doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.045

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

李碧晗[1,2] 王彦民[3] 马小斌[1,2] 汪瑞军[1,2]

（1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083；
3. 石家庄中兴机械制造股份有限公司，石家庄 051530）

摘要： 为提高农业机械车轮模具在低速重载作业环境下的摩擦磨损性能，以农业机械车轮模具使用的GCr15为研究对象，采用电火花沉积技术和超声振动复合电火花沉积技术分别在GCr15基体上制备了WC涂层。采用显微硬度计、表面粗糙度仪、摩擦磨损试验机以及三维白光干涉轮廓仪等设备对WC涂层的显微硬度、表面粗糙度、摩擦磨损性能等进行了分析测试。研究结果表明，超声振动复合WC涂层表面粗糙度为4.641 μm，相比于电火花沉积WC涂层降低约62%，显微硬度为1 114.6 $HV_{0.025}$，相比于电火花沉积WC涂层提高约15%，相比于基材提高约67%。摩擦磨损试验结果表明，超声振动复合WC涂层和电火花沉积WC涂层的平均摩擦因数和磨损量均低于基材，这表明制备WC涂层可有效提高模具的减摩耐磨性。超声振动复合WC涂层的平均摩擦因数、磨损量以及磨痕深度均低于电火花沉积WC涂层，这表明在低速重载条件下超声振动复合WC涂层具有最优异的减摩耐磨性能。试样磨损量与其显微硬度成负相关，与平均摩擦因数和涂层表面粗糙度成正相关。

关键词： 超声振动复合电火花沉积；WC涂层；低速重载；摩擦磨损性能

中图分类号： TG174.44；TH117.1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-1298(2024)S1-0420-07

Friction and Wear Performance of Ultrasonic Vibration Composite Electro-spark Deposition WC Coatings on GCr15 Surface with Heavy Load at Low Speed

LI Bihan[1,2] WANG Yanmin[3] MA Xiaobin[1,2] WANG Ruijun[1,2]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*
3. *Shijiazhuang Zhongxing Machinery Manufacture Co., Ltd., Shijiazhuang* 051530, *China*)

Abstract: In order to improve the friction and wear performance of agricultural machinery wheel molds in low-speed and heavy-load operating environments, WC coatings were prepared on GCr15 substrates by using electro-spark deposition technology and ultrasonic vibration composite electro-spark deposition technology, respectively, with GCr15 used in agricultural machinery wheel molds as the object of study. The microhardness, surface roughness, friction and wear performance of the WC coatings were analyzed and tested by using microhardness tester, surface roughness tester, friction and wear tester and three-dimensional white light interference profiler. The results showed that the surface roughness of the ultrasonic vibration composite WC coating was 4.641 μm, which was lower than that of the electro-spark deposition WC coating by about 62%. The microhardness was 1 114.6 $HV_{0.025}$, which was improved by about 15% compared with that of the electro-spark deposition WC coating, and improved by about 67% compared with that of the substrate. The results of the friction and wear test showed that the average coefficient of friction and the wear of the ultrasonic vibration composite WC coating and the electro-spark deposition WC coating were lower than that of the substrate, which indicated that the preparation of the WC coating can effectively improve the friction reduction and wear resistance of the mold. The average coefficient of friction, wear amount

收稿日期：2024-07-23 修回日期：2024-08-26

基金项目： 中国机械工业集团有限公司青年科技基金项目(QNJJ-PY-2022-15)

作者简介： 李碧晗(1994—)，女，工程师，主要从事先进表面工程制备技术与关键件表面增材智造技术研究，E-mail：libihan118@163.com

通信作者： 汪瑞军(1967—)，男，研究员，博士生导师，主要从事先进表面工程制备技术与再制造技术研究，E-mail：1370138963@163.com

and depth of abrasion of the ultrasonic vibration composite WC coating were lower than that of the electro-spark deposition WC coating, which indicated that the ultrasonic vibration composite WC coating had the best friction and abrasion resistance under the condition of heavy load and low speed. The wear amount of the specimen was in a negative correlation with its microhardness, and in a positive correlation with the average coefficient of friction and coating surface roughness.

Key words: ultrasonic vibration composite electro-spark deposition; WC coating; low speed and heavy load; friction and wear performance

0　引言

模具是农业机械车轮生产的主要工具，其表面质量直接决定了模具的使用寿命和产品精度，常用的农业机械车轮模具用钢包括T8、T10、45、GCr15等[1-5]。GCr15由于具有较高硬度和强度、足够的韧性、较高的耐磨性和热硬性、价格便宜等优点，在模具钢领域得到了广泛应用[6-8]。在农业机械车轮和钢圈的生产过程中，模具与工件的接触表面发生相对滑动，导致模具表面出现磨损，严重的摩擦磨损是影响模具使用寿命和农业机械车轮成形质量的重要因素[9-11]。随着农业现代化的快速发展以及农业机械产量需求的日益增加，传统热处理工艺制备的模具已无法满足日益严峻的工况和逐渐增加的产量需求。为提高模具的耐磨性和延长其使用寿命，采用表面工程技术，如电火花沉积技术在农业机械车轮模具表面形成耐磨涂层成为一种有效途径。

电火花沉积技术可制备出与基材形成冶金结合的涂层，具有热影响区小、零部件不易变形、涂层结合强度高以及适用范围广等优点[12-19]。但传统的电火花沉积技术受多种因素共同影响，在沉积过程常会发生短路现象，使有效放电频率降低、熔化的材料无法完全抛出，影响涂层质量[20-21]。超声振动电火花沉积技术是基于电火花沉积技术发展起来的新型表面工程技术，沉积过程中在电极上施加超声振动，有助于减少电极与工件之间的拉弧和短路现象，制备的涂层更加均匀致密，但超声振动对涂层的破碎作用会使沉积效率降低[22-23]。目前对于WC涂层性能的研究较多[24-26]，但对于其在低速重载条件下摩擦磨损性能研究的相关报道较少。针对上述问题，本文采用电火花沉积技术与超声振动电火花沉积技术复合沉积的方法，在GCr15表面制备WC涂层，对比研究WC涂层和基体在低速重载条件下的摩擦磨损性能。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

选用的基材与实际应用的农业机械车轮模具材料一致，即热处理后的GCr15，硬度为HRC59，其化学成分如表1所示。试验前用砂纸打磨基材试样表面，以除去表面氧化皮、锈斑等杂物，再进行超声清洗去垢除污，最后用压缩空气吹干。选用ϕ3 mm的WTC-90合金圆棒和0.9 mm×3 mm×100 mm的WTC-90合金片作为电极材料，其主要成分为90%WC和10%Co。

表1　GCr15主要化学成分含量

Tab. 1　GCr15 main chemical composition content　　%

化学成分	C	Mn	Si	S	Cr	Fe
含量	0.95~1.05	0.20~0.40	0.15~0.35	0.01~0.02	1.30~1.65	96.35~97.39

1.2　涂层制备过程

采用UD-100型电火花沉积设备制备涂层，并采用质量分数为99.99%的氩气作为保护气，具体工艺参数如表2所示。超声振动复合WC涂层制备过程如下：首先在基材表面采用电火花沉积技术制备一层WC涂层，随后采用超声振动电火花沉积技术在此基础上再制备一层WC涂层，最终获得超声振动复合WC涂层试样。为与超声振动复合WC涂层性能进行对比研究，本试验采用与上述电火花沉积过程相同的工艺参数制备了电火花沉积WC涂层试样。

表2　涂层制备工艺参数

Tab. 2　Coating preparation process parameters

工艺	电压/V	电容/μF	超声振动功率/W	氩气流量/(L·min^{-1})
电火花沉积	150	70		15
超声振动复合电火花沉积	150	30	12	15

1.3　摩擦磨损试验

依据T/CSTM 00646.1—2021《金属材料 销-盘摩擦磨损试验 第1部分：室温摩擦磨损试验方法》测定了在不同测试载荷和时间下基材、电火花沉积WC涂层、超声振动复合WC涂层的摩擦磨损性能。摩擦磨损试验参数依据模具实际工况进行设计，农业机械车轮模具工作在500~1 000 t压力机下，受力面积约为0.25 m^2，因此载荷选用350、525、700N，摩擦时间选用60、120、240、

480 min。摩擦副为 ϕ4.8 mm的GCr15销，盘试样尺寸为 ϕ30 mm×5 mm，旋转速度为20 r/min，共进行了36组试验。摩擦磨损试验前后，分别采用精度为0.1 mg的XPE504型分析天平分别测量试样质量。最后，采用Nex View型三维白光干涉轮廓仪对磨痕进行观测，并计算磨损的磨痕深度。

1.4 试验表征

涂层制备完成后，采用MH-500D型显微硬度计测量涂层的显微硬度，其中测量载荷为25 g，保载时间为10 s。采用HUD280+型表面粗糙度仪测量涂层的表面粗糙度。

2 涂层测试与表征

2.1 涂层显微硬度和表面粗糙度

表3为电火花沉积WC涂层和超声振动复合WC涂层的显微硬度和表面粗糙度，基材显微硬度经换算约为666 $HV_{0.025}$。可以看到，超声振动复合WC涂层显微硬度相比于电火花沉积WC涂层提高约15%，相比于基体提高约67%，这说明引入超声振动可提高涂层显微硬度。超声振动复合WC涂层表面粗糙度相比于电火花沉积WC涂层降低约62%，这说明引入超声振动能有效降低涂层表面粗糙度，改善涂层成形质量。

表3 涂层显微硬度和表面粗糙度

Tab. 3 Microhardness and surface roughness of coating

试样	显微硬度($HV_{0.025}$)	表面粗糙度/μm
电火花沉积WC涂层	966.0	12.214
超声振动复合WC涂层	1 114.6	4.641

2.2 涂层摩擦磨损性能

为了模拟农业机械车轮模具的实际工况，对涂层和基体分别进行了低速重载摩擦磨损试验。图1为基体和涂层试样在载荷350、525、700 N下进行480 min摩擦磨损试验的摩擦因数随测试时间变化的关系曲线图。由图1可知，在同一载荷下，超声振动复合WC涂层试样摩擦因数随时间变化的波动相比于其他两种试样更小，整个摩擦磨损过程更加平稳，且随着载荷的增加，其波动范围逐渐减小。

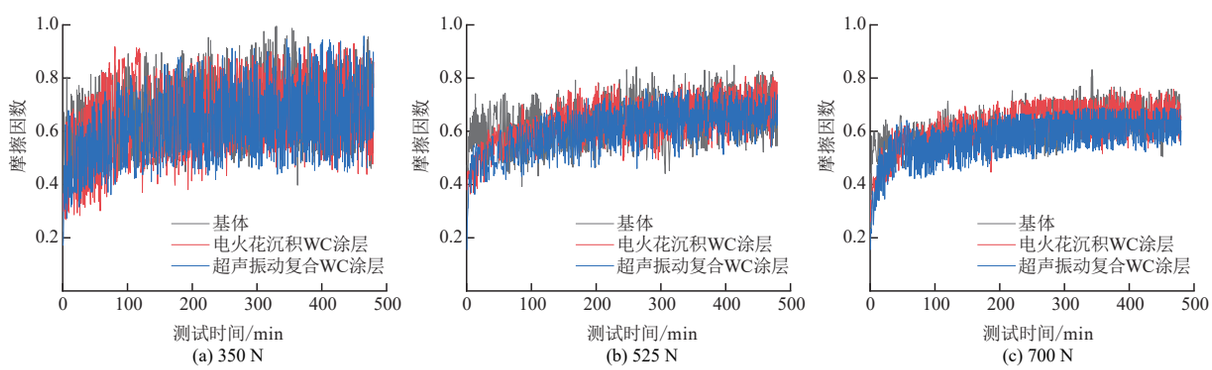

图1 基材和涂层试样在不同载荷下摩擦因数与时间关系

Fig. 1 Coefficient of friction of substrate and coating specimens under different loads as function of time

图2为基材和涂层试样在载荷350、525、700 N下进行不同测试时间摩擦磨损试验的平均摩擦因数。由图2可知，在同一载荷和测试时间下，超声振动复合WC涂层的平均摩擦因数明显小于其他两组试样。在同一测试时间下随着载荷的增加，涂层平均摩擦因数逐渐减小。在载荷350 N下进行480 min摩擦磨损试验，超声振动复合WC涂层平均摩擦因数为0.615，相比电火花沉积WC涂层降低约3%，相比基材降低约7%；在载荷525 N下进行480 min摩擦磨损试验，超声振动复合WC涂层平均摩擦因数为0.600，相比电火花沉积WC涂层降低约4%，相比基材降低约6%；在载荷700 N下进行480 min摩擦磨损试验，超声振动复合WC涂层平均摩擦因数为0.578，相比电火花沉积WC涂层和基材均降低约6%。综上结果表明，超声振动复合WC涂层具有较低且稳定的摩擦因数，表现出较好的减摩性能。

图3为基材和涂层试样在载荷350、525、700 N下进行不同测试时间摩擦磨损试验的磨损量。由图3可知，随着载荷和测试时间的增加，3种试样磨损量均逐渐增大。在载荷700 N下，电火花沉积WC涂层在120 min以后进入急剧磨损阶段，磨损量急剧增加。在载荷350 N下进行480 min摩擦磨损试验，超声振动复合WC涂层磨损量为4.3 mg，相比电火花沉积WC涂层降低约54%，相比基材降低约67%。在载荷525 N下进行480 min摩擦磨损试验，超声振动复合WC涂层磨损量为5.5 mg，相比电火花沉积WC涂层降低约58%，相比基材降低约75%。在载荷700 N下进行480 min摩擦磨损试验，超声振动复合WC涂层的磨损量为8.2 mg，相比电火花沉积WC涂层降低约72%，相比基材降低约74%。超声振动复合WC涂层磨损量明显小于其他两组试样磨损量，这说明超声振动复合WC涂层具有更好的耐磨性。

图4为基材和涂层试样在700 N载荷下进行不同测试时间摩擦磨损试验的磨痕深度变化。由图4可知，在同一测试时间下，超声振动复合WC涂层试样的磨痕深度均小于其他两种试样。超声振动复合WC涂层试样的磨痕深度随着测试时间的增加增长平缓，在进行480 min摩擦磨损试验后，超声振动复合WC涂层试样磨

痕深度为22.643 μm，相比于基材试样降低约69%，相比于电火花沉积WC涂层试样降低约86%，这说明超声振动复合WC涂层的表面磨损较轻，具有更好的耐磨性。在120 min后，电火花沉积WC涂层试样的磨痕深度急剧增加，这说明电火花沉积WC涂层在试验进行到120 min后逐渐被磨穿，摩擦副直接与基体对磨，加剧了电火花沉积WC涂层试样表面的磨损情况，导致其磨损深度急剧增加。

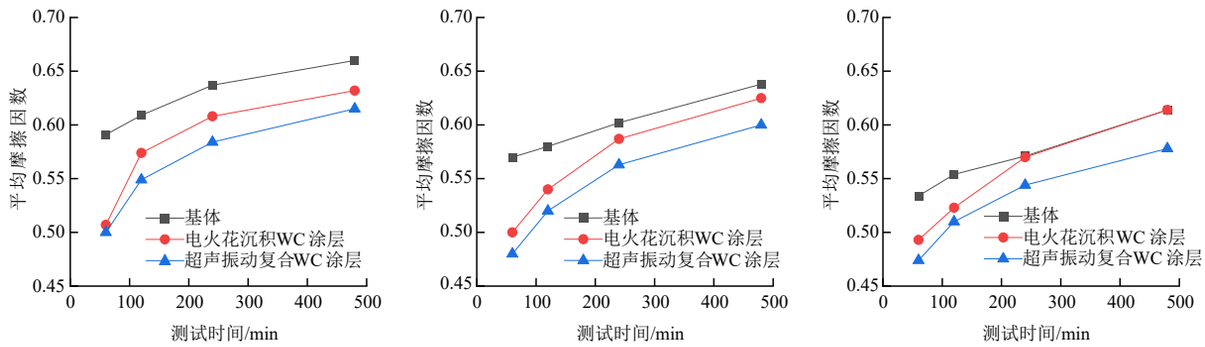

图2　基材和涂层试样在不同载荷和测试时间下的平均摩擦因数

Fig. 2　Average coefficient of friction of substrate and coating specimens at different loads and test times

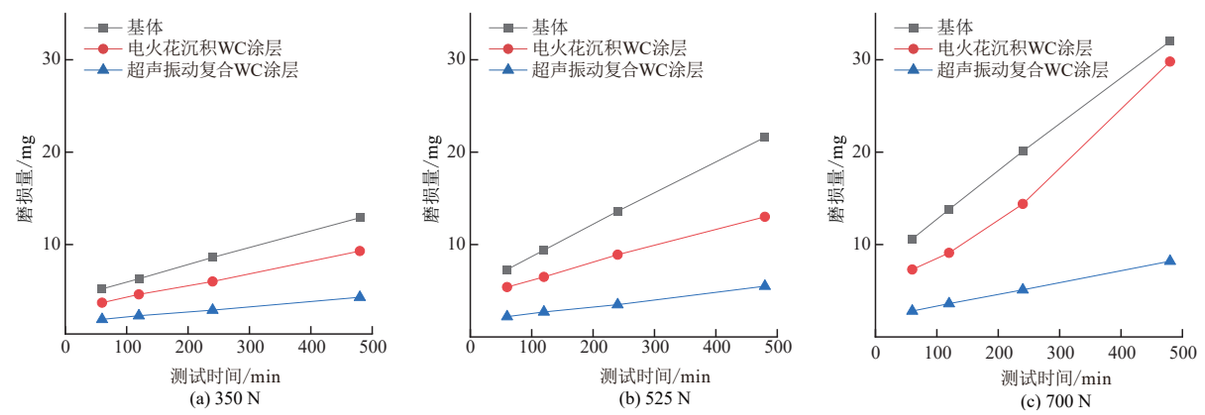

图3　基材和涂层试样不同载荷和测试时间下磨损量

Fig. 3　Wear of substrate and coating specimens at different loads and test times

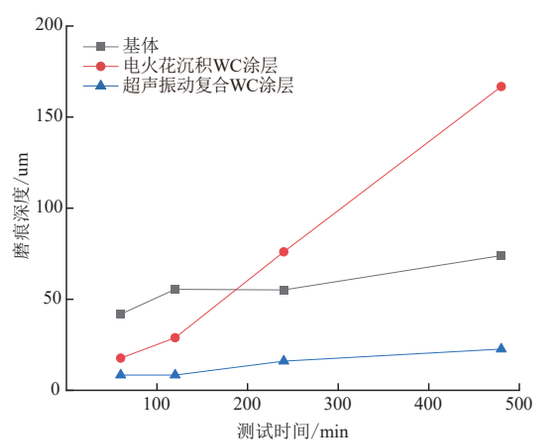

图4　不同测试时间下基材和涂层试样磨痕深度

Fig. 4　Depth of abrasion of substrate and coating specimens at different test times

3　结果与分析

3.1　硬度对磨损量的影响

图5为基材和涂层试样分别在载荷350、525、700 N和测试时间480 min条件下试样硬度与其磨损量的关系。由图5可知，试样磨损量随其硬度的升高而降低，即试样磨损量与硬度成反比。在载荷350、525、700 N下，随着硬度的升高，试样磨损量分别下降约67%、75%、74%。这是由于超声振动引起放电间隙高频率周期性变化，减少了拉弧与烧蚀现象发生，改善了放电间隙，使涂层致密度增加，使其显微硬度增大。试样硬度高导致摩擦副压入试样表面的深度变浅，降低了摩擦发生时的切削作用，从而使磨损量减小，试样磨损量与硬度的变化规律符合经典的Archard定律[27-28]。随着载荷的增加，试样磨损量逐渐增加，这是由于载荷的增大使表面承受更大的剪切应力，容易产生摩擦磨损[29]。

3.2　摩擦因数对磨损量的影响

图6为基材和涂层试样分别在载荷350、525、700 N和测试时间480 min条件下试样平均摩擦因数与其磨损量的关系。由图6可知，试样磨损量随其平均摩擦因数的升高而增加，即摩擦因数与磨损量成正相关。在载荷350、525、700 N下，随着平均摩擦因数的升高，试样磨损量分别增加约2、3、3倍。摩擦因数的增加导致总磨损量显著增加，较大的摩擦因数意味着接触表面的滑动阻力增加，增大了试样与摩擦副之间的磨擦作用和微观粘接

作用，从而使磨损量升高。随着载荷增加，试样摩擦因数逐渐降低，这是由于随着载荷的增加，涂层与摩擦副之间的接触状态从点接触转变为微观面接触，接触面积增大，弹性接触转变为塑性接触，降低了涂层表面塑性变形的阻力，从而降低摩擦因数。其次，随着载荷的增加，增加了涂层表面的摩擦热，涂层表面的软化导致剪切强度降低，从而降低摩擦因数[30]。

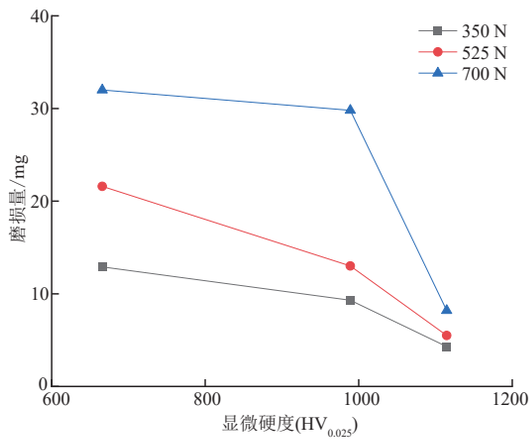

图5 不同载荷下磨损量与硬度关系

Fig. 5 Plot of wear versus hardness at different loads

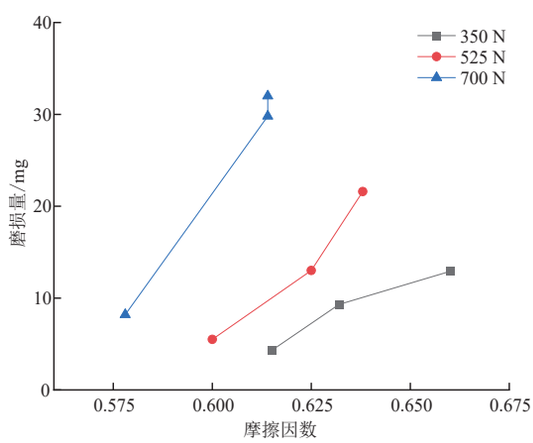

图6 不同载荷下磨损量与摩擦因数关系

Fig. 6 Plot of wear versus coefficient of friction at different loads

3.3 表面粗糙度对磨损量的影响

图7为涂层试样分别在载荷350、525、700 N和测试时间480 min条件下试样表面粗糙度与其磨损量的关系。由图7可知，试样磨损量随其表面粗糙度的升高而增加，即涂层表面粗糙度与磨损量成正相关。在载荷350、525、700 N下，随着涂层表面粗糙度的升高，试样磨损量分别增加约1.2、1.4、2.6倍。这是由于超声振动减小了熔融液滴尺寸、增加其初速度，使其冲击碰撞工件表面的程度更加激烈，使得到的涂层表面均匀平滑，并且超声振动对涂层表面起到了超声机械抛磨作用，降低了沉积过程中凹坑的深度，从而大大降低涂层的表面粗糙度[31]。较大的表面粗糙度意味着当载荷加载到涂层表面时，其表面的凸起将更多的嵌入到摩擦副中，机械啮合力大，从而使试验磨损量升高。

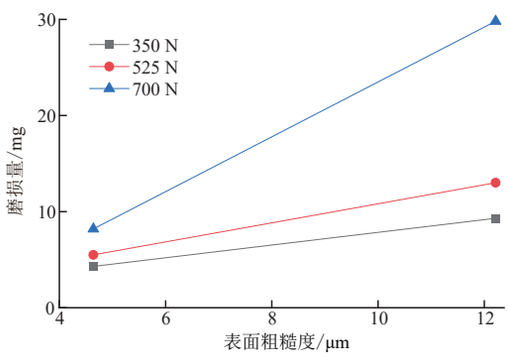

图7 不同载荷下磨损量与表面粗糙度关系

Fig. 7 Plot of wear versus surface roughness at different loads

4 结论

(1)在同一载荷、同一测试时间下，电火花沉积WC涂层和超声振动复合WC涂层平均摩擦因数和磨损量均低于基材，这表明制备WC涂层可有效提高农业机械车轮模具的减摩耐磨性。在载荷700 N、测试时间480 min条件下，超声振动复合WC涂层平均摩擦因数、磨损量和磨痕深度相较于电火花沉积WC涂层分别降低约6%、72%、86%。这表明超声振动复合WC涂层的减摩耐磨性能明显优于电火花沉积WC涂层。

(2)电火花沉积WC涂层、超声振动复合WC涂层显微硬度分别达到966.0 $HV_{0.025}$和1 114.6 $HV_{0.025}$，均高于基材。试样磨损量随其硬度的升高而降低，即磨损量与其显微硬度成负相关。

(3)电火花沉积WC涂层、超声振动复合WC涂层平均摩擦因数均小于基材。试样磨损量随其平均摩擦因数的升高而增加，即磨损量与摩擦因数成正相关。

(4)电火花沉积WC涂层、超声振动复合WC涂层表面粗糙度分别为4.641 μm和12.214 μm。试样磨损量随其表面粗糙度的升高而增加，即磨损量与其表面粗糙度成正相关。

参 考 文 献

[1] 邹伟，黄锦涛，程春，等. 基于增材制造技术快速模具制造研究进展[J]. 材料导报，2022，36(19)：175－183.
ZOU Wei, HUANG Jintao, CHENG Chun, et al. Research progress of rapid tooling based on additive manufacturing[J]. Materials Review, 2022, 36(19): 175－183. (in Chinese)

[2] 邱凌，吴晓春. 国内外冷作模具钢发展概述[J]. 模具制造，2017，17(11)：89－96.
QIU Ling, WU Xiaochun. Development of cold work die steel at home and abroad[J]. Die & Mould Manufacture, 2017, 17(11): 89－96. (in Chinese)

[3] 潘金芝，任瑞铭，戚正风. 国内外模具钢发展现状[J]. 金属热处理，2008(8)：10－15.

PAN Jinzhi, REN Ruiming, QI Zhengfeng. Development status of model steels at home and abroad[J]. Heat Treatment of Metals, 2008(8): 10 - 15. (in Chinese)

[4] 祝溪明. 冷作模具钢性能优化及应用研究[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 248 - 251.
ZHU Ximing. Study on performance optimization and application method of the cold - working die steel [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(4): 248 - 251. (in Chinese)

[5] 吴茜, 刘斌. 模具材料研究与应用现状及发展趋势[J]. 模具工业, 2017, 43(3): 1 - 7, 20.
WU Xi, LIU Bin. Research on application status and development trends of die & mould materials[J]. Die & Mould Industry, 2017, 43(3): 1 - 7, 20. (in Chinese)

[6] 张智昶. 选区激光熔化制备GCr15合金的微观组织与力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
ZHANG Zhichang. Microstructure and mechanical properties of GCr15 alloy prepared by selective laser melting[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese)

[7] 刘先兰, 张文玉. 冷作模具钢的选择及应用[J]. 锻压技术, 2007(6): 13 - 17.
LIU Xianlan, ZHANG Wenyu. Selection and application of cold working die steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2007(6): 13 - 17. (in Chinese)

[8] 邓彩环. 浅析现代冷作模具材料的选用[J]. 机电信息, 2011(21): 200 - 201.

[9] 陈再良, 陈蕴博, 佟晓辉, 等. 典型冷作模具钢性能与失效关系的探讨[J]. 金属热处理, 2006(2): 87 - 93.
CHEN Zailiang, CHEN Yunbo, TONG Xiaohui, et al. Mechanical properties and failure types for cold - working die steels[J]. Heat Treatment of Metals, 2006(2): 87 - 93. (in Chinese)

[10] 彭成允, 邓明. 典型冷作模具的选材及热处理[J]. 金属热处理, 2001(5): 31 - 33.
PENG Chengyun, DENG Ming. Material selection and heat treatment for typical cold - work dies[J]. Heat Treatment of Metals, 2001(5): 31 - 33. (in Chinese)

[11] 晁拥军. 模具材料及表面强化技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

[12] 张留伟, 邵俊. 电火花沉积技术研究现状及发展趋势[J]. 装备制造技术, 2017(8): 76 - 79.
ZHANG Liuwei, SHAO Jun. Research status and development trend of electro - spark surface deposition technology[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(8): 76 - 79. (in Chinese)

[13] FAKOORI H M, MALEK G F, EBRAHIMNIA M, et al. Production of amorphous and nanocrystalline iron based coatings by electro - spark deposition process[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270: 95 - 101.

[14] 耿铭章, 王文权, 张新戈. 电火花沉积Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层的组织及性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 222 - 229.
GENG Mingzhang, WANG Wenquan, ZHANG Xin'ge. Microstructures and properties of Ni/Ti(C,N) composite cermet coating prepared by electrospark deposition[J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 222 - 229. (in Chinese)

[15] 辛昊, 王海涛, 高立, 等. 电火花沉积技术研究现状及其发展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 25 - 29.
XIN Hao, WANG Haitao, GAO Li, et al. Research status and development of electro - spark deposition technology[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(20): 25 - 29. (in Chinese)

[16] 田浩亮, 张晓敏, 金国, 等. 电火花沉积高熵合金涂层的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊1): 342 - 346.
TIAN Haoliang, ZHANG Xiaomin, JIN Guo, et al. Research status and prospect of high entropy alloy coating prepared by electrospark deposition[J]. Materials Review, 2021, 35(Supp.1): 342 - 346. (in Chinese)

[17] 汪瑞军, 李延军, 黄小鸥. 电火花表面强化工艺的参数优化[J]. 焊接, 2004(8): 21 - 24.
WANG Ruijun, LI Yanjun, HUANG Xiaoou. Parameter optimization in electric spark surface strength process[J]. Welding & Joining, 2004(8): 21 - 24. (in Chinese)

[18] LEŠNJAK A, TUŠEK J. Processes and properties of deposits in electrospark deposition[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, 7(6): 391 - 396.

[19] HONG X, TAN Y F, WANG X L, et al. Effects of nitrogen flux on microstructure and tribological properties of in - situ TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrospark deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3329 - 3338.

[20] 孙何. 在45钢基体上电火花沉积制备石墨自润滑涂层及性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
SUN He. Study on self - lubricating graphite coating prepared by electrospark deposition on 45 steel substrate and its properties[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)

[21] 洪翔, 谭业发, 胡晓光, 等. 钛合金表面电火花沉积强化技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2013, 42(20): 24 - 27.
HONG Xiang, TAN Yefa, HU Xiaoguang, et al. Research status of electro - spark deposition on titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(20): 24 - 27. (in Chinese)

[22] ZHAO H, GAO C, WU X Y, et al. A novel method to fabricate composite coatings via ultrasonic - assisted electro - spark powder deposition[J]. Ceramics International, 2019, 45(17): 22528 - 22537.

[23] 张勇, 李丽, 常青, 等. 电火花沉积技术研究现状与展望[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 150 - 161.
ZHANG Yong, LI Li, CHANG Qing, et al. Research status and prospect of electro - spark deposition technology[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 150 - 161. (in Chinese)

[24] 郝建军, 马跃进, 杨欣, 等. 火焰熔覆镍基/铸造碳化钨熔覆层在犁铧上的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 139 - 142.

HAO Jianjun, MA Yuejin, YANG Xin, et al. Experimental investigation on plowshare coated by flame cladding Ni - base cast WC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 139 - 142. (in Chinese)

[25] 徐德生,任露泉,邱小明,等. WC/Cu基仿生非光滑耐磨复合涂层的研究[J]. 农业机械学报,2004,35(6):148 - 151.
XU Desheng, REN Luquan, QIU Xiaoming, et al. Study on WC/Cu based bionic, non - smoothed, and composite coating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 148 - 151. (in Chinese)

[26] 王文权,杜明,张新戈,等. H13钢表面电火花沉积WC - Ni基金属陶瓷涂层微观组织及摩擦磨损性能[J]. 金属学报,2021,57(8):1048 - 1056.
WANG Wenquan, DU Ming, ZHANG Xin'ge, et al. Microstructure and tribological properties of WC - Ni matrix cermet coatings prepared by electrospark deposition on H13 steel substrate[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(8): 1048 - 1056. (in Chinese)

[27] CHAI L, WANG C, XIANG K, et al. Phase constitution, microstructure and properties of pulsed laser - clad ternary CrNiTi medium - entropy alloy coating on pure titanium[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 402: 126503.

[28] KHRUSCHOV M M. Principles of abrasive wear[J]. Wear, 1974, 28(1): 69 - 88.

[29] TANG Y, JI P, LI B, et al. Effect of loading on microstructure and friction and wear behavior of an austenite lightweight steel[J]. Tribology International, 2023, 177: 108006.

[30] STRAFFELINI G , PELLIZZARI M , MOLINARI A .Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al - based metal - matrix - composites against friction material[J].Wear, 2004, 256(7 - 8):754 - 763.

[31] 张云鹏,孙广标,张安洲. 超声磨料对TC4钛合金电火花加工表面质量的影响[J]. 航空学报,2010,31(1):204 - 209.
ZHANG Yunpeng, SUN Guangbiao, ZHANG Anzhou. Effect of abrasive particle ultrasonic vibration on surface quality of titanium alloy TC4 in EDM[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 204 - 209. (in Chinese)

(上接第411页)

[18] 程军伟,高连华,王红岩,等. 履带车辆转向分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1110 - 1115.
CHENG Junwei, GAO Lianhua, WANG Hongyan, et al. Analysis on the steering of tracked vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(9): 1110 - 1115. (in Chinese)

[19] 方志强,王红岩,贺小军,等. 一种测定履带车辆行驶地面性质参数的新方法[J]. 兵工学报, 2007, 28(4): 391 - 395.
FANG Zhiqiang, WANG Hongyan, HE Xiaojun, et al. A new method to measure the parameters of ground properties for tracked vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(4): 391 - 395. (in Chinese)

[20] 赵状状,张国忠,罗承铭,等.考虑滑移滑转的双电机履带底盘路径跟踪算法[J].农业工程学报,2024,40(12):46 - 54.
ZHAO Zhuangzhuang, ZHANG Guozhong, LUO Chengming, et al. Path tracking algorithm of the dual motor tracked chassis considering skid and slip[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 46 - 54. (in Chinese)

[21] 侯旭朝,马越,项昌乐.电驱动履带车辆转向稳定性控制研究[J].机械工程学报,2024,60(8):233 - 244.
HOU Xuchao, MA Yue, XIANG Changle. Research on steering stability control of electric drive tracked vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(8): 233 - 244. (in Chinese)

[22] 王辉,王桂民,罗锡文,等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 - 19.
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 - 19. (in Chinese)

[23] 王法安,杨全合,张兆国,等.基于ICR的履带车辆路径跟踪与转向控制算法研究[J].农业机械学报,2024,55(1):386 - 395,425.
WANG Faan, YANG Quanhe, ZHANG Zhaoguo, et al. Path tracking and turning control algorithm of tracked vehicle based on ICR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 386 - 395,425. (in Chinese)

[24] CHEN Y, ZHAO S, FARRELL J A. Computationally efficient carrier integer ambiguity resolution in multiepoch GPS/INS: a common - position - shift approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 24(5): 1541 - 1556.

[25] ALLOTTA B, CAITI A, CHISCI L, et al. An unscented Kalman filter based navigation algorithm for autonomous underwater vehicles[J]. Mechatronics. 2016, 39: 185 - 195.

[26] 韩明兴,徐琨,廖宜涛,等.液电混动履带底盘电液系统联合仿真与试验[J].农业机械学报 ,2024,55(1):396 - 408,418.
HAN Mingxing, XU Kun, LIAO Yitao, et al. Co-simulation and test of electro-hydraulic system of novel hybrid track[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 396 - 408,418. (in Chinese)