

旋耕刀表面硬质 WC 合金涂层的 电弧热喷涂工艺研究

陈吉朋, 王计安, 周宏平

(南京林业大学 机械电子工程学院, 南京 210014)

摘要: **目的** 旋耕刀是重要的农机土壤部件, “表硬芯韧”是制造高性能旋耕刀的关键。尝试利用电弧热喷涂方法在旋耕刀表面直接制备含硬质碳化钨 (WC) 的合金涂层, 以提高其综合力学性能。**方法** 以旋耕刀常用制造材料 65Mn 为基材, 以含 WC 的合金材料为电极丝材, 搭建电弧喷涂实验平台, 开展三因素两水平工艺实验。重点探讨喷涂电压、送丝速度、扫描速度对涂层制备的影响。**结果** 所制备的涂层表面光滑、平整, 无宏观裂纹或可见缺陷。在喷涂电压 30 V、送丝速度 40 mm/s、扫描速度 30 mm/s 时, 电弧热喷涂的涂层沉积速率为 174.7 g/min, 其平均硬度可达 HRC51, 表面粗糙度 R_a 为 2.366 μm 。扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 等测试结果表明, WC 合金涂层具有典型的层状结构, 结构均匀致密, 涂层与基体之间形成了良好的机械结合。**结论** 在基础工艺研究基础上, 成功制备了表面含有硬质 WC 合金涂层的旋耕刀样件, 进一步验证了工艺可行性, 为高性能旋耕刀制备提供了新的思路和方法。

关键词: 旋耕刀; 电弧喷涂; 碳化钨; 涂层; 工艺特性

中图分类号: TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)15-0234-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.15.022

Preparation of Hard WC Alloy Coatings on Rotary Tiller Blade Surface Using Arc Spraying Technology

CHEN Jipeng, WANG Ji'an, ZHOU Hongping

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210014, China)

ABSTRACT: The rotary tiller blade plays a pivotal role as a crucial component of agricultural machinery. "Hard surface with a tough core" is the key to manufacturing high-performance rotary tiller blades. This work attempted to employ arc spraying to directly prepare alloy coatings containing hard tungsten carbide (WC) on the surface of rotary tiller blades to improve their comprehensive mechanical properties. 65Mn, a commonly used manufacturing material for rotary tillers, was used as the substrate, and alloy materials containing WC particles were used as electrode wires. The experimental platform for arc spraying was established. The experimental platform included an arc spraying device (CMD-AS400), a 6-axis robotic arm (Yaskawa DX100), and an air compression system. In the experiment, the air pressure was set to 0.6 MPa and the distance from the nozzle to the workpiece was set to 150 mm. To investigate the effects of key factors such as spray voltage, wire feed speed, and

收稿日期: 2023-09-18; 修订日期: 2023-12-20

Received: 2023-09-18; **Revised:** 2023-12-20

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(20)3067)

Fund: Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund (CX(20)3067)

引文格式: 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.

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.

scanning speed on the coating preparation process, three factor two level factorial experiments were designed. Among them, the high level of spray voltage was 40 V, and the low level was 20 V; The high level of wire feed rate was 50 mm/s, and the low level was 30 mm/s; The high level of scanning speed was 40 mm/s, and the low level was 20 mm/s. The experimental results showed that when the spray voltage was 30 V, the wire feed speed was 40 mm/s, and the scanning speed was 30 mm/s, the deposition rate was as high as 174.7 g/min, and the average hardness could reach HRC51. Furthermore, test results such as scanning electron microscopy (SEM) and energy disperse spectroscopy (EDS) indicated that the alloy coating had a typical layered structure, with a uniform and dense structure, and a good mechanical bonding between the coating and the substrate cross section. The surface of the prepared coating was smooth and flat, without macroscopic cracks or visible defects. Based on the optimized process parameters, a rotary tiller blade sample with a hard alloy coating was successfully prepared on the surface, providing new ideas and methods for the preparation of high-performance rotary tiller blades.

KEY WORDS: rotary tiller blade; arc spraying; tungsten carbide; coating; process characteristics

农业机械的工作环境较恶劣, 不仅需要承受较大的扭矩和交变载荷, 还需要应对各种土壤和气候条件的挑战, 许多关键零部件往往因磨损而快速失效, 造成巨大的经济损失。据不完全统计, 80%以上的农机触土部件因磨粒引起的磨损失效而报废^[1-4]。旋耕刀是常见的土壤工作部件, 是制约农耕作业质量和效率的关键零部件之一。据统计, 在正常工作条件下, 旋耕刀在黏性土壤中作业的寿命为 20~35 hm²/片, 而在沙土中作业的寿命仅有 3.3~5.5 hm²/片, 同时磨损后的部件会出现牵引阻力大、油耗增多等现象, 使得农机的整体工作效率降低、作业质量降低、成本提高^[5]。“表硬芯韧”是制造高性能旋耕刀的重要指标。传统技术常常采用热处理加工工艺, 但热处理工艺往往在获得硬质表面的同时, 带来工件整体力学性能下降或产生微观裂纹等缺陷, 制约了旋耕刀的使用寿命。近年来, 如何提高旋耕刀等土壤工作部件的使用寿命和力学性能正引起越来越多的关注^[6-10]。

表面改性和在工件表面制备耐磨涂层是提高其力学性能的有效途径。已有多种表面技术应用于旋耕刀等农业机械土壤接触部件。如, 邢泽炳等^[11]以 65Mn 钢旋耕刀为研究对象, 采用氩弧堆焊技术在其表面形成由 WC、TiC、Co 组成的硬质合金熔敷层。研究结果显示, 该电弧熔敷硬质合金形成的耐磨涂层与 65Mn 钢基体结合紧密。当涂层中 Co、TiC、WC 的质量分数分别为 45%、20%、35%时, 其平均磨损量仅为未处理 65Mn 旋耕刀的 27%。田永财等^[12]采用激光熔覆技术在旋耕刀表面制备铁基涂层, 熔覆层的显微硬度最高可达 820HV1, 为基体的 3 倍左右。陈亚茹等^[13]为了提高旋耕刀的耐磨性, 采用强流脉冲电子束表面改性技术处理 60Si₂Mn 钢表面。研究发现, 电子束表面改性技术能够有效提高旋耕刀的耐磨性, 尤其是对侧刃内侧的处理效果优于外侧, 在加速电压为 30、27 kV 时, 旋耕刀表面的耐磨性更佳, 前者的磨损量较小。

除氩弧堆焊、激光熔覆等方法外, 热喷涂也是常用的表面处理方法, 在工程材料防护和涂层制备等领

域被广泛采用^[14-18]。根据热源种类, 热喷涂技术主要包括火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、爆炸喷涂等。其中, 电弧喷涂设备成本低、沉积速率高。相较于其他热喷涂方法, 电弧热喷涂应用得更加广泛^[19]。李晖等^[20]研究了在 60Si₂Mn 钢旋耕刀表面采用高速电弧喷涂技术制备 NiAl 黏结层, 并与 Ni-Al₂O₃、Cr₂O₃、SiC、Cr、Ti、Fe 构成陶瓷耐磨涂层, 结果表明, 电弧喷涂涂层有效减少了摩擦和磨损, 提高了材料的耐磨性能。碳化钨 (WC) 是一种优质的硬质合金材料, 具有优异的耐磨性能和高承载力, 能够有效抵抗磨损磨蚀, 已成为众多工业应用的首选材料^[21-23]。为了改善旋耕刀表面涂层的力学性能, 实现“表硬芯韧”制造, 提出采用电弧喷涂技术在 65Mn 钢基体表面制备含 WC 的合金涂层。通过设计电弧喷涂析因实验, 研究涂层的表面质量、微观组织和结构特征, 获得优化工艺参数, 并尝试加工旋耕刀样件。

1 实验

1.1 材料

65Mn 是制造旋耕刀常用的材料。以尺寸为 130 mm×50 mm×10 mm 的 65Mn 钢为基体材料。在喷涂试验前, 首先采用粗砂纸打磨基体表面, 然后使用丙酮溶液进行超声清洗, 并将其吹干备用。利用 46 目棕刚玉对基体表面进行喷砂处理。喷涂丝材选用直径为 1.6 mm 的合金材料, 牌号为 Tafa 97 MXC。该牌号的丝材中含有质量分数约为 26%的 WC 成分。Tafa 97 MXC 的具体成分和含量如表 1 所示。

表 1 热喷涂丝材的主要成分
Tab.1 Chemical composition of thermal spraying wire

Element	Cr	B	Ni	Si	TiC	WC	Fe
Mass fraction/%	13	2	6	1	6	26	Bal.

1.2 实验平台和参数

实验平台由电弧喷涂装置、六轴机器人和压缩空

气供给系统等组成。其中，电弧喷涂装置型号为 CMD-AS400，其最大输出电流可达 400 A；六轴机器人型号为 Yaskawa DX100，电弧喷枪安装于机器人末端。如图 1 所示，电弧热喷涂的原理：利用 2 根连续送进的金属丝作为自耗电极，在其端部产生电弧作为热源，利用压缩空气将熔融丝材雾化，使之以超音速喷向工件，并沉积于工件表面，形成致密涂层^[24]。在电弧喷涂过程中，涂层的形成受到多种因素的影响，包括喷涂电压、喷涂送丝速度、扫描速度、喷涂距离、气流压力等。根据文献[25]的报道，本实验将喷涂距离设置为定值 150 mm。此外，将工作气体的压力设置为 0.6 MPa。为了考察喷涂电压、送丝速度、扫描速度等关键参数对涂层制备性能的影响，设计了三因素两水平—中心点析因实验，参数见表 2。

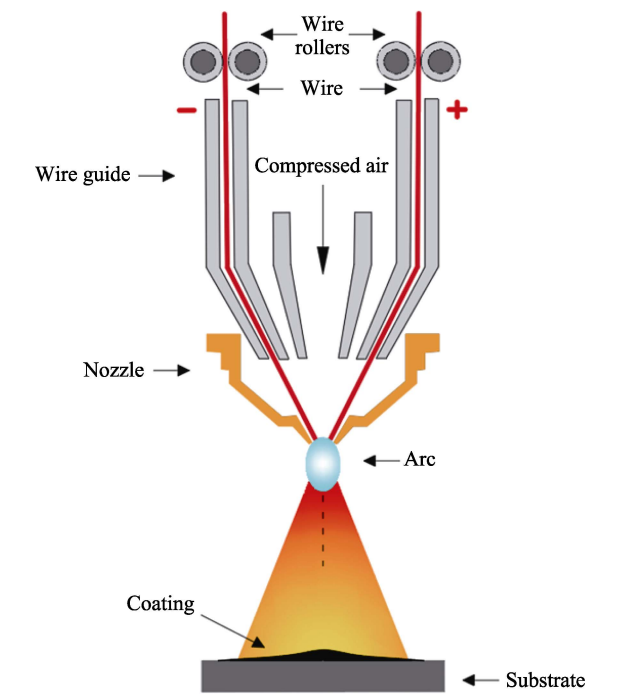


图 1 电弧喷涂原理示意
Fig.1 Schematic diagram of arc spraying

表 2 电弧喷涂工艺参数
Tab.2 Process parameters of arc spraying

Samples	Spray voltage/ V	Wire feed rate/ (mm·s ⁻¹)	Scanning speed/ (mm·s ⁻¹)
E1	30	40	30
E2	20	50	40
E3	40	50	40
E4	40	30	20
E5	20	30	40
E6	20	30	20
E7	40	50	20
E8	20	50	20
E9	40	30	40

1.3 分析测试方法

选用 Meilin-MTB2000D 电子秤对喷涂前后的样件进行质量测量，该电子秤的量程为 2 000 g，精度为 0.01 g。使用 Mitutoyo SJ-210 粗糙度仪对涂层的表面粗糙度进行测量。利用 HR-150A 洛氏硬度计测试工件表面的硬度。采用 Q-2A 金相试样切割机对喷涂样件进行切割取样，得到尺寸为 10 mm×10 mm× 10 mm 的金相试样。对试样研磨抛光后采用 MR5000 型金相显微镜观察涂层的金相组织。分别使用 Hitachi Regulus 8100 扫描电子显微镜（SEM）和 Oxford Xplore 30 能谱仪（EDS）对试样涂层截面进行微观形貌观察和元素分析。利用 Image J 软件处理涂层截面图片，并计算孔隙率。

2 结果与分析

2.1 试样外观及表面粗糙度

在各组参数下，通过电弧喷涂技术制备的样件如图 2 所示。可以观察到，WC 合金涂层在基体表面的沉积状态良好，涂层表面平整，未发现宏观裂纹或明显的喷涂缺陷。同时发现，在不同的加工参数下，涂层表面的粗糙程度并不相同。

测量工件表面的粗糙度，每个工件随机测量 6 个不同位置，然后取其平均值。总体而言，实验所制备的 WC 合金涂层的表面粗糙度范围为 1.9~3.1 μm。其中，样件 E2、E3 的平均粗糙度最高，分别为 3.097、3.087 μm，而样件 E1、E6 的平均粗糙度较低，分别为 2.366、1.971 μm。工艺参数对表面粗糙度的影响曲面如图 3 所示，说明工件表面粗糙度与喷涂电压、送丝速度、扫描速度之间存在复杂的交互关系。根据图 4 的效应分析结果可知，影响涂层粗糙度的主次因素的顺序为送丝速度、扫描速度、喷涂电压。送丝速度、扫描速度、喷涂电压三者之间的交互作用（ABC），喷涂电压与送丝速度之间的交互作用（AB）、喷涂电压与扫描速度之间的交互作用（AC）等也是影响涂层表面粗糙度的重要因素。

2.2 沉积速率

通过在喷涂加工前后对工件进行称量，可以获得喷涂前后工件的质量变化量，从而计算喷涂沉积速率。统计发现，样件 E1 的沉积速率为 174.7 g/min，样件 E2、E3、E7 的沉积速率介于 157.4~192.7 g/min 之间，样件 E8 的沉积速率可达 220.6 g/min。可见，利用电弧喷涂 WC 合金涂层可获得高的沉积速率。工艺参数对沉积速率的影响曲面如图 5 所示。综合分析，发现喷涂电压、扫描速度和送丝速度三者之间存在一定的交互关系。总体而言，随着送丝速度的增加，沉积速率增幅明显。送丝速度的增加可在单位时间内提

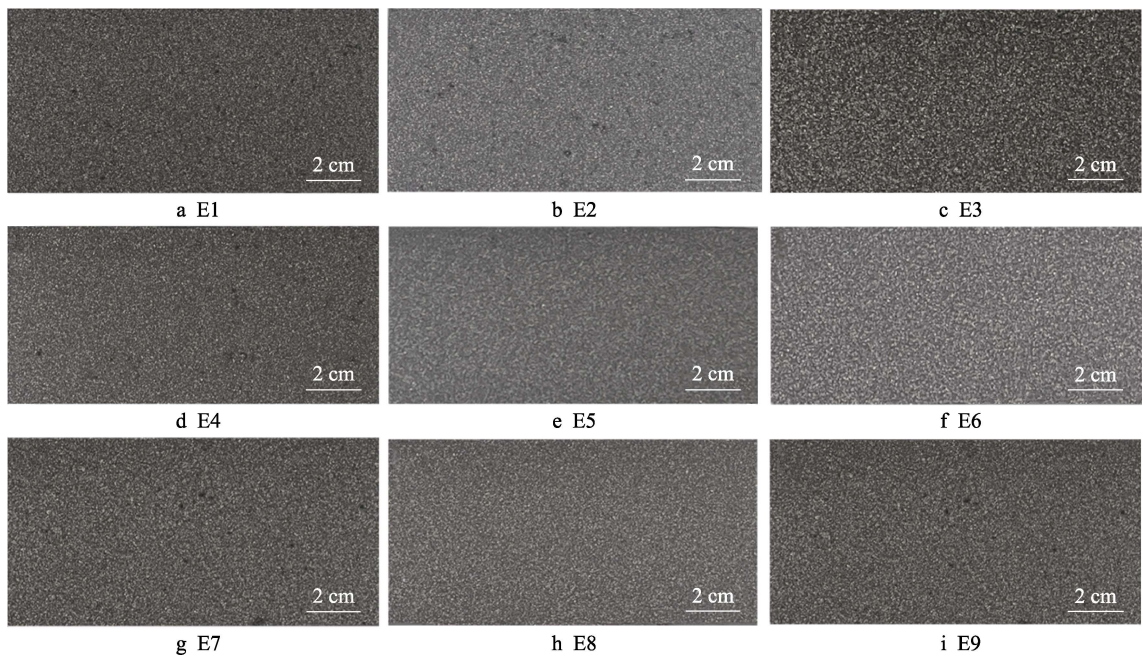


图 2 工件表面 WC 合金涂层
Fig.2 WC alloy coating on workpiece surface

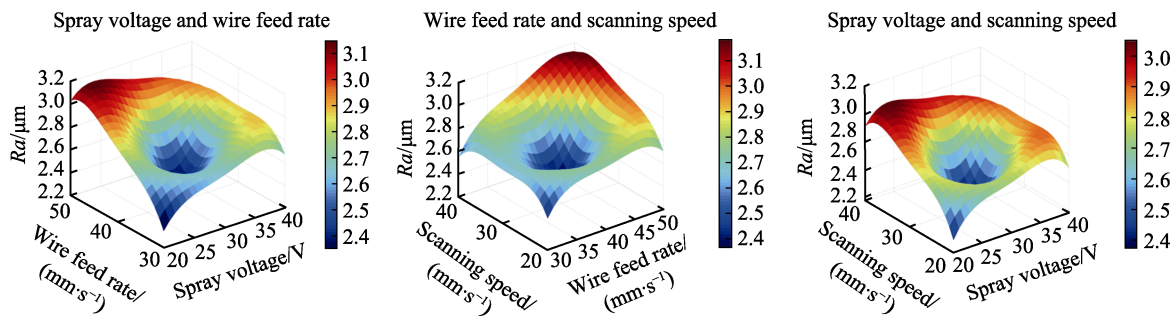


图 3 粗糙度影响曲面
Fig.3 Response surface of surface roughness

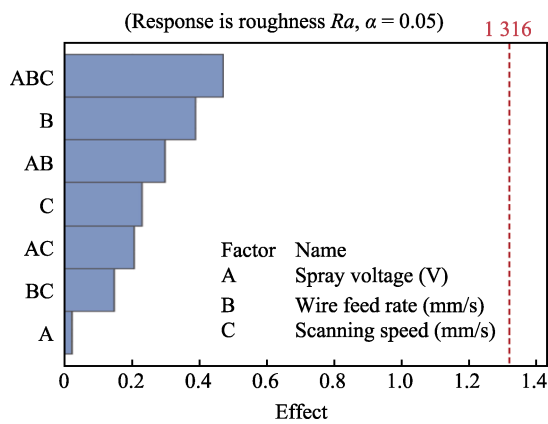


图 4 表面粗糙度的影响效应
Fig.4 Effect of parameters on surface roughness

供更多的丝材,从而提高了沉积速率;送丝速度过快,可能导致材料未充分熔化,从而引起短路或提高沉积难度,反而降低沉积速率。类似地,在一定范围内提高喷涂电压也可以增加沉积速率,其原因是电流一定的条件下,高电压对应更高的能量,有利于材料的熔

化,但这一趋势也受到其他参数的制约。如图 6 所示,根据效应分析结果得出了影响涂层沉积速率的主要因素顺序为送丝速度、扫描速度、喷涂电压。

2.3 涂层表面硬度

硬度是考察旋耕刀表面耐磨性能的重要指标。测试硬度时,在工件表面随机选出 10 个点进行测量,结果取其平均值。由于洛氏硬度计采用压痕表征硬度,涂层过薄易导致压痕测试失败,因此对硬度测试的样件通过增加喷涂次数提高涂层厚度(大于 500 μm)。在喷涂后,样件(E1—E9)的硬度分布如图 7 所示,所有样件的硬度均较基体材料的硬度(HRC21.5)有了显著提高。样件 E1(喷涂电压 30 V,送丝速度 40 mm/s,扫描速度 30 mm/s)、E8(喷涂电压 20 V,送丝速度 50 mm/s,扫描速度 20 mm/s)的涂层显示出较高的平均硬度,分别达 HRC51、HRC51.4,约为基体材料硬度的 2 倍。可见,采用硬质 WC 合金丝材有助于在 65Mn 基材表面获得高硬度的涂层。根据 GB/T 5669—2017,旋耕机械的刀柄部分硬度推荐为

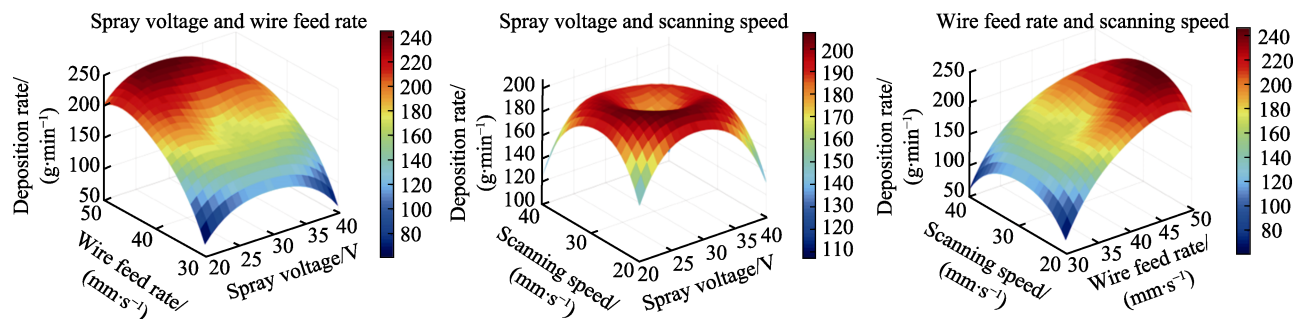


图 5 沉积速率影响曲面
Fig.5 Response surface of deposition rate

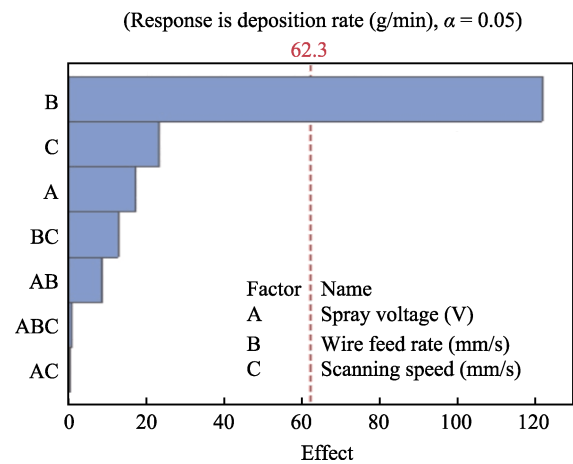


图 6 沉积速率的影响效应
Fig.6 Effect of parameters on deposition rate

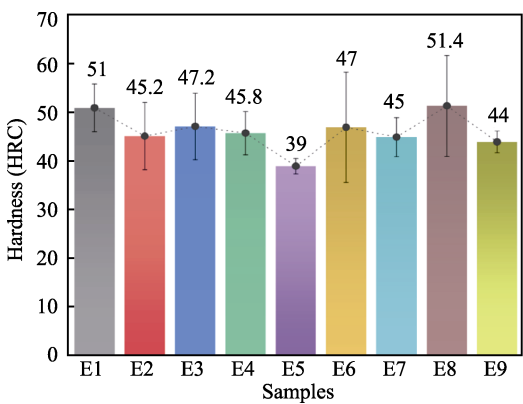


图 7 涂层硬度统计
Fig.7 Hardness of coatings

HRC38~HRC45, 刀身部分热处理硬度推荐为 HRC48~HRC54。利用电弧喷涂 WC 合金涂层方法, 可满足国家标准推荐硬度要求, 有望代替传统热处理工艺。

2.4 涂层厚度和孔隙率

对涂层进行取样后, 通过金相显微镜观察组织特性。以样件 E1、E2、E6、E7 为例, 在 200 倍显微镜下, 观察到的涂层截面金相组织如图 8 所示。所制备

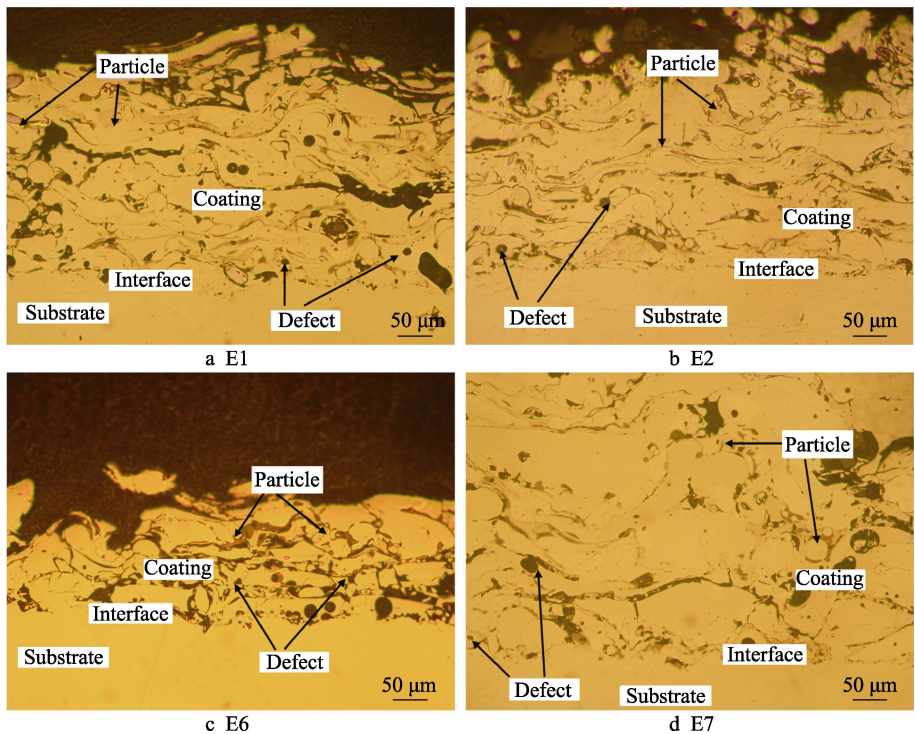


图 8 涂层截面的金相图
Fig.8 Cross-sectional morphology of coating

WC 合金涂层组织致密, 未发现宏观裂纹等重大缺陷, 涂层与基体的界面结合良好, 无明显间隙。样件 E1、E2、E6、E7 的涂层厚度分别约为 250、220、150、300 μm 。文献[26]报道, 在热喷涂层的显微组织中一般含有片状物、片状物间的氧化物及球状氧化物颗粒, 片层组织之间的间隙主要有氧化物夹杂、未熔颗粒和孔洞。在截面金相图中, 可观察到涂层组织中存在大量片状组织, 符合典型的电弧喷涂粒子变形组合形貌。此外, 在涂层中可发现大量的半球状颗粒组织, 判断该组织的成分为 WC 颗粒。

利用 Image J 计算涂层孔隙率。样件 E1、E5、E9 的涂层处理图片如图 9 所示; 样件 E1—E9 的孔隙率统计结果如图 10 所示。分析可知, 样件 E1 (喷涂

电压 30 V, 送丝速度 40 mm/s, 扫描速度 30 mm/s)、E3 (喷涂电压 40 V, 送丝速度 50 mm/s, 扫描速度 40 mm/s)、E5 (喷涂电压 20 V, 送丝速度 30 mm/s, 扫描速度 40 mm/s)、E9 (喷涂电压 40 V, 送丝速度 30 mm/s, 扫描速度 40 mm/s) 的孔隙率较低, 分别为 3.8%、3.9%、2.9%、2.8%, 样件 E8 (喷涂电压 20 V, 送丝速度 50 mm/s, 扫描速度 20 mm/s) 的孔隙率最高, 达到了 7.1%。分析上述孔隙率对应的加工参数, 总体上, 较低的喷涂电压和较高的送丝速度组合下, 孔隙率易于增高。其原因在于, 上述参数组合条件不利于丝材充分熔融及雾化, 可能导致粒子在沉积过程中变形不充分, 提高了成孔概率。

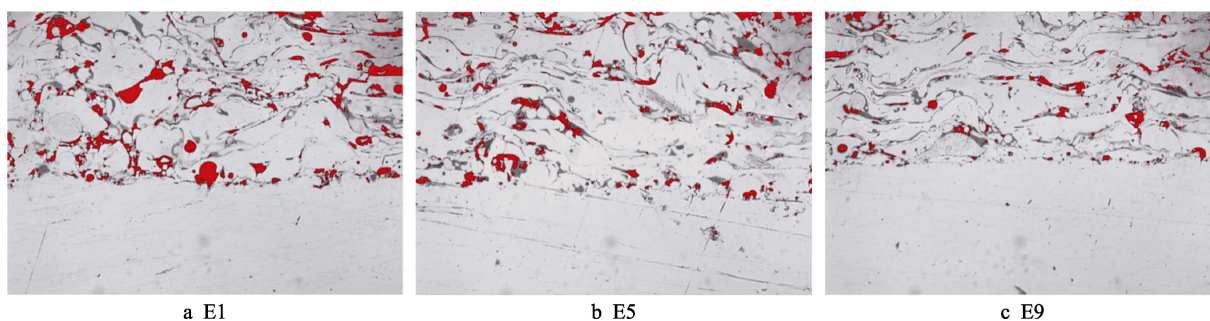


图 9 涂层孔隙率统计示意
Fig.9 Porosity statistics of coating

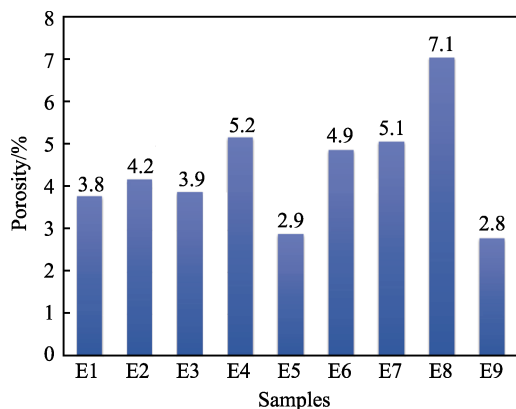


图 10 样件孔隙率统计
Fig.10 Porosity statistics of samples

3 讨论

涂层中的 WC 成分是提高涂层表面硬度、实现旋耕刀“表硬芯韧”制造的关键。为考察涂层中 WC 的分布特性, 选择样件 E1、E2、E7 开展分析和讨论。图 11a~c 分别为上述样件的涂层截面金相图。如前文所述, 在涂层的金相图中可明显观察到部分呈半球状的颗粒, 该组织被判断为 WC。为验证该判断的正确性, 对该类半球状组织进行了 EDS 元素分析, 结果如图 11d 所示。结果表明该半球组织主要元素成分为

W 和 C, 因而可确定其为 WC 颗粒。进一步观察发现, 涂层中的 WC 颗粒大小不一, 但分布在涂层的不同位置。根据文献[27]报道, 由于在电弧喷涂过程中 WC 焊丝及其尖端熔化, 并形成熔融液滴, 将来自内芯的破碎颗粒的合金元素和来自外芯的金属组织在高温下熔融, 并随机混合, 且喷射速度极高。粒子在喷射过程中会经历加速和定向运动, 导致较小速度的 WC 颗粒更易在气流中保持悬浮状态, 并在涂层中弥散, 然后在与基体碰撞时快速凝固。可见, 利用电弧喷涂方法可在 65Mn 基材表面制备出含弥散状 WC 颗粒的硬质涂层, 有利于实现旋耕刀耐磨表面的制备。

4 样件加工

综合涂层制备的沉积速率、表面粗糙度和孔隙率等指标, 优选样件 E1 对应的工艺参数 (喷涂电压 30 V, 送丝速度 40 mm/s, 扫描速度 30 mm/s), 尝试在旋耕刀工件表面制备 WC 合金涂层, 所选用的旋耕刀样件为弯刀。图 12 为样件加工装置和喷涂路径规划模拟, 喷涂路径模拟利用 RobotStudio 平台进行。完成喷涂加工后的旋耕刀样件如图 13 所示。样件表面完整, 涂层均匀、致密, 验证了利用电弧喷涂方法在旋耕刀表面制备 WC 合金涂层的可行性。

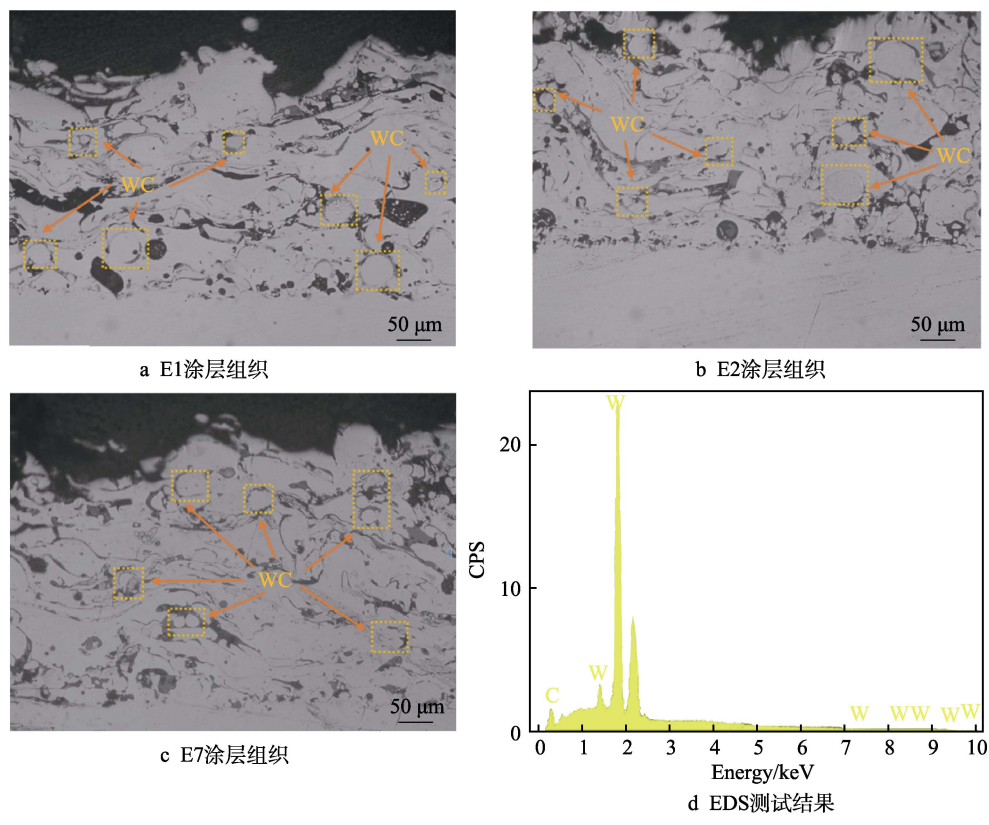


图 11 涂层组织 WC 观察及 EDS 分析
Fig.11 WC observation and EDS analysis of coating microstructure: a) E1 coating microstructure; b) E2 coating microstructure; c) E7 coating microstructure; d) EDS test result

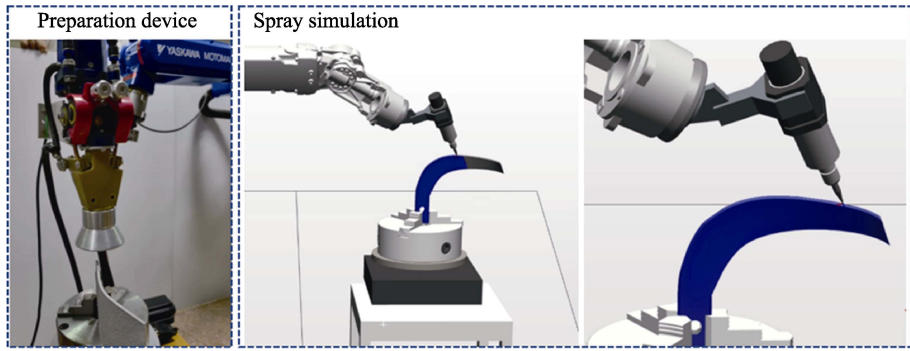


图 12 旋耕刀样件加工装置和路径模拟
Fig.12 Sample preparation device and spray simulation of rotary tiller blade



图 13 喷涂加工得到的旋耕刀样件
Fig.13 Rotary tiller blade samples processed with arc spraying

5 结论

利用电弧喷涂技术,提出在旋耕刀表面制备耐磨涂层的新方法,主要结论如下。

1) 以 65Mn 为基体,以含 WC 成分的合金丝材为涂层材料,利用电弧喷涂在基体表面制备的硬质涂层表面平整,无宏观裂纹或明显缺陷。

2) 在喷涂电压 30 V、送丝速度 40 mm/s、扫描速度 30 mm/s 时,涂层的综合性能最佳。在该参数下,涂层的沉积速率为 174.7 g/min;粗糙度为 2.366 μm;孔隙率为 3.8%;硬度超过 HRC50,约为 65Mn 基体的 2.4 倍。

3) SEM 观察和 EDS 分析结果表明, 所制备的 WC 合金涂层均匀致密, 与基材结合良好, WC 硬质相弥散分布于涂层的不同位置。

4) 在优选工艺参数下, 结合机器人喷涂路径规划, 成功制备出含 WC 合金涂层的旋耕刀样件。样件表面完整, 涂层均匀致密, 验证了新方法的可行性。

参考文献:

- [1] ADU-BAFFOUR F, DAUM T, BIRNER R. Can Small Farms Benefit from Big Companies' Initiatives to Promote Mechanization in Africa? A Case Study from Zambia[J]. Food Policy, 2019, 84: 133-145.
- [2] XIONG L, SUN S L, XIAO M T. Agricultural Machinery Automation and Intelligent Research and Application[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 452: 042077.
- [3] GONZÁLEZ H, CAPPELLI N L, TORO A. Wear of Rotary Plows Operating in a Tropical Clay Loam Soil[J]. Engenharia Agrícola, 2013, 33(4): 772-781.
- [4] VALBOA G, LAGOMARSINO A, BRANDI G, et al. Long-Term Variations in Soil Organic Matter under Different Tillage Intensities[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 126-135.
- [5] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and Energy Characteristics for Strip-Tillage Cultivation when Cutting Furrows Using Three Designs of Rotary Blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 329-340.
- [6] SUN J F, CHEN H M, WANG Z M, et al. Study on Plowing Performance of EDEM Low-Resistance Animal Bionic Device Based on Red Soil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104336.
- [7] SINGH S, GARG J, SINGH P, et al. Effect of Hard Faced Cr-Alloy on Abrasive Wear of Low Carbon Rotavator Blades Using Design of Experiments[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 3390-3395.
- [8] 龙伟民, 秦建, 路全彬, 等. 旋耕刀感应钎涂层热处理工艺研究[J]. 材料导报, 2022, 36(7): 98-102.
LONG W M, QIN J, LU Q B, et al. Heat Treatment Process of Induction Braze Coating of Rotary Blades[J]. Materials Reports, 2022, 36(7): 98-102.
- [9] ARAMIDE B, PITYANA S, SADIKU R, et al. Improving the Durability of Tillage Tools through Surface Modification-a Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(1): 83-98.
- [10] 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 J J, YANG Z Y, MA L P, et al. Fe-Cr-C-V Plasma Surfacing Layer Improving Wear Resistance and Impact Toughness of Rotary Blade[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 24-30.
- [11] 邢泽炳, 卫英慧, 翟鹏飞. 65Mn 钢表面熔敷硬质合金及其耐磨性能[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(3): 189-193.
XING Z B, WEI Y H, ZHAI P F. Microstructure and Wear Resistance of Cemented Carbide Coatings on 65Mn Steel by Arc Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(3): 189-193.
- [12] 田永财, 王宏立. 旋耕刀表面激光熔覆铁基涂层的组织性状及耐磨性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 359-362.
TIAN Y C, WANG H L. Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding Iron-Based Coating on Rotary Tillers' Surface[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(11): 359-362.
- [13] 陈亚茹, 李晖. 旋耕刀表面强流脉冲电子束改性后的耐磨性研究[J]. 材料保护, 2017, 50(8): 84-88.
CHEN Y R, LI H. Wear Resistance of Rotary Tiller Blades Treated by High Current Pulsed Electron Beam[J]. Materials Protection, 2017, 50(8): 84-88.
- [14] ŁATKA L, PAWŁOWSKI L, WINNICKI M, et al. Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings[J]. Applied Sciences, 2020, 10(15): 5153.
- [15] BONABI S F, ASHRAFIZADEH F, SANATI A, et al. Structure and Corrosion Behavior of Arc-Sprayed Zn-Al Coatings on Ductile Iron Substrate[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27(3): 524-537.
- [16] 黄杰, 李俊峰, 张守杰, 等. AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的组织和性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 195-200.
HUANG J, LI J F, ZHANG S J, et al. Microstructures and Properties of AlMg5 and AlMg5-Zr Arc Spraying Coatings [J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 195-200.
- [17] DING P, LIU X J, LIU J J, et al. Study on the Properties of FeCrNi/CBN Composite Coating with High Velocity Arc Spraying[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2018, 11(6): 935-941.
- [18] TIAN H L, WANG C L, GUO M Q, et al. Frictional Wear Performance under Oil-Lubricated Conditions and Wear Resistance Mechanism of High-Velocity Arc-Sprayed FeNiCrAl Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 353: 237-246.
- [19] SZYMANSKI K, HERNAS A, MOSKAL G, et al. Thermally Sprayed Coatings Resistant to Erosion and Corrosion for Power Plant Boilers - a Review[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 268: 153-164.
- [20] 李晖, 陈亚茹, 邓书彬, 等. 60Si2Mn 钢高速电弧喷涂耐磨涂层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 77-83.
LI H, CHEN Y R, DENG S B, et al. Friction-Wear Behavior of 60Si2Mn Steel Sprayed with Wear-Resistance Coating by High Velocity Arc Spraying[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 77-83.

(下转第 251 页)

- [23] 李海祥, 李相波, 孙明先, 等. 冷喷涂 Zn-50Al 复合涂层在海水中的耐蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 62-66.
LI H X, LI X B, SUN M X, et al. Corrosion Resistance of cold-Sprayed Zn-50Al Coatings in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 62-66.
- [24] DZHURINSKIY D, MAEVA E, LESHCHINSKY E, et al. Corrosion Protection of Light Alloys Using Low Pressure Cold Spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(2): 304-313.
- [25] KOIVULUOTO H, NÄKKI J, VUORISTO P. Corrosion Properties of Cold-Sprayed Tantalum Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(1): 75-82.
- [26] CHAVAN N M, KIRAN B, JYOTHIRMAYI A, et al. The Corrosion Behavior of Cold Sprayed Zinc Coatings on Mild Steel Substrate[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, 22(4): 463-470.
- [27] 曾群锋, 许雅婷, 林乃明. 304 不锈钢在人工海水环境中的腐蚀磨损行为研究[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 194-202, 212.
ZENG Q F, XU Y T, LIN N M. Tribocorrosion Behaviors of 304 Stainless Steel in Artificial Seawater[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 194-202, 212.
- [28] CHOI S J, LEE H S, JANG J W, et al. Corrosion Behavior in a 3.5wt.% NaCl Solution of Amorphous Coatings Prepared through Plasma-Spray and Cold-Spray Coating Processes[J]. Metals and Materials International, 2014, 20(6): 1053-1057.
- [29] KAUSHAL G, BALA N, KAUR N, et al. Comparative High-Temperature Corrosion Behavior of Ni-20Cr Coatings on T22 Boiler Steel Produced by HVOF, D-Gun, and Cold Spraying[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(1): 395-410.

(上接第 241 页)

- [21] WENG Z K, WANG A H, WU X H, et al. Wear Resistance of Diode Laser-Clad Ni/WC Composite Coatings at Different Temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 304: 283-292.
- [22] SHU D, LI Z G, YAO C W, et al. *In Situ* Synthesised WC Reinforced Nickel Coating by Laser Cladding[J]. Surface Engineering, 2018, 34(4): 276-282.
- [23] ZENG M Q, TU J L, ZHU M, et al. Fabricating Ultrathin Plate-Like WC Grains in WC-8Co Hardmetals by Increasing Discharge Intensity during Plasma-Assisted Ball Milling[J]. Metals and Materials International, 2020, 26(9): 1373-1384.
- [24] CHENG J B, WANG Z H, XU B S. Wear and Corrosion Behaviors of FeCrBSiNbW Amorphous/Nanocrystalline Coating Prepared by Arc Spraying Process[J]. Journal of thermal spray technology, 2012, 21: 1025-1031.
- [25] LI H, HUANG F, LIN J, et al. Microstructure and Tribological Properties of Fe-Based- Al_2O_3 - B_4C Composite Coatings Prepared by High-Velocity Arc Spraying[J]. Coatings, 2022, 12: 1956.
- [26] DORFMAN M R. Thermal Spray Coatings[M]// Handbook of Environmental Degradation of Materials. Amsterdam: Elsevier, 2018: 469-488.
- [27] DARAM P, MUNROE P R, BANJONGPRASERT C. Microstructural Evolution and Nanoindentation of NiCrMoAl Alloy Coating Deposited by Arc Spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 391: 125565.