# 钢表面电火花沉积耐磨涂层研究 进展及发展趋势

# 杨金朋<sup>1</sup>,王子君<sup>1</sup>,张新颖<sup>2</sup>,高峰<sup>1</sup>,陈晓明<sup>1</sup>, 徐志宇<sup>1</sup>,朱广林<sup>1</sup>,郭策安<sup>1\*</sup>

(1.沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159; 2.营口市现代服务学校, 辽宁 营口 115002)

摘要:系统概述了近十年来电火花沉积技术在钢表面耐磨涂层制备领域的研究进展及未来发展趋势,重点 聚焦其技术原理、材料应用及工艺优化。首先,阐述了电火花沉积技术的基本原理,包括其工艺流程和影 响因素。其次,从电极材料的成分出发,详细分析了不同的耐磨涂层,包括难熔单金属涂层、传统合金涂 层、高熵合金涂层、非晶合金涂层及复合材料涂层,分别从沉积条件、微观结构、硬度和摩擦学性能等方 面进行了系统探讨,并归纳总结了相关研究成果,全面展现了其性能特点与应用潜力。最后,进一步探讨 了电火花沉积技术的发展趋势,重点分析了涂层形成机理的深入研究、新型涂层材料的开发、沉积工艺参 数的优化、大面积低成本制备技术以及沉积工艺的自动化实现等多个方面,为该领域的后续研究提供思路 和方向。

关键词: 电火花沉积; 耐磨涂层; 高熵合金; 非晶合金; 复合材料; 摩擦学性能 中图分类号: TG174 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)01-0031-19 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2025.01.004

## Research Status and Development Trend of Electrospark Deposited Wear Resistance Coating on Steel Surface

YANG Jinpeng<sup>1</sup>, WANG Zijun<sup>1</sup>, ZHANG Xinying<sup>2</sup>, GAO Feng<sup>1</sup>, CHEN Xiaoming<sup>1</sup>, XU Zhiyu<sup>1</sup>, ZHU Guanglin<sup>1</sup>, GUO Cean<sup>1\*</sup>

School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
 Yingkou Modern Service School, Liaoning Yingkou 115002, China)

**ABSTRACT:** The work provides a systematic overview of the research progress and future development trends in the field of wear-resistant coating preparation for steel surfaces by EDM deposition technology in recent ten years, focusing on its technical

Received: 2024-11-26; Revised: 2025-01-07

引文格式:杨金朋,王子君,张新颖,等. 钢表面电火花沉积耐磨涂层研究进展及发展趋势[J]. 装备环境工程,2025,22(1):31-49.

\*通信作者(Corresponding author)

收稿日期: 2024-11-26; 修订日期: 2025-01-07

**基金项目:** 辽宁省应用基础研究项目(No.2022JH2/101300006);辽宁省教育厅科研项目(LJKMZ20220604和1030040000675);武器科 学技术研究重点实验室(LJ232410144071);沈阳理工大学光选团队计划(SYLUGXTD5)

**Fund:** Research Project of application foundation of Liaoning Province of China (No.2022JH2/101300006); Research Project of Education Department of Liaoning Province of China (LJKMZ20220604 and 1030040000675); Key Laboratory of Weapon Science & Technology Research (LJ232410144071), Light-Selection Team Plan of Shenyang Ligong University (SYLUGXTD5)

YANG Jinpeng, WANG Zijun, ZHANG Xinying, et al. Research Status and Development Trend of Electrospark Deposited Wear Resistance Coating on Steel Surface[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 31-49.

principles, material applications and process optimization. Firstly, the basic principles of EDM technology, including its process and influencing factors are described. Secondly, from the composition of electrode materials, different wear-resistant coatings, including refractory mono-metal coatings, traditional alloy coatings, high-entropy alloy coatings, amorphous alloy coatings and composite coatings, are analyzed in detail, and systematically discussed from the aspects of deposition conditions, microstructures, hardness, and tribological properties, respectively. Finally, the development trend of EDM deposition technology is described, focusing on the in-depth study of the coating formation mechanism, the development of new coating materials, the optimization of deposition process parameters, the large-area low-cost preparation technology, as well as the automation of the deposition process, so as to provide ideas and directions for the subsequent research in this field.

**KEY WORDS:** electric spark deposition; wear resistance coating; high entropy alloy; amorphous alloy; composite; tribological property

在众多金属材料中,钢由于具有优异的力学性 能、良好的加工性能以及相对低廉价格而被广泛应用 于军事装备,如火炮身管、装甲履带等<sup>[1-4]</sup>。然而, 在一些高温、高压、高载、高速、腐蚀等苛刻摩擦工 况环境下使用时,钢构件表面往往因为耐磨性能不足 而导致构件寿命衰减,最终对设备的整体运行状态产 生显著影响。据报道,在一个高度工业化国家里,磨 损所带来的经济损失可占到国内生产总值的4%<sup>[5-7]</sup>。 因此,对于经济的发展和设备长时间可靠运行,钢构 件表面减摩耐磨的意义不言而喻。

在钢构件表面施加耐磨涂层可极大地提高钢构 件表面的摩擦磨损性能,而构件基体的力学性能仍保 持不变,这样可以明显地延长构件的服役寿命,从而 节省大量经济成本。目前,常用的钢构件表面涂层技 术包括激光熔覆、物理气相沉积、热喷涂、电火花堆 焊沉积、电火花沉积等<sup>[8-12]</sup>。在这些技术中,电火花 沉积工艺是一个快速的表面涂层过程,通过短时高能 的电火花来熔化和沉积材料,电极材料在放电过程中 被瞬间熔化,并沉积到基材表面。此技术主要用于在 金属表面形成高硬度的薄涂层,以增强其耐磨性和耐 腐蚀性。电火花堆焊涂层工艺使用电火花放电,但通 常需要更高的能量和更长时间的放电,以实现更厚的 堆焊层。材料以熔融状态被堆积到基材上,此技术主 要用于重建或修复磨损的表面,增加厚度,以及提供 耐磨、耐热、耐腐蚀的保护层。

与其他沉积技术相比,电火花沉积技术虽然存在 着沉积效率低、劳动强度大、涂层易产生气孔和裂纹、 涂层表面粗糙度较大等不足,但因其具有独特的技术 优势,在钢构件表面沉积涂层领域中发挥了重要的作 用<sup>[13-15]</sup>:设备简单,造价低;沉积层与基体结合牢固, 不发生剥落;工件心部无组织及性能变化;耗能少, 材料消耗低;适合特大型工件的局部处理;表面沉积 层强化效果显著;可用来修复磨损件;操作方法易掌 握。在现代制造和材料科学领域,电火花沉积技术作 为一种独特且高效的表面改性和修复技术,展现了广 泛的应用前景。在航空航天领域中,被广泛用于增强 飞机和航天器部件的耐磨性和抗腐蚀性;在汽车工业 中,被应用于修复发动机缸体和活塞等关键部件的磨损表面;在模具制造业中,通过在模具表面沉积高硬度合金或陶瓷材料,增强模具的耐磨性和抗疲劳性能,减少生产过程中因模具磨损导致的停机时间和成本;在电子和精密仪器行业中,被用于制造微型电极和电路,以其精细控制能力满足对微观尺度加工的需求。

本文将从电火花沉积技术的基本原理出发,结合 近十年来报道的钢表面电火花沉积耐磨涂层,分别综 述各类涂层的微观结构、硬度及摩擦磨损性能。根据 电火花沉积涂层的优异特性,展望其未来发展趋势, 旨在为该技术的广泛应用奠定坚实基础。

## 1 电火花沉积涂层技术基本原理

电火花沉积技术是一种利用高能量密度、低热输 人的方法进行表面改性的工艺。它通过在气体介质 中,利用电极(作为沉积材料,连接到脉冲电源的正 极)和基体(待强化或修复的工件,连接到脉冲电源 的负极)之间的电火花放电,将导电材料熔化并涂覆 到基体表面,从而实现表面强化或修复的效果,其工 作原理如图1所示[16-17]。将待沉积材料作为脉冲电源 的阳极,基体作为脉冲电源的阴极,在沉积过程中, 由一旁的气体供给装置吹入保护或反应气体。工作时 电极进行振动或旋转运动,并以一定频率将阳极与阴 极接触(见图 1a),进而产生火花放电。放电瞬间释 放出极高的热量,电极端部表面形成熔滴,并且基体 表面形成熔池(见图 1b)。熔滴掉入基体表面的熔池 时,撞击并推动熔池内的材料,使其向两边分流,形 成一个沉积点(见图 1c)。之后,电极和基体将再次 接触放电(见图 1d),以此类推,最终形成了完整的 沉积层。

在电火花沉积技术中,涂层的沉积效果受电极直 径、沉积角度、脉冲电流、脉冲频率、放电时间、电 极间隙及环境因素等工艺参数的影响。涂层表面粗糙 度随电极直径和沉积角度的增加而显著增大;沉积层 厚度随放电参数(包括功率、频率、电压和电容)的 增加呈现先增大、后减小的动态变化;高沉积电流会



图 1 电火花沉积原理 Fig.1 Schematic diagram for principles of ESD

导致更高的温度和更快的熔化速度, 使涂层形成更细 小的晶粒, 但同时也增加热影响区和微裂纹的风险; 低电流可能导致较低的沉积速率和较大的晶粒尺寸, 影响涂层的致密性和硬度。此外, 保护气体的种类、 流量、温度均对沉积质量和性能产生显著影响。在电 火花沉积过程中, 气体会发生电离击穿, 周围环境中 的气体对涂层的性能有显著影响。使用空气作为分离 气体时, 会形成高导热性的等离子体, 导致电极放电 端形成球状熔融体,这些熔体在等离子体作用下变为 小液滴,高速喷射并撞击到基体上,形成小型熔池。 相比之下,使用氩气时产生的等离子体导热率较低, 这种等离子体会使电极尖端的熔融材料以喷射的形 式转移到基体上,形成更为光滑和均匀的涂层。2种 气氛下电火花沉积钨合金涂层的火花特征如图 2 所 示<sup>[18]</sup>。由图 2 可以看出,在氩气中形成的火花更亮, 具有更高的能量,因此会产生更高的沉积效率。



a空气

b 氩气

图 2 2 种气氛下电火花沉积钨合金涂层的火花特征 Fig.2 Characteristics of sparks in tungsten alloy coatings deposited by electrospark under two different atmospheres: a) air; b) argon

电火花沉积技术在优化沉积参数和选择合适的 电极材料方面具有一定的灵活性,但涂层的性能和结 构会受到基体材料热物理参数(热扩散、热膨胀系数、 导热性)的影响。在实际应用中,往往需要通过实验 来调整各项沉积参数,以确保获得最佳的涂层性能。

## 2 电火花沉积耐磨涂层

由于电火花涂层在形成过程中电极与基体材料

在熔融状态下会发生物理化学反应,涂层中通常会形成不同于电极和基体的新相。耐磨涂层通常具有多层结构,表层是熔化并迅速冷却的材料,一般会形成细小的柱状或针状晶粒,涂层与基材之间的界面通常是冶金结合,界面处可能存在微小的孔洞或缺陷。由于冷却速度极快,涂层的晶粒尺寸通常较小,有时甚至可以达到纳米尺度,这会显著提高涂层的硬度。涂层可能会含有非平衡相,如亚稳相、亚晶态或无定形相,这些相态的形成与快速冷却有关。

通常情况,电火花沉积工艺中,对电极材料的选 择没有严格的化学成分限制,但实际操作中需要考虑 电极材料的熔点、导电性、与基体材料的兼容性等因 素。此外,某些特定元素的含量可能会影响涂层性能, 如硫和磷在高温下可能导致脆性。为了综述的方便, 本文将电火花制备的涂层以电极材料进行命名。电火 花沉积的耐磨涂层包括难熔单一金属、传统合金、高 熵合金、非晶态合金以及复合材料涂层,如图3所示。



图 3 电火花沉积耐磨涂层的分类 Fig.3 Classification of ESD wear resistance coatings

#### 2.1 难熔单金属

电火花沉积单金属耐磨涂层是指采用难熔单金 属电极,在钢基体表面在电火花的作用下形成固溶强 化相、金属间化合物等相结构,从而提升基体的摩擦 磨损性能。常用的单金属电极包括 Cr、Ta、Mo 等难

熔金属,这些金属涂层具有极高的熔点,耐高温、耐 磨、耐腐蚀,通常用于高温环境下的部件,如航空发 动机部件、切割工具等。

Wang 等<sup>[19]</sup>利用电火花沉积方法在 CrNi3MoVA 钢基体上制作了 Ta 涂层,研究了涂层的纳米力学性 能和摩擦磨损性能。涂层的微观形貌及物相成分如图 4 所示,涂层表面有熔滴流动积累的形貌及细孔的出 现。结果表明,纳米晶 Ta 梯度涂层主要由 α-Ta、Fe-Ta 金属间化合物、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和  $\alpha$ -Fe 组成, Ta 涂层的硬度比 基体的硬度提高了115%,弹性降低了21%,磨损质 量损失减少了 89%。Ta 涂层的磨损主要表现为轻微 的黏着磨损,而基体材料则呈现出严重的黏着及疲劳 磨损。栾程群等<sup>[20]</sup>采用电火花沉积技术在 H13 钢基 体表面沉积了 Nb 涂层,研究了涂层的力学性能及摩 擦磨损性能。涂层的微观形貌及物相成分如图 5 所 示,涂层表面有单点沉积所形成的熔滴飞溅形貌及涂 层最终表面形貌。结果表明, Nb 涂层主要由 Fe2Nb 和 Fe0.2Nb0.8 等组成, 沉积层截面组织连续且致密, Nb 涂层与基体发生了元素的相互扩散,涂层中含有 大量的微晶和非晶结构,沉积层的显微硬度达到 642HV, 是基体硬度的 3.2 倍。在相同的磨损条件下, Nb 涂层的磨损量约为基体的 1/3, 磨痕较浅, 磨损方 式主要为磨料磨损。Wang 等<sup>[21]</sup>采用电火花沉积技术 在 H13 钢基体表面沉积了 Mo 涂层,表面形貌如图 6





Fig.4 Microscopic morphology and phase composition of Ta coating: a) morphology at low magnification; b) morphology at high magnification; c) XRD pattern



a 单点沉积形貌

图 5 Nb 涂层的微观形貌及物相成分

Fig.5 Microscopic morphology and phase composition of Nb coating: a) single-pit deposition morphology; b) surface morphology of deposited coating; c) XRD pattern





b 3 min/cm<sup>2</sup> c 4 min/cm<sup>2</sup> 图 6 Mo 涂层的表面形貌 Fig.6 Surface morphology of Mo coating

所示。该涂层截面主要由强化区和过渡区组成,涂层 与基体之间形成冶金结合。涂层主要由 Feg7Mo0.3、

Fe-Cr、FeMo 和 Fe<sub>2</sub>Mo 硬质合金相以及非晶相组成, 涂层的显微硬度和耐磨性均优于基体,如图7所示。

3种电火花沉积难熔单金属涂层的沉积工艺参数 及摩擦学性能见表1。由表1可以看出,几种电火花 难熔沉积单金属涂层均具有良好的耐磨性,其中电火 花沉积 Ta 涂层具有明显的减摩效果。

#### 2.2 传统合金

传统合金电极由 2 种或多种金属通过合金化工 艺制成,通常其性能优于单一金属。常用的传统合金 电极包括钨合金、镍合金、铁合金等。这些合金涂层 不仅能为基体提供良好的耐腐蚀性、导电性或导热 性,还可以根据基体材料的需要进行匹配。



表 1 3 种电火花沉积难熔单金属涂层的摩擦学性能 Tab.1 Tribological properties of three kinds of ESD refractory single metal coatings

基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损量	磨损机理	参考文献
CrNi3MoVA 钢	Ta	电极直径为 4 mm; 沉积功率为 1 200 W; 输出电压为 60 V; 氩气流量为 15 L/min; 电极速率为 3 000 r/min; 比沉积时间为 1 min/cm <sup>2</sup>	室温; GCr15; 载荷为 20 N; 往复距离为 6 mm; 往复速度为 5 mm/s; 时间为 30 min	小于 0.14	1.36 mg	轻微黏着磨损	[19]
H13 钢	Nb	电极直径为 3 mm; 输出电压为 60 V; 沉积功率为 1 000 W; 放电频率为 700 Hz; 比沉积时间为 3 min/cm <sup>2</sup> ; 氩气流量为 8 L/min	室温; 碳化硅 2000#砂纸		7 mg	磨料磨损	[20]
H13 钢	Мо	电极直径为 3 mm; 沉积角度为 45°; 沉积速度为 1 500 r/min; 氩气流量为 8 L/min; 沉积功率为 100~1 400 W; 输出电压为 100 V; 放电频率为 5~650 Hz	室温; 碳化硅 2000#砂纸; 载荷为 2、4、6、8、10 N		2~7 mg/cm <sup>2</sup>		[21]

张贺等<sup>[22]</sup>采用电火花沉积技术在CrNi3MoVA钢 基体表面制备了钨合金涂层,涂层的微观形貌及物相

成分如图 8 所示,涂层表面有微孔洞及部分裂纹出 现。物相结果表明, 该涂层主要由 γ-Fe(W)和 α-Fe 相





Fig.8 Microscopic morphology and phase composition of W alloy coating: a) surface morphology at low magnification; b) high magnification in area A; c) XRD pattern

组成。涂层的硬度较基体提高了 47.4%,摩擦因数为 0.22~0.25,磨损率较基体降低 53.7%,磨损的主要机 理包括微切削磨损和氧化磨损。杨君宝等<sup>[23]</sup>采用电火 花沉积技术在 CrNi3MoVA 钢表面沉积了 W-Ni-Fe-Co 涂层,该涂层由 α-W、γ-Fe 和 NiWO4组成。涂层的 硬度较电镀硬 Cr 涂层降低 18%,涂层的磨损机制为 轻微的黏着磨损。与电镀 Cr 涂层相比,该涂层表现 出显著的减摩和耐磨性能,其摩擦因数降低主要是因 为表面氧化物提供了自润滑功能。Kreivaitis 等<sup>[24]</sup>通 过电火花沉积技术在 45 号碳钢上制备了 W-Co 涂层, 其显微硬度平均达到 840HV。相比于 C45 碳钢基体, 该涂层几乎没有磨损,摩擦因数为 0.11~0.12,低于 基体,显示出优异的耐磨性能。

杨君宝等<sup>[25]</sup>采用电火花沉积技术在 CrNi3MoVA 钢表面获得了由柱状晶组成的 NiCrAlY 微晶涂层, 物相成分结果如图 9 所示。该涂层包含 β-NiAl 和γ-Ni 两相,涂层的硬度较基体提高 22%,摩擦因数为 0.45~0.55,具有明显的减摩耐磨作用,其表面形成的 黏附力强的薄氧化物层是其耐磨的主要原因,涂层的 磨损机制为微切削磨料磨损。Zhou 等<sup>[26]</sup>采用电火花 沉积技术在 45 号碳钢表面沉积了镍基合金涂层,涂 层的表面形貌及截面形貌如图 10 所示。该涂层中含 有铬、钼等元素,形成了高硬度化合物,这使涂层比 基体材料硬度更高,从而表现出优异的耐磨性。在低 载和低速下,沉积层的磨损机理主要是微切削磨损。



图 9 NiCrAlY 涂层的 XRD 图谱 Fig.9 X-ray diffraction patterns of NiCrAlY coatings

高速重载时,主要磨损机理为疲劳磨损。

Kayali 等<sup>[27]</sup>采用电火花沉积技术分别在 AISI4010 钢和 AISI1040 钢表面沉积了 M24 钢涂层, AISI4010 钢表面涂层主要由 Fe-Ni 和 α-Fe 两相组成, 涂层的 摩擦因数为 0.46, 磨损率为 1.989 96×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m); AISI1040 钢表面涂层主要由 α-Fe 和 γ-Fe 两相组 成, 涂层的摩擦因数为 0.49, 磨损率为 1.027 61×  $10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/(N·m), 涂层具有明显的减摩耐磨作用。

几种电火花沉积传统合金涂层的摩擦学性能见 表 2。由表 2 可以看出,电火花沉积传统合金涂层具 有良好的摩擦学性能,其中钨合金涂层在一定的摩擦 条件下具有明显的减摩效果。



图 10 镍基合金涂层的表面形貌及截面形貌 Fig.10 surface morphology and section morphology of Ni-based alloy coating: a) surface morphology; b) cross-sectional section morphology

		Tab.2 Tribological pr	operfies of several ESD	traditional allo	by coatings		
基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损率/ (mm <sup>3</sup> ·N <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	磨损机理	参考 文献
CrNi3MoVA	钨合金	电极直径为 5 mm; 电极厚度为 50 mm; 沉积电压为 50 V; 电容为 100 μF	氧化铝球;载荷2N; 滑动速度为48 mm/s; 时间为20 min	0.22~0.25	13.1×10 <sup>-4</sup>	微切削磨损 氧化磨损	[22]
CrNi3MoVA	W-Ni-Fe-Co	电极直径为 3.5 mm; 功率为 1 200 W; 氩气流量为 10 L/min; 比沉积时间为 1 min/cm <sup>2</sup>	淬火 G15 钢球; 载荷为 20 N; 往复 行程为 10 mm; 滑动 速度为 200、400、 600 r/min	0.65~0.75 (200 r/min); 0.55~0.65 (400 r/min); 0.45~0.50 (600 r/min)		轻微黏着磨损	[23]
C45 碳钢	W-Co	前几层振动电极: 振荡频率为 30 Hz; 工作平均电流为 3 A; 工作平均电压为 63 V; 阳极直径为 1.3 mm; 最后几层旋转电极: 振荡频率为 100 Hz; 工作电流为 2 A; 工作电压为 30 V; 阳极直径为 3 mm; 氩气流速为 10 L/min	GCr15 钢球; 载荷为 25 N; 滑动速度为 0.005 m/s	0.11~0.12			[24]
CrNi3MoVA	NiCrAlY	电极直径为4mm; 电极厚度为10mm; 功率为1200W; 比沉积时间为 3min/cm <sup>2</sup>	淬火 G15 钢球;载荷 为 10 N;往复行程为 10 mm;滑动速度为 600 r/min;时间为 5 min	0.45~0.55		切削磨料磨损	[25]
45 钢	Deloro60	<ul> <li>氩气流量 10 L/min;</li> <li>比沉积时间为</li> <li>4 min/cm<sup>2</sup>;</li> <li>输出电压为 170 V;</li> <li>功率为 1 200 W;</li> <li>工作频率为 1 400 Hz</li> </ul>	Si3N4 陶瓷轴承球 试验载荷为 6、7、 9、11 N;转速为 200、 400、600、800 r/min; 运行时间为 40 min			在低载和低速 下,微切削磨损; 高速重载时,为 疲劳磨损	[26]
AISI4010 钢	M24 钢	沉积电压为 90 V; 频率为 1 050 Hz; 保护气体为氩气; 沉积时间为 2 min	WC-Co球;载荷为5N; 滑动速度为0.3m/s; 滑动距离为500m	0.46	1.989 96×10 <sup>-4</sup>		[27]
AISI1040 钢	M24 钢	沉积电压为 90 V; 频率为 1 050 Hz; 保护气体为氩气; 沉积时间为 2 min	WC-Co球;载荷为5N; 滑动速度为0.3m/s; 滑动距离为500m	0.49	1.027 61×10 <sup>-4</sup>		[27]

#### 表 2 几种电火花沉积传统合金涂层的摩擦学性能 2 Tribological properties of several FSD traditional alloy coati

#### 2.3 高熵合金

高熵合金是一种包含至少 5 种主要元素的新型 合金体系,其元素质量分数在 5%~35%,通常按等物 质的量比或接近等物质的量比进行合金化,主元之间 能形成简单的固溶体结构。由于高熵效应、晶格畸变、 扩散迟滞和鸡尾酒效应,这些合金展现出高强度、高 硬度和高耐磨性等优异性能<sup>[28]</sup>。借助电火花沉积技术 带来的快速凝固特性,所形成的高熵合金涂层不仅能 够充分利用其技术上的优势,还更容易形成具有细小 晶粒的简单面心立方(FCC)或体心立方(BCC)固 溶相,从而获得性能卓越的高熵合金涂层。

郭策安等[29-30]采用电火花沉积技术在炮钢表面

制备了 AlCoCrFeNi 涂层,并与基体材料和硬铬涂层 进行了力学性能对比。结果表明,该涂层晶粒细小, 组织致密无裂纹,由 FCC 和 BCC 双相组成。涂层的 硬度比基体提高约 1 倍,比硬 Cr 涂层提高了约 10%, 基体的摩擦因数为 0.85~0.95,硬 Cr 涂层的摩擦因数 为 0.65~0.73, AlCoCrFeNi 涂层仅为 0.29~0.38,基体、 硬 Cr 涂层的磨损率分别约为 AlCoCrFeNi 涂层的 9.4、 1.4 倍。因此, AlCoCrFeNi 涂层具有明显的减摩耐磨 效果。AlCoCrFeNi 涂层的磨损机制为微切削磨损, 其在高速摩擦磨损过程中,表面形成的具有良好黏附 性的氧化膜起到了减摩作用。Chandrakant 等<sup>[31]</sup>采用 电火花沉积技术在 AISI410 不锈钢基体上制备了 AlCoCrFeNi 涂层,涂层由 BCC+少量 FCC 相组成, 显微硬度较基体提高了 3 倍。由于 ESD 制备涂层时 重复加热导致的晶粒粗化,致使涂层硬度沿涂层表层 向基体方向降低,内部硬度仅为外部涂层的 75%,如 图 11 所示。由于涂层独特的高熵效应、晶粒细化、 原位增强颗粒、固溶强化作用,从而提高了其耐磨性。



d 钢基体磨损试验后磨损表面的 SEM 图像

e涂层磨损试验后磨损表面的 SEM 图像



Fig.11 Friction and wear properties of AlCoCrFeNi coating: a) variation of hardness with depth at cross section of coated substrate; b) change of sliding wear behavior with distance; c) functional relationship between friction and distance during sliding; d) SEM image of worn surface of steel matrix after wear test; e) SEM image of worn surface after coating wear test

Yang 等<sup>[32]</sup>采用电火花沉积技术在炮钢基体表面 沉积了 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层,研究了涂层在不 同温度下的摩擦磨损性能。结果表明,高熵合金涂层 由 BCC+B2 相构成,其显微硬度为(540±40)HV0.1, 约为基体的 1.5 倍。在 300、800 ℃时,该涂层的摩 擦因数为 0.42~0.45,在 600 ℃时的摩擦因数为 0.46~0.49。在 300、600、800 ℃条件下,涂层的磨损 率分别为 4.77×10<sup>-4</sup>、2.53×10<sup>-5</sup>、1.05×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m), 在 600 ℃时的磨损率最低,如图 12 所示。涂层的主 要磨损机理在 300 ℃时表现为磨粒磨损,在 600、 800 ℃时表现为氧化磨损。

张建斌等<sup>[33]</sup>采用电火花沉积技术在 304 不锈钢 表面成功制备了 AlCrNiFeTi 高熵合金涂层,研究了 其摩擦磨损性能。结果表明, AlCrNiFeTi 电极与涂层



图 12 AlCoCrFeNi 涂层在 300、600、800 ℃下的摩擦因数和磨损率 Fig.12 Friction coefficients and wear rates for alcocrfeni coating at 300, 600, and 800 °C: a) friction coefficients; b) wear rates

均以 BCC1 和 BCC2 简单固溶体为主, 电极微观组织 结构呈典型的树枝晶。涂层在多个沉积点的铺展作用 下形成, 表面呈现出明显的橘皮纹理, 每个沉积点的 轮廓都十分清晰。沉积点的边缘呈现出喷溅状扩散, 如图 13a 所示,表面呈现出不平整的起伏;在图 13b 中可见沉积点之间有明显的分界,边缘处的堆积尤为 明显;沉积点紧密相连,部分区域表面呈现出丘陵状,

存在球形熔滴颗粒,如图 13c 所示,涂层表面未见明 显的裂纹等缺陷,典型地展现了沉积点的特征。涂层 最大显微硬度为 587.3HV0.2,比基体硬度提高约 2.45 倍。随着载荷的增大,涂层的磨损机制由氧化磨损和 轻微磨粒磨损转变为磨粒磨损和黏着磨损。涂层的磨 损率为 1.213×10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m), 摩擦因数仅为 0.446, 涂层的磨损率较基体的磨损率减小了约28.3%。



a 沉积和喷溅花样

图 13 电火花沉积 AlCrNiFeTi 涂层的表面微观形貌

Fig.13 Surface microscopic morphology of electrospark deposited AlCrNiFeTi coating: a) sedimentation site and splatter pattern; b) molten droplet; c) hilly

几种电火花沉积高熵合金涂层的摩擦学性能见 表 3。由表 3 可以看出,由于电火花沉积高熵合金涂 层的固溶强化、细晶强化的作用,使得涂层的耐磨性 及减摩效果均有极大的提高。

Tab.3 Tribological properties of several kinds of ESD high entropy alloy coatings

基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损率/ (mm <sup>3</sup> ·N <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	磨损机理	参考 文献
CrNi3MoVA 钢	AlCoCrFeNi	电极直径为4mm; 电极厚度为50mm; 功率为800W; 氩气流 量为12L/min; 电极转 速为2000r/min; 比沉 积时间为2min/cm <sup>2</sup>	室温; GCr15 钢球; 载荷为 10 N; 往复距离为 10 mm; 速度为 1 000 r/min; 时间为 5 min	0.29~0.38	9.15×10 <sup>-5</sup>	微切削磨粒磨损	[29]
CrNi3MoVA 钢	AlCoCrFeNi	电极直径为4mm;电 极厚度为50mm;功率 为1000W;氩气流量 为15L/min;比沉积时 间为2.5min/cm <sup>2</sup>	室温; GCr15 钢球; 载荷为 10 N; 往复距离为 10 mm; 速度为 800 r/min; 时间为 5 min	0.25~0.33	9.15×10 <sup>-5</sup>	微切削磨损磨粒 磨损、氧化磨损	[30]

## 续表 3 几种电火花沉积高熵合金涂层的摩擦学性能

Tab.3 Tribological properties of several kinds of ESD high entropy alloy coatings

基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损率/ (mm <sup>3</sup> ·N <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	磨损机理	参考 文献
AISI410不锈钢	AlCoCrFeNi	电极直径为4mm; 电极厚度为50mm; 沉积功率为800W; 氩气流速为12L/min; 电极速率2000r/min; 单位面积沉积时间为 2min/cm	室温; EN31 钢盘; 载荷为 2.5 N; 滑动 距离为 8 000 m			磨粒磨损	[31]
CrNi3MoVA 钢	AlCoCrFeNi	电极直径为 5 mm; 电极厚度为 36 mm; 沉积功率为 1 200 W; 电极转速为 2 000 r/min; 单位面积沉积 时间为 2 min/cm; 氩气流速为 15 L/min	300 ℃; Si3N4; 陶瓷球; 载荷 为 10 N; 往复 距离为 6 mm; 频率为 2 Hz; 时间为 30 min	0.42~0.45	4.77×10 <sup>-4</sup>	磨粒磨损	[32]
CrNi3MoVA 钢	AlCoCrFeNi	电极直径为 5 mm; 电极厚度为 36 mm; 沉积功率为 1 200 W; 电极转速为 2 000 r/min; 单位面积沉积 时间为 2 min/cm; 氩气流速为 15 L/min	600 ℃; Si3N4; 陶瓷球; 载荷 为 10 N; 往复 距离为 6 mm; 频率为 2 Hz; 时间为 30 min	0.46~0.49	2.53×10 <sup>-5</sup>	氧化磨损	[32]
CrNi3MoVA 钢	AlCoCrFeNi	电极直径为 5 mm; 电极厚度为 36 mm; 沉积功率为 1 200 W; 电极转速为 2 000 r/min; 单位面积沉积时间为 2 min/cm; 氩气流速 为 15 L/min	800 ℃; Si3N4; 陶瓷球; 载荷 为 10 N; 往复 距离为 6 mm; 频率为 2 Hz; 时间为 30 min	0.42~0.45	1.05×10 <sup>-4</sup>	氧化磨损	[32]
304 不锈钢	AlCrNiFeTi	电极直径为7 mm; 电 极速率为2 600 r/min; 氩气流速为10 L/min; 沉积电压为160 V; 电容为240 μF; 放电频率为5 000 Hz	室温; GCr1 钢球; 载荷为 2 N; 往复距 为 5 mm; 频率为 6 Hz; 时间为 10 min	0.54	2.377×10 <sup>-3</sup>	磨粒磨损 黏着磨损	[33]
304 不锈钢	AlCrNiFeTi	电极直径为7 mm;电 极速率为2 600 r/min; 氩气流速为10 L/min; 沉积电压为160 V; 电容为240 μF; 放电频率为5 000 Hz	室温; GCr15 钢球; 载荷为 5 N; 往复距 离为 5 mm; 频率为 6 Hz; 时间为 10 min	0.47	1.213×10 <sup>-3</sup>	磨粒磨损 黏着磨损	[33]

### 2.4 非晶合金

自从发现非晶态合金以来,以其高强度、硬度、 良好的韧性以及卓越的耐磨、耐腐蚀和抗疲劳特性, 引起了广泛关注。非晶合金涂层主要用于精密仪器和 生物医疗器械等领域。然而,形成这种涂层通常需要 特定的电极材料和沉积条件。研究表明,非晶化能力 与冷却速度密切相关,冷却速度越快或温度梯度越 大,非晶形成能力越强<sup>[34]</sup>。得益于其快速加热与迅速 冷却的特点,电火花沉积技术在非晶态涂层制造过程 中展现出显著的优势。

何艳玲等<sup>[35]</sup>利用电火花沉积技术在 45Mn2 钢基

体上沉积了 Invar、Invar/非晶以及 Invar/非晶/Invar 等 3 种涂层,这些涂层紧密均匀,并与基体形成冶金 结合,其截面形貌如图 14 所示。研究显示, Invar 涂 层是 FCC 固溶体结构,而 Invar/非晶和 Invar/非晶/ Invar 涂层则呈现出非晶与固溶体混合相结构。Invar、 Invar/非晶和 Invar/非晶/Invar 涂层的平均硬度分别达 到 176.6HV0.1、757.7HV0.1、772.8HV0.1,摩擦因数 分别为 0.44、0.21、0.19。提高沉积层非晶含量可提 高硬度,降低摩擦因数,提高耐磨性。

Invar 沉积层与基材的硬度较低,在摩擦过程中容易产生黏着磨损,导致摩擦因数较高。相比之下, Invar/非晶和 Invar/非晶/Invar 涂层中含有更多的非晶相,硬度更高,弹性模量大,具有较大的弹性比功,因此摩擦因数较低。在基材和 Invar 涂层表面观察到 大量的剥落坑,这主要是由于黏着磨损机制所致。 Invar/非晶涂层表面主要是犁沟和少量剥落坑及片状 剥落,为磨粒磨损机制,如图15所示。

魏祥等<sup>[36]</sup>利用电火花沉积技术在高速钢基体上制备了 4 种不同的合金涂层,分别为 Fe-8B-xMo(x=13.62、23.62、33.62、43.62)。研究发现,这些涂层均包含非晶相、马氏体和 Fe<sub>2</sub>B 相,结构致密,缺陷少,并且与基体形成了良好的冶金结合。4 种涂层都存在垂直于基体的垂直裂纹,但无横向分层裂纹,表明它们都与基体材料具有良好的相容性。23.62%Mo 涂层具有最大的峰值显微硬度(1 138.1HV0.05),同时该涂层在摩擦磨损的稳定阶段具有最小的平均摩擦因数,且其 2 h 的磨损质量最小,表现出更好的摩擦磨损性能。4 种涂层的磨损机制均为磨粒磨损和疲劳磨损。

Burkov 等<sup>[37]</sup>在结晶颗粒的混合物中通过电火花 沉积技术,在 35 号钢表面上制备了铁基非晶涂层, 涂层含有不同比例的 W、Mo、Co、Ni,非晶相质量 分数普遍在 81%~99%。涂层的硬度比 35 钢提高 10~







a Invar 涂层

b Invar/非晶涂层

c Invar/非晶/Invar 涂层

图 14 电火花沉积涂层的横截面显微组织

Fig.14 Cross-sectional microstructure of electrospark deposited coatings: a) Invar coating; b) Invar/amorphous coating; c) Invar/amorphous/Invar coating



a 基体

b Invar 涂层



c Invar/非晶涂层



图 15 电火花沉积涂层磨痕的微观形貌 Fig.15 Worn morphologies of electrospark deposited coatings: a) substrate; b) Invar coating; c) Invar/amorphous coating; d) Invar/amorphous/Invar coating 15 GPa, 而它们在 10、50 N 载荷下的干滑动磨损模式 下的耐磨性比 35 钢分别提高 3.3 和 1.6 倍,涂层摩擦因 数比 35 号钢低 13%~30%。涂层的平均磨损率比 35 钢 小 58.3%~78.7%, 35 钢和涂层在 50 N 载荷时的平均磨 损率几乎相同。以上研究表明,随着所施加的摩擦载荷 的增加,非晶涂层对 35 号钢的硬化效果降低,钨提高 了铁基非晶合金的耐磨性,而镍则降低了耐磨性。几种 电火花沉积非晶合金涂层的摩擦学性能见表 4。

	Iab.4 Inbological properties of several kinds of ESD amorphous alloy coatings         基体材料       涂层       工艺参数       试验条件       摩擦因数       磨损量/率       磨损机理 参考文献								
基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损量/率	磨损机理	参考文献		
45Mn2 钢	Invar; Invar/非晶; Invar/非晶/ Invar	电极直径为 3 mm; 电极厚度为 50 mm; 氩气流量为 6 L/min; 电极速率为 5 000 r/min; 第 1 层沉积电压为 100 V; 电容为 10 μF; 频率为 150 Hz; 第 2 层将基材 顺时针旋转 90°, 沉积电压为 50 V; 电容为 10 μF 频率为 2 000 Hz	室温; GCr15 轴承钢; 载荷为 10 N; 时间为 30 min	0.44 0.21 0.19		黏着磨损 磨粒磨损 疲劳磨损	[35]		
某含硼高速钢	Fe-8B- <i>x</i> Mo ( <i>x</i> =13.62, 23.62,33.62, 43.62)	电极直径为 7.5 mm; 电极厚度为 45 mm; 电容为 360 μF; 输出电压为 150 V; 放电频率为 1 800 Hz; 比沉积速率为 2 min/cm <sup>2</sup> ; 氩气流量为 5 L/min; 电极速率为 2 480 r/min	室温; φ9.6 mm 的 SiC 球(80HRC); 测试载荷为 50 N; 摩擦行程为 7.5 mm; 往复频率为 5 Hz	0.578 0.549 0.567 0.622	3.0 mg 1.2 mg 1.7 mg 4.3 mg	均为磨粒 磨损和疲 劳磨损	[36]		
35 钢	铁基非晶合金	输出电压为 30 V; 频率为 1 000 Hz; 振幅为 110 A; 时间为 100 μs; 氯气流量为 7 L/min	室温;载荷为10、 50N;摩擦速度为 0.47m/s。	比 35 钢低 13%~30%	在 10、50 N 载 荷下,磨损率分 别比 35 钢低 56.5%~76.7% 和 47.4%~61.5%		[37]		

#### 表 4 几种电火花沉积非晶合金涂层的摩擦学性能

#### 2.5 复合材料

复合材料是由2种或2种以上性质不同的材料组 分,以所设计的比例组合而成,可以是金属基、陶瓷 基或聚合物基复合材料,各组分之间有明显的界面存 在。采用性质不同的金属与非金属相组合制备成复合 材料电极,通过电火花沉积,可以引入不同材料的优 异性能,如提高硬度、耐磨性、抗热震性等。

#### 2.5.1 含陶瓷相

陶瓷具有高强度、高硬度、耐磨损、耐高温等优 异性能,结合金属材料的高韧性和强塑性,可以制备 出摩擦学性能优异的电火花沉积涂层。Korkmaz 等<sup>[38]</sup> 利用电火花沉积技术在 St35 合金钢表面形成了 Cr7C3-NiCr 涂层。涂层的表面特征、截面特征及物 相成分如图 16 所示。由表面和截面形貌均可看出, 涂层中有大量的裂纹出现,物相结果表明,该涂层由 硬度较高的 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>和 Cr<sub>0.19</sub>Fe<sub>0.70</sub>Ni<sub>0.11</sub>相组成,涂层表 面的平均显微硬度达到 1 381HV, 较 St35 合金钢的 显微硬度(227HV)提高了约 6.1 倍,涂层的磨损率 (4.627×10<sup>-2</sup> mm<sup>3</sup>·N<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>)比 St35 合金钢的磨损率 (7.33×10<sup>-2</sup> mm<sup>3</sup>·N<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>)有所降低,摩擦因数 (0.5~0.65)也有所减小,表现出良好的抗磨损能力。

Kayali 等<sup>[27]</sup>采用电火花沉积技术分别在 AISI4010 钢和 AISI1040 钢上沉积了 WC 涂层,此涂层是由 W<sub>2</sub>C、 α-Fe 和 γ-Fe 相组成。ISI4010 钢上涂层的摩擦因数为 0.51,涂层的磨损率为 1.020  $83 \times 10^{-4} \text{ mm}^{3}/(\text{N·m})$ ; AISI1040 钢上涂层的摩擦因数为 0.46,涂层的磨损 率为 3.300  $8 \times 10^{-4} \text{ mm}^{3}/(\text{N·m})$ 。涂层具有明显的减摩 耐磨作用。

Burkov 等<sup>[39]</sup>通过电火花沉积技术,利用多组分 CrMoWCBSi 的铁颗粒混合物中添加碳化钨粉末的方 法在 AISI1045 基体上沉积了复合涂层。涂层中主要 含 αWC、W 及 αFe 这 3 种成分,如图 17 所示。随着 颗粒混合物中 WC 的质量分数增加至 1.2%,涂层组





合物中 WC 相的含量增加。涂层的显微硬度在 814HV~1 118HV,较 AISI1045 钢提高 41%。含 WC 的涂层的摩擦因数平均值为 0.60~0.67,比非晶态涂 层的摩擦因数低 30%。WC 涂层的磨损率在  $0.5 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m}), 低于不含 WC 的样品(<math>1.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )。



Fig.17 XRD patterns of deposited coatings

宋增金等<sup>[40]</sup>使用 Fe-Cr-Ni 固溶体合金和 WC-10Co 硬质合金作为电极,通过电火花沉积技术在45Mn2 钢表面预置 Fe 基非晶合金粉末,成功制备了非晶复合涂层。固溶体沉积层呈现单一 FCC 结构,而固溶体/非晶复合沉积层则由非晶相和 FCC 结构的固溶体构成。WC 沉积层主要由 W<sub>2</sub>C 和 W<sub>6</sub>C<sub>2.54</sub> 相组成,WC/非晶复合沉积层则含有非晶相和 W<sub>2</sub>C 相。沉积层中的元素与基体元素发生相互扩散,使涂层与基体之间形成了良好的冶金结合。基体材料 45Mn2的平均硬度为 300HV,磨损量为 0.011 g;WC 沉积层平均显微硬度为1 066HV,磨损量为 0.008 g;WC/非晶复合沉积层平均显微硬度为1 345.9HV,磨损量为 0.004 g。WC/非晶复合涂层的平均摩擦因数为 0.328,在持续应力作用下,主要为脆性剥离的疲劳

磨损,伴随有少量磨粒磨损。

Zhang 等<sup>[41]</sup>采用电火花沉积技术在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面制备了 WC-8Co 涂层,提高了泵流动部件 表面的耐磨能力。该涂层均匀、连续、致密,无明显的 裂纹和孔隙,最高的显微硬度(HV0.3)为 18 920 MPa, 涂层的平均硬度(HV0.3)为 17 950 MPa,约为基体(2 600 MPa)的 6 倍。涂层的耐磨性为基底的 3.75 倍,主要磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损。几 种电火花沉积含陶瓷相复合材料涂层的摩擦学性能 见表 5。

#### 2.5.2 含自润滑相

添加在基体材料中的自润滑相(如过渡族金属硫 化物、石墨等)可有效降低基体材料的摩擦因数。将 自润滑相混入电极材料中,可制备具有自润滑性能的 电火花沉积涂层。Guo 等<sup>[42]</sup>首先采用放电等离子体技术 制备了 Ni-MoS<sub>2</sub> 自润滑复合材料,随后在 CrNi3MoVA 钢表面电火花沉积了 Ni-MoS<sub>2</sub> 自润滑涂层, 该涂层组 织致密,与CrNi3MoVA钢形成了牢固的冶金结合, 涂层主要由 MoS<sub>2</sub>、γ-Ni、MoO<sub>2</sub>、Ni<sub>x</sub>S 相组成。Ni-MoS<sub>2</sub> 涂层的硬度较 CrNi3MoVA 钢提高了约 10.0%, 室温 下的摩擦因数为 0.18~0.19, 较 CrNi3MoVA 钢降低了 约70%。Yue等<sup>[43]</sup>采用同样的技术手段在CrNi3MoVA 钢表面电火花沉积了 Ni-WS2 自润滑涂层, 该涂层由 WS<sub>2</sub>、γ-Ni、α-W 和 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 相组成,与基体同样形成 了良好的冶金结合。Ni-WS2 涂层的摩擦因数较 CrNi3MoVA 钢降低了约 79%, 耐磨性提高了约 96%。  $Ni-MoS_2$ 与  $Ni-WS_2$  自润滑涂层的强化机理不同, 前 者主要形成了 MoO2 强化相, 而后者主要形成了纳米 α-W强化相。Liu等<sup>[44]</sup>研究了不同电压在 CrNi3MoVA 钢表面电火花沉积 W-WS2 涂层的摩擦学性能。其表 面形貌如图 18 所示, W-WS,涂层表面有许多微米级 大小的球体,这与 ESD Ni-WS,涂层表面形貌的飞溅 现象和重叠特征不同。XRD 结果如图 19 所示,涂层 主要由 α-W 和 WS2相组成。涂层硬度随电压升高而 增加,80 V 电压制备的涂层的表面硬度值最高(如 图 20 所示 )。60 V 电压制备的涂层的摩擦因数最小, 耐磨性能最好。Cao<sup>[45]</sup>在高速钢表面电火花沉积了

#### 表 5 几种电火花沉积含陶瓷相复合材料涂层的摩擦学性能

Tab.5 Tribological properties of several kinds of ESD composite with ceramic phase coatings

基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损量/率	磨损机理	参考 文献
St35 合金钢	Cr7C3-NiCr	输出电压为 45 V;频率为 22.12~95.92 Hz;振幅为 100~400 A;时间为 100 µs	WC球;载荷为10N; 滑动速度为20 cm/s; 滑动距离为800 m	0.50~0.65	$4.627 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$		[38]
AISI4010 钢	WC	沉积电压为 90V;频率为 1 050 Hz;保护气体为氩 气;沉积时间为 2 min	WC-Co球;载荷为5N; 滑动速度为0.3 m/s; 滑动距离为500 m	0.51	$1.020 83 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$		[27]
AISI1040 钢	WC	沉积电压为 90 V;频率 为1050 Hz;保护气体为 为氩气;沉积时间为2 min	WC-Co球;载荷为5N; 滑动速度为0.3 m/s; 滑动距离为500 m	0.46	3.300 8× 10 <sup>-4</sup> mm <sup>3</sup> /(N⋅m)		[27]
AISI1045	WC	输出电压为 30 V;频率为 1 000 Hz;振幅为 110 A; 时间为 100 μs;氩气流量 为 10 L/min	室温; 304 不锈钢球; 载荷为 25 N;摩擦速度 为 0.47 m/s	0.60~0.67	0.5×10 <sup>-5</sup> ~1.1× 10 <sup>-5</sup> mm <sup>3</sup> /(N·m)		[39]
45Mn2 合金	固溶体/非晶 复合涂层; WC/非晶复 合涂层	电极速率为 2 500 r/min;	室温; 对磨环材料为 直径 40 mm 的 GCr15 轴承钢; 法向载荷为 100 N; 转速为 420 r/min; 时间为 30 min	0.258 0.328	0.003 g 0.004 g	疲劳磨损 少量磨粒 磨损	[40]
1Cr18Ni9Ti 不锈钢	WC-8Co	<ul> <li>沉积功率为2500W;</li> <li>输出电压为100V;</li> <li>频率为1000Hz;</li> <li>电极速率为3000r/min;</li> <li>比沉积时间为3min/cm<sup>2</sup></li> </ul>	运行时间为 30 min	0.1~0.3	0.4 mg	黏着磨损和 磨粒磨损	[41]





Cu-MoS<sub>2</sub>涂层,该涂层表面凹凸不平,并存在气孔。随着电容和沉积时间的增加,涂层厚度呈现先增加后

下降的趋势。3档电容制备的自润滑涂层表面质量最 佳,摩擦因数最小。





Kong 等<sup>[46]</sup>将 Ni、MoS<sub>2</sub>、石墨混合烧结成电极, 在 CrNi3MoVA 钢表面电火花沉积了 Ni-MoS<sub>2</sub>-C 自润 滑涂层。该涂层由 MoS<sub>2</sub>、γ-Ni、MoO<sub>2</sub>、Ni<sub>x</sub>S、MoC 和石墨相组成,且与基体形成良好的冶金结合。 Ni-MoS<sub>2</sub>-C 涂层硬度为 6.23 GPa,较 CrNi3MoVA 钢 提高了 37%。由于 Ni-MoS<sub>2</sub>-C 涂层中石墨与 MoS<sub>2</sub>的 协同作用,使得 Ni-MoS<sub>2</sub>-C 涂层的摩擦磨损性能得到 显著提高,涂层摩擦因数最低降至 0.14,磨损率较 CrNi3MoVA 钢降低了 91%。

单春生<sup>[47]</sup>在高速钢表面电火花沉积了 Cu/BN 自 润滑涂层,该涂层厚度随沉积时间延长而增大,硬度 由涂层表面向基体方向逐渐增大,界面处硬度达到最 大值。在3档电容、沉积时间 15 min 时,Cu/BN 涂 层的表面质量最好,摩擦因数最小。摩擦的初始阶段, 由于表面粗糙度大,未形成均匀连续的固体润滑膜。 涂层在摩擦副的切向力作用下,表面凸起部发生塑性 变形,造成表面材料脱离,磨损机理主要为磨粒磨损。 随着固体润滑剂由涂层内部不断溢出,在接触对磨表



Fig.20 Hardness test results of N1-WS<sub>2</sub> self-lubricating coating

面形成均匀连续的润滑膜,起到了减摩耐磨的效果。

吕壮等<sup>[48]</sup>选择石墨和 YG8 硬质合金棒作为电极 材料,在 45 钢表面电火花沉积了底层硬质合金间隔 分布的自润滑涂层。底层硬质合金、往复摩擦频率 以及载荷均会影响涂层的摩擦学性能,底层硬质合 金既可为顶层石墨提供支撑,也可与石墨结合形成 新的润滑膜,提高涂层的减摩耐磨效果。谈庆瑶等<sup>[49]</sup> 采用电火花间隔技术在 45 钢表面沉积了条状石墨和 硬质合金流层,得到的涂层致密且厚度均匀。随着 硬质合金面积占比从 10%增加到 40%,涂层的润滑 性能有所下降,但耐磨性则得到了提升。随着往复 摩擦频率的增加,接触表面温度升高会使涂层自润 滑性能提高。

几种电火花沉积含自润滑相复合材料涂层的摩 擦学性能见表 6。由表 6 可以看出,除了电火花沉积 W+WS2 涂层外,其余电火花沉积含自润滑相复合材 料涂层均具有较低的摩擦因数,减摩耐磨效果明显。

基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损量/率	磨损机理	参考 文献
CrNi3MoVA	Ni+MoS <sub>2</sub>	电极直径为 4 mm; 电极厚度为 50 mm; 沉积功率为 1 200 W; 氩气流量为 12 L/min; 电极速率为 3 500 r/min; 沉积时间单位面积为 2.5 min/cm	室温; GCr15 球; 压力为 20 N; 往复距离为 6 mm; 速度为 5 mm/s; 时间为 30 min	0.17~0.20	2.85 mg	磨粒磨损 疲劳磨损	[42]
CrNi3MoVA	Ni+WS <sub>2</sub>	电极直径为 4 mm; 电极厚度为 50 mm; 沉积功率为 1 000 W; 氩气流量为 15 L/min; 电极速率为 3 000 r/min; 沉积时间单位面积为 2 min/cm	室温; GCr15 钢球; 载荷为 2 N; 往复距离为 5 mm; 速度为 0.1 m/s; 时间为 5 min	0.14~0.16		黏着磨损	[43]

表 6 几种电火花沉积含自润滑相复合材料耐磨涂层的摩擦学性能 Tab.6 Tribological properties of several kinds of ESD composite with self-lubricating phase coatings

## 续表 6 几种电火花沉积含自润滑相复合材料耐磨涂层的摩擦学性能

Tab.6 Tribological properties of several kinds of ESD composite with self-lubricating phase coatings

基体材料	涂层	工艺参数	试验条件	摩擦因数	磨损量/率	磨损机理	参考 文献
CrNi3MoVA	W+WS <sub>2</sub>	电极直径为 5 mm; 电极厚度为 50 mm; 沉积电压为 40~80 V; 沉积功率为 800~1 600 W; 电极速率为 2 500 r/min; 氩气流量为 15 L/min; 比沉积时间为 1 min/cm <sup>2</sup>	室温; 304 不锈钢球; 载荷为 3 N; 时间为 10 min	0.5	0.1 mg	磨粒磨损	[44]
HSS	Cu+MoS <sub>2</sub>	电容为 80~480 μF; 输出电压为 75 V; 放电频率为 400 Hz;	室温; GCr15 钢针; 载荷为 5 N; 转速为 400 r/min; 时间为 15 min	0.23	1.8 mg	剪切滑移	[45]
CrNi3MoVA	Ni+MoS <sub>2</sub> +C	电极直径为 4 mm; 电极厚度为 50 mm; 沉积功率为 1 200 W; 氩气流量为 15 L/min; 电极速率为 3 500 r/min; 输出电压为 80 V; 沉积时间单位面积为 0.2 min/cm	室温; Si <sub>3</sub> N₄球; 压力为 10 N; 速度为 10 mm/s; 时间为 600 s	0.14~0.16	2.89× 10 <sup>-5</sup> mm <sup>3</sup> /(N·m)	磨粒磨损 疲劳磨损	[46]
W18Cr4V	Cu/BN	电极直径为 1.6~2.5 mm; 电极厚度为 5 mm; 沉积时间为 15 min	室温; GCr15 钢球; 载荷为 500 g; 速度为 400 r/min; 时间为 20 min	0.1		磨粒磨损	[47]
45 钢	硬质合金+ 石墨	<ul> <li>硬质合金</li> <li>电极直径为 3 mm;</li> <li>电极厚度为 10 mm;</li> <li>电极厚度为 250 r/min;</li> <li>沉积时间为 6 min;</li> <li>脉冲电压为 50 V;</li> <li>脉冲宽度为 40 μS;</li> <li>放电频率为 40 Hz;</li> <li>石墨</li> <li>电极直径为 3 mm;</li> <li>电极厚度为 10 mm;</li> <li>电极厚度为 10 mm;</li> <li>电极速率为 250 r/min;</li> <li>沉积时间为 6 min;</li> <li>脉冲电压为 60 V;</li> <li>脉冲宽度为 40 μS;</li> <li>放电频率为 40 Hz</li> </ul>	室温; 304 不锈钢球; 往复距离为 6 mm; 时间为 20 min	低至 0.213	降至 0.29 mg	黏着磨损	[48]
45 钢	条状硬质 合金+石墨	放电功率为 60 μF; 频率为 40 Hz; 电极速率为 140 r/min	室温; GCr15 钢球; 载荷为 10 N; 往复距离为 5 mm; 时间为 20 min	低至 0.247	最低约 0.1 mg	磨粒磨损 黏着磨损	[49]

## 3 结语

电火花沉积作为现代表面技术方向的一项重要 技术,在航天、航空、军工、机械等领域中得到了广 泛的应用,尤其是对钢制易磨损构件的表面强化与修 复展现了广阔的应用前景。凡是导电的电极材料均可 通过火花放电的作用沉积到钢构件的表面,极大地提 高其表面的摩擦学性能。为更好地满足现代化工业的 发展需要,可以从以下几方面对电火花沉积耐磨涂层 进行新发展和新突破:

 1)涂层形成机理的探索。电火花沉积技术涉及 了材料表面与界面技术、等离子物理、材料热力学等 多学科交叉。在沉积过程中,电极和基体之间电火花 放电状态、涂层与基体之间的内在反应机理、涂层微 观结构和性能的影响规律等,目前尚未建立完备的理 论体系,需进行进一步的探索。

2)新型涂层材料的开发。传统材料涂层已无法 满足复杂苛刻工况的服役要求,需要进一步探索各种 高性能涂层材料,制造出具有特定功能梯度(如导热 性、电导率等)的复合材料。如高熵合金、非晶合金 及多元复合材料涂层等,通过材料成分优化设计,实 现基体与涂层材料之间的最佳冶金匹配性,获得性能 优异的沉积涂层。

3)沉积工艺参数的优化。电火花沉积过程中, 电参数(沉积电压、沉积电容、沉积频率等)及电极 直径、保护介质等均是影响涂层质量的要素,通过进 一步优化工艺参数,是获得高质量耐磨涂层的关键。 同时,通过调整沉积参数,制造出具有梯度变化的涂 层,以满足不同深度或不同部位的性能需求。

4)大面积低成本的应用。目前 ESD 主要用于小 面积或局部修复,扩展到大面积沉积将大大拓展其应 用范围。与此同时,若能降低 ESD 设备和电极材料 的成本,必将使得技术更广泛地应用于工业生产中。

5) 沉积自动化的实现。传统手工电火花沉积涂 层质量受制于操作技术熟练度,因此通过引入计算机 控制系统,可以更精确地控制电流、电压、脉冲频率 和脉冲宽度,提高沉积过程的可重复性和涂层质量的 稳定性。同时,引入机器人可以实现自动化操作,提 高生产效率,减少人工误差,并能够处理复杂形状的 基体,从而实现工艺参数与沉积路径的精确控制,保 证沉积过程的稳定性与涂层的均匀性。

#### 参考文献:

- [1] 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 H, WANG H T, GAO L, et al. Research Status and Development of Electro-Spark Deposition Technology[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(20): 25-29.
- [2] 陈钟燮. 电火花表面强化工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
   CHEN Z X. Electric Spark Surface Strengthening Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
- [3] 梁怀南,刘志奇,林乃明,等. 电火花沉积技术及其表面性能的研究进展[J]. 热加工工艺, 2021, 50(12): 1-7.
   LIANG H N, LIU Z Q, LIN N M, et al. Research Progress of Electrospark Deposition Technology and Its Surface Properties[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(12):

1-7.

- [4] 陈长军. 电火花表面加工新技术[M]. 北京: 机械工业 出版社, 2011.
   CHEN C J. New Surface Processing Technology of Electrospark[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [5] 张建斌,朱程. 电火花沉积技术研究与应用进展[J]. 材料导报, 2023, 37(21): 221-234.
   ZHANG J B, ZHU C. Progress in Research and Application of Electro-Spark Deposition Technology[J]. Materials Reports, 2023, 37(21): 221-234.
- [6] CALDERON VELASCO S, LOPEZ V, ALMEIDA ALVES C F, et al. Structural and Electrochemical Characterization of Zr-C-N-Ag Coatings Deposited by DC Dual Magnetron Sputtering[J]. Corrosion Science, 2014, 80: 229-236.
- [7] WANG X R, WANG Z Q, HE P, et al. Microstructure and Wear Properties of CuNiSiTiZr High-Entropy Alloy Coatings on TC11 Titanium Alloy Produced by Electrospark—Computer Numerical Control Deposition Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 156-161.
- [8] 高玉新,易剑,方淳.高速钢钻头电火花沉积 Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的组织及切削性能[J].表面技术,2014,43(5):29-32.
  GAO Y X, YI J, FANG C. Microstructure and Cutting Performance of Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coating on High-Speed Steel Drill Produced by Electro-Spark Deposition[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 29-32.
- [9] ENRIQUE P D, JIAO Z, ZHOU N Y, et al. Dendritic Coarsening Model for Rapid Solidification of Ni- Superalloy via Electrospark Deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 138-143.
- [10] 王小荣. 高能微弧火花数控沉积 Ti-Co-Cu-Fe-Ni-Cr 高 熵合金涂层研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. WANG X R. Study on High Entropy Ti-Co-Cu-Fe-Ni-Cr Alloy Coating Deposited by High Energy Micro-Arc Spark Numerical Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [11] 张怡,陈志国,魏祥,等. 电火花沉积碳化铬基金属陶 瓷涂层的微观组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 601-607.
  ZHANG Y, CHEN Z G, WEI X, et al. Microstructure and Properties of Chromium Carbide Based Metal-Ceramic Coatings Prepared by Electro-Spark Deposition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(2): 601-607.
- [12] 王建升,唐明奇,吕瑞丽,等.铸钢轧辊亚微米 WC-4Co电火花沉积涂层高温性能[J].焊接学报,2017, 38(7):49-53.
  WANG J S, TANG M Q, LYU R L, et al. High Temperature Properties of Micro-Crystalline WC-4Co Alloys Deposited on Cast Steel Roll by Electro-Spark Deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 49-53.
- [13] 徐安阳, 王晓明, 朱胜, 等. 集束电极电火花合成沉积

XU A Y, WANG X M, ZHU S, et al. Microstructure and Wear Resistance of TiN Coating Synthesized by Electric Spark Deposition with Cluster Electrode[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 115-122.

- [14] 胡士廉, 吕彦, 胡俊, 等. 高强韧厚壁炮钢材料的发展[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(6): 108-112.
  HU S L, LYU Y, HU J, et al. Progress in High Strength and Toughness of Steel Material for Thick-Wall Cannon[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(6): 108-112.
- [15] 金浩,李德元,郭策安,等. PCrNi<sub>3</sub>Mo 钢表面磁控溅射 CrN 涂层工艺优化及性能[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(2): 132-138.
  JIN H, LI D Y, GUO C A, et al. Process Optimization and Properties of CrN Coating on PCrNi<sub>3</sub>Mo Steel by Magnetron Sputtering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(2): 132-138.
- [16] LIU J, WANG R J, QIAN Y Y. The Formation of a Single-Pulse Electrospark Deposition Spot[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7): 2433-2437.
- [17] 苏全宁. 电火花沉积熔滴过渡与沉积层形成过程仿真研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2022.
   SU Q N. Research on Simulation of Droplet Transfer and Coating Formation Process in Electro-spark Deposition[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2022.
- [18] LIANG Z, ZHANG H, WANG S S, et al. Comparative Research of Electrospark Deposited Tungsten Alloy Coating in Two Kinds of Gas[J]. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2021, 16(3): 793-800.
- [19] WANG Z, ZHU G, LU F, et al. Friction and Wear Performance of an Electrospark-Deposited Ta Coating on CrNi3MoVA Steel[J]. Material in Tehnology, 2024, 58(1): 17-23.
- [20] 栾程群, 王文权, 邝厘祥. H13 钢表面电火花沉积 Nb 涂 层组织与性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 285-290. LUAN C Q, WANG W Q, KUANG L X. Microstructures and Properties of Niobium Coating on H13 Steel Substrate by Electrospark Deposition[J]. Surface Technology, 2019, 48(1): 285-290.
- [21] WANG W Q, DU M, ZHANG X G, et al. Preparation and Properties of Mo Coating on H13 Steel by Electro Spark Deposition Process[J]. Materials, 2021, 14(13): 3700.
- [22] 张贺, 李冬敏, 梁振刚. 炮钢表面电火花沉积钨合金涂 层的摩擦磨损性能[J]. 沈阳理工大学学报, 2021, 40(2): 44-48.
  ZHANG H, LI D M, LIANG Z G. Friction and Wear Performance of Electrospark Depositing Tungsten Alloy Coating on Gun Steel[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2021, 40(2): 44-48.
  [23] 杨君宝, 郭秋萍, 赵博远, 等. CrNi<sub>3</sub>MoVA 钢表面电火
- [23] 杨君宝, 郭秋泙, 赵博远, 等. CrNi<sub>3</sub>MoVA 钢表面电火 花沉积 W-Ni-Fe-Co涂层的摩擦磨损性能[J]. 材料导报, 2017, 31(12): 35-38.

YANG J B, GUO Q P, ZHAO B Y, et al. Friction and Wear Performance of W-Ni-Fe-Co Coating Electrospark Deposited on CrNi<sub>3</sub>MoVA Steel[J]. Materials Review, 2017, 31(12): 35-38.

- [24] KREIVAITIS R, AUDRIUS Ž, KUPČINSKAS A, et al. A Study of Tribological Behaviour of W-Co and Cu Electro-Spark Alloyed Layers under Lubricated Sliding Conditions[J]. Tribology International, 2016, 103: 236-242.
- [25] 杨君宝, 王远超, 曲家惠, 等. CrNi<sub>3</sub>MoVA 钢表面电火 花沉积 NiCrAIY 涂层的高速摩擦磨损性能[J]. 材料导 报, 2017, 31(2): 51-54. YANG J B, WANG Y C, QU J H, et al. High-Speed Friction and Wear Performance of NiCrAIY Coating Electrospark Deposited on CrNi<sub>3</sub>MoVA Steel[J]. Materials Review, 2017, 31(2): 51-54.
- [26] 周永权,周朝霞,姜涛,等. 镍基合金 Deloro60 电火花 沉积层摩擦学性能研究[J]. 矿山机械, 2015, 43(2): 125-129.
   ZHOU Y Q, ZHOU Z X, JIANG T, et al. Study on Abra-

sion Characteristics of Ni-Based Alloy Deloro60 Electro-Spark Deposition Layer[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(2): 125-129.

- [27] KAYALI Y, YALÇIN Y, TALAŞ Ş. Electro-Spark Deposition Coating of AISI 4140 and AISI 1040 Steels by WC, Ni and M42 Electrodes and Their Wear Properties[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(21): 11558-11568.
- [28] 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(S1): 342-346.

TIAN H L, ZHANG X M, JIN G, et al. Research Status and Prospect of High Entropy Alloy Coating[J]. Materials Reports, 2021, 35(S1): 342-346.

- [29] GUO C, ZHAO Z, LU F, et al. Performance of High-Speed Friction and Wear of Electrospark Deposited Alcocrfeni High-Entropy Alloy Coating[J]. Dig J Nanomater Biostruct, 2018, 13(4): 931-939.
- [30] 郭策安,赵宗科,赵爽,等. 电火花沉积 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的高速摩擦磨损性能[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 1462-1465.
  GUO C A, ZHAO Z K, ZHAO S, et al. High-Speed Friction and Wear Performance of Electrospark Deposited AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy Coating[J]. Materials Reports, 2019, 33(9): 1462-1465.
- [31] CHANDRAKANT, REDDY N S, PANIGRAHI B B. Electro Spark Coating of AlCoCrFeNi High Entropy Alloy on AISI410 Stainless Steel[J]. Materials Letters, 2021, 304: 130580.
- [32] YANG H L, CHEN X M, et al. Influence of Temperature on Tribological Behavior of AlCoCrFeNi Coatings Prepared by Electrospark Deposition[J]. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2023, 18(1): 145-156.
- [33] 张建斌, 南志远, 朱程, 等. AlCrNiFeTi 高熵合金涂层 的电火花沉积制备与摩擦磨损性能[J]. 材料工程,

2024, 52(1): 183-192.

ZHANG J B, NAN Z Y, ZHU C, et al. Preparation and Frictional Wear Property of AlCrNiFeTi High-Entropy Alloy Coatings by Electric Spark Deposition[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(1): 183-192.

- [34] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. 物理学进展, 2013, 33(5): 177-351.
   WANG W H. The Nature and Properties of Amorphous Matter[J]. Progress in Physics, 2013, 33(5): 177-351.
- [35] 何艳玲, 王彦芳, 斯佳佳, 等. 电火花沉积 Invar/非晶 复合涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(11): 238-244.
  HE Y L, WANG Y F, SI J J, et al. Microstructure and

Properties of Electro-Spark Deposited Invar/Amorphous Composite Coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(11): 238-244.

- [36] 魏祥,陈志国,钟掘,等. 电火花沉积制备 Fe-8B-Mo 非晶涂层的可行性[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 16-23.
  WEI X, CHEN Z G, ZHONG J, et al. Feasibility on Preparation of Fe-8B-Mo Amorphous Coatings by Electro-Spark Deposition[J]. China Surface Engineering,
- [37] BURKOV A A, KRUTIKOVA V O. Deposition of Amorphous Hardening Coatings by Electrospark Treatment in a Mixture of Crystalline Granules[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020, 61(1): 132-141.

2016, 29(5): 16-23.

- [38] KORKMAZ K. Investigation and Characterization of Electrospark Deposited Chromium Carbide-Based Coating on the Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 272: 1-7.
- [39] BURKOV A, KULIK M. Hardening of FeCrMoWCBSi Amorphous Electrospark Coatings with Tungsten Carbide[J]. Letters on Materials, 2021, 11(3): 304-308.
- [40] 宋增金. 电火花沉积 Fe 基非晶复合涂层的组织结构及 性能[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2019.
  SONG Z J. Microstructure and Properties of Fe-Based Amorphous Composite Coating Deposited by EDM[D].
  Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2019.
- [41] ZHANG R Z, LI J R, YAN D K, et al. Mechanical Properties of WC-8Co Wear-Resistant Coating on Pump Im-

pellers Surface by Electro- Spark[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(7): 1587-1590.

- [42] GUO C, KONG Z, HAO S. Performance of Friction and Wear of Electro Spark Deposited Ni-MoS<sub>2</sub> Coating[J]. Chalcogenide Letters, 2019, 16(7): 309-315.
- [43] YUEA M, ZHAO W, et al. Tribological Properties of Electrospark Depositing Ni-WS<sub>2</sub> Self-Lubricating Coating[J]. Chalcogenide Letters, 2021, 18(10): 557-564.
- [44] LIU T X, GUO C A, et al. Influence of Deposition Voltage on Tribological Properties of W-WS<sub>2</sub> Coatings Deposited by Electrospark Deposition[J]. Chalcogenide Letters, 2023, 20(10): 741-749.
- [45] CAO T K, LEI S T, ZHANG M. The Friction and Wear Behavior of Cu/Cu-MoS<sub>2</sub> Self-Lubricating Coating Prepared by Electrospark Deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 270: 24-32.
- [46] 孔凡亮. 炮钢表面沉积自润滑涂层的摩擦磨损机理研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
   KONG F L. Study on Friction and Wear Mechanism of Self-Lubricating Coating Deposited on Gun Steel Surface[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2021.
- [47] 单春声. 基于电火花沉积自润滑涂层的工艺参数和性能的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
  SHAN C S. Study on Process Parameters and Properties of Self-Lubricating Coating Based on EDM Deposition[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2014.
- [48] 吕壮,曹同坤,张伟.底层硬质合金间隔分布自润滑涂 层的制备及其摩擦磨损性能研究[J]. 工具技术, 2023, 57(10): 59-62.
  LYU Z, CAO T K, ZHANG W. Preparation and Friction Loss Properties of Self-Lubricating Coatings with Bottom Cemented Carbide Spacing Distribution[J]. Tool Engineering, 2023, 57(10): 59-62.
- [49] 谈庆瑶,曹同坤,徐英涛.电火花间隔沉积石墨-硬质 合金自润滑涂层及其摩擦学性能[J].表面技术,2021, 50(6):265-271.
   TAN Q Y, CAO T K, XU Y T. Tribological Properties of

Self-Lubricating Coating Prepared by ESD with Graphite and Cemented Carbide Alternately Deposited on Substrate Surface[J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 265-271.