

WC 粒径影响等离子体熔覆镍基涂层旋耕刀耐磨性研究

吴志立^{1,2} 马英罡¹ 皮祖铭¹ 曾江¹ 周好³ 李专³ 雷明凯⁴ 吴明亮^{1,2}

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 长沙 410128;
3. 中南大学粉末冶金研究院, 长沙 410128; 4. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116000)

摘要: 为了解决旋耕刀硬度低、耐磨性差,难以满足现代农业对旋耕刀工作性能要求的问题,采用等离子体熔覆技术在 65Mn 钢基体表面制备镍基碳化钨(WC)增强复合涂层,系统研究不同碳化钨颗粒粒径对涂层微观结构、力学性能及旋耕刀田间磨损行为的影响。通过制备 Ni-WC 涂层,结合 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、显微硬度测试(显微维氏硬度计)及摩擦磨损试验(湿砂橡胶轮试验),分析涂层的物相组成、组织形貌、硬度和耐磨性;并利用台架试验与田间试验对比不同涂层的旋耕刀磨损。结果表明:50~100 μm 的 WC 颗粒因分散均匀性高,显著细化涂层组织,减少气孔与裂纹缺陷;涂层的平均硬度为 1 155.7 HV0.5,是基体硬度的 4 倍。在相同工况下的湿砂橡胶轮磨损试验中,涂层的磨损损失量为 65Mn 钢的 47.61%,磨损形貌由粘附磨损转变为磨料磨损。利用台架试验验证田间试验的可用性,田间试验表明涂层刀具在耕作 37.7 hm² 旱田后磨损损失量降低 19%。涂层提升了旋耕刀的硬度、耐磨性及强度。

关键词: 等离子体熔覆; 镍基碳化钨涂层; 旋耕刀; 耐磨性

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)19-0159-11

OSID:



Wear Performance Evolution of Plasma-cladded Nickel-based Coated Rotary Tiller Blades Affected by WC Particle Size

Wu Zhili^{1,2} Ma Yinggang¹ Pi Zuming¹ Zeng Jiang¹ Zhou Hao³ Li Zhuan³ Lei Mingkai⁴ Wu Mingliang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China
2. Hunan Modern Agricultural Equipment Engineering Technology Research Center, Changsha 410128, China
3. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410128, China
4. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: Aiming to address the drawbacks of rotary tiller blades, including low hardness and poor wear resistance, which failed to meet the performance requirements of rotary tiller blades in modern agriculture, plasma cladding technology was adopted to fabricate nickel-based tungsten carbide (WC) reinforced composite coatings on the substrate surface of 65Mn steel. The effects of WC particles with different particle sizes on the microstructure, mechanical properties and field wear behavior of coated rotary tiller blades were systematically investigated. Ni-WC composite coatings were prepared and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), microhardness tests (Vickers microhardness tester) and wet sand rubber wheel abrasion tests to analyze the phase composition, microstructure morphology, microhardness and wear resistance of the coatings. Bench tests and field trials were further carried out to compare the wear loss of rotary tiller blades coated with different composite coatings. The results showed that WC particles sized 50~100 μm exhibited excellent dispersion uniformity, which significantly refined the coating microstructure and reduced pore and crack defects. The average microhardness of the coating reached 1 155.7 HV0.5, approximately four times of that of the 65Mn substrate. In wet sand rubber wheel abrasion tests under identical working conditions, the mass wear loss of the coating was only 47.61% of that of the 65Mn substrate, and the dominant wear mechanism shifted from adhesive wear to abrasive wear. Bench tests verified the reliability of field trial

收稿日期: 2026-04-23 修回日期: 2026-05-06

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2023NK2009)和湖南省智能农机装备创新研发项目(HNNJ-2023-03)

作者简介: 吴志立(1979—),男,副教授,博士,主要从事农业机械表面工程研究,E-mail: zhiliwu@hunau.edu.cn

results. Field experiments demonstrated that the wear loss of coated blades was decreased by 19% after ploughing 37.7 hm² of dry farmland. The composite coating effectively improved the hardness, wear resistance and structural strength of rotary tiller blades.

Key words: plasma cladding; nickel-based tungsten carbide coating; rotary tillage blades; wear resistance

0 引言

旋耕刀是农业生产中最普遍、最重要的农业机械之一。在工作过程中不断经受来自土壤中各种硬质磨料和植物根茎的冲击和磨损作用,因此出现了不同程度的磨损失效情况。旋耕刀磨损过快则无法保证耕地质量,使耕地成本和时间都增加。所以,迫切需要提升材料的耐磨性,延长金属零件的使用寿命。目前,传统的热处理技术可以在一定程度上提高刀片的耐磨性,但存在工艺复杂、成本高、难以大批量生产等问题^[1-6]。

等离子体熔覆技术是目前表面技术中制备硬质涂层的常用手段,制备方法在很大程度上影响涂层的耐磨性能。其以钨极与待加工工件之间产生的等离子弧作为核心热源,当等离子弧释放的热量作用于硬面涂层材料与工件表面时,二者会在高温作用下共同熔化,进而形成具有一定流动性的熔池^[7-10]。碳化钨(WC)因具有硬度高、弯曲强度大、极强的耐磨性等优异的物理性能,被广泛用于硬质合金的制造。Ni基自熔性粉末不仅具有优异的耐磨性、耐蚀性和自润滑性,且Co、Ni等金属可以吸收部分来自等离子束或激光束的热量,减少碳化钨表面温度,抑制碳化钨颗粒的溶解^[11-14]。

Tahaei等^[15]采用等离子转移弧(PTA)堆焊工艺在D2工具钢表面制备镍基涂层,研究添加不同质量分数(1%~7%)纳米碳化钨(WC)对涂层显微组织与磨损性能的影响。结果表明,3%纳米WC涂层在1N/5N载荷下均表现最优,磨损率显著低于纯镍基涂层,且随载荷升高磨损机制转为黏着磨损。陈吉朋等^[16]采用超音速电弧喷涂技术在旋耕刀材料65Mn钢上制备了硬质碳化钨(WC)涂层,得到平均硬度达HRC51的涂层;WC合金有效地沉积在基体表面上,涂层表面光滑、平整,无明显宏观裂纹或可见缺陷。郝建军等^[17]采用等离子体堆焊技术在65Mn钢基体上制备Fe-Cr-C-V,在45号钢上及

开沟器铲尖制备Mo₂FeB₂堆焊层;结果表明,与65Mn淬火钢相比,Fe-Cr-C-V堆焊层的维氏硬度提高了75%,磨损质量降低了约67%。相同工况下的磨损试验表明,涂层的平均磨损量(19.20 mg)和平均摩擦因数(0.294)与基体相比分别降低了52.9%和42.4%;试验证明:Fe-Cr-C-V与Mo₂FeB₂堆焊层均具有较好的耐磨、耐蚀和耐冲击综合性能。

目前对WC颗粒增强机理研究较多,但对于不同粒径的WC颗粒性能研究较少。WC颗粒粒径较大时会导致WC颗粒与铁基融合不充分,颗粒粒径较小,WC颗粒会提前溶解,与基体中元素共同析出,导致涂层韧性不足。本研究将不同粒径WC的Ni-WC粉末熔覆至试块与旋耕刀上,系统研究湿砂橡胶轮摩擦磨损试验、台架试验与田间试验中不同粒径WC涂层对65Mn钢基体的强化作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

本试验使用的熔覆基体为55 mm×28 mm×5 mm的65Mn钢板和相同材质的245型旋耕刀。其中65Mn钢板用于进行工艺优化及组织性能的测试分析,旋耕刀用来进行台架试验与田间试验。化学成分含量如表1所示。涂层选用不同粒径Ni-WC粉末,WC颗粒为片状(WC颗粒粒径分别为0~50 μm、50~100 μm、100~150 μm、0~200 μm),Ni为球体。图1为不同粒径相同放大倍数下的电镜图像。化学成分含量如表2所示。图2为0~200 μm粉末粒径分布图,由超景深显微镜拍摄,采用ImageJ软件进行处理,共统计1 000个WC颗粒,按20 μm为一组进行统计划分。粉末平均粒径D为(83.9±45.4) μm,其中83.9 μm为WC颗粒的平均粒径,45.4 μm为标准偏差。65Mn钢板的前处理流程为:使用金相砂纸(SiC)从120目打磨至800目,然后在酒精中进行超声清洗,最后吹风机吹干备用^[18]。

表1 65Mn钢化学成分组成
Tab.1 Chemical composition of 65Mn

成分	Mn	C	Si	Ni	Cr	P	S	Fe
质量分数	0.90~1.20	0.62~0.70	0.15~0.35	≤0.25	≤0.25	≤0.035	≤0.035	Bal

注:Bal表示余量。

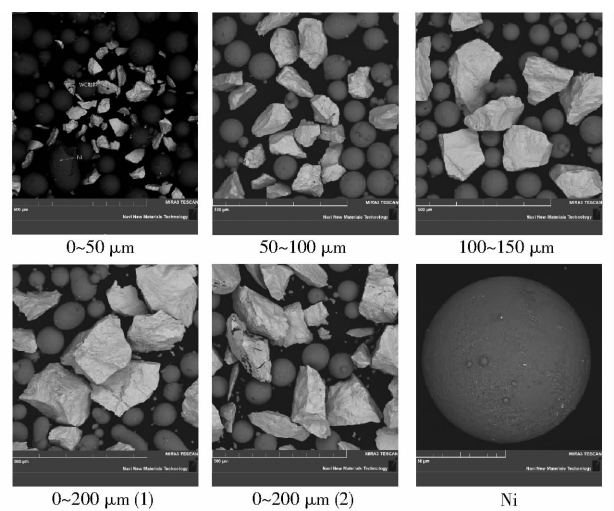


图 1 粉末 SEM 图像

Fig. 1 SEM image of powder

表 2 Ni-WC 化学成分组成

Tab.2 Chemical composition of Ni-WC %								
成分	W	C	Si	Ni	Cr	B	S	O
质量分数	46.85	2.24	2.21	36.26	8.63	1.52	2.21	<0.05

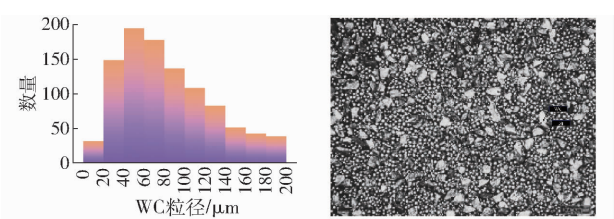


图 2 0~200 μm 粉末粒径分布统计与形貌图

Fig. 2 Statistical diagram of particle size distribution and morphology for 0~200 μm powder

采用 DML-V03BD 型数控等离子体熔覆设备制备涂层,采用同步送粉的方法,以氩气作为保护气,试验其他参数设置为:送粉气/离子气/保护气流量分别为 3.5、1.5、10 L/min,纵向位移量 F 分别为 1、2、3 mm。设备装置如图 3 所示。

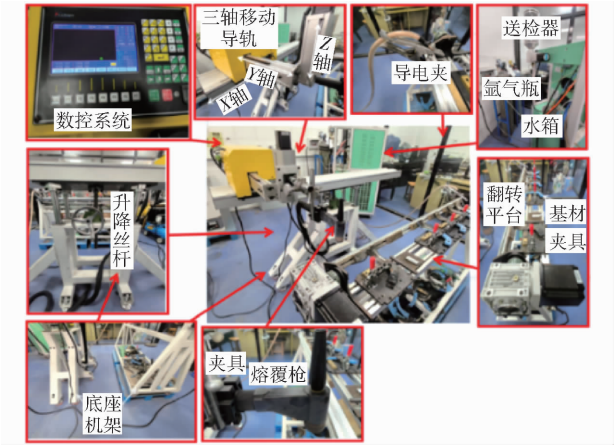


图 3 等离子体熔覆设备

Fig. 3 Plasma cladding equipment

使用 Tescan Mira 4 型扫描电子显微镜观察涂

层的微观形貌和显微结构,通过 SEM 自带的 EDS 能谱分析系统进行元素成分分析。采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪分析涂层的物相组成,扫描范围 2θ 为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$,扫描速度 $5(^{\circ})/\text{min}^{[19]}$ 。

采用 HV-1000Z 型显微维氏硬度计进行涂层显微维氏硬度测试,加载载荷 5 N,加载时间 5 s,测试时从距离表层 50 μm 处开始每隔 200 μm 测试一个点,通过在同一深度下测试 3 个点取平均值来降低测试误差。

采用 MLS-225 型湿砂橡胶轮磨料磨损试验机进行磨损性能测试,选取石英砂粒度 40~70 目,试验加载载荷 70 N,每次取石英砂 2 500 g,水 500 mL,每次试验 1 000 r,转速为 200 r/min^[20]。

使用湘仪电子分析天平对湿砂橡胶轮磨损试验结果进行称量,设备精度 0.000 1 g。田间测试中使用 SC900 型土壤紧实度测量仪测量土壤坚实度,采用 S 形取样,避开凹坑、凸起与石子,共测试 9 个点,试验结果取平均值。使用含水率测定仪测量土壤含水率,采用五点取样法,结果取平均值。

1.2 工艺优化

根据前期试验结果与设备参数可调范围,以熔覆电流、熔覆速度以及纵向位移为变量设计正交试验,优化粒径 0~50 μm WC 颗粒的熔覆工艺。剩余一列为空列以估算试验误差。对试验结果进行极差分析(表 3)与方差分析(表 4)。

表 3 试验设计与结果

Tab.3 Experimental design and results					
试验 编号	因素				磨损量/ g
	熔覆电流/ A	熔覆速度/ (mm·s ⁻¹)	纵向位移 量/mm	空列	
1	90	20	1.00	1	0.426 2
2	90	25	1.25	2	0.535 6
3	90	30	1.50	3	0.287 3
4	100	20	1.25	3	0.424 3
5	100	25	1.50	1	0.434 35
6	100	30	1.00	2	0.082 8
7	110	20	1.50	2	0.111
8	110	25	1.00	3	0.107 95
9	110	30	1.25	1	0.075 75
K_1	1.249 1	0.961 5	0.616 9	0.936 3	
K_2	0.941 5	1.077 9	1.035 7	0.729 4	
K_3	0.294 7	0.445 9	0.832 7	0.819 6	
k_1	0.416 4	0.320 5	0.205 7	0.312 1	
k_2	0.313 8	0.359 3	0.345 2	0.243 1	
k_3	0.098 2	0.148 6	0.277 6	0.273 2	
极差 R	0.318 1	0.210 7	0.140 0	0.069 0	
主次因素	$A > B > C$				
最优组合	$A_3 B_3 C_1$				

表 4 方差分析
Tab.4 Analysis of variance

因素	离差平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
熔覆电流	0.158	2	0.079	22.052	0.043
熔覆速度	0.075	2	0.038	10.515	0.086
纵向位移量	0.029	2	0.015	4.074	0.197
误差	0.007	2	0.004		

对表 3 试验结果开展方差分析(表 4), $A_3B_3C_1$ 组涂层磨损量显著低于其余 8 组。熔覆电流对磨损量影响显著,方差分析与极差分析结论一致,确定最优工艺参数:电流 110 A、熔覆速度 30 mm/s、纵向位移 1 mm,其余参数固定。以此参数熔覆不同粒径 Ni-WC 粉末,开展后续性能表征。

2 分析与测试

2.1 涂层微观组织

结合图 4 与表 5 分析可得:涂层的微观组织可分为 4 类典型相:白色杆状相 T、团絮状相 Q、多边形块状相 S 及十字型相 M。

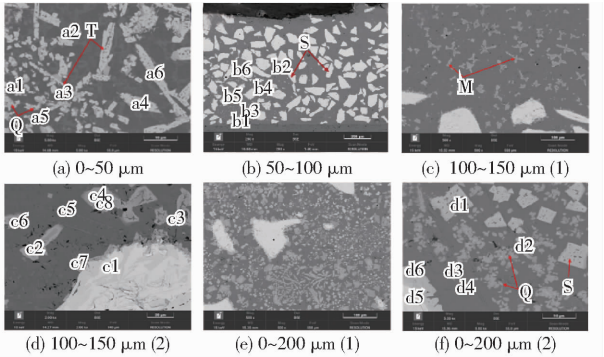


图 4 不同粒径的 Ni-WC 涂层截面微观组织形貌
Fig.4 Cross-sectional microstructural morphology of Ni-WC coatings with different particle sizes

其中,T 富含 W 与 Cr,对应 XRD 中的 WC 与 W_2C 硬质碳化物,在 0 ~ 50 μm 涂层中弥散分布;Q 为连续分布的 Ni 基固溶体,固溶了 Fe、W 等元素,作为粘结相承受并传递载荷,赋予涂层良好韧性,避免硬质相剥落;S 对应 W 或 W_2C 相,在 50 ~ 100 μm 及 0 ~ 200 μm 涂层中以块状存在,起到局部强化作用,但也易成为应力集中源;M 仅出现于 100 ~ 150 μm 涂层,其 Cr 与 W 显著富集,涂层裂纹与气孔等缺陷随 WC 粒径增大而增多,这是由于大颗粒 WC 周围更容易产生裂纹,且大颗粒在磨损过程中裸露在外的面积更大,受到冲击时更难以固定而脱落^[21-22]。

2.2 涂层物相分析

结合图 5 涂层 XRD 图谱与表 5 能谱点扫结果可得,涂层主要物相由 W、WC、 W_2C 、 Cr_3C_2 、Ni 基固

表 5 涂层能谱分析
Tab.5 EDS analysis of coating

位置	原子百分比/%				
	Ni	C	Fe	W	Cr
a1	32.8	5.4	37.6	12.9	2.7
a2	23.6	6.9	43.2	8.5	10.5
a3	13.36	6.01	21.05	50.37	4.56
a4	23.83	6.83	44.55	9.18	11.05
a5	18.52	6.04	19.99	45.9	3.91
a6	10.68	6.06	16.25	57.57	5.2
b1	0.3	5.3	0.4	90.8	0.1
b2	51.3	3.6	31.0	0.9	4.9
b3	25.8	2.8	10.5	28.5	20.4
b4	64.0	3.8	11.6	0.8	4.7
b5	0	7.3	0.3	87.6	0
c1	0.17	5.77	0.2	92.16	0.13
c2	7.17	6.11	9.04	38.93	29.05
c3	6.73	9.25	6.75	44.34	23.31
c4	7.22	3.28	7.82	49.54	25.59
c5	64.49	6.86	15.75	0.63	1.83
c6	7.93	5.32	9.38	43.7	26.85
c7	6.42	5.53	7.68	50.04	20.06
c8	7.58	3.74	7.77	49.53	23.80
d1	7.3	2.6	4.7	64.2	13.5
d2	7.5	2.8	6.4	56.3	16.4
d3	6.1	8.2	3	46.4	33.8
d4	64.2	3.8	15	1.2	2.2
d5	0.9	5.3	0.6	91.6	0.1
d6	12.3	3.3	3.4	66.6	6.4

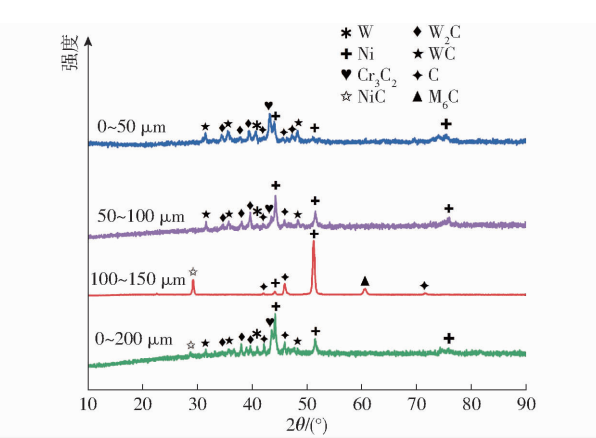


图 5 涂层 XRD 衍射图谱
Fig.5 XRD diffraction pattern of fused cladding layer

溶体、 M_6C 及游离 C 组成。其中,WC、 W_2C 为主要硬质增强相,由 WC 颗粒在熔池中部分溶解与原位反应生成,显著提升涂层硬度与耐磨性; Cr_3C_2 由 Cr 与 C 元素结合形成,可进一步提高涂层高温稳定性与耐磨性能;Ni 基固溶体作为粘结相,能够支撑硬质相、缓冲应力并保证涂层韧性;游离 C 起到固体润滑作用。

在 50 ~ 100 μm 涂层中,硬质相分布均匀,组织

致密性良好,既避免了较小粒径 WC 易团聚的问题,又未出现较大粒径带来的元素偏聚现象。该区间内 WC 溶解与扩散较为充分,能够形成 WC、W₂C 及 Cr₃C₂复合硬质相,同时不生成脆性相 M₆C,涂层兼具较高硬度与良好韧性,耐磨性能稳定优异。

当粒径增大至 100 ~ 150 μm 时,WC 颗粒比表面积显著减小,溶解不充分,W、Cr、C 原子在局部区域过度富集,满足 M₆C 脆性相的生成条件,因此在该涂层中出现 M₆C。而在 0 ~ 200 μm 粒径涂层中,小颗粒 WC 与大颗粒 WC 形成协同作用,小颗粒促

进成分均匀化,有效抑制元素局部富集,从而避免了 M₆C 相的析出。

图 6 为涂层线扫结果,由于图 6c 中涂层较厚,故标尺为 1 mm,其余皆为 500 μm。通过观察不同 WC 粒径下涂层截面 EDS 线扫结果分析,当线扫过亮白色颗粒时,该位置有较多的 W 元素,因此判断亮白色颗粒为 WC 颗粒或富含 W 元素的其他化合物。Ni 元素的谱图中波谷刚好对应 W 元素谱图的波峰,因此可以判定灰色部分主要为富含 Ni 元素的粘结相。

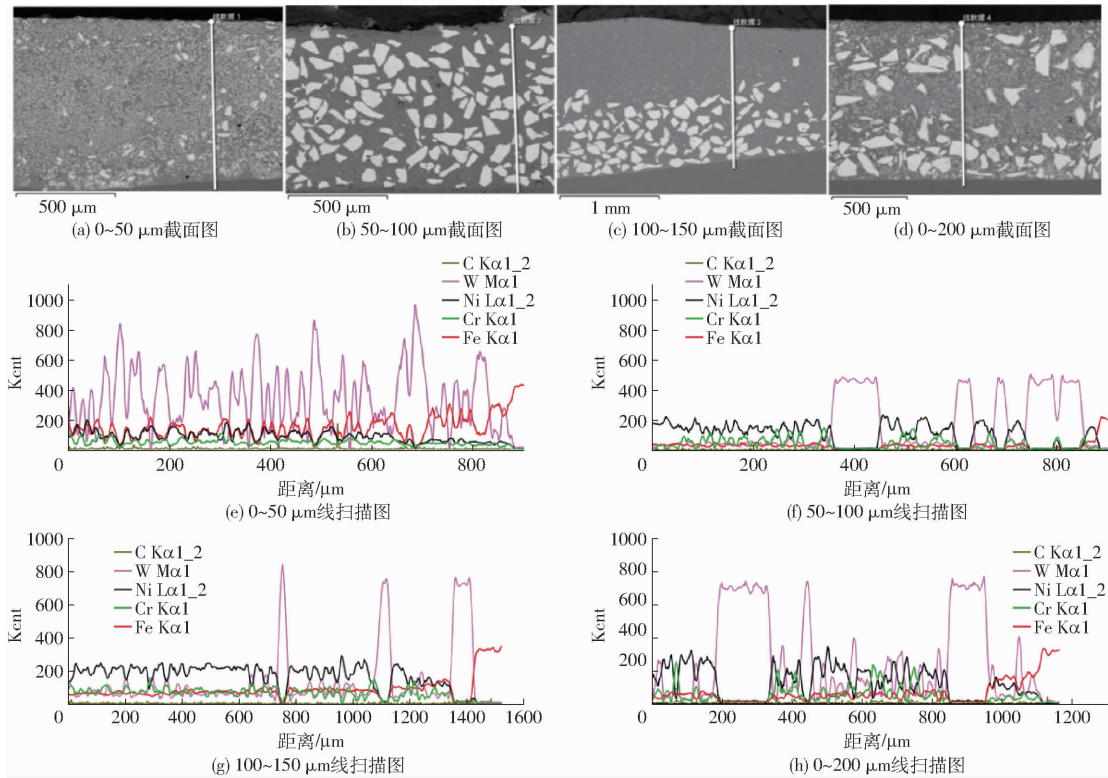


图 6 不同粒径的 Ni-WC 涂层线扫结果

Fig. 6 Linear scanning results of Ni-WC coatings with different particle sizes

在 100 ~ 150 μm 涂层中,由于大颗粒占比较多,出现 WC 颗粒的沉积现象。熔覆过程中,在 高能等 离子束作用下,熔池中存在剧烈涌动。由于颗粒质量大、惯性大,所需分散动能及本身重力大于对流作用所提供的对流动能。此时对流无法正常进行卷吸,仅能对其进行微弱推动作用,导致大颗粒难以克服重力沉降趋势而缓慢下沉,最终导致出现大颗粒沉底现象^[23-24]。

图 7 为不同粒径下 Ni-WC 熔覆层截面面扫图,包括熔覆层背散射电子成像图,以及 Fe、Cr、Mn、Ni、W、C 共 6 种元素的 EDS 面扫描图。由图 7 可见,图 7b 的微观组织结构最为优良。BSE 图像显示该涂层内部组织致密,WC 颗粒以多面体状均匀弥散分布于 Ni 基体中,未观察到明显的颗粒沉降或团聚现象,且与基体结合界面完整致密,无裂纹、气孔

等冶金缺陷。EDS 元素面扫分布进一步证实,W、C 元素与亮白色 WC 颗粒位置高度重合,表明增强相保留良好且分布均匀;而 Ni、Cr 等合金元素均匀分布于基体区域,说明该粒径范围内的粉末熔覆充分,实现了较好的冶金结合。

2.3 涂层显微硬度分析

图 8 为 Ni-WC 涂层最优参数下载面显微硬度变化图。由图分析,随着粒径的增大,涂层硬度呈上升趋势,其中 100 ~ 150 μm 涂层在距离基体表面较近处硬度达到最高。这种现象是由于 WC 颗粒未均匀分布在涂层内,沉积所致。各涂层显微硬度分别为:0 ~ 50 μm 为 836.5 HV0.5,较基体提升 1.8 倍;50 ~ 100 μm 为 1 155.7 HV0.5,提升 4.0 倍;100 ~ 150 μm 为 915.2 HV0.5,提升 2.8 倍;0 ~ 200 μm 为 1 161.5 HV0.5,提升 4.0 倍。

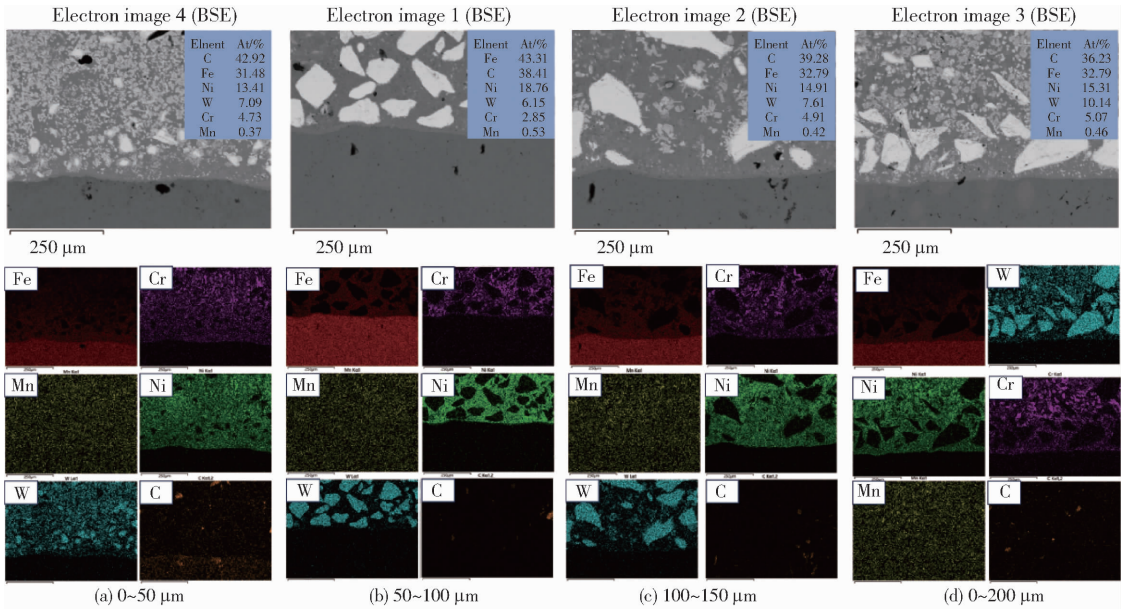


图 7 不同粒径的 Ni - WC 涂层面扫描结果

Fig. 7 EDS mapping results of Ni - WC coatings with different particle sizes

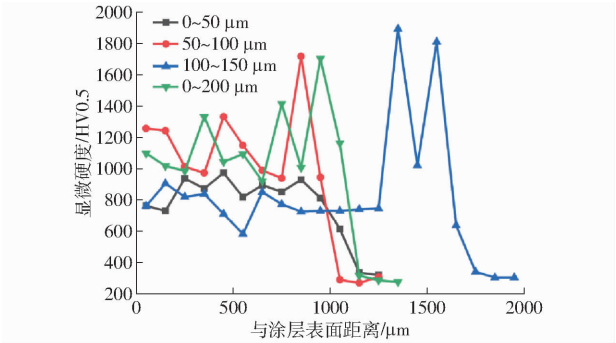


图 8 不同粒径的 Ni - WC 涂层截面显微硬度对比

Fig. 8 Comparison of cross-sectional microhardness of Ni - WC coatings with different particle sizes

2. 4 涂层磨损性能分析

图 9 为湿砂橡胶轮试验示意图,其属于标准化的磨料磨损试验(水砂比为 1:5)。材料的损失方式主要为磨料磨损,磨粒在材料表面或滚动或以一定的压入深度沿线速度方向进行犁削,产生材料的切削或将材料向前推挤产生犁沟,在表面留下凹坑或切槽,或者在多次撞击冲刷作用下产生裂纹,随裂纹

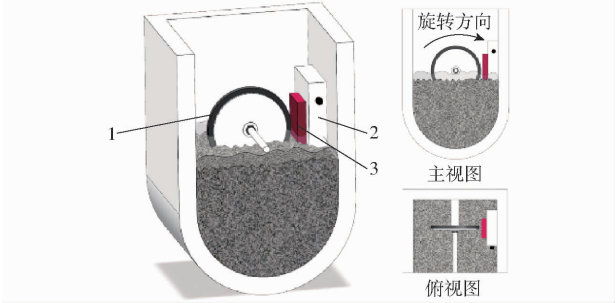


图 9 湿砂橡胶轮试验示意图

Fig. 9 Schematic of wet sand rubber wheel test

1. 橡胶轮 2. 夹具 3. 试样

扩展并最终造成材料的脆性脱落^[25-26]。

图 10、11 分别为涂层进行湿砂橡胶轮摩擦磨损试验的磨损前后微观形貌对比与磨损数据。在粒径 0 ~ 50 μm 和粒径 50 ~ 100 μm 的涂层中,磨损前后都可观测到表面的 WC 颗粒,说明 WC 颗粒没有出现沉底现象,分布均匀,材料的磨损形式主要是磨粒对 WC 颗粒与颗粒间的粘结相的滑切和犁削作

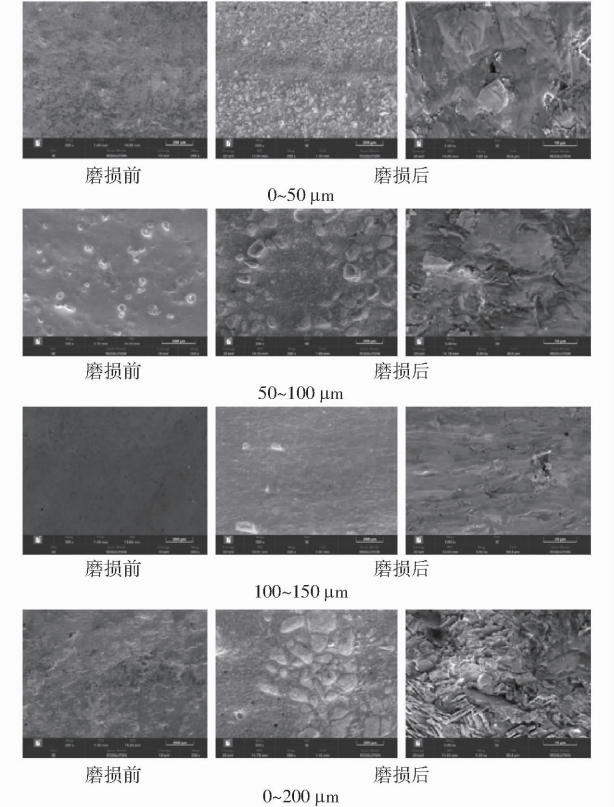


图 10 不同粒径的 Ni - WC 涂层磨损微观形貌

Fig. 10 Wear micro-morphology of Ni - WC coatings with different particle sizes

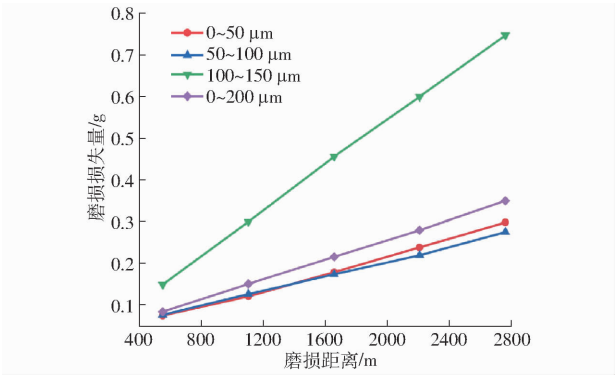


图 11 不同粒径的 Ni - WC 涂层磨损试验结果
Fig. 11 Wear test results of Ni - WC coatings with different particle sizes

用^[27-28]。粒径 100 ~ 150 μm 的涂层磨损最为严重,结合显微硬度与电镜图像分析得:由于 WC 颗粒大面积沉底,表面几乎没有出现 WC 颗粒,磨粒在表面留下了大量密集连续的切削痕迹和凹坑。由于 WC 颗粒沉底现象较为严重,涂层表面硬质颗粒较少,因此磨损速度较快,且由于涂层上部硬度较低,平均只有 729.6 HV0.5,当硬度较低的 Ni 元素与少量析出碳化物承受磨粒连续冲击与梳刷作用力出现脱落后,会出现裸露的 WC 颗粒剥落现象,进一步加剧磨损。

0 ~ 200 μm 涂层磨损前后颗粒形貌相近,其材料损失主要为磨粒对颗粒间的滑切与犁沟,以及 WC 颗粒受冲刷、撞击产生裂纹而脆性脱落颗粒^[29]。

2.5 台架试验

台架试验为可控工况下的磨料冲击复合磨损试验,模拟刀具真实切削运动且排除复杂干扰,故以此作为田间试验前的验证试验与加速试验;采用土槽试验台对 2 把原刀以及 4 把带有不同 WC 颗粒粒径的 Ni - WC 涂层旋耕刀进行耐磨性试验;土槽试验台刀盘每组装 3 把刀,共进行了 2 组试验,第 1 组为 0 ~ 50 μm 与 50 ~ 100 μm 涂层刀以及 1 把原刀,第 2 组为 100 ~ 150 μm 与 0 ~ 200 μm 涂层刀以及 1 把原刀。试验台结构如图 12a 所示,试验前后分别称量,试验时将旋耕刀安装进土槽试验台,试验的具体参数设置如下:刀盘电机转速 251 r/min,土槽转速 11.5 r/min,旋耕刀刀尖距离土槽回转中心 1.1 m,旋耕刀入土深度为 (14 ± 2) cm。试验时间 24 h。测试土壤为砂土,土壤含水率 10%。

试验磨损结果表明:经磨损试验测试,0 ~ 50 μm 涂层刀具损失量为 13.5 g,50 ~ 100 μm 涂层刀具损失量为 3.6 g,100 ~ 150 μm 涂层刀具损失量为 9.8 g,0 ~ 200 μm 涂层刀具损失量为 12.2 g,原刀具平均损失量为 14.6 g。对比可知,50 ~ 100 μm 涂

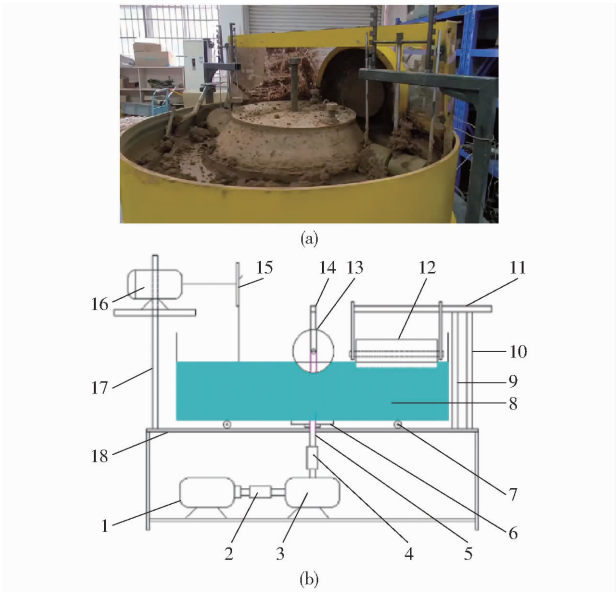


图 12 土槽试验台

Fig. 12 Soil trough test bench

1. 土槽驱动电机 2,4. 联轴器 3. 减速器 5. 土槽驱动轴 6. 法兰盘 7. 土槽支撑轮 8. 回转土槽 9、10、14、17. 立柱 11. 支撑臂 12. 压实器 13. 覆土器 15. 旋转刀盘 16. 触土刀具驱动电机 18. 机架

层刀具损失量最低,仅为原刀具磨损量的 24.7%,耐磨性能最优。

图 13、14 为土槽试验后不同粒径 WC 颗粒 Ni - WC 涂层与原刀的宏观磨损与 SEM 扫描电镜微观磨损形貌图。观察磨损形貌发现,原刀表面有大量连续且密集的划痕与凹坑,65Mn 钢基体在承受磨料的连续冲击与梳刷作用下,大量基体材料被带走,且磨痕较宽。

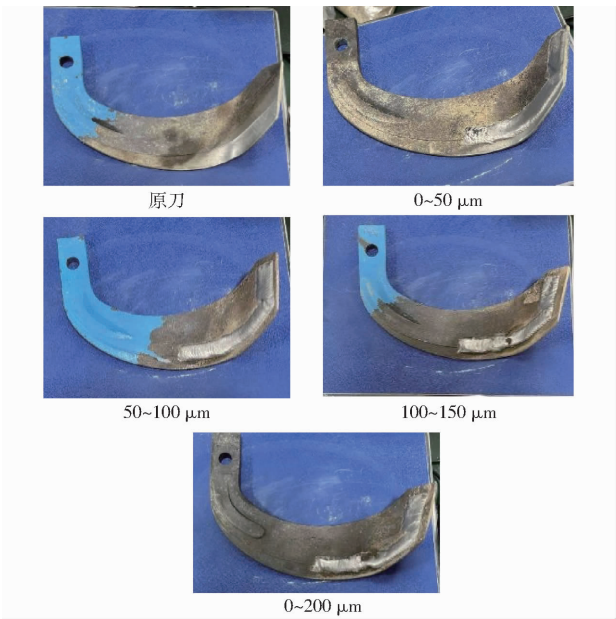


图 13 土槽试验后旋耕刀宏观表面形貌

Fig. 13 Macroscopic surface morphology of rotary tiller blade after bench test

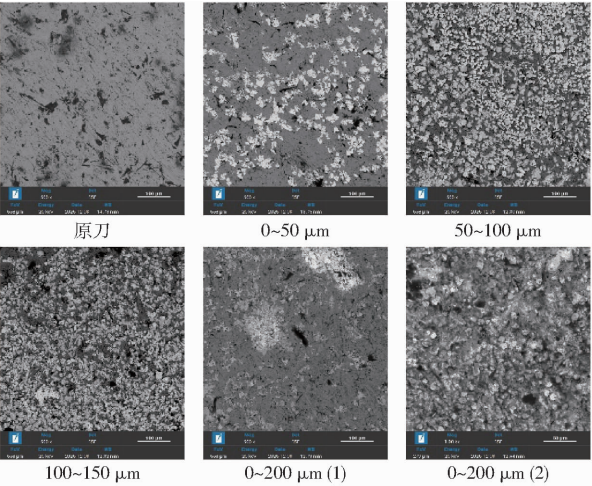


图 14 土槽试验磨损后旋耕刀微观表面形貌
Fig. 14 Microscopic surface morphology of rotary tiller blade after wear in soil bin test

在 0 ~ 50 μm 涂层旋耕刀表面观测到大量磨痕,磨痕较细且深浅不一的凹坑过多,并出现 WC 颗粒脱落现象。50 ~ 100 μm 涂层旋耕刀表面可以看到表面镶嵌大量 WC 颗粒,分布均匀、镍基作为粘结相起到支撑 WC 颗粒作用。在高硬度涂层的保护作用下,能有效抵御土壤硬质颗粒的切削与刮擦^[30-32]; 100 ~ 150 μm 与 0 ~ 200 μm 涂层则可以观察到凹坑较多,且出现较多的 WC 颗粒脱落痕迹与刮擦痕迹。

2. 6 田间试验

为验证最优涂层在实际田间工况下的适应性,在湖南省浏阳市沙市镇农机合作社开展田间磨损试验。动力设备为 2BYG-230 型油菜旋耕施肥播种机,作业面积为 37.7 hm^2 ,旋耕刀转速为 760 r/min,拖拉机前进速度为 5 ~ 8 km/h,土壤硬度为 1 200 kPa,土壤含水率为 20%,旋耕机幅宽 2.3 m。试验组与对照组分别设置 4 把刀具,试验组为 50 ~ 100 μm 涂层刀,对照组为原刀。如图 15 所示,将涂层刀与未处理的刀交替安装于刀轴上进行对比试验。在试验进行至 20 hm^2 时将刀拆下后进行清洗吹干,然后进行称量,称量后装回原位。在 37.7 hm^2 时试验结束,按相同流程测量,并观察表面。选取安装在相同安装平面的涂层刀以及原刀,采用线切割机切割成 10 mm $\times$ 10 mm 小块,随后在超声波清洗机中清洗,经吹干后进行 SEM 电镜观察表面磨损状况。



图 15 田间试验场景
Fig. 15 Field test site

图 16 为旋耕刀田间试验前后宏观表面对比,可以从图中看出,工作面积达到 37.7 hm^2 后原刀正切刃和侧切刃均磨损严重,尤其是侧切刃处,且在弯折点处宽度减少 50% 左右。故选择熔覆在此处是正确的位置。由图 17 可见,涂层刀磨损量低于原刀,说明涂层对旋耕刀刃口产生了较好的保护作用,且随着磨损试验的进行,涂层所处的位置成为新的刃口,延缓了磨损进程,表现为涂层刀磨损曲线斜率逐渐变小^[33-35]。试验结果表明,涂层旋耕刀平均磨损量为 131.35 g,比无涂层旋耕刀磨损量 162.33 g 降低了 19%。

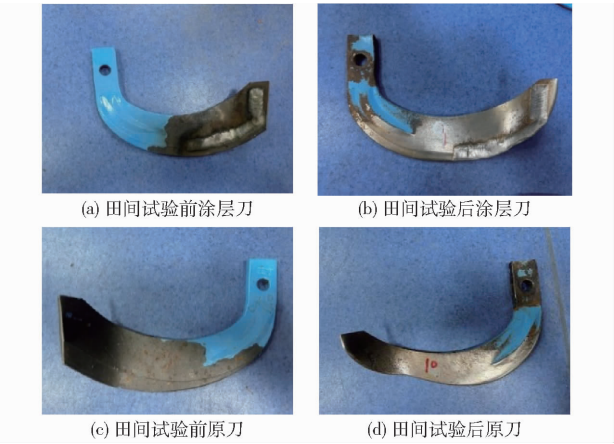


图 16 田间试验前后旋耕刀对比
Fig. 16 Comparison of rotary tillage blades before and after field tests

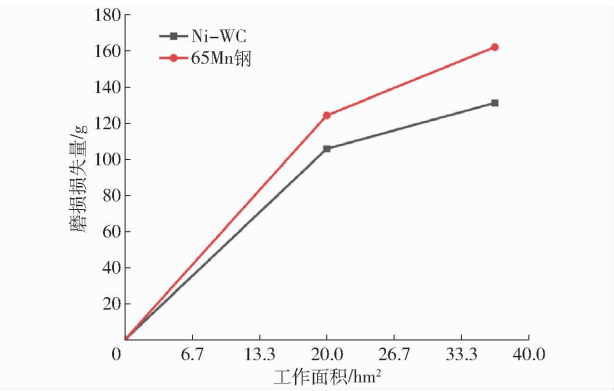


图 17 田间试验磨损损失量变化曲线
Fig. 17 Field experiment wear data

分析图 18 得到:20 hm^2 作业面积下原刀与涂层刀平均磨损损失量分别为 124.33 g 和 105.85 g,两组间差异不显著 ($p > 0.05$),说明在短期作业 (20 hm^2) 工况下,涂层刀的耐磨优势尚未充分体现;当作业面积增至 37.7 hm^2 时,原刀磨损量升至 162.33 g,涂层刀为 131.35 g,两组间存在显著差异 ($p < 0.05$),表明在长期作业 (37.7 hm^2) 工况下,涂层刀的耐磨性能优势得到充分发挥,能有效降低磨损。

图 19 为田间试验后 SEM 电镜图像,与原刀相

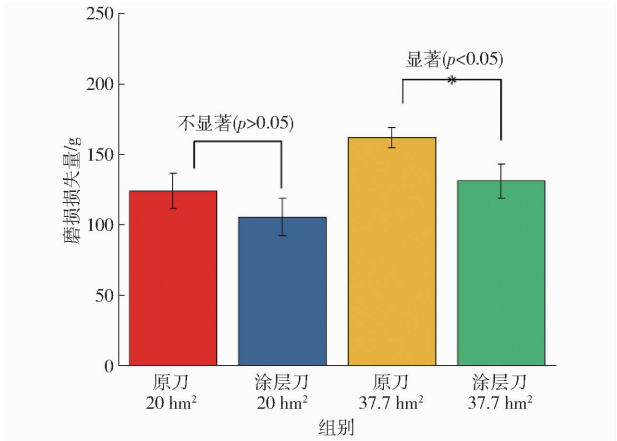


图 18 原刀与涂层刀田间试验结果显著性分析

Fig. 18 Significance analysis of field test results

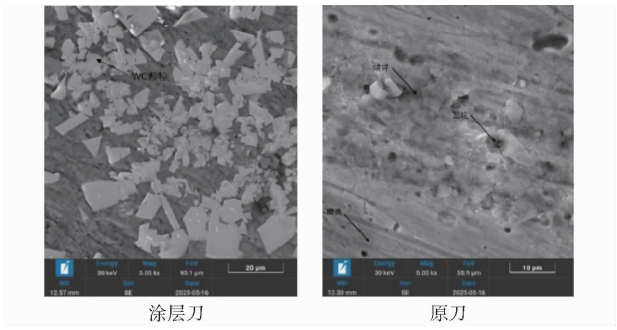


图 19 田间磨损后表面微观形貌

Fig. 19 Microscopic surface morphology after field wear

比,涂层刀磨痕较少,说明在较高硬度下,涂层可以承受田间复杂的磨损状况。

从图 19 中看出表面出现较多磨痕,且方向一致并出现些许点蚀现象。表明在田间试验中由于土壤中存在的细小硬质磨料使基体出现剥离现象。如果继续工作,达到剧烈磨损阶段时会使旋耕刀磨损速度加快。而相同倍镜下带有涂层的刀则未出现此种现象。通过对比台架试验与田间试验,旋耕刀皆由刀盘带动进行转动,对土壤进行切削、破碎及翻土作业。其中区别在于台架试验通过简化工况,剥离田间复杂耦合因素,以磨料磨损为主导,伴有冲击疲劳。从图 13 可以看出,在固定频率、固定强度的冲击下,刀刃会出现应力集中导致产生循环应力,引发微裂纹。

田间地况复杂,旋耕刀田间磨损是以磨料磨损为核心,辅以冲击疲劳、腐蚀磨损、冲蚀与微切削协同作用的复杂过程。其机理的复杂性源于田间工况的多变性(土壤、载荷、速度、湿度),与实验室单一机制试验有本质区别。在本次试验条件下,试验场地土壤为红壤土,其粘附性较强,粘附磨损虽然不起主导作用,但会导致表面粗糙度提升,进一步促进磨料磨损。

3 结论

(1)使用等离子体熔覆技术在试块和旋耕刀上制备出了 4 种不同 WC 粒径的 Ni-WC 耐磨合金涂层,通过表征试验,系统探究不同碳化钨颗粒粒径对涂层微观结构、力学性能及旋耕刀田间磨损行为的影响,分析涂层的物相组成、组织形貌、力学性能和耐磨性能;并利用田间试验对比原刀与涂层刀的磨损性能。

(2)以摩擦磨损性能为评价指标,试验后进行极差分析和方差分析,得到了最优工艺参数组合为:熔覆电流 110 A、熔覆速度 30 mm/s、纵向位移 1 mm,其他参数为送粉速率 30 g/min,熔覆距离 10 mm,保护气/离子气/送粉气速率为 10、1.5、3.5 L/min。使用该参数熔覆不同粒径的 Ni-WC 涂层进行性能表征。

(3)50~100 μm Ni-WC 涂层成型良好,界面干净整洁,没有多余的气孔与夹渣,与 65Mn 钢基体形成冶金结合。涂层的物相主要由 W₂C、Cr₃C₂、NiC、W、Ni、WC 以及 C 组成。

(4)50~100 μm NiWC 涂层的平均硬度为 1 155.7 HV0.5,是平均基体硬度的 4 倍。湿砂橡胶轮磨损试验中,涂层的磨损损失量为 65Mn 的 47.61%。土槽磨损试验中,50~100 μm 涂层的磨损损失量为 65Mn 钢的 24.7%。

(5)田间试验表明,带有涂层的旋耕刀比原刀磨损量降低了 19%,从宏观磨损形貌可知,旋耕刀的磨损主要集中在弯折角与正切刃,涂层的存在能够有效减缓磨损进程,确保在经过长时间的作业后依旧能够让刃口保持相对完整,延长旋耕刀使用寿命。

参 考 文 献

[1] 詹华,张艳静,郑军,等.农业机械触土部件材料研究与应用进展综述[J].农业机械学报,2026,57(11):1-14.
Zhan Hua, Zhang Yanjing, Zheng Jun, et al. Review of research and application progress of materials for agricultural machinery soil-contact components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 1-14. (in Chinese)

[2] 齐江涛,杨宇超,丁文瑞,等.播种作业触土部件研究综述[J].农业机械学报,2026,57(11):15-35.
Qi Jiangtao, Yang Yuchao, Ding Wenrui, et al. Review of research on soil-engaging components in seeding operations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 15-35. (in Chinese)

[3] 孙景彬,吕明哲,曾令坤,等.丘陵山区坡地旋耕专用试验平台设计与性能试验[J].农业机械学报,2025,56(6):137-145,154.
Sun Jingbin, Lü Mingzhe, Zeng Lingkun, et al. Design and performance test of special test platform for rotary tillage on hilly

- and mountainous slopes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 137–145, 154. (in Chinese)
- [4] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2017,48(7):1–13.
Jia Honglei, Wang Wanpeng, Chen Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1–13. (in Chinese)
- [5] 刘敬春,田铁柱,赵建国,等. 开沟器铲尖表面等离子熔覆 Mo_2FeB_2 涂层制备及其磨损性能[J]. 农业工程学报,2024, 40(9):39–48.
Liu Jingchun, Tian Tiezhu, Zhao Jianguo, et al. Preparation and wear properties of plasma cladding Mo_2FeB_2 coating on the surface of the furrow opener tip[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(9): 39–48. (in Chinese)
- [6] Zeng J, Ma Y, Fang Z, et al. Process optimization and wear performance of plasma-cladding Fe_5 coatings on rotary tillage blades [J]. Applied Sciences, 2024, 15(1): 77–77.
- [7] 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.
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)
- [8] 宋月鹏,王征,吴昆,等. 金属陶瓷自磨刃割刀对苜蓿低损伤切割机理分析[J]. 农业机械学报,2020,51(10):421–426,309.
Song Yuepeng, Wang Zheng, Wu Kun, et al. Fabrication of self-sharpening blades with metaloceramics materials and low-damaged cutting mechanism of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 421–426, 309. (in Chinese)
- [9] 李明曦,李明,黄海波,等. 农机具触土部件表面处理技术研究进展[J/OL]. 中国表面工程, (2025–08–27)[2026–04–23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3905.TG.20250115.1035.006>.
Li Mingxi, Li Ming, Huang Haibo, et al. Research progress in surface treatment technology of soil-engaging components of agricultural machinery[J/OL]. China Surface Engineering, (2025–08–27)[2026–04–23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3905.TG.20250115.1035.006>. (in Chinese)
- [10] 袁有录,李铸国. 原位自生 WC 增强 Fe 基熔覆层的组织及干滑动摩擦磨损性能[J]. 材料工程,2016,44(5):47–53.
Yuan Youlu, Li Zhuguo. Microstructure and dry sliding friction and wear properties of in situ synthesized WC reinforced Fe-based coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(5): 47–53. (in Chinese)
- [11] 谢建华,周通,王长云,等. 棉秆粉碎刀具磨损状态监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(12):155–165.
Xie Jianhua, Zhou Tong, Wang Changyun, et al. Design and experiment of wear status monitoring system for cotton straw crushing tool[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 155–165. (in Chinese)
- [12] 贾华,于吉鲲,鞠恒,等. 颗粒增强铁基复合材料熔覆层耐磨性研究进展[J]. 中国材料进展,2024,43(10):953–960.
Jia Hua, Yu Jikun, Ju Heng, et al. Research progress on wear-resistance of particle reinforced iron matrix composite cladding layer[J]. Progress in Materials Science of China, 2024, 43(10): 953–960. (in Chinese)
- [13] 杨紫涵,刘咏,张伟,等. 硬质颗粒对等离子熔覆碳化钨/多元主合金复合硬面涂层组织与耐磨性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2023,28(1):35–43.
Yang Zihan, Liu Yong, Zhang Wei, et al. Effects of hard particles on microstructure and wear-resistance of plasma cladding WC/multi-principal components alloy composite hard facing coating [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2023, 28(1): 35–43. (in Chinese)
- [14] 姜缘赫. 等离子体熔覆碳化钨增强镍基复合涂层工艺与性能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学,2022.
Jiang Yuanhe. Study on the technology and properties of nickel base tungsten carbide composite coating by plasma cladding [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [15] Tahaei A, Vanani B B, Abbasi M, et al. The hardfacing properties of the nickel-based coating deposited by the PTA process with the addition of WC nano-particles; wear investigation[J]. Tribology International, 2024, 193: 109472.
- [16] 陈吉朋,王计安,周宏平. 旋耕刀表面硬质 WC 合金涂层的电弧热喷涂工艺研究[J]. 表面技术,2024,53(15):234–241,251.
Chen Jipeng, Wang Ji'an, Zhou Hongping. Preparation of hard WC alloy coatings on rotary tiller blade surface using arc spraying technology[J]. Surface Technology, 2024, 53(15): 234–241, 251. (in Chinese)
- [17] 郝建军,杨泽宇,马璐萍,等. Fe–Cr–C–V 等离子堆焊层改善旋耕刀耐磨性和冲击韧性[J]. 农业工程学报,2019, 35(3):24–30.
Hao Jianjun, Yang Zeyu, Ma Luping, et al. Fe–Cr–C–V plasma surfacing layer improving wear resistance and impact toughness of rotary blade[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 24–30. (in Chinese)
- [18] 尹自豪,马兴华,尹宇,等. $(\text{Y}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{O}_3$ 对 WC 增强 Ni 基复合涂层组织结构及性能的影响[J]. 表面技术,2025, 54(19):153–162.
Yin Zihao, Ma Xinghua, Yin Yu, et al. Effect of $(\text{Y}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{O}_3$ on microstructure and performance of WC-reinforced nickel-based composite coatings[J]. Surface Technology, 2025, 54(19): 153–162. (in Chinese)
- [19] 方艳,贾晓慧,雷剑波,等. 激光熔化沉积 60wt% 不同粒径 WC 复合 NiCu 合金耐磨性及电化学腐蚀性能[J]. 复合材料学报,2022,39(7):3498–3509.
Fang Yan, Jia Xiaohui, Lei Jianbo, et al. Wear resistance and electrochemical corrosion properties of 60wt% coarse and fine WC composite NiCu alloy by laser melting deposition[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3498–3509. (in Chinese)
- [20] Nie H, Li Z, Zhou H, et al. Study on the wear resistance and mechanism of HVOF-sprayed WC10Co4Cr coatings[J]. Surface

- & Coatings Technology, 2024, 494(P1): 131368.
- [21] 刘均波. 等离子熔覆高铬铁基涂层的开裂行为与控制[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 97–100, 118.
Liu Junbo. Cracking behavior and control of plasma clad high chromium iron based composite coating[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 97–100, 118. (in Chinese)
- [22] 杨凡, 张志强, 张宏伟, 等. CeO_2 对 TiC_x 增强钛基激光熔覆层成形质量和组织的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 137–151.
Yang Fan, Zhang Zhiqiang, Zhang Hongwei, et al. Effects of CeO_2 on forming quality and microstructure of TiC_x -reinforced Ti-based laser cladding coating[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 137–151. (in Chinese)
- [23] 李连颖, 杜晓东, 宋自力, 等. 等离子弧喷焊颗粒增强铁基合金涂层组织的分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(9): 41–44, 115.
Li Lianying, Du Xiaodong, Song Zili, et al. Analysis on microstructure of particles reinforced Fe-based layers by plasma spray welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(9): 41–44, 115. (in Chinese)
- [24] 张孟良, 汤文博, 李百奇, 等. 等离子熔覆添加和内生联合 WC 颗粒增强铁基熔覆层的组织和性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 200–205.
Zhang Mengliang, Tang Wenbo, Li Baiqi, et al. Microstructure and properties of additional and in situ synthesized WC particle-reinforced iron-based coatings prepared by plasma cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2): 200–205. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 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)
- [27] 王军, 刘东, 祝颖丹, 等. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料摩擦磨损性能研究进展[J/OL]. 复合材料学报, (2025–10–28) [2026–04–23]. <https://fhclxb/buaa.edu.cn/article/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251022.002? ViewType=citedby-info>.
Wang Jun, Liu Dong, Zhu Yingdan, et al. Research progress on friction and wear properties of carbon fiber reinforced polyetheretherketone composites[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, (2025–10–28) [2026–04–23]. <https://fhclxb/buaa.edu.cn/article/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251022.002? ViewType=citedby-info>. (in Chinese)
- [28] 张艳静, 詹华, 徐天杨, 等. 农业机械耕作部件磨损性能试验研究现状[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 61–67.
Zhang Yanjing, Zhan Hua, Xu Tianyang, et al. Current research of experiment on wear performance for tillage tools of agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 61–67. (in Chinese)
- [29] 陈国栋, 刘秀波, 刘庆帅, 等. IN718 激光熔覆 Co–WC/Cu 复合涂层组织与摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(6): 741–751.
Chen Guodong, Liu Xiubo, Liu Qingshuai, et al. Microstructure and tribological properties of laser clad Co–WC/Cu composite coatings on IN718[J]. Tribology, 2024, 44(6): 741–751. (in Chinese)
- [30] 李碧晗, 王彦民, 马小斌, 等. 低速重载下 GCr15 表面超声振动复合电火花沉积 WC 涂层的摩擦磨损性能[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 420–426.
Li Bihan, Wang Yanmin, Ma Xiaobin, et al. Friction and wear performance of ultrasonic vibration composite electro-spark deposition WC coatings on GCr15 surface with heavy load at low speed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 420–426. (in Chinese)
- [31] 牛荣军, 汪静静, 詹华, 等. 关节轴承配副表面 CrDLC 和 WDLC 薄膜摩擦学性能研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 603–610.
Niu Rongjun, Wang Jingjing, Zhan Hua, et al. Tribological properties of CrDLC and WDLC films on pairs surface of spherical plain bearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 603–610. (in Chinese)
- [32] 谭小波, 周嘉利, 李云, 等. 激光熔覆 FeCrB/NiCrB 合金涂层的摩擦磨损与抗冲击性能[J]. 机械工程材料, 2023, 47(10): 62–67.
Tan Xiaobo, Zhou Jiali, Li Yun, et al. Friction and wear properties and impact resistance of laser clad FeCrB/NiCrB alloy coating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(10): 62–67. (in Chinese)
- [33] 宋月鹏, 吴昆, 王伟, 等. 真空复合轧制自磨锐割刀与其结合界面组织性能研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 586–592.
Song Yuepeng, Wu Kun, Wang Wei, et al. Fabrication of self-sharpening blades via vacuum-rolling composite technology and its interfacial material microstructure and properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 586–592. (in Chinese)
- [34] Xiao Q, Sun W L, Yang K X, et al. Wear mechanisms and micro-evaluation on WC particles investigation of WC–Fe composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 420: 127341.
- [35] Hao Z, Pan Yingjun, Yang Z, et al. Microstructure, toughness, and tribological properties of laser clad Mo_2FeB_2 -based composite coating with in situ synthesized WC and La_2O_3 addition[J]. Surface & Coatings Technology, 2022, 449: 128947.