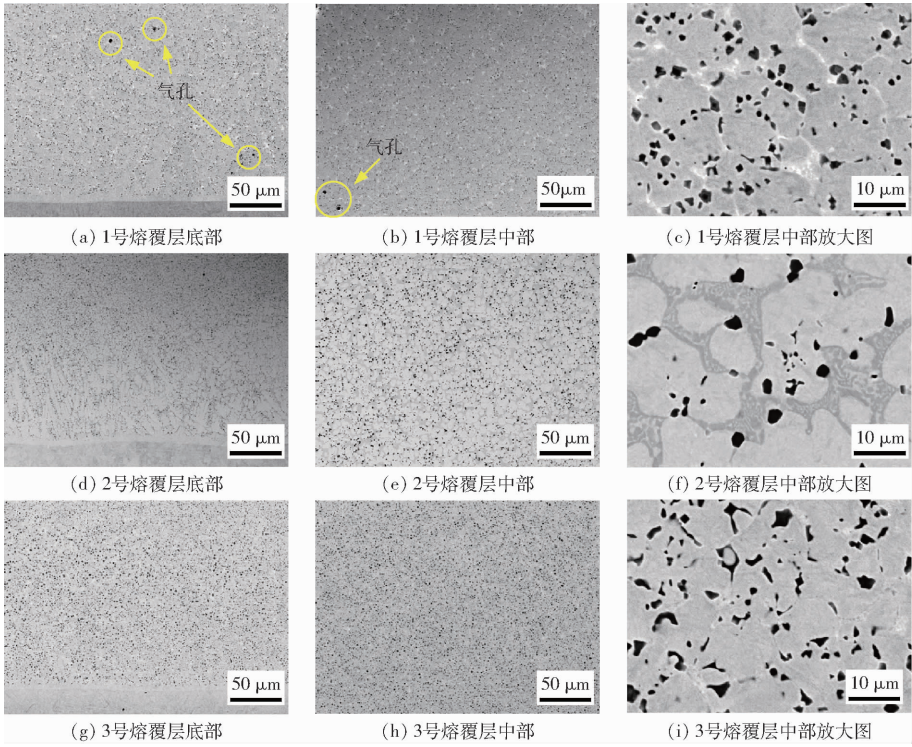


图4 不同铁基合金熔覆层微观组织形貌

Fig.4 Microstructural morphologies of different Fe-based alloy cladding layers

与1号铁基合金材料相比,2号材料中添加了0.44% Ni元素和0.7% B元素,但未添加W元素。如图4d所示,2号熔覆层从结合界面到熔覆层内部呈现为粗大的枝晶结构,枝晶生长方向垂直于结合界面,该形貌主要源于2号熔覆层中特有的 Ni_2B 相。Ni元素与B元素结合形成的 Ni_2B 相熔点较低,在激光熔覆凝固过程中易沿特定方向优先析出,从而引导枝晶定向生长,并促使组织粗化。对比图4c、4f、4i可知,2号熔覆层的胞晶尺寸明显大于1号和3号熔覆层,并存在显著成分偏析现象。

如图5b所示EDS面扫描结果,Cr元素在胞晶边界呈断续网状分布,其连续性较1号熔覆层更弱。此外,2号熔覆层中V元素同样以VC硬质相形式存在,但由于 Ni_2B 相引起的枝晶偏析效应,VC颗粒在组织中的分布较为弥散。这也是导致2号熔覆层组织均匀性低于1号和3号熔覆层的重要原因之一。

3号铁基合金材料中添加了1.62% Mo、1.58% W,未添加Ni和B元素。如图4i所示,3号熔覆层微观组织呈现为均匀的超细胞状晶结构,晶粒细化程度优于1号熔覆层,且未见枝晶生长。这一组织特征主要归因于高含量Mo的强细化作用:Mo与C生成大量Mo基碳化物($\text{Mo}_{61}\text{C}_{39}$ 、 Mo_{18}C_7),显著提高了形核质点密度,在快速凝固条件下完全抑制了枝晶生长,从而形成无明显取向的超细胞状晶。

如图5c所示EDS面扫描结果进一步表明,3号

熔覆层中富集V元素的黑色颗粒VC颗粒分布最为均匀。由于3号材料中C元素含量最高,VC相生成也更为充分。同时,Cr元素在胞晶边界形成连续网状分布且更为致密的网状,与Fe、C结合形成的Cr基碳化物对晶界的强化作用也更为显著。此外,3号熔覆层中W含量低于1号熔覆层,WC相以孤立细小颗粒均匀弥散分布于基体中,避免了如1号熔覆层中出现的WC聚集现象,从而进一步提高了组织的整体致密度。

2.3 湿砂橡胶轮磨损试验

经湿砂橡胶轮磨损试验后,30MnB5基材和3种铁基合金熔覆层的磨损损失质量结果如图6所示。与30MnB5基材相比,3种铁基合金熔覆的耐磨性均显著提升。在相同测试条件下30MnB5基材的平均磨损损失质量为2.5606g,而3种铁基合金熔覆层中最大平均磨损损失质量仅为0.0936g,相当于基材损失质量的3.66%。耐磨性提升主要归因于熔覆层中形成的硬质强化相。

不同成分的铁基合金熔覆层磨损损失质量也存在差异:1号熔覆层的磨损量最高(0.0936g),2号与3号熔覆层的平均损失质量相近,分别为0.0534g和0.0522g。1号熔覆层磨损较大的原因在于硬质相局部聚集与组织致密度不足。尽管其W含量最高、WC相数量多,但过量W导致WC颗粒发生聚集,该区域界面结合较弱且易产生应力集中,抗磨能力下降。在磨粒磨损过程中,聚集的WC颗粒因界面

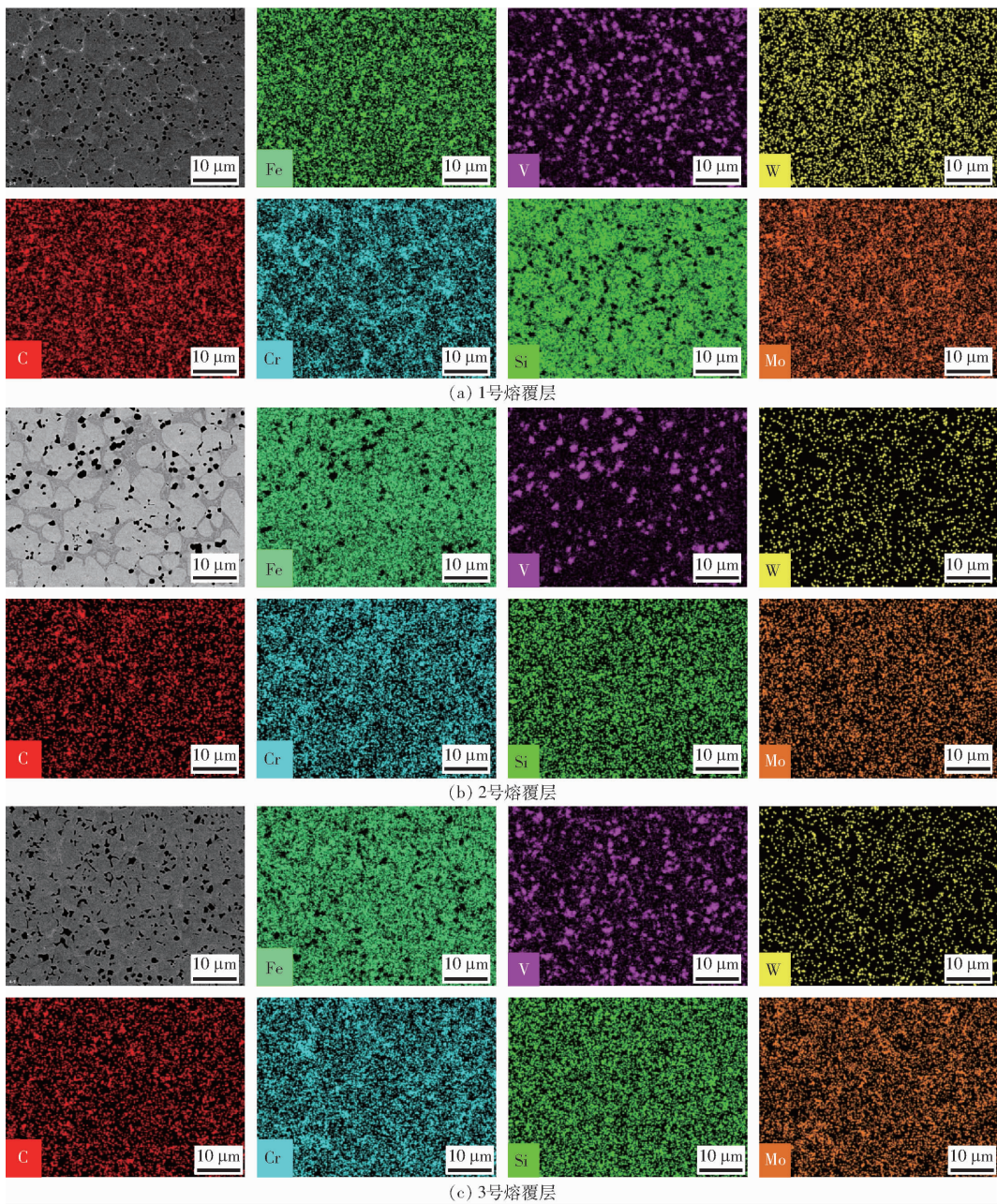


图 5 不同铁基金熔覆层面扫结果

Fig. 5 Scanning results of different Fe-based alloy cladding layers

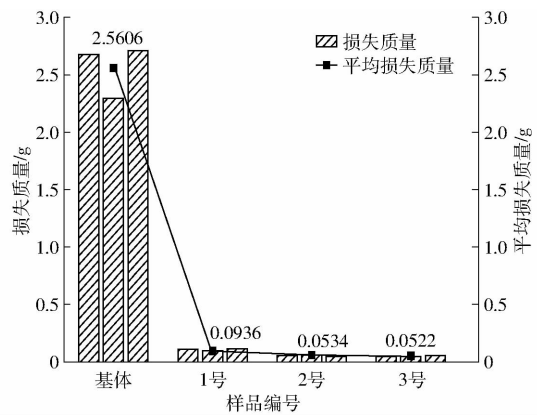


图 6 30MnB5 和不同铁基金熔覆层磨损损失质量
Fig. 6 Loss weight for 30MnB5 and different Fe-based alloy cladding layers

开裂而脱落,脱落的颗粒成为“二次磨粒”,进一步加剧表面切削。此外,熔覆层局部存在气孔,石英砂容易嵌入其中,也加速了材料损失。

2 号熔覆层的磨损损失质量仅比 3 号高 2.30%,尽管 2 号中特有的 Ni_2B 相、较高的 Si 含量形成的 SiC 相以及较高 Cr 含量生成的 Cr 基碳化物理论上均有利于耐磨性提升,但其整体耐磨表现仍略逊于 3 号。

3 号熔覆层表现出最佳的耐磨性能,其磨损损失质量最低(0.052 2 g)。这主要得益于硬质相分布均匀、组织致密度高以及各类强化相的协同作用。3 号材料中较高的 C 含量与 V、W、Mo 等元素结合,生成大量高硬度碳化物(V_4C_3 、 WC 、 $\text{Mo}_{61}\text{C}_{39}$ 等),其

中 VC 和 WC 作为核心耐磨相均匀弥散于 Fe - C 基体中,有效抵抗石英砂的切削与犁削作用^[27]。同时,高 Mo 含量促使形成均匀的超细胞晶结构,显著细化晶粒并避免枝晶偏析;Cr 在胞晶边界形成的连续致密的网状碳化物,进一步提升了组织致密度。该致密细化组织结构不仅能抑制磨粒侵入时的塑性变形,也降低了硬质相脱落的风险,增强了硬质相与基体的界面结合强度,从而避免因界面分离导致的二次磨损。

2.4 不同铁基熔覆层磨损机理分析

磨粒磨损试验后的表面微观形貌及 EDS 面扫氧元素分布如图 7 所示。1 号熔覆层表面存在大量分散气孔(图 7a),其磨损机制以磨粒磨损为主导,协同粘着磨损与氧化磨损。在橡胶轮的壓力作用下,石英砂磨粒易嵌入气孔内部,形成“固定磨粒”,嵌入的磨粒随橡胶轮转动对熔覆层表面产生切削作用,形成宽且深的犁沟;另一方面,气孔作为应力集中点,磨粒冲击时易引发孔周围材料剥落,进一步扩大犁沟范围,最终表现为表面显著的犁削痕迹。依据 Bowden - Tabor 粘着理论,磨损过程中熔覆层与磨粒/橡胶轮的接触面积及表面粗糙度决定粘着概率^[28]。1 号熔覆层的气孔与 WC 聚集缺陷使表面粗糙度升高,磨损时,熔覆层表面凸起区域与磨粒发生局部塑性接触,形成金属粘着点;当粘着点剪切强度低于熔覆层本体强度时,粘着点断裂并随磨粒脱

落,形成粘着磨屑;脱落的磨屑进一步作为“二次磨粒”加剧粘着磨损,形成“粘着-脱落-二次磨损”的恶性循环。EDS 面扫结果显示,1 号熔覆层表面粘着的杂质中含有大量的氧元素,这是由于犁削产生的磨屑与空气中的氧气快速反应,生成脆性氧化膜。氧化膜与基体结合力弱,在磨损冲击和剪切作用下易剥落,暴露新的基体表面;新表面再次氧化并剥落,形成氧化磨损的“氧化-剥落”循环,最终导致氧化磨屑在熔覆层表面堆积,进一步降低表面耐磨性。

2 号熔覆层表面存在连续且较深的犁沟,伴随局部氧化物堆积,磨损损失质量略高于 3 号,其磨损机制同样为磨粒磨损、粘着磨损与氧化磨损的协同作用。其中磨粒磨损是主要磨损形式,而粘着磨损和氧化磨损对磨损的深度和表面状态产生了重要影响。犁沟的形成与磨粒嵌入熔覆层后在湿环境下的滑动行为密切相关,在滑动过程中,磨粒的尖锐边缘不断切削熔覆层表面,导致材料发生塑性变形并形成长而深的犁沟。此外,磨痕表面观察到大量氧元素,一方面,熔覆层中的硬质颗粒在磨粒载荷的反复作用下脱落,暴露了基体较为软弱的区域,使得这些区域更容易被磨粒进一步切削;另一方面,脱落的磨屑与环境中的湿砂和氧气发生反应,生成氧化物,这些氧化物颗粒可能在后续滑动过程中再次参与摩擦作用,进一步加剧了材料的磨损。

虽然 3 号熔覆层的平均磨损损失质量与 2 号熔

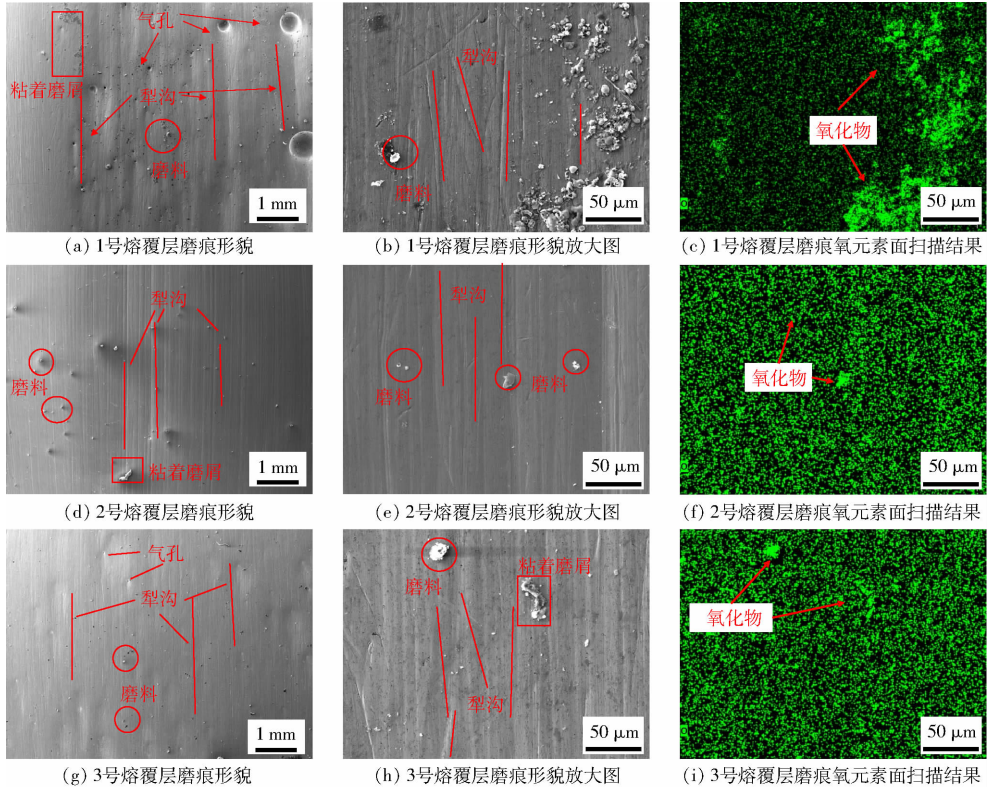


图 7 不同铁基合金熔覆层磨痕形貌及其氧元素 EDS 扫描结果

Fig. 7 Morphologies of wear tracks and EDS scanning results for oxygen element in different Fe-based alloy cladding layers

覆层相近,但磨损后的表面形貌却具有差异。如图 7g 所示,3 号熔覆层表面分布有密集而微小的犁沟,这表明磨粒对熔覆层表面产生了较高的切削和犁削效应。此外,熔覆层表面还存在一些较小的气孔缺陷,从磨损形貌观察可知,这些气孔对附近区域的磨损行为产生了明显影响:在气孔附近,犁沟的深度显著增加。由于气孔降低了局部材料的承载能力,导致磨粒在滑动过程中更容易引发材料剥落和塑性变形。从图 7i 的氧元素面扫结果看,3 号熔覆层表面也存在一定量的氧化物,这与磨损过程中磨屑与环境中的湿砂和氧气反应密切相关。氧化物颗粒的生成可能在后续滑动过程中起到加速磨损的作用,使得磨损行为为进一步复杂化。综合分析,3 号熔覆层的磨损机制主要包括磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损。

2.5 开沟刀磨损试验

按照相同的工艺流程,在开沟刀表面制备了 3 种不同的铁基熔覆层,并采用入土部件试验台进行磨损性能测试。从磨损试验结果(图 8)来看,3 种熔覆层的磨损表现与湿砂橡胶轮磨粒磨损试验结果具有良好的一致性。其中,3 号样品在 60 min 和 120 min 的磨损测试中表现出优异的耐磨性能。

3 结论

(1)对比分析 3 种不同成分的铁基合金熔覆层显微组织发现,Mo 元素与 C 元素结合产生 $Mo_{61}C_{39}$ 、 $Mo_{18}C_7$ 相,起到抑制枝晶生长作用,表现为 1 号和

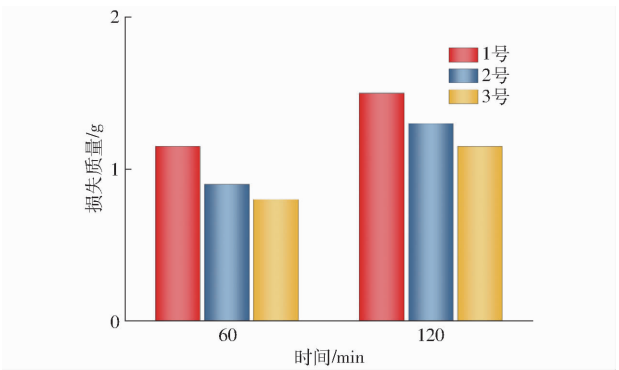


图 8 开沟刀磨损试验结果

Fig. 8 Wear test results of ditch knife

3 号熔覆层的细化组织形貌;而 Ni 元素与 B 元素易结合形成低熔点的 Ni_2B ,使得 2 号熔覆层呈现出枝晶状生长。

(2)湿砂橡胶轮磨损试验和自研入土部件磨损性能试验台上开展的开沟刀磨损试验结果都表明,3 号熔覆层具有最优的耐磨性,这主要是因为 3 号熔覆层中高 Mo 元素含量(1.62%)显著抑制枝晶生长,熔覆层显微组织为细小胞状细晶结构;另外适量的 V、W 元素含量使得硬质相(VC 、 WC 、Mo 基碳化物)又在熔覆层中呈现弥散分布,提升了熔覆层的耐磨性。

(3)3 种铁基合金熔覆层磨损均以磨粒切削与剥落机制为主导,伴随粘着-脱落-二次磨损及氧化-剥落循环机制,作用特征随表面缺陷状态差异变化。1 号受气孔影响显著,2 号犁沟明显,3 号微小气孔加剧局部磨损。

参 考 文 献

[1] NIJLAND H J, CROON F W, RITZEMA H P. Subsurface drainage practices[M]. Wageningen, Alterra; ILRI Publication, 2005, 91 - 100.

[2] MAO Z Q, ZHANG Y, ZHANG K P, et al. Optimization of rotary blade wear and tillage resistance based on DEM - MBD coupling model[J]. Agriculture, 2025, 15(3): 328.

[3] KUMAR M, SAHNI R K, KUMAR M, et al. Impact of roto-till drill on energy saving in wheat production using difference-in-difference method[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025, 79: 104358.

[4] GENG G S, CHEN T L, XIAO M H, et al. The design and testing of a new antitangling and antisticking knife for a wet clay soil environment[J]. Agriculture, 2025, 15(10): 1102.

[5] 郝建军, 刘天龙, 赵建国, 等. 耕整播农机装备触土部件表面耐磨强化研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 14 - 25.

[6] HAO Jianjun, LIU Tianlong, ZHAO Jianguo, et al. Research progress in surface wear resistance strengthening of soil contact components in tillage and sowing agricultural machinery equipment[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(11): 14 - 25. (in Chinese)

[7] CHENG J, XIA J F, ZHENG K, et al. Construction and analysis of a discrete element model for calculating friction resistance of the typical rotary blades[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108303.

[8] QIN Y, GAO Y P, XIE C G, et al. Design and test of an energy-saving bionic-inspired rotary blade: a study on power consumption and soil surface quality[J]. Agriculture, 2025, 15(9): 938.

[9] 朱晨颖, 张雷, 孙志鹏, 等. 感应钎涂工艺在旋耕刀上的应用研究[J]. 电焊机, 2022, 52(10): 23 - 30.

[10] ZHU Chenlei, ZHANG Lei, SUN Zhipeng, et al. Application research of induction brazing technology on rotary blades[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10): 23 - 30. (in Chinese)

[11] 陈吉朋, 王计安, 张雨秋, 等. 一种大耕深旋耕刀表面喷涂重熔一体化加工方法: 115011909B[P]. 2024 - 02 - 27.

[10] GUAN C S, FU J J, CUI Z C, et al. Evaluation of the tribological and anti-adhesive properties of different materials coated rotary tillage blades[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 209: 104933.

[11] NIRANATLUMPONG P, SUKHONKET C, NAKNGOENTHONG J. Wear resistant surface treatment of pulverizer blades[J]. *Wear*, 2013, 302(1–2): 878–881.

[12] KAROONBOONYANAN S, SALOKHE V M, NIRANATLUMPONG P. Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades [J]. *Wear*, 2006, 263(1): 604–608.

[13] 李艳. 65Mn 钢表面激光熔覆 Fe60/WC 复合涂层组织结构及耐磨性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
LI Yan. Study on the structure and wear resistance of laser cladding F60/WC composite coating on 65Mn steel surface[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese)

[14] 曹新娜, 宋路阳, 黄玲玲, 等. 60Si2Mn 钢表面激光熔覆铁基涂层的组织及耐磨性研究[J]. *表面技术*, 2024, 53(7): 164–170.
CAO Xinna, SONG Luyang, HUANG Lingling, et al. Microstructure and wear resistance of laser clad iron-based coatings on 60Si2Mn steel[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(7): 164–170. (in Chinese)

[15] 吴腾. 基于激光熔覆技术的旋耕刀片表面性能提升研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023.
WU Teng. Research on surface performance improvement of rotary tillage blades based on laser cladding technology[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2023. (in Chinese)

[16] ZHANG Y, YANG W F, PENG J, et al. Unveiling wear property and multiscale tribological mechanism of laser cladding-nitriding synergistically enhanced high-entropy alloy coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 710: 163878.

[17] APRAMEYA C R, JOLADARASHI S, RAMESH M R. Surface enhancement of SS304 for high-temperature wear resistance using laser clad Mo-alloyed stellite 6 coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2025, 513: 132457.

[18] 王超, 姜芙林, 杨发展, 等. 激光能量密度对 65Mn 钢表面 Ni60A/WC 复合涂层摩擦磨损性能的影响规律[J]. *表面技术*, 2024, 53(11): 181–192.
WANG Chao, JIANG Fulin, YANG Fazhan, et al. Effect of laser energy density on friction and wear properties of Ni60A/WC composite coating on 65Mn steel surface[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(11): 181–192. (in Chinese)

[19] 夏进启, 闫龙, 詹华, 等. 旋耕刀表面铁基涂层摩擦磨损性能研究[J]. *表面技术*, 2025, 54(7): 86–97.
XIA Jinqi, YAN Long, ZHAN Hua, et al. Friction and wear properties of iron-based coating on surface of rotary blade[J]. *Surface Technology*, 2025, 54(7): 86–97. (in Chinese)

[20] XIE C S, WEI W B, ZHU Y J, et al. Wear reduction damage mitigation and operational reliability analysis of rotary tiller knives based on the self-excited vibration theory[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 231: 109991.

[21] 夏进启, 闫龙, 詹华, 等. 表面涂层厚度对旋耕刀功耗的影响及优化[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(8): 39–48.
XIA Jinqi, YAN Long, ZHAN Hua, et al. Influence and optimization of surface coating thickness on the power consumption of rotary blades[J]. *Transactions of the CSAE*, 2025, 41(8): 39–48. (in Chinese)

[22] ZHANG F B, LUO Z T, ZHENG E L, et al. Imitating pangolin scale structure for reducing adhesion and resistance of rotary tillage in wet-adhesive soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2025, 245: 106306.

[23] ZHANG Y J, ZHAN H, WAN Q, et al. Multi-objective optimization of process parameters for rectangular laser cladding of Fe-based alloy wear-resistant coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2025, 503: 131990.

[24] YU Y Z, DING W K, WANG X, et al. Study on microstructure and wear resistance of multi-layer laser cladding Fe901 coating on 65Mn steel[J]. *Materials*, 2025, 18(15): 3505.

[25] WANG Q, LI Q, ZHANG J W. Effect of boron gradient design on the microstructure and properties of laser-clad Fe-based coatings[J]. *Materials Letters*, 2025, 398: 138932.

[26] ZHUANG D D, ZHANG L S, YAO W S, et al. The effect of ultrasonic vibration on the structure and selected functional properties of laser clad Ti-enhanced AlCoCrFeNi coatings[J]. *Tribology International*, 2025, 212: 111004.

[27] YANG H F, FANG C, ZHAO E L, et al. Wear-resistant high manganese steel/WC composite coatings with twinning-induced hardening ability prepared by laser cladding[J]. *Wear*, 2025, 580–581: 206250.

[28] BRICOTTE L, CHOUGRANI K, ALARD V, et al. Adhesion theories: a didactic review about a century of progress[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2024, 132: 103673.