

激光表面改性技术

# 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

王超<sup>1</sup>, 姜芙林<sup>1,2\*</sup>, 杨发展<sup>1</sup>, 梁鹏<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 a. 机械与汽车工程学院 b. 工业流体节能与污染控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266520; 2. 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心, 山东 青岛 266109)

**摘要:** **目的** 改善旋耕刀 65Mn 钢的摩擦磨损性能, 提高农机触土零部件的使用寿命。**方法** 采用激光熔覆技术在 65Mn 钢基体表面制备 Ni60A/WC 复合涂层。通过改变激光功率调节激光能量密度, 在不同能量密度下制备 Ni60A/WC 复合涂层, 观察并测试不同参数下复合涂层试样的宏观形貌、微观结构、物相组成、元素分布、显微硬度及摩擦磨损特性, 研究激光能量密度对 Ni60A/WC 复合涂层组织演变及摩擦磨损性能的影响规律和机理。**结果** Ni60A/WC 复合熔覆层顶部主要有胞状晶和树枝晶, 分布较紧密, 熔覆层中部主要有树枝状晶, 熔覆层底部主要为胞状晶和垂直交界面生长的枝晶, 且分布均匀致密。随着激光能量密度的升高, 熔覆层的熔高和熔深增加显著, WC 硬质相颗粒发生分解, 硬质相的数量明显减少, 涂层的平均显微硬度降低。在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 时, 熔覆层的平均显微硬度为 587.1HV1.0, 相较于基体, 提升了约 1.8 倍。此时熔覆层的平均摩擦因数最小, 为 0.312, 相较于基体, 得到显著提升, 摩擦磨损机制为轻微的磨粒磨损。经田间试验测试发现, 在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 时制备的带有熔覆层的旋耕刀相较于无熔覆层的旋耕刀, 其磨损质量降低了 63%。**结论** 通过控制激光能量密度, 可以有效调控 Ni60A/WC 熔覆层的硬度和耐磨性, 可为农机触土易磨损件的减摩耐磨表面强化改性提供理论指导。

**关键词:** 旋耕刀; 激光能量密度; Ni60A-WC 涂层; 微观组织; 物相组成; 硬度; 耐磨性

**中图分类号:** TG115.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)11-0181-12

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.11.016

## Effect of Laser Energy Density on Friction and Wear Properties of Ni60A/WC Composite Coating on 65Mn Steel Surface

WANG Chao<sup>1</sup>, JIANG Fulin<sup>1,2\*</sup>, YANG Fazhan<sup>1</sup>, LIANG Peng<sup>1</sup>

(1. a. School of Mechanical and Automotive Engineering, b. Key Lab of Industrial Fluid Energy Conservation and Pollution Control, Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao 266520, China; 2. Collaborative Innovation Center for Shandong's Main crop Production Equipment and Mechanization, Shandong Qingdao 266109, China)

收稿日期: 2023-06-13; 修订日期: 2023-09-25

Received: 2023-06-13; Revised: 2023-09-25

**基金项目:** 山东省自然科学基金 (ZR2022MEE081, ZR2021ME198); 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心开放课题项目 (SDXTZX-21); 高等学校学科创新引智计划 (D21017)

**Fund:** Shandong Provincial Natural Science Foundation under Grant (ZR2022MEE081, ZR2021ME198); Collaborative Innovation Center for Shandong's Main Crop Production Equipment and Mechanization (SDXTZX-21); 111 Project (D21017)

**引文格式:** 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.

\*通信作者 (Corresponding author)

**ABSTRACT:** A rotary tiller is a commonly used device in farming work. Its main soil-engaging parts, rotary blades, mainly undergo low-stress abrasive wear when working in the soil. As the wear increases, it leads to the failure of rotary blades. Every year, each country wastes a lot of steel. In order to improve the friction and wear properties of 65Mn steel used in rotary blades, improve the service life of soil-engaging parts of agricultural machinery, extend their service time, and reduce the waste of steel. Ni60A/WC composite coatings were prepared on the surface of 65Mn steel by laser cladding technology.

The Ni60A/WC composite coatings were prepared under different laser energy densities by changing the laser power to adjust the laser energy density by selecting the appropriate scanning speed, powder feeding amount, spot diameter, overlap rate, and other process parameters through pre-experiment. The macroscopic morphology, crack distribution, microstructure, phase composition, element distribution, microhardness, and friction and wear characteristics of the composite coating samples under different parameters were observed and tested. The influence law and mechanism of laser energy density on the microstructure evolution and friction and wear properties of Ni60A/WC composite coatings were studied. The results showed that when the laser energy density was low, there were convex defects in the center of each cladding layer, and there were many penetrating cracks on the surface of the cladding layer. With the increase of laser energy density, the surface of the cladding layer gradually became smooth and flat, and the cracks gradually disappeared. Microscopically, the top of the Ni60A/WC composite cladding layer mainly had cellular crystals and dendrites and was closely distributed. There were mainly dendritic crystals in the middle of the cladding layer. The bottom of the cladding layer was mainly cellular crystals and dendrites growing perpendicular to the interface, and they were uniform and dense. With the increase of laser energy density, the melting height and melting depth of the cladding layer increased significantly, the WC hard phase particles decomposed, the number of hard phases decreased significantly, and the average microhardness of the coating decreased. When the laser energy density was 120 J/mm<sup>2</sup>, the average microhardness of the cladding layer was 587.1HV1.0, which was about 1.8 times that of the substrate. At this time, the average friction coefficient of the cladding layer was 0.312, which was significantly lower than that of the substrate. The hardness and wear resistance were significantly improved, and the friction and wear mechanism was slightly abrasive wear. The rotary blade with cladding layer was prepared by laser cladding technology when the laser energy density was 120 J/mm<sup>2</sup>. The field test showed that the wear quality of the rotary blade with a cladding layer was 63% lower than that of the rotary blade without a cladding layer. The rotary blade prepared by laser cladding technology had better cost performance.

The hardness and wear resistance of the Ni60A/WC cladding layer can be effectively controlled by controlling the laser energy density. This study can provide theoretical guidance for the anti-friction and wear resistance and surface strengthening modification of agricultural machinery soil-touching parts.

**KEY WORDS:** rotary blade; laser energy density; Ni60A-WC coating; microstructure; phase composition; hardness; wear resistance

我国农业机械在工作过程中的可靠性和稳定性较差,其有效工作寿命不及国外同类产品,制约了我国农业机械化的深入发展<sup>[1-3]</sup>。其中,农机触土件的摩擦磨损性能不佳、质量达不到标准是导致上述问题的重要因素<sup>[4-5]</sup>。我国主要采用 65Mn 钢作为制造旋耕刀的钢材,它具有硬度高、强度高、淬透性好、价格低廉等特点<sup>[6-7]</sup>。在无润滑情况下,旋耕刀与土壤颗粒直接接触,在旋耕刀与土壤的相对运动过程中,土壤颗粒以较小角度冲击旋耕刀,进而发生低应力磨损。旋耕刀的触土部位在土壤颗粒长时间的冲击下形成了犁沟,长此以往导致旋耕刀报废<sup>[8-9]</sup>,因此探索以旋耕刀为代表的农机触土件的减摩耐磨机理、提升农机触土件的服役寿命成为推动农业机械化发展的关键。

激光熔覆技术主要通过激光产生的高密度能量熔化粉末和基体材料,从而在基体与熔覆层材料之间

实现优异的冶金结合,达到改性材料表面的目的。该技术具有熔覆层与基材的结合强度高,稀释率小,易加工,材料的选择性广泛等优点。针对熔覆层性能强化问题,基于多种强化机理提升熔覆层的硬度、耐磨性成为研究热点。Li 等<sup>[10]</sup>采用激光熔覆技术,以 Fe60 和碳纤维混合粉末在 16Mn 钢基体上制备碳化物增强复合涂层,高硬度的碳化物均匀地镶嵌在基体中,起到了弥散强化作用,熔覆层的显微硬度得到显著提高。不同的扫描速度、激光功率、送粉速度、光斑直径、搭接率等工艺参数对熔覆层耐磨性的强化效果也不相同。Bartkowski 等<sup>[11]</sup>通过激光熔覆技术制备了高强度的 Fe-WC 复合熔覆涂层,研究表明,通过优化工艺参数,使得熔覆层的硬度和耐蚀性获得较大提升。陈海龙<sup>[12]</sup>、夏国峰<sup>[13]</sup>探究了在 65Mn 钢上激光熔覆不同配比的铁基粉末,研究发现,不同粉末配比对 65Mn 钢熔覆层的强化效果不同,通过正交试验研究

了粉末配比影响熔覆层硬度、耐磨性的规律。选择合适的工艺参数和粉末配比,可以得到具有优异力学性能的表面强化涂层。目前,市场上 65Mn 钢旋耕刀表面强化大都基于传统的焊接和堆焊技术,其性能的提升有限,通过激光熔覆实现旋耕刀等农机触土件减摩耐磨表面改性的机理和技术等相关报道较少。

本文以旋耕刀减摩耐磨强化为目标,采用激光熔覆技术在旋耕刀材料 65Mn 钢基体上制备力学性能优异的 Ni60A/WC 复合涂层,探究激光能量密度对熔覆涂层硬度和耐磨性的影响规律,分析不同能量密度下熔覆层微观组织的演变规律,揭示 Ni60A/WC 复合涂层的减摩耐磨机理,探索 Ni60A/WC 复合涂层耐磨性能最佳的激光熔覆工艺参数,拟为以旋耕刀为代表的农机触土件的减摩耐磨及寿命提升研究提供参考。

1 实验

1.1 材料

实验选用旋耕刀常用钢 65Mn 钢为基体材料,其主要化学元素组成如表 1 所示。用角磨机将基体熔覆表面打磨平整,然后用砂纸依次打磨,直至表面平整光洁,用超声波清洗仪,并加入无水乙醇,将打磨后的基体清洗 15 min,以去除表面氧化层和污渍。熔覆层粉末使用鑫盾合金焊材喷涂有限公司提供的 Ni60A、WC。Ni60A 粉末的主要化学元素组成如表 2 所示,主要为球形颗粒,具有较好的浸润性、流动性,颗粒直径为 0.045~0.1 mm; WC 粉末以不规则形状为主,与 Ni60A 粉末充分接触,使其具有较高的结合强度,颗粒直径为 0.05~0.075 mm。粉末的形貌如图 1 所示。

通过预实验,选取 Ni60A/WC (WC 的质量分数为 15%,以下简称 Ni60A/15% WC) 复合粉末,在实验前先将混合粉末使用立式行星磨机混合 90 min,以保证粉末充分混合,然后使用烘干箱烘干,设定烘干温度为 130 ℃,烘干时间为 90 min,以去除混合粉末中的水分,减小它对熔覆效果和熔覆层质量的影响。

1.2 仪器与方法

实验使用德国罗芬公司生产的最大功率为 2 kW 的 FL020 光纤激光器,以及安装有氮气辅助同轴送粉装置的 KUKA-KR30-3 机械臂。经过预实验,选择激光功率为变量,其余参数(如表 3 所示)不变。激光功率的区间为 900~1 600 W,不同激光功率对应的激光能量密度如表 4 所示。在熔覆结束后,用电火花线切割机切割试样,以进行后续分析。在熔覆后,将试样在王水溶液中腐蚀 30 s,用 MERLIN Compact 场扫描电镜观察分析熔覆层的显微组织,用扫描电镜自带能谱仪(EDS)对熔覆层进行点扫描和面扫描,测量其成分。使用日本理学 UltimaIV 的 X 射线衍射仪测量不同激光能量密度下熔覆层的物相组成,靶材为 Cu,电压为 40 kV,电流为 150 mA,测试速度为 4 (°)/min,衍射角为 20°~90°。使用 HV-1000 型显微硬度计,加载保持在 9.81 N,加载时间为 10 s,测量涂层顶端到基体的显微硬度。在测量显微硬度时,选取熔覆层不相邻的 3 道熔覆层进行测量,测量范围为熔覆层顶部到底部基体,间隔为 0.2 mm,取同一高度的 3 个显微硬度的平均值作为此垂直深度的显微硬度。摩擦磨损试验采用兰州华汇仪器科技有限公司生产的 MFT-EC4000 型摩擦磨损试验机,具体参数

表 1 65Mn 钢化学成分  
Tab.1 Main chemistry of 65Mn steel

Element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe
Mass fraction/%	0.62-0.70	0.17-0.37	0.90-1.20	≤0.30	≤0.15	Allowance

表 2 Ni60A 合金粉末化学成分  
Tab.2 Main chemistry of Ni60A alloy particles

Element	C	Cr	Si	B	Fe	Ni
Mass fraction/%	0.80	16.50	4.00	4.00	< 8.00	Allowance

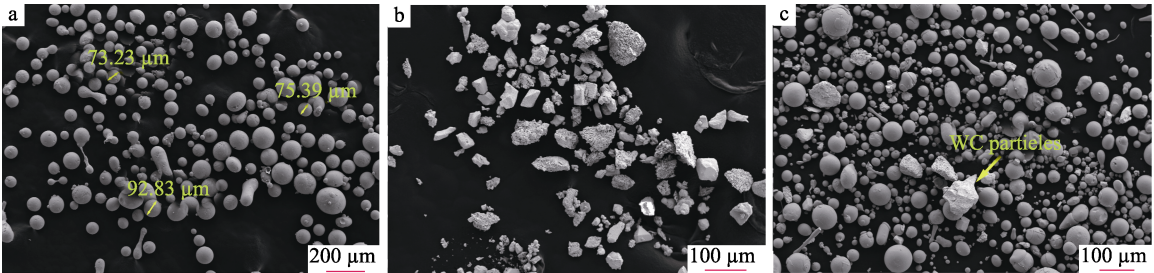


图 1 Ni60A 粉末 (a)、WC 粉末 (b)、Ni60A/WC 复合粉末 (c) 的形貌  
Fig.1 Morphology of Ni60A powder (a), WC powder (b), Ni60A/WC composite powder (c)



表 3 工艺参数  
Tab.3 Technology parameters

Parameter	Spot diameter/mm	Scanning speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	Powder flow rate/(g·min)	Overlap rate/%
Values	2	5	15	40

表 4 激光能量密度对熔覆层宏观形貌的影响  
Tab.4 Effect of laser energy density on macro forming of cladding layer

Group	Power of laser/W	Laser energy density/(J·mm <sup>-2</sup> )	Formability
a	900	90	Poor, surface with convex defects
b	1 000	100	Poor, surface sintering, surface with convex defects
c	1 100	110	Ordinary, surface with a small amount of convex defects
d	1 200	120	Good, flat surface
e	1 300	130	Good, flat surface
f	1 400	140	Good, flat surface
g	1 500	150	Good, flat surface
h	1 600	160	Good, flat surface

设置：频率为 2 Hz，单向位移为 5 mm，载荷为 10 N，持续时间为 20 min。在室温、干摩擦条件下，使用直径为 9.525 mm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 球。利用激光扫描共聚焦显微镜（LSCM）测量磨损后试样磨痕的磨损体积，分析摩擦磨损结果。

2 结果与分析

2.1 激光能量密度对熔覆层宏观形貌的影响

不同激光能量密度下，在 65Mn 钢表面制备的 Ni60A/WC 熔覆层的宏观形貌如图 2 所示。由图 2 可知，熔覆层整体宏观形貌良好，随着激光能量密度的增加，熔覆层表面更加平整，搭接处更为平滑。在激光能量密度为 90~100 J/mm<sup>2</sup> 时，熔覆层中间位置出现凸起状缺陷，在激光能量密度为 100 J/mm<sup>2</sup> 时出现烧结状缺陷，如图 2a~b 所示。在激光能量密度较低

时，熔覆层中间位置出现凸起状缺陷的原因：使用的粉末的熔点较高（Ni60A 粉末的熔点为 960~1 040 ℃，WC 粉末的熔点约为 2 870 ℃），熔化所需的能量较高，且在实验过程中使用的光纤激光器激光能量呈高斯分布，中心位置能量高，四周位置能量低<sup>[14]</sup>，在激光功率较低时激光光源中心位置粉末吸收的能量较多，发生熔化，激光光源外部粉末吸收的能量相对较低，达不到熔点，未充分熔化；激光熔覆是一个快热快冷过程，在熔覆过程中光源中心位置的粉末熔化，四周位置的粉末还未充分吸收能量就发生熔化，激光光源发生移动。

2.2 激光能量密度对熔覆层熔高、熔深的影响

在不同能量密度下，熔覆层的横截面形貌如图 3 所示。熔覆层与基体的结合区无裂纹、气孔等缺陷，呈现良好的冶金结合。随着激光能量密度的升高，熔



图 2 不同激光功率下镍基熔覆层的宏观形貌  
Fig.2 Macromorphology of nickel base cladding layer with different laser power



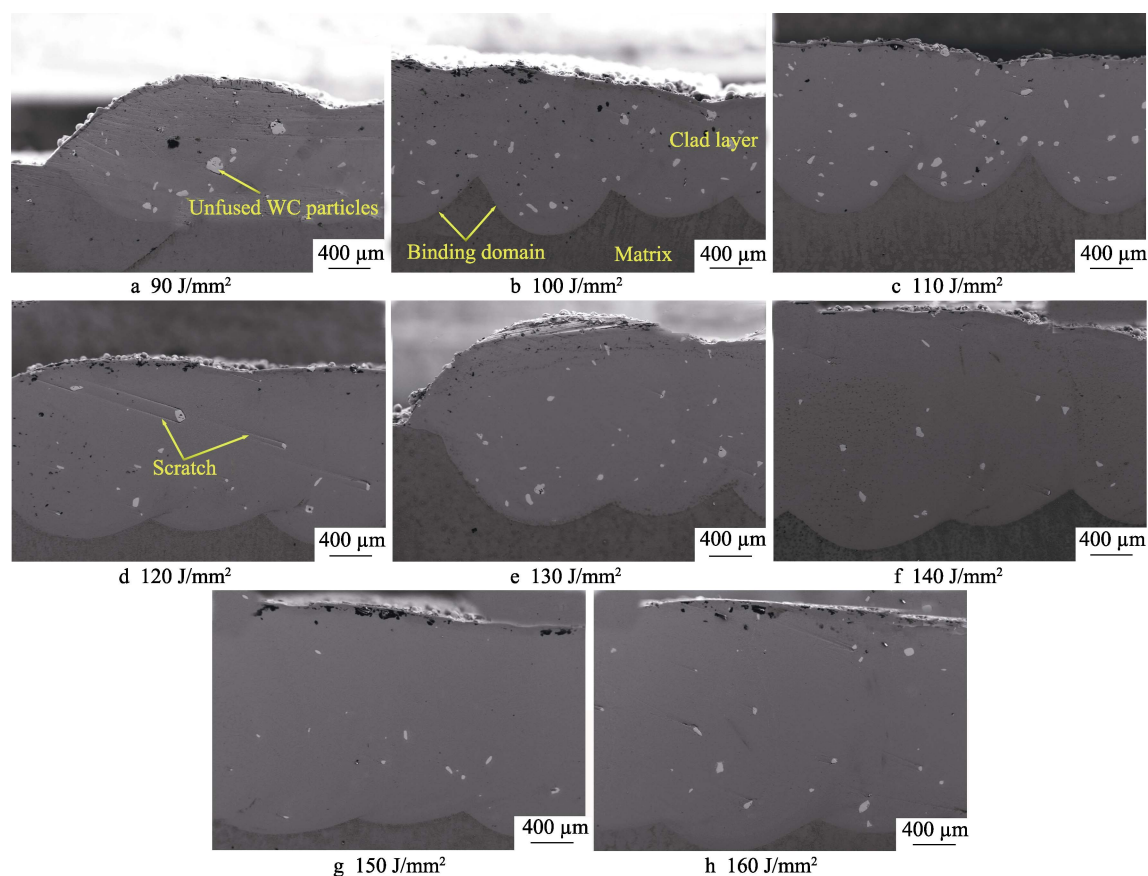


图 3 熔覆层的横截面形貌  
Fig.3 Cross-sectional view of cladding layer

覆层整体高度越来越高。未熔 WC 颗粒均匀地分布在熔覆层中, 作为硬质相, 它对熔覆层起着弥散强化作用。如图 3d 所示, 由于 WC 硬质相颗粒具有较高的硬度, 因此在打磨过程中出现了划痕。随着激光能量密度的升高, 未熔 WC 颗粒明显减少。分析原因可知, 随着激光能量密度的增加, 基体受到高能激光束的照射, 熔池随着激光能量密度的增加熔化得更深, 熔覆层的高度越来越高<sup>[15-17]</sup>。在 Marangoni 对流作用下, 未熔化熔覆层内部发生对流, 使得未熔 WC 颗粒均匀分布在熔覆层中<sup>[18]</sup>。同时, WC 颗粒具有较高的熔点, 随着激光能量密度的升高, 激光热源所释放的热量增多, 部分 WC 颗粒吸收热量而发生熔解, 所以表现出 WC 颗粒数目逐渐减小的趋势。

在不同激光能量密度下, 熔覆层的高度和深度的变化情况如图 4a 所示。由图 4a 可知, 当激光能量密度从  $90 \text{ J/mm}^2$  增加到  $160 \text{ J/mm}^2$  时, 熔覆层的高度和深度呈增大趋势。在激光熔覆过程中送粉量不变的情况下, 随着激光能量密度的增大, 粉末所吸收的能量增多, 粉末熔化量增多, 熔覆层的高度呈现增大趋势。同时, 随着激光能量密度的增加, 基体吸收的热量更多, 基体熔池深度更深。在激光能量密度为  $100 \sim 130 \text{ J/mm}^2$  时, 熔覆层的高度相差不大, 而熔覆层的深度出现增大趋势。在激光能量密度大于  $130 \text{ J/mm}^2$  后, 熔覆层的高度显著增加。分析原因可知, 在激光功率

较低时, 熔覆层中间出现凸起, 同轴送粉量不变, 随着激光能量密度的增加, 激光光源边缘位置粉末吸收激光光源释放的能量增多, 使得更多的粉末充分熔化, 熔覆层顶端慢慢变得均匀, 熔高变化不大。在  $130 \sim 160 \text{ J/mm}^2$  时, 熔深超过熔高, 因为激光功率的增加使得 65Mn 钢基体熔化得更多, 熔深逐渐增大, 由于送粉量为定值, 因此熔高增加得较缓慢。稀释率随激光能量密度的变化情况如图 4b 所示, 随着激光能量密度的增加, 熔覆层的稀释率增加。在激光熔覆层中, 熔化的基体会与熔覆层紧密结合, 同时也会对熔覆层的成分产生一定稀释作用, 熔覆层的质量主要取决于稀释率。当激光能量密度增大时, 65Mn 钢基体吸收的能量更多, 使得熔池变深, 熔化的基体混入熔覆层, 导致稀释率过大。相反, 较小的激光能量密度导致稀释率过小。稀释率会影响熔覆层的内部组织、元素分布、宏观形貌、硬度、裂纹等<sup>[19-22]</sup>, 因此有效控制稀释率才能得到高质量的熔覆层<sup>[23]</sup>。

### 2.3 激光能量密度对熔覆层裂纹的影响

在 Ni60A/WC 粉末体系中, Ni60A 合金粉末具有良好的浸润性, 能够充分与 WC 颗粒混合, 而 WC 属于硬质相陶瓷颗粒。部分颗粒在熔覆层中会发生熔解, 起到固溶强化作用, 部分颗粒未熔解在熔覆层中。当未熔 WC 过多时, 则易在周围产生应力集中, 从而

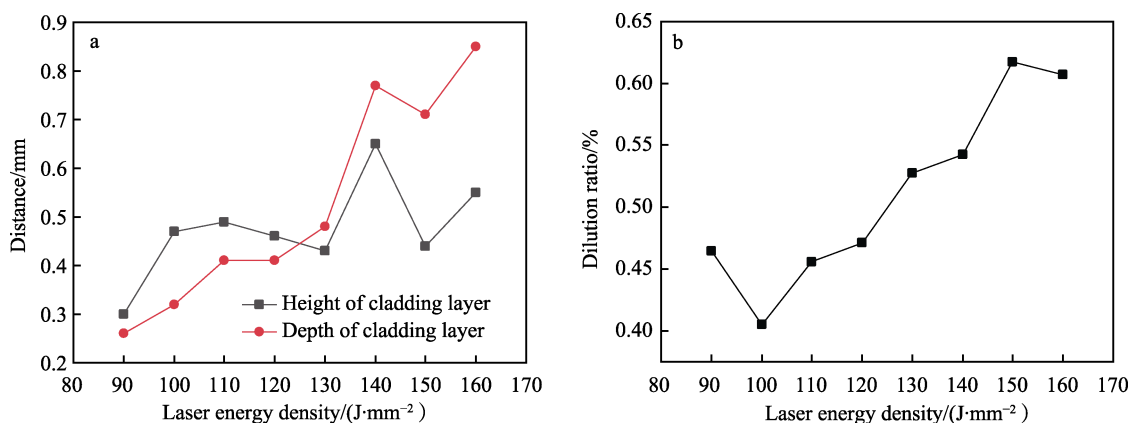


图 4 熔高、熔深 (a) 及稀释率 (b) 随激光能量密度的变化曲线

Fig.4 Curve of changes in melting height, depth (a), and dilution rate (b) with laser energy density

引发熔覆层出现裂纹等缺陷。在激光能量密度为  $90\sim 160 J/mm^2$  时, 熔覆层探伤实验结果如图 5 所示。在激光能量密度为  $90\sim 110 J/mm^2$  时, 熔覆层存在贯穿式裂纹, 分析有以下原因。

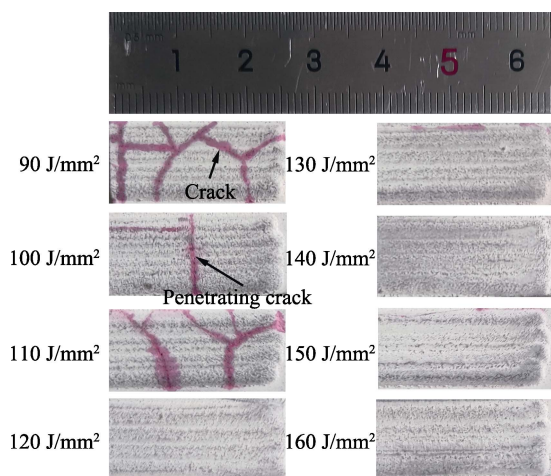


图 5 熔覆层裂纹探伤实验

Fig.5 Test diagram of crack detection of cladding layer

1) 在激光熔覆时, 激光功率过低, 则熔覆层中存在大量未熔的 WC 硬质相陶瓷颗粒, 未熔 WC 硬质相陶瓷颗粒易产生应力集中, 导致熔覆层开裂, 使得熔覆层的质量变差。当激光能量密度较小时, Ni60A 粉末未充分吸收激光光源释放的能量, 因而未充分融化, 也会使熔覆层开裂。

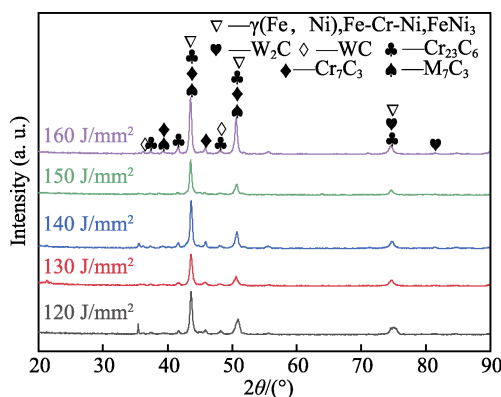
2) 激光熔覆是一个快热极冷过程, 激光光源热量呈高斯分布, 激光光源经过基体, 使得粉末与基体同时熔化而紧密结合。当激光能量密度太小时, 熔覆层快速冷却, 因此容易出现裂纹。

3) 在 Ni60A 粉末熔覆过程中, 如果稀释率过小, 则会导致熔覆层出现裂纹<sup>[24]</sup>。随着激光功率的增加, 激光能量密度增大, 在激光能量密度为  $120\sim 160 J/mm^2$  时熔覆层未出现裂纹, 粉末充分吸收能量而熔化, 表现为熔覆层表面平整。如果熔覆层出现裂纹缺陷, 则工件工作过程中熔覆层在冲击、循环应力的作用

下会脱落。结合如图 2 所示的熔覆层宏观形貌, 后续试验将对激光能量密度为  $120\sim 160 J/mm^2$  的试样展开分析。

## 2.4 熔覆层元素分布及显微组织

在激光能量密度为  $120\sim 160 J/mm^2$  时, 熔覆层的 XRD 图谱如图 6 所示。可以看出, 改变激光能量密度并未改变熔覆层的物相, 熔覆层主要由  $\gamma(Fe, Ni)$ 、 $Fe-Cr-Ni$ 、 $FeNi_3$ 、 $W_2C$ 、 $WC$ 、 $Cr_{23}C_6$ 、 $Cr_7C_3$ 、 $M_7C_3$  ( $M$  表示  $Fe$ 、 $Cr$ ) 等物相组成。其中,  $Fe$ 、 $Ni$ 、 $Cr$  元素在周期表中作为相邻元素, 也是过渡族元素, 其原子半径接近, 易发生反应, 并结合成固溶体。其中,  $\gamma(Fe, Ni)$  固溶体可以增强熔覆层的硬度和耐磨性<sup>[25]</sup>,  $M_xC_y$  型碳化物的出现, 在熔覆层中起着弥散强化作用, 降低了发生晶间腐蚀的可能性, 提高了熔覆层的耐磨性、耐腐蚀性<sup>[26]</sup>。采用高能激光束照射 WC 粉末, 使其吸收能量分解, 发生脱碳反应, 生成  $W_2C$ 、 $C$ , 生成的  $C$  元素与熔覆层中的  $Cr$  元素结合, 生成  $Cr_{23}C_6$ 、 $Cr_7C_3$  等化合物, 并析出。  $W_2C$ 、 $WC$ 、 $Cr_{23}C_6$ 、 $Cr_7C_3$  等化合物在熔覆层中作为弥散分布的硬质相, 能够提高熔覆层的硬度、耐磨性<sup>[27]</sup>。

图 6 激光能量密度为  $120\sim 160 J/mm^2$  时熔覆层的 XRD 图谱Fig.6 XRD pattern of  $120\sim 160 J/mm^2$  cladding layer with laser energy density



在激光能量密度为  $120\text{ J/mm}^2$  时, 熔覆层及基体的主要元素分布如图 7 所示。Cr 元素主要存在于 Ni60A 粉末中, 分布均匀, 表明熔覆层与基体紧密结合, Cr 元素充分扩散。Ni 元素主要来源于 Ni60A, 主要分布在熔覆层中。W 主要表现为团聚状 (未熔 WC 颗粒), 均匀分布在熔覆层中。部分 WC 颗粒发生熔解, 并与 Ni60A 元素相结合, 从而起到固溶强化作用。部分未熔 WC 颗粒在熔覆层中均匀分布, 起到了弥散强化作用。熔覆层中 O 元素的含量远远少于基体中 O 元素的含量。在分析元素前先用王水进

行腐蚀, 表明基体更易氧化, 熔覆层的耐腐蚀性比基体的耐腐蚀性好。

在激光能量密度为  $120\text{ J/mm}^2$  时, 熔覆层顶部、中部、底部的显微组织如图 8 所示。观察到晶粒细小且紧密排布, 此时晶粒组织对熔覆层起到了细晶强化作用。熔覆层顶部的显微组织如图 8a 所示, 主要存在胞状晶和树枝状晶, 且紧密排列。因为熔覆层顶部与保护气体直接接触, 热量流失较快, 使其过冷度较大, 因此熔覆层顶部的晶粒组织较细小。熔覆层中部的显微组织如图 8b~c 所示, 由于熔覆层中部的热量

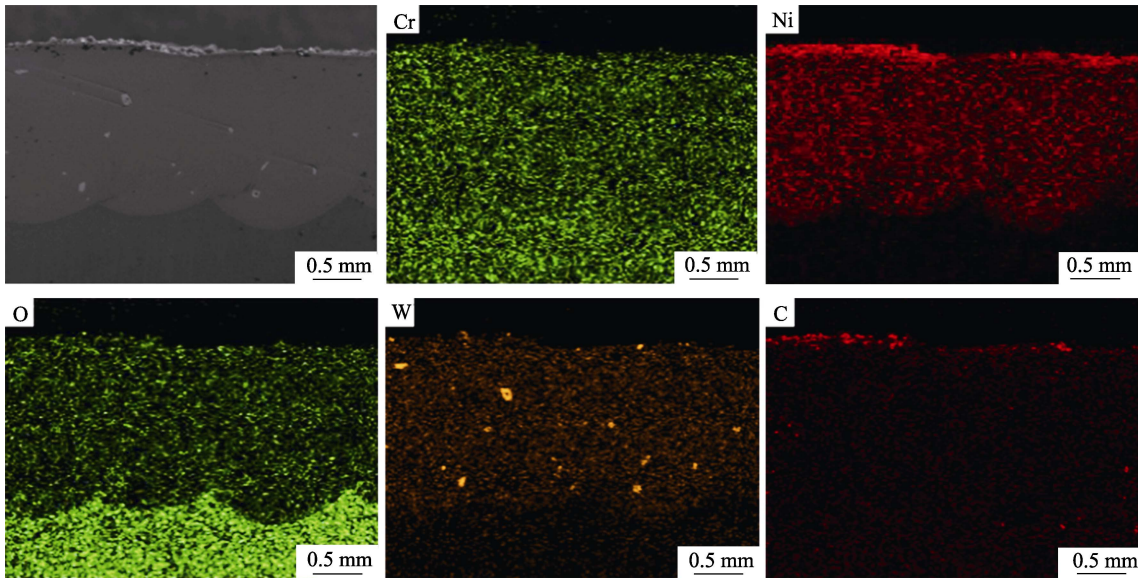


图 7 激光能量密度为  $120\text{ J/mm}^2$  时熔覆层的元素分布  
Fig.7 Element distribution of  $120\text{ J/mm}^2$  cladding layer with laser energy density

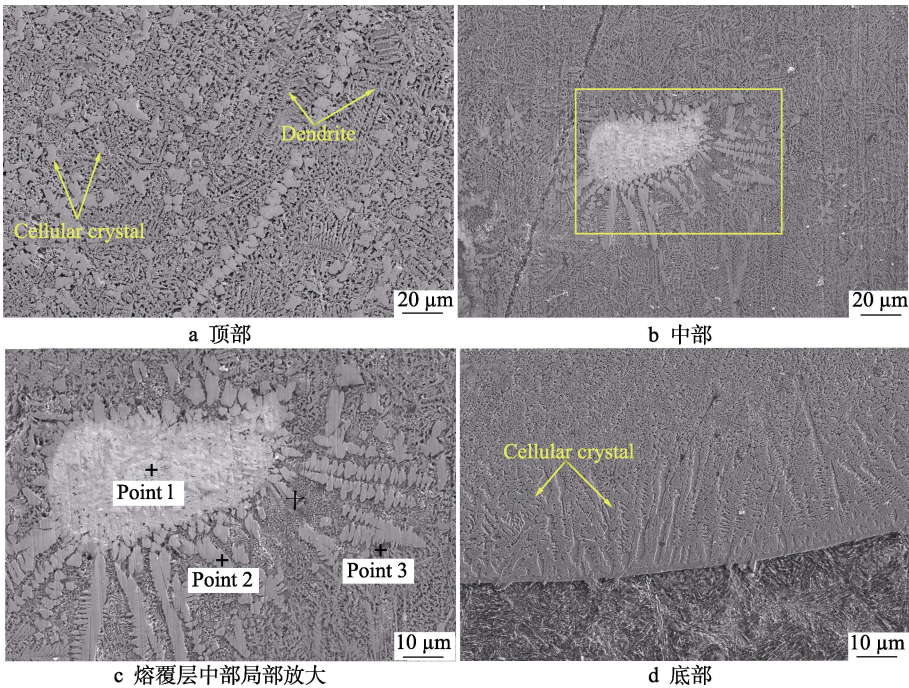


图 8 激光能量密度为  $120\text{ J/mm}^2$  时熔覆层的显微组织图片  
Fig.8 Microstructure picture of cladding layer at  $120\text{ J/mm}^2$  laser energy density:  
a) top; b) middle; c) partial enlargement of the middle of the cladding layer; d) bottom



散失较慢,内部组织充分生长,因此出现了大量紧密生长的树枝晶。白色椭圆状物体为未熔碳化钨颗粒,它与熔覆层紧密结合,阻碍了位错滑移运动,使得熔覆层的整体强度得到提高。WC 颗粒未熔解在熔覆层中,作为质点,使得晶粒在形成过程中依附于未熔 WC 颗粒异质形核,因此 WC 周围生长了许多胞状晶,以及垂直于 WC 颗粒生长的柱状晶。熔覆层底部的显微组织如图 8d 所示,在熔覆层与基体的交界处出现了一条白亮带,结合 Cr 元素分布均匀且充分扩散的情况(图 7)可知,熔覆层与基体结合良好,且为冶金结合。在熔覆层底部主要存在胞状晶,以及垂直于熔覆层与基体交界面生长的枝晶。这是因为熔覆层底部区域与基体直接接触,出现了热量流失情况,出现温度差,导致熔覆层存在过冷现象。熔覆层中存在的大量共晶组织均匀地分布在熔覆层中,使得熔覆层整体的硬度得到提高。在熔覆层不同区域晶粒的形态不同,这是因为激光熔覆是快热极冷过程,温度梯度、过冷度的不同导致晶体的凝固方式也不同。

通过对点 1、2、3 进行 EDS 点扫描分析(均用原子数分数表示)可知(表 5),点 1 主要含有 W、C 元素,为未熔 WC 颗粒;点 2 含有 Fe 9.77%、C 5.48%、Cr 24.05%、Ni 32.84%、W 27.86%,结合 XRD 分析结果,推断为 FeNi<sub>3</sub>与 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>、WC、W<sub>2</sub>C 形成的共晶组织;点 3 含有 Fe 16.03%、C 25.50%、Cr 19.70%、Ni 17.85%、W 20.92%,结合 XRD 分析结

表 5 不同点的 EDS 分析结果  
Tab.5 EDS analysis results at different points

Point	Atomic percentage/%				
	Fe	C	Cr	Ni	W
1	—	4.66	—	—	95.34
2	9.77	5.48	24.05	32.84	27.86
3	16.03	25.50	19.70	17.85	20.92

果和金属结晶理论分析,推断为 Fe 与 Ni 形成的  $\gamma(\text{Fe,Ni})$ 金属间化合物<sup>[25]</sup>,Fe、Cr、C 元素结合生成的 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>、M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>等间隙化合物,与 WC、W<sub>2</sub>C 共同形成的晶间组织。

2.5 激光能量密度对熔覆层硬度的影响

在激光能量密度为 120~160 J/mm<sup>2</sup>时,熔覆层横截面显微硬度曲线如图 9a 所示。随着激光能量密度的增加,涂层的显微硬度呈减小趋势。在激光能量密度为 120~160 J/mm<sup>2</sup>时,熔覆层的平均显微硬度如图 9b 所示。在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup>时,熔覆层的平均显微硬度最大值为 587.1HV1.0,约为基体硬度(325.3HV1.0)的 1.8 倍。熔覆层中未熔 WC 颗粒的硬度为 991.4~1 839.5HV1.0,远远高于基体和熔覆层的硬度。涂层的显微硬度呈减小趋势的原因:激光功率的增大,使得 65Mn 钢基体的熔化部分增多,对熔覆层的稀释作用增强;激光功率的增大,使得熔覆层内部温度升高,冷却速度减慢,温度梯度降低,过冷度减小,熔覆层内部组织充分生长,使得晶粒粗化,导致熔覆层的质量下降;随着激光功率的增大,WC 颗粒发生熔解,阻碍位错滑移运动的趋势减小。相较于 Ni60A 粉末熔覆层,Ni60A/WC 复合粉末熔覆层的硬度得到提高的原因:部分 WC 颗粒吸收热量,并熔解于熔覆层中,发挥着固溶强化作用;C 元素与 Cr、W 等元素结合,生成了 W<sub>2</sub>C、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>等硬质相,并从熔覆层中析出,这些硬质相化合物在熔覆层中均匀分布,具有析出强化和弥散强化的作用。随着激光功率的增加,在熔覆层中出现了 WC 颗粒熔解和基体稀释作用同时存在的现象,并且逐渐增强,基体的稀释作用强于 WC 颗粒熔解在熔覆中带来的强化作用,因此出现了熔覆层平均显微硬度下降的现象。

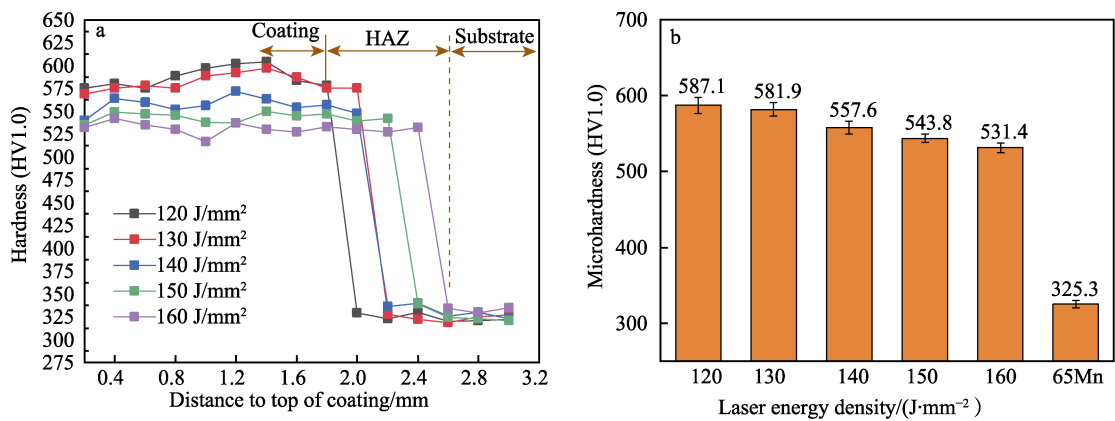


图 9 不同激光功率下熔覆层横截面显微硬度曲线(a)及熔覆层、基体的平均显微硬度(b)  
Fig.9 Cross-sectional microhardness curves of cladding layers with different laser power (a), average microhardness of cladding layer and matrix at different energy densities (b)

2.6 激光功率对熔覆层摩擦磨损行为的影响

在激光能量密度为 120~160 J/mm<sup>2</sup> 时, Ni60A/WC 涂层、65Mn 钢基体在法向载荷 10 N 下摩擦因数随时间的变化如图 10a 所示。摩擦因数反映材料在复杂的工况中工作时减摩能力的强弱, 摩擦因数越低, 则减摩效果越好, 材料磨损量越少<sup>[28]</sup>。在摩擦磨损初始阶段(Ⅰ, 磨合阶段), 摩擦因数逐渐上升。10 min 后属于稳定磨损阶段(Ⅱ)。在摩擦磨损初始阶段, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷球与熔覆层、基体直接接触, 基体和熔覆层掉落的碎屑阻碍了陶瓷球与熔覆层的相对滑动, 导致摩擦因数增大。随着相对摩擦时间的增加, 碎屑不断积累堆积, 并达到稳定状态, 此时进入稳定磨损阶段<sup>[29]</sup>。熔覆层和基体在 10 min 后进入稳定磨损阶段的平均摩擦因数如图 10b 所示, 熔覆层的平均摩擦因数均低于 65Mn 钢的摩擦因数。随着激光能量密度的增加, Ni60A/WC 熔覆层的平均摩擦因数呈现上升趋势, 在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 时熔覆层达到最低平均摩擦因数(0.312)。

耐磨性指材料本身抵抗磨损的性能, 采用磨损率

表征耐磨性的强弱, 计算见式(1)<sup>[30]</sup>。

$$W = \frac{V}{N \cdot S}$$

(1)

式中: W 为磨损率, mm<sup>3</sup>/(N·m); V 为磨损体积, mm<sup>3</sup>; N 为法向载荷, N; S 为磨损行程, mm。

采用激光共聚焦显微镜测量室温、干摩擦条件下 Ni60A/WC 涂层和 65Mn 基体的磨痕体积, 如表 6 所示。计算不同参数下的磨损率, 65Mn 钢基体的磨损率为 8.86×10<sup>-2</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m); 在激光能量密度为 120~160 J/mm<sup>2</sup> 时, 熔覆层的磨损率分别为 4.5×10<sup>-2</sup>、4.64×10<sup>-2</sup>、5.18×10<sup>-2</sup>、5.38×10<sup>-2</sup>、5.5×10<sup>-2</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)。表明熔覆层的磨损率均小于 65Mn 钢基体的磨损率, 在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 时熔覆层的磨损率最低。在熔覆层的摩擦磨损阶段, 未熔 WC 颗粒在熔覆层中均匀分布, 起到了耐磨减损作用, 熔解到熔覆层的 WC 颗粒则起到了固溶强化和析出强化的作用, 提升了熔覆层的硬度, 从而减小了磨损。结合熔覆层的显微硬度曲线可知, 磨损率与硬度的分布趋势基本成正比。

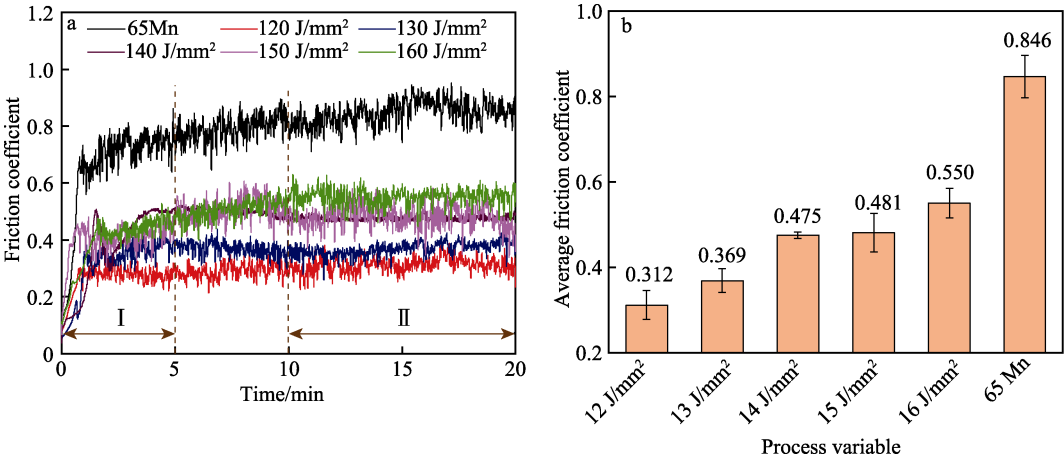


图 10 不同激光能量密度下熔覆层和 65Mn 钢表面摩擦因数随时间的变化 (a) 及熔覆层、65Mn 钢的平均摩擦因数 (b)  
Fig.10 Variation of friction coefficient of cladding layers and 65Mn steel surface with time under different laser energy densities (a), average friction coefficient of cladding layers and 65Mn steel under different laser energy densities (b)

表 6 不同激光能量密度下 Ni60A/WC 熔覆层和 65Mn 钢的磨损数据

Tab.6 Wear data of Ni60A/WC cladding layer and 65Mn steel under different laser energy densities

Group	Wear area/ $\mu\text{m}^2$	Wear volume/ $(10^{-2} \text{ mm}^3)$	Wear rate/ $(10^{-2} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
Matrix	8 864.6	4.43	8.86
120 J/mm <sup>2</sup>	4 493.6	2.25	4.5
130 J/mm <sup>2</sup>	4 648.9	2.32	4.64
140 J/mm <sup>2</sup>	5 184.4	2.59	5.18
150 J/mm <sup>2</sup>	5 386.9	2.69	5.38
160 J/mm <sup>2</sup>	5 503.1	2.75	5.5

Ni60A/15% WC 的磨损形貌 SEM 图如图 11 所示, 图 11a~e 为激光能量密度为 120~160 J/mm<sup>2</sup> 时熔覆层的磨损形貌。在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 时, 熔覆层表面主要出现了较浅的犁沟和少量黏着现象, 且较为平整, 此时熔覆层发生了轻微的磨粒磨损。随着激光能量密度的增加, 犁沟呈逐渐变深的趋势, 磨损表面变得凹凸不平。在激光能量密度高于 140 J/mm<sup>2</sup> 时, 熔覆层出现了塑性变形引起的涂层剥落现象, 此时熔覆层的磨损机制主要为磨粒磨损和疲劳磨损。在激光能量密度为 150 J/mm<sup>2</sup> 时, 熔覆层表面出现了黏着和塑性变形现象, 此时熔覆层表面的主要磨损机制为黏着磨损和较为严重的疲劳磨损。在激光能量密度



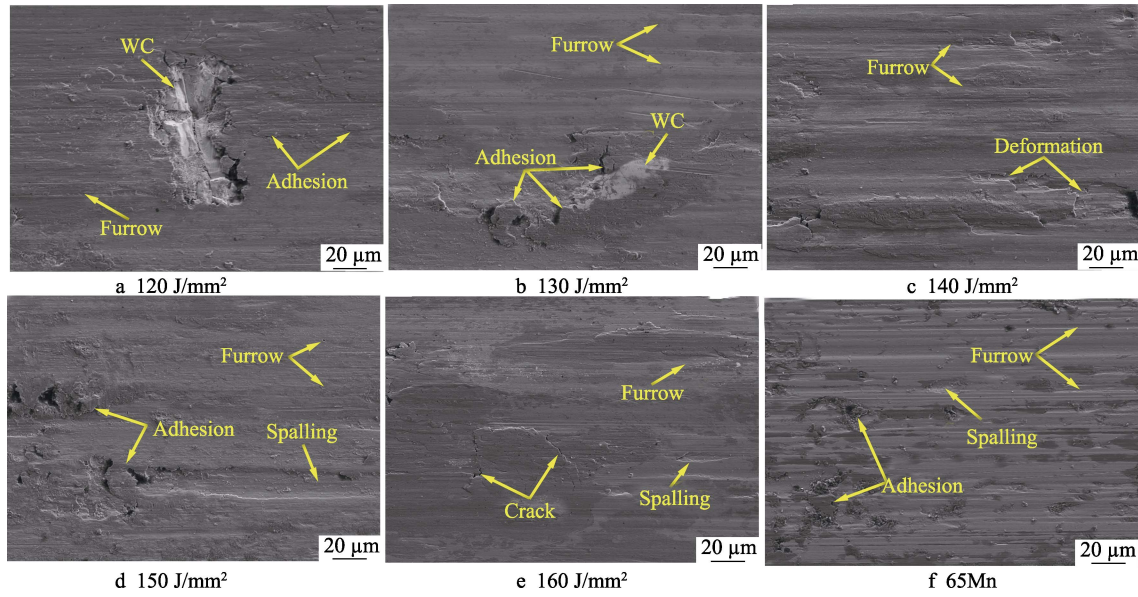


图 11 Ni60A/15% WC 复合涂层和基体磨损形貌 SEM 图  
Fig.11 SEM image of wear morphology of Ni60A/15% WC composite coating and substrate

为 160 J/mm<sup>2</sup> 时，涂层与对磨件磨擦时出现了裂纹缺陷，使得熔覆层更易剥落，导致熔覆层的质量下降。如图 11f 所示，65Mn 基体表面的磨痕明显，存在较深的犁沟，出现了塑性变形所致的剥落和黏着现象，发生了严重的疲劳磨损和黏着磨损。

如图 11a 所示，白色颗粒状物体为涂层中均匀分布的未熔 WC 颗粒，在磨损过程中作为硬质相阻碍了犁沟的扩展，提升了材料的耐磨能力<sup>[31]</sup>。如图 11b 所示，未熔 WC 颗粒周围出现了明显的黏着现象，在对磨件与熔覆层反复对磨的过程中，在熔覆层表面产生了较多的磨屑。在与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷球的相对运动过程中，由于 WC 颗粒的硬度极高，较难发生磨损，磨屑附着在 WC 颗粒周围并发生黏着，起到了对抗反复摩擦的作用，从而提高了熔覆层的耐磨能力。

2.7 田间试验

为了验证旋耕刀表面激光熔覆 Ni60A/WC 复合涂层的实际田间应用效果，选取激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 在旋耕刀刃部进行激光熔覆，制备了 Ni60A/WC 复合涂层，并与普通未经熔覆处理的旋耕

刀一起安装在旋耕机上，并在青岛市莱西农田进行了田间试验，试验现场如图 12 所示。总作业面积为 20 000 m<sup>2</sup>，土壤为沙壤土，耕作速度为 4~5 km/h。

带有熔覆层的旋耕刀和不带熔覆层旋耕刀田间试验前后对比如图 13 所示。可知，旋耕刀在耕作过程中主要是正切刃和侧切刃发生磨损，在正切刃与侧



图 12 田间试验现场  
Fig.12 Field test site



图 13 普通旋耕刀与带有熔覆层旋耕刀作业前后对比  
Fig.13 Comparison of ordinary rotary blade and rotary blade with cladding layer before and after operation:  
a) ordinary rotary blade before cultivation; b) ordinary rotary tillage blades after cultivation; c) rotary tillage blades with a fusion layer before cultivation; d) rotary tiller blades with fusion layer after cultivation



切刃相交部位的磨损最严重, 如图 13d 所示。在田间试验后去除旋耕刀表面的泥土, 然后烘干后称量, 普通旋耕刀的磨损质量为 97.1 g, 带有熔覆层的旋耕刀的磨损质量为 35.9 g。旋耕刀的磨损质量明显降低, 表明带有 Ni60A/WC 熔覆涂层的旋耕刀在农耕过程中具有较好的耐磨性。

### 3 结论

采用激光熔覆技术, 在 65Mn 钢上制备 Ni60A/15% WC 复合涂层, 研究了不同激光能量密度下 Ni60A/15% WC 复合涂层的组织演变及摩擦磨损性能的影响规律, 探索了复合涂层的减摩耐磨强化机理, 得出以下结论。

1) 宏观上, 熔覆层的表面形貌随着激光能量密度的增加而变得平整光洁, 裂纹逐渐减少, 熔覆层的稀释率逐渐增大。未熔 WC 颗粒均匀地分布在熔覆层中, 起到了弥散强化的作用。

2) 在 Ni60A/WC 复合涂层中存在大量的  $W_2C$ 、 $Cr_{23}C_6$ 、 $Cr_7C_3$ 、 $M_7C_3$  (M 表示 Fe、Cr) 等硬质析出相, 它们均匀地分布在熔覆层中, 起到了析出强化和弥散强化的作用。在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 时, Ni60A-WC 熔覆层的顶部、中部、底部组织细小且致密, 具有细晶强化的作用, 使得 Ni60A/WC 复合涂层的硬度和耐磨性得到提高。

3) Ni60A/WC 复合涂层的硬度相较于基体显著提高。在激光能量密度为 120 J/mm<sup>2</sup> 时, 熔覆层的平均显微硬度最大值为 587.1HV1.0, 约为基体硬度的 1.8 倍, 此时熔覆层的平均摩擦因数达到最低值 (0.312), 只发生了轻微的磨粒磨损, 未熔 WC 颗粒均匀地分布在熔覆层中, 阻碍了犁沟的扩展, 同时也会黏着磨屑, 起到了减摩和抗磨的作用。经田间试验测试发现, 带有熔覆层的旋耕刀的磨损质量相较于普通旋耕刀降低了 63%, 具有较好的耐磨性。

### 参考文献:

- [1] 赵岭, 吕钊钦. 可靠性技术在农业机械中的应用[J]. 山东农机, 2004, 42(7): 7-8.  
ZHAO L, LYU Z Q. Application of Reliability Technology in Agricultural Machinery[J]. Shandong Agricultural Machinery, 2004, 42(7): 7-8.
- [2] 苏彬彬, 徐杨, 简建明. 农业机械耐磨件发展及研究现状[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(5): 53-58.  
SU B B, XU Y, JIAN J M. The Actuality of Development and Research of Wear Resistant Part for Agricultural Machinery[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013, 34(5): 53-58.
- [3] 陈志. 中国农机零部件工业的现状和发展[J]. 农业机械, 2012(28): 78-82.  
CHEN Z. Present Situation and Development of Agricultural Machinery Parts Industry in China[J]. Farm Machinery, 2012(28): 78-82.
- [4] 仪坤秀, 王明磊. 我国农机零配件质量状况综述[J]. 农业机械, 2010(14): 2-4.  
YI K X, WANG M L. Summary of the Quality of Agricultural Machinery Spare Parts in China[J]. Farm Machinery, 2010(14): 2-4.
- [5] 马德鹏. 农机关键零配件如何突围[J]. 农业机械, 2011(3): 60.  
MA D P. How to Break through the Key Spare Parts of Agricultural Machinery[J]. Farm Machinery, 2011(3): 60.
- [6] 陈渝, 刘双喜, 黄叶萍, 等. 综合传动装置高精度摩擦片的冲压工艺创新[J]. 锻压技术, 2015, 40(9): 107-110.  
CHEN Y, LIU S X, HUANG Y P, et al. Innovation of Stamping Technology of High Precision Friction Pieces for Integrated Transmission Device[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(9): 107-110.
- [7] 邱香花, 傅清霞, 张筱蓉, 等. 65Mn 带钢的断裂原因[J]. 物理测试, 2013, 31(4): 38-41.  
QIU X H, FU Q X, ZHANG X R, et al. Fracture Cause of 65Mn Strip Steel[J]. Physics Examination and Testing, 2013, 31(4): 38-41.
- [8] CHEN K Y, YANG X F, LI W Y, et al. Study on the Wear and Corrosion Resistance of Fe-Mo Coatings on 65Mn Steel Ploughshares by Laser Cladding[J]. Applied Physics A, 2022, 128(9): 795.
- [9] SINGH J, CHATHA S S, SIDHU B S. Abrasive Wear Characteristics and Microstructure of Fe-Based Overlaid Ploughshares in Different Field Conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104771.
- [10] LI J F, ZHU Z C, PENG Y X, et al. In Situ Synthesized (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>-Reinforced Composite Coatings via Laser Cladding Deposition of Fe-Based Alloys and Carbon Fibers[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 391-398.
- [11] BARTKOWSKI D, BARTKOWSKA A, JURČI P. Laser Cladding Process of Fe/WC Metal Matrix Composite Coatings on Low Carbon Steel Using Yb: YAG Disk Laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 136: 106784.
- [12] 陈海龙. 翻转犁铧表面激光熔覆涂层耐磨耐腐蚀性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2019: 57-58.  
CHEN H L. Study on Wear Resistance and Corrosion Resistance of Turn Plough by Laser Cladding Coating on the Surface[D]. Jinan: University of Jinan, 2019: 57-58.
- [13] 夏国峰. 铧式犁体表面激光熔覆铁基涂层制备及性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2021: 73-74.  
XIA G F. Preparation and Properties of Laser Cladding Iron-Based Coating on Working Surface of Ploughshare [D]. Jinan: University of Jinan, 2021: 73-74.
- [14] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003: 25-28.  
LIU Z X. Modeling and Numerical Simulation on Laser Remelting and Cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 25-28.

- [15] WANG W J, LIANG S Y. Prediction of Molten Pool Height, Contact Angle, and Balling Occurrence in Laser Powder Bed Fusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(9): 6193-6202.
- [16] LIU C, MA P F, LIU H, et al. Effect of Metal Layer Height on Heat Transfer Inside Molten Pool[J]. Kern-technik, 2022, 87(5): 0033.
- [17] ZHENG M, WEI L, CHEN J, et al. A Novel Method for the Molten Pool and Porosity Formation Modelling in Selective Laser Melting[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 1091-1105.
- [18] 王慧萍, 李军, 张光钧, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆 TiC 复合涂层组织和耐磨性能[J]. 金属热处理, 2010, 35(8): 38-41.
- WANG H P, LI J, ZHANG G J, et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Clad TiC Coating on TC4 Titanium Alloy Surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(8): 38-41.
- [19] LÓPEZ B, GUTIÉRREZ I, URCOLA J J. Microstructural Analysis of Steel-Nickel Alloy Clad Interfaces[J]. Materials Science and Technology, 1996, 12(1): 45-55.
- [20] XI W C, SONG B X, ZHAO Y, et al. Geometry and Dilution Rate Analysis and Prediction of Laser Cladding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9): 4695-4702.
- [21] LIU B, LIU H P, JING X B, et al. The Effect of Laser Process Parameters on Microstructure and Dilution Rate of Cladding Coatings[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 307: 012035.
- [22] CHEN C, ZHAO J Y, ZHOU J, et al. Arc Deposited AlSi12 Cladding Layer on Steel Plate without Zinc Coating[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(1): 100-107.
- [23] ZHAO J X, WANG G, WANG X Y, et al. Multicomponent Multiphase Modeling of Dissimilar Laser Cladding Process with High-Speed Steel on Medium Carbon Steel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 118990.
- [24] 申泽慧, 孙荣禄. 稀释率对钛合金表面镍基熔覆层质量的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(6): 101-105.
- SHEN Z H, SUN R L. Influence of Dilution Rate on Quality of Nickel-Based Cladding on Surface of Titanium Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(6): 101-105.
- [25] 徐欢欢, 林晨, 刘佳, 等. 超声功率对激光熔覆 Ni 基 WC+CeO<sub>2</sub> 涂层组织与性能的影响[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 439-446.
- XU H H, LIN C, LIU J, et al. Effect of Ultrasonic Power on the Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-Based WC+CeO<sub>2</sub> Coating[J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 439-446.
- [26] 肖奇, 孙文磊, 刘金朵, 等. Ni60A/WC 激光熔覆涂层表面抗蚀行为[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8146-8150.
- XIAO Q, SUN W L, LIU J D, et al. Surface Corrosion Behavior of Ni60A/WC Laser Cladding Coating[J]. Materials Reports, 2021, 35(8): 8146-8150.
- [27] 丁阳喜. Cr<sub>12</sub>MoV 钢激光熔覆 Ni 基 WC 合金性能研究 [J]. 热加工工艺, 2009, 38(24): 93-94.
- DING Y X. Research on Properties of Laser Cladding Ni-Based WC Alloy on Cr<sub>12</sub>MoV Steel Surface[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(24): 93-94.
- [28] 刘亚楠, 谷米, 孙荣禄, 等. 钛合金表面激光熔覆原位制备 TiC/Ti<sub>2</sub>Ni 复合涂层微观组织及性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402011.
- LIU Y N, GU M, SUN R L, et al. Microstructure and Properties of In-Situ TiC/Ti<sub>2</sub>Ni Composite Coating Prepared via Laser Cladding on Titanium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402011.
- [29] TONG Z P, REN X D, ZHOU W F, et al. Effect of Laser Shock Peening on Wear Behaviors of TC11 Alloy at Elevated Temperature[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 139-148.
- [30] 相占凤. 添加固体润滑剂 hBN 的钛合金激光熔覆高温耐磨复合涂层研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015: 20-21.
- XIANG Z F. Study of High Temperature Anti-Wear Composite Coatings on Titanium Alloy with the Addition of hBN[D]. Suzhou: Soochow University, 2015: 20-21.
- [31] 芦海俊, 水剑虹, 王锴, 等. WC 颗粒熔解析出对 Ni60 熔覆层性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 189-196.
- LU H J, SHUI J H, WANG K, et al. Effects of Dissolving and Precipitating of WC Particles on Performance of Ni60 Coating[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 189-196.