

WC-12Ni 硬质涂层在模拟土壤环境中的磨料磨损行为

赵建杰¹, 吴志立^{1,2*}, 吴明亮^{1,2}, 雷明凯³

(1.湖南农业大学工学院, 湖南 长沙 410128; 2.南方粮油作物协同创新中心, 湖南 长沙 410128; 3.大连理工大学材料科学与工程学院表面工程实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:采用美科 LF-HVOF 超音速火焰喷涂系统, 对 45 钢表面喷涂厚约 300 μm 的 WC-12Ni 硬质涂层, 利用显微硬度计、X 射线衍射仪和场发射扫描电镜分别表征硬质涂层的硬度、相结构和表面形貌; 以 65Mn 弹簧钢作为对比材料, 利用湿砂橡胶轮磨损试验测试涂层的磨料磨损性能。结果表明: WC-12Ni 硬质涂层硬度为 1 020 HV0.3, 碳化钨硬质颗粒的相结构为 WC 相与少量 WC_{1-x} 相, 粘结相镍为面心立方 Ni 相, 碳化钨硬质颗粒大小为 2~10 μm , 均匀致密, 孔隙率为 8%; 随砂水比由 3 1 降至 3 2、载荷由 40 N 增至 110 N, WC-12Ni 硬质涂层的磨损失重在 53~80 mg 范围波动, 仅为 65Mn 弹簧钢磨损失重的 1/14; WC-12Ni 硬质涂层的磨损为粘结剂磨损导致的硬质颗粒局部剥落以及硬质颗粒的微量磨损, 可延长旋耕刀具等土壤工作部件的寿命。

关键词: 模拟土壤环境; WC-12Ni 硬质涂层; 超音速火焰喷涂; 磨料磨损

中图分类号: TG174.45

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2018)01-0106-05

Abrasive wear behavior of WC-12Ni hard coatings under simulated soil environment

ZHAO Jianjie¹, WU Zhili^{1,2*}, WU Mingliang^{1,2}, LEI Mingkai³

(1.College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Surface Engineering Laboratory, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: WC-12Ni hard coating was sprayed on the surface of 45 steel with a thickness of 300 μm by using the LF-HVOF flame spray system. The hardness, phase structure and surface morphology of the hard coatings were characterized by microhardness tester, X-ray diffractometer and field emission scanning electron microscopy. The abrasive wear performance of the hard coatings was tested by using the wet sand rubber wheel abrasion tester, as compared with the 65Mn spring steel. The results showed that the WC-12Ni coatings is mainly composed of 2–10 μm WC hard particles and face centered cubic bonded phase Ni with the hardness of 1020 HV0.3 and the porosity of 8%. With the decrease of sand to water ratio from 3 1 to 3 2 and load from 110 N to 40 N, the weight loss of WC-12Ni hard coating changed in the range of 53–80 mg, which was only one fourteenths of the weight loss of 65Mn spring steel. The wear mechanism of hard coatings is adhesive wear caused by local spalling and micro wear of hard particles, which could increase the working life of soil working components such as rotary blades.

Keywords: simulated soil environment; WC-12Ni hard coatings; high velocity oxygen fuel spraying; abrasive wear

旋耕刀具刃口抵抗土壤与稻茬磨损而保持其几何形状的能力(锋利性), 是保证耕整机械部件使

用性能的关键^[1-3], 需要发展和应用新材料、新工艺, 提高部件的耐磨性、可靠性与使用性能, 满足土壤类型多样、复杂地形地貌的需求。软/硬涂层化、表面合金化和结构复合化是改善零部件表面结构与性能的主要途径^[4-7]。热喷涂技术作为表面工程重要的技术手段, 可以在农机关键零件表面制备耐磨、耐蚀涂层, 延长零部件使用寿命, 同时在修复磨损、磨蚀零件尺寸, 实现关键零件的再制造方面也发挥着重要作用^[8]。目前, 已有等离子体、超音速、热喷涂等方法制备的碳化钨钴(WC-Co)硬质涂层应用于犁、铧、灭茬甩刀等耕翻部件, 硬度可达 10~15 GPa, 厚度约达 300 μm , 大幅提高了土壤工作部件的耕作性能和工作寿命^[9-13]。碳化钨(WC)颗粒尺寸和粘结相含量是决定涂层性能的关键参数。磨损率随 WC 颗粒尺寸减小和粘结相含量增加而降低, 初期磨损机制为粘结相磨损, 进而导致 WC 颗粒剥落。由于喷涂工艺特点所限, WC-Co 硬质涂层不可避免存在一定量的疏松、孔隙和大颗粒等缺陷, 在刀具耕作过程中泥浆易透过涂层缺陷侵蚀界面而导致涂层翘曲和剥落失效。热喷涂技术在国外农机行业的应用日趋成熟, 其在延长金属材料寿命方面的作用及其巨大的经济效益已经得到广泛认可^[8]。

现有国标旋耕刀采用 65Mn 弹簧钢制造, 使用寿命约为 80 h, 仅为国外产品的 1/5^[14]。油菜联合播种机作业方式为复式作业, 需对其使用的旋耕刀进行表面强化, 提高其作业效率和工作寿命。笔者采用美科 LF-HVOF 超音速火焰喷涂系统, 对 45 钢表面喷涂厚约 300 μm 的 WC-12Ni 硬质涂层, 利用显微硬度计、X 射线衍射仪和场发射扫描电镜分别表征硬质涂层的硬度、相结构和表面形貌, 并以 65Mn 弹簧钢作为对比材料, 利用湿砂橡胶轮磨损试验模拟, 测试涂层的磨料磨损性能, 以期揭示 WC-12Ni 磨料磨损机制, 并为表面强化旋耕刀具的田间应用打下基础。

1 材料与方法

1.1 材料

45 钢和 65Mn 弹簧钢, 均为钢材市场购置的热

轧态钢板, 分别进行正火和淬火+回火处理, 加工为长 57 mm、宽 25 mm、厚 6 mm 的长方体样品, 采用金相砂纸打磨表面, 金刚石抛光, 置于无水乙醇中进行超声波清洗干净后, 冷风吹干备用。

超音速火焰喷涂材料采用瑞士苏尔寿美科表面技术公司生产的 WC-12Ni(WC 含量 88%, Ni 含量 12%)粉末, 平均粒径约 60 μm 。

1.2 方法

采用美科 LF-HVOF 燃油喷涂系统在 45 钢表面喷涂 WC-12Ni 硬质涂层, 煤油为燃料, 氧气作为助燃剂, 运载气采用空气。根据前期煤油和氧气流量、送粉率等喷涂参数对 WC-12Ni 硬质涂层硬度和孔隙率的影响研究结果^[15], 基于孔隙率最低的原则, 确定煤油流量为 21.0 L/h, 氧气流量 876 L/min, 送粉量 75 g/m, 喷涂角度 90°, 喷涂距离 350 mm。45 钢喷涂前进行喷丸处理, 并在乙醇和丙酮溶液中超声清洗 30 min, 电风吹干后喷涂 WC-12Ni 涂层, 喷涂时间为 30 min。

采用 HVT-1000 型显微维氏硬度计测量涂层硬度。利用 SHIMADZU XRD-6000 型 X 射线衍射仪 (Cu 靶, 管压 40 kV, 管流 40 mA, 波长为 0.154 056 nm, 20°<扫描角度<100°, 步长 0.02°, 停留时间 4 s) 分析涂层相结构。采用蔡司 SUPRA55 场发射扫描电镜观测磨损后试样表面形貌, 加速电压为 5 kV, 放大倍数 5 000 倍。

按照 2007 年修订的湿砂橡胶轮磨损试验标准 G105—02^[16], 磨料磨损试验在 MLS-225 湿砂橡胶轮式磨损试验机(济南益华生产)上进行。测量涂层磨料磨损性能时, 利用河沙筛分得到的 150~212 μm 石英砂作为磨料, 橡胶轮硬度 60, 直径 178 mm, 旋转速度 100 r/min。设定砂水比和载荷(表 1)后, 开始试

表 1 湿砂橡胶轮式磨损测试的砂水比和载荷

Table 1 Sand to water ratio and load for the wet sand/rubber wheel tests

序号	砂水比	载荷/N
1	3 2	40
2	3 2	70
3	3 2	110
4	3 1	40
5	3 1	70
6	3 1	110

验, 单次运转 2 000 r 后停止运转, 取出试样, 乙醇清洗烘干后, 用精度 0.001 g 的精密电子天平称重, 重新更换磨料, 再次试验, 共循环 8 次。每组试验 WC-12Ni 硬质涂层和 65Mn 弹簧钢各进行 1 次。

2 结果与分析

2.1 WC-12Ni 硬质涂层的相结构与性能

45 钢超音速火焰喷涂 WC-12Ni 硬质涂层的厚度为 300 μm, 硬度 1020 HV0.3, 孔隙率 8%, 均匀致密。从 WC-12Ni 硬质涂层的 X 射线图谱(图 1) 中观测到具有高强度的 WC(001)、WC(100)、

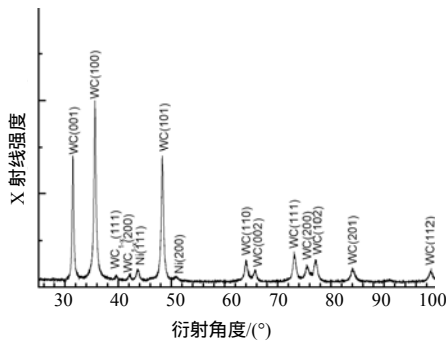
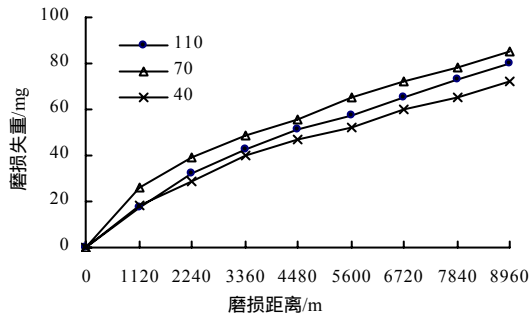


图 1 WC-12Ni 硬质涂层的 X 射线图谱

Fig. 1 XRD patterns of WC-12Ni coatings

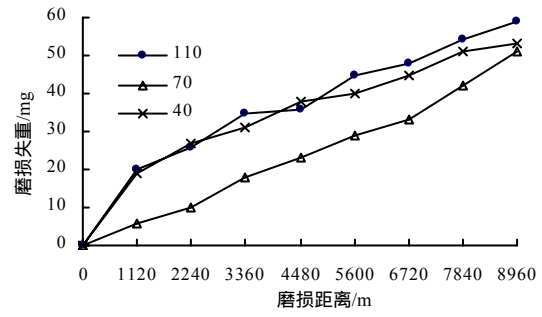


a 砂水比 3 : 1

WC(101)、WC(110)、WC(102)、WC(002)、WC(111)、WC(200)、WC(102)、WC(201)、WC(112)和低强度的 WC_{1-x}(111)、WC_{1-x}(200)及 Ni(111)、Ni(200), 表明采用超音速火焰喷涂工艺制备的 WC-12Ni 涂层由 WC 硬化相和面心立方 Ni 粘结相组成。

2.2 砂水比和载荷对 WC-12Ni 硬质涂层磨料磨损性能的影响

图 2 是砂水比 3 : 1 和 3 : 2、载荷 40、70 和 110 N 条件下, WC-12Ni 硬质涂层磨损失重随磨损距离的变化曲线。由图 2 可知, 因超音速火焰喷涂 WC-Ni 硬质涂层表面粗糙度较大, 初期磨损失重较多, 随着表面凸起的硬质颗粒逐渐磨损, 涂层致密度提高, 显微硬度增加近 50%, 耐磨性提高, 磨损失重增速减缓。砂水比为 3 : 1 (图 2-a) 时, 随着载荷由 40 N 增至 110 N, WC-12Ni 硬质涂层磨损失重为 72~80 mg; 随着砂水比降低至 3 : 2 (图 2-b), 涂层磨损失重减小至 51~59 mg, 表明载荷对涂层磨损的影响较小, 同一载荷条件下, 随磨料砂石含量增加, 涂层的磨损量增加。



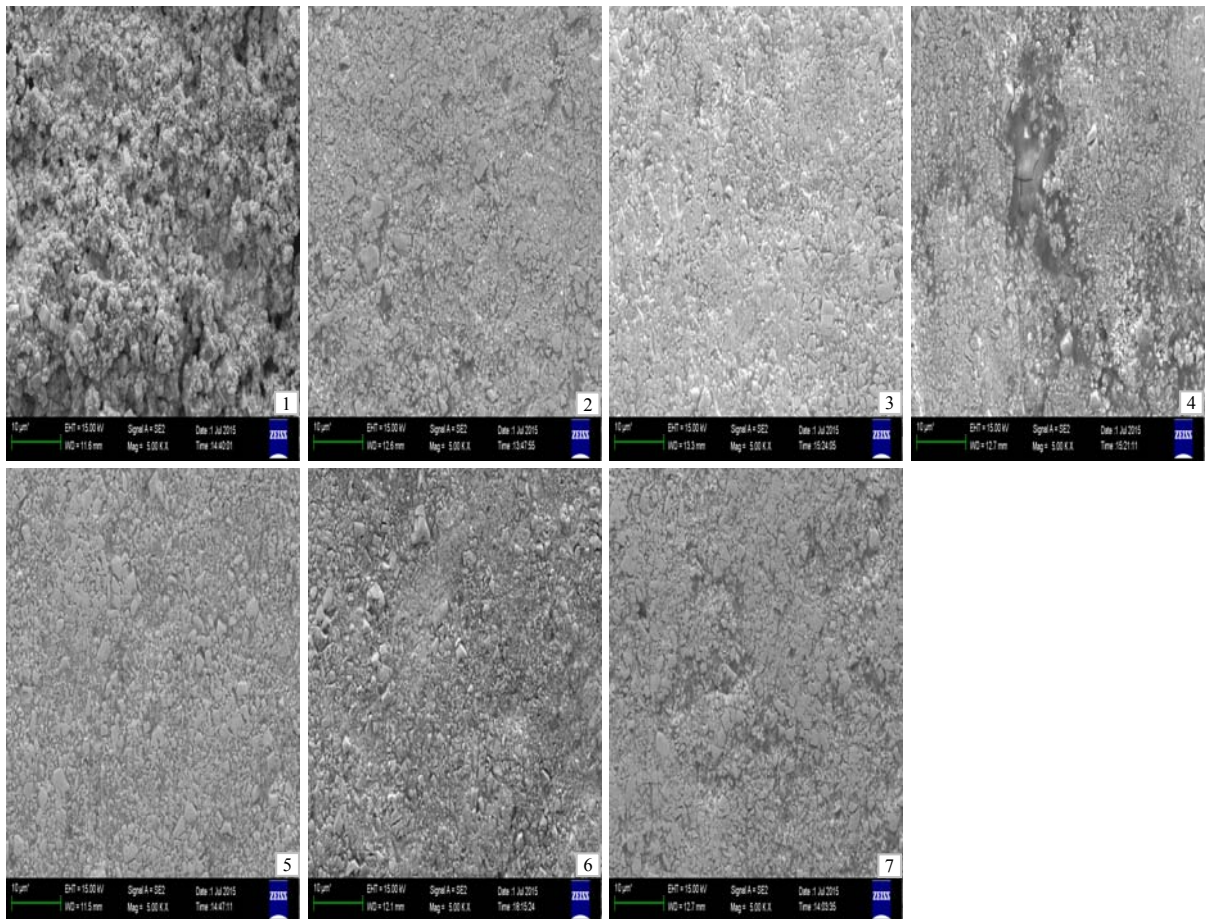
b 砂水比 3 : 2

图 2 WC-Ni 硬质涂层磨损失重

Fig.2 Weight loss of WC - Ni coatings dependent on the sliding distance

图 3 为 WC-12Ni 硬质涂层在砂水比为 3 : 2 和 3 : 1、载荷 40~110 N 条件下, 磨损 8 960 m 后的场发射扫描电镜观察结果。由图 3 可知, 由于高载荷对涂层表面的冲击和刮削作用更强, 粘结相 Ni 更易被磨损, 导致 WC 硬质相更易破碎或剥落, 高载荷作用下涂层磨损后表面比低载荷作用下更

为粗糙。同时, 高载荷条件下, 由于砂粒的磨损导致涂层表面产生裂纹, 进而剥落, 磨损失重进一步增加。结果表明 WC-12Ni 硬质涂层的磨损为粘结剂磨损导致的硬质颗粒局部剥落, 以及硬质颗粒的微量磨损。



1 原始形貌；2 载荷 40 N，砂水比 3 : 2；3 载荷 70 N，砂水比 3 : 2；4 载荷 110 N，砂水比 3 : 2；5 载荷 40 N，砂水比 3 : 1；6 载荷 70 N，砂水比 3 : 1；7 载荷 110 N，砂水比 3 : 1。

图 3 WC-12Ni 硬质涂层磨损表面的场发射扫描电镜观察结果

Fig.3 SEM images of WC-12Ni coatings on the worn surface

2.3 WC-12Ni 硬质涂层的磨料磨损性能

WC-12Ni 硬质涂层磨损量小，表面无明显凹陷，仅产生表面抛光效果。65Mn 弹簧钢的磨损剧烈，表面有明显的磨损凹陷，磨损深度约 1~2 mm。由表 2 可知，随砂水比降低、载荷增大，WC-12Ni 硬质涂层的磨损失重为 53~80 mg，而 65Mn 弹簧钢磨损失重则由 944 mg 上升至 1 963 mg。砂水比为 3 : 1 时，

表 2 65Mn 弹簧钢与 WC-12Ni 硬质涂层磨损失重比值

Table 2 Weight loss ratio of 65Mn to WC-12Ni coatings					
序号	载荷/N	砂水比	磨损失重/mg		65Mn 弹簧钢与 WC-12Ni 涂层磨损失重比值
			65Mn 弹簧钢	WC-12Ni 硬质涂层	
1	40	3 : 1	1 042	72	14
		3 : 2	1 021	53	19
2	70	3 : 1	1 584	85	18
		3 : 2	948	51	18
3	110	3 : 1	1 963	80	24
		3 : 2	944	59	16

65Mn 弹簧钢磨损失重与 WC-12Ni 硬质涂层磨损失重的比值，随载荷增加由 14 增至 24，而砂水比为 3 : 2 时，则由 19 降至 16，说明超音速火焰喷涂 WC-12Ni 硬质涂层具有优良的耐磨料磨损性能，可延长旋耕刀具等土壤工作部件的使用寿命。

3 结论

WC-12Ni 硬质涂层在湿砂条件下，因超音速火焰喷涂涂层较为粗糙，初期为石英砂抛光过程，涂层表面疏松的 WC 硬质颗粒剥落，使表面光滑致密化，磨损过程逐步转化因粘结剂磨损导致的硬质颗粒局部剥落，以及硬质颗粒的微量磨损；在大载荷条件下，涂层产生大量裂纹，磨损加剧。

超音速火焰喷涂 WC-12Ni 硬质涂层的磨损失重为 53~80 mg，相比 65Mn 弹簧钢的磨损失重，减少 14 倍以上，表明 WC-Ni 硬质涂层具有优良的耐磨料磨损性能。

参考文献:

- [1] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 57-58.
- [2] 任述光, 吴明亮, 官春云, 等. 油菜免耕直播联合播种机抛土性能研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(5): 543-548.
- [3] FINDIK F. Latest progress on tribological properties of industrial materials[J]. Materials and Design, 2014, 57(5): 218-244.
- [4] 吴志立, 李玉阁, 吴彼, 等. 高功率调制脉冲磁控溅射沉积 TiAlSiN 纳米复合涂层结构调控与性能研究[J]. 无机材料学报, 2015, 30(12): 1254-1260.
- [5] 吴志立, 朱小鹏, 雷明凯. 高功率脉冲磁控溅射沉积原理与工艺研究进展[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 15-20.
- [6] HAQUE T, ERTAS D, OZEK CIN A, et al. The role of abrasive particle size on the wear of diamond-like carbon coatings[J]. Wear, 2013, 302(1/2): 882-889.
- [7] 王群, 屈帮荣, 唐墨胖, 等. 超音速火焰喷涂碳化钨-钴涂层磨粒磨损行为[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7): 1920-1928.
- [8] 乔新义, 吕玉芬, 汪瑞军. 热喷涂技术在农机工程材料延寿中的应用现状[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(4): 1-5.
- [9] JANKAUSKAS V, ANTONOV M, VARNAUSKAS V, et al. Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix[J]. Wear, 2015, 328/329(1): 378-390.
- [10] KANG A S, CHEEMA G S, SINGLA S. Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 1442-1451.
- [11] KAROONBOONYANAN S, SALOKHE V M, NIRANATLUMPONG P. Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blade[J]. Wear, 2007, 263(1): 604-608.
- [12] 马跃进, 郝建军, 申玉增, 等. 根茬粉碎还田机灭茬甩刀喷焊 NiWC 工艺优化[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 92-94.
- [13] 吴志立, 赵建杰, 吴明亮, 等. 农机土壤工作部件耐磨强化研究进展[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(8): 256-264.
- [14] 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.
- [15] DU P C, ZHU X P, MENG Y, et al. Water-lubricated tribological behavior of WC-Ni coatings deposited by off-angle HVOF spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309(2): 663-670.
- [16] ASTM G105-02 Standard test method for conducting wet sand/rubber wheel tests[S].

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立