

等离子喷涂银基涂层性能研究

胡宇^{1,2,3}, 高峰^{1,2,3}, 万伟伟^{1,2,3}, 国俊丰^{1,2,3}

(1、北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2、北矿新材科技有限公司, 北京 102206;
3、北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心, 北京 102206)

摘要: 银基涂层作为一种减磨润滑涂层, 具有良好的润滑性。本文采用大气等离子热喷涂方法在不锈钢基体上制备了银基涂层, 并采用扫描电镜、灰度法、拉伸法、摩擦磨损等方法对涂层的微观结构、孔隙率、结合强度、硬度、摩擦系数、磨损量、耐蚀性能进行了研究。试验表明, 在适当的喷涂工艺下制备的银基涂层组织致密, 孔隙率低至 0.55%, 结合强度达 50MPa 以上, 摩擦系数低至 0.1683, 耐腐蚀性能优异。

关键词: 银基; 热喷涂; 孔隙率; 结合强度

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127 (2018) 09-0002-04

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2018.03.002

Study on the process of silver based coating by plasma spraying

HU Yu^{1,2,3}, GAO Feng^{1,2,3}, WAN Weiwei^{1,2,3}, GUO Junfeng^{1,2,3}

(1、BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;
2、BGRIMM Advanced Materials Science & Technology Co., Ltd, Beijing 102206; 3、Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry parts, Beijing 102206)

Abstract : As a kind of antifriction lubrication coating, silver based coating has good lubrication. The silver based coating is prepared on the stainless steel substrate by atmospheric plasma thermal spraying. This paper studies on the microstructure, porosity rate, bonding strength, hardness, wear resistance and corrosion resistance of the coating. The test shows that the microstructure of the silver based coating prepared under the suitable spraying process is compact. The porosity rate is as low as 0.55%, the bonding strength is above 50MPa, the coefficient of friction is as low as 0.1683, the corrosion resistance is excellent.

Key words: Silver based coating; Thermal spraying; Porosity rate; Bonding strength

0 引言

润滑可降低摩擦系数, 减少磨损。随着现代工业装备的运行工况越来越苛刻以及不断提升的高精度、高可靠性和长寿命方面的要求, 对突破原有材料性能极限的高性能润滑材料的需求也越

来越迫切^[1,2]。低摩擦系数的固体润滑涂层, 由于受热和摩擦双重作用, 固体润滑剂在相对滑动表面形成一层较为稳定的润滑膜, 并靠本身的“自消耗”来不断补充和提供固体润滑剂, 从而修复被撕裂的润滑膜。银基涂层作为一种减磨润滑涂层, 具有韧性好, 抗中、低温粘结性好的特点^[3-5],

常用于航天发动机封严环、轴承衬套等机械部件减磨润滑用。

目前对银基涂层的研究较少,由于银基材料易挥发的特性,等离子喷涂工艺较难控制^[6,7],且孔隙率高,涂层结合强度较低。本文采用大气等离子喷涂方法制备银基涂层,并对涂层的微观结构、孔隙率、结合强度、硬度、摩擦系数、磨损量、耐蚀性能进行了研究。

1 试验过程与方法

1.1 原材料的选择

本试验选用北矿新材料科技有限公司真空气雾化制备的银基粉末(-140+325目),氧含量 $\leq 100\text{ppm}$,以及胶粘团聚法制备的KF-6铝包镍粉(-140+325目),基材为314不锈钢。

1.2 涂层制备及喷涂参数

采用大气等离子喷涂方法制备底层和面层,均在GTV F6等离子喷涂系统上进行,喷涂参数如表1。

表 1 等离子喷涂银基工艺参数

Table 1 Plasma spraying parameters of Silver based powder

工艺	氩气 / $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	氢气 / $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	载气 / $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	送粉速率 / $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	喷距 /mm	功率 /kW
面层	50	10	5	60	115	42
底层	50	10	5	6	110	40

1.3 检测方法

采用Quanta 600扫描电子显微镜测试涂层的形貌,灰度法测量涂层孔隙率,采用402MVA显微硬度计测试涂层的显微硬度。涂层结合强度采用粘结拉伸法检测。摩擦磨损使用布鲁克UMT-TriboLab摩擦磨损试验机进行实验,摩擦形式为销-平面往复干滑动摩擦。试验载荷1N,相对线速度5mm/s,磨损时间300s;使用精确度为0.0001g的AEL-200型电子天平进行材料的失重称量。极化曲线测试使用PAR273A电化学工作站,采用三电极体系,工作电极为涂层样品,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,腐蚀介质为3.5%的NaCl溶液,试验温度20。

2 试验结果与讨论

2.1 涂层微观组织形貌

采用表1喷涂工艺制备了银基涂层,对涂层进行剖面处理后采用扫描电镜观察剖面形貌及孔隙率检测。如图1(a)所示,涂层无肉眼可见裂纹,涂层与基体、底层与面层均结合良好,涂层均匀,未见明显孔隙。如图1(b)采用扫描电镜灰度法测得涂层孔隙率为0.55%,孔隙率低。

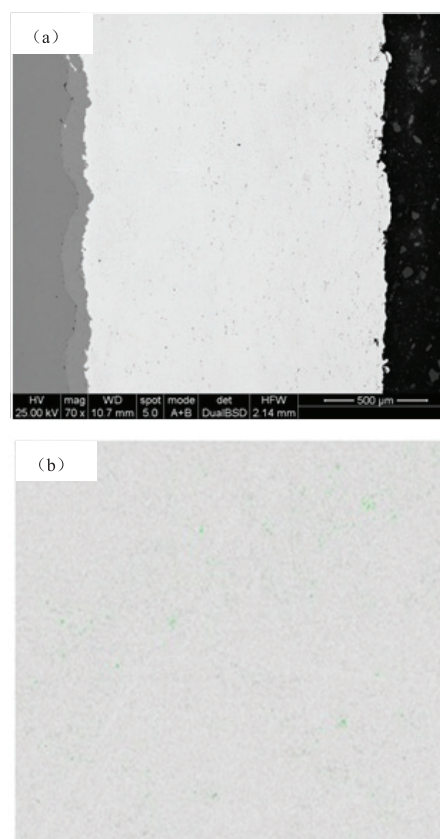


图 1 涂层形貌

Fig.1 Morphology of coating

2.2 涂层的结合强度、显微硬度

表 2 为采用上述工艺制备涂层的结合强度，基体与底层、底层与面层结合较好，结合强度高

达 56.32MPa。如若不采用打底层，涂层结合强度仅为 32.47MPa，通过增加打底层，可显著提高涂层的结合强度。

表 2 涂层的结合强度 (MPa)

Table 2 Bond strength of coatings(MPa)

编号	1	2	3	平均值
结合强度 /MPa	56.22	55.56	57.18	56.32

表 3 为涂层的剖面显微硬度($HV_{0.1}$)测试结果，涂层剖面，1-5 号点沿从上表面逐渐向与底层结合处，由结果可知涂层上、中、下位置硬度较为集中，

区别较小，与扫描电镜照片中面层均匀相吻合，显微硬度平均值为 $65.15HV_{0.1}$ 。

表 3 涂层的硬度 ($HV_{0.1}$)

Table 3 Hardness of coatings($HV_{0.1}$)

1#	2#	3#	4#	5#	平均值
63.37	64.00	67.78	64.53	66.07	65.15

2.3 摩擦磨损试验

银呈面心立方的晶体结构，具有较低的临界剪切应力，可发生晶晶间滑移，具有优异的扩散性能及热化学稳定性，以银为基础制备的涂层寄希望延续其减磨润滑的优势，而摩擦系数是检验减磨润滑效果好坏的关键指标。摩擦系数越小，代表减磨润滑效果越优异。本文工艺制备的涂层摩擦系数，仅有 0.1683 (17Co-WC 在近似条件下摩擦系数为 $0.5460^{[8]}$)，摩擦系数较低，实验条件下的磨损量仅为 0.61mg。图 2 为摩擦系数随时间变化曲线，由图 2 可知，在摩擦伊始(磨合期)，摩擦系数最高，随着时间的推移，摩擦系数逐渐降低，逐步进入稳态磨损，摩擦系数趋于稳定。对比 17Co-WC 摩擦磨损曲线^[8]，其磨合期摩擦系数最低，随着磨损进行，摩擦系数逐渐升高，达到稳定磨损期摩擦系数变化不大。银基涂层具有较低的摩擦系数，且摩擦系数曲线随时间减少，说明该涂层具有较好的减磨润滑效果。

如图 3(a)所示，摩擦磨损处银基涂层发生塑性变形，涂层整体保存较好，未见明显涂层剥落现象。放大摩擦区域，如图 3(b)所示，磨损

区域涂层平滑、无明显剥落，沿着摩擦方向产生少量犁沟。这主要因为该涂层硬度低，韧性较好，随着摩擦的不断进行，硬度较高的对磨件使涂层发生塑性变形，与对磨件逐渐匹配，极少量被摩擦剥落的涂层逐渐填平磨损微观区域，试样摩擦磨损区域电镜照片区犁沟少且浅，因此系统的摩擦系数才不断降低，随着时间推移逐步形成稳态平衡，摩擦系数不再降低，趋于稳定。

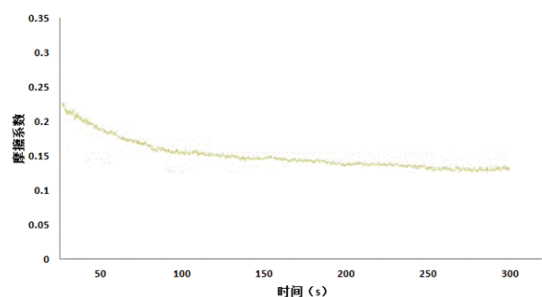


图 2 摩擦系数随时间变化曲线

Fig.2 The curve of friction coefficient with time

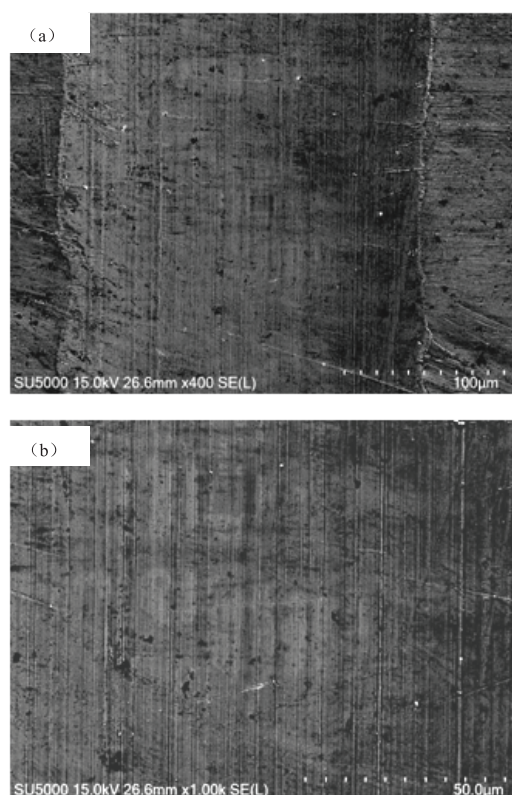


图 3 试样磨损表面形貌

Fig. 3 Wear morphology of different coatings

2.4 电化学性能对比

电化学性能是反应涂层抗腐蚀性能的一项重要指标, 腐蚀速率数值越小说明耐腐蚀性能越优异。由图 4 可知, 在阳极极化过程中, 曲线首先进入活化区, 随后进入钝化区, 腐蚀速率为 $1.874 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$, 在金属材料耐蚀性的 10 级标准中, 该数据属于很耐蚀。

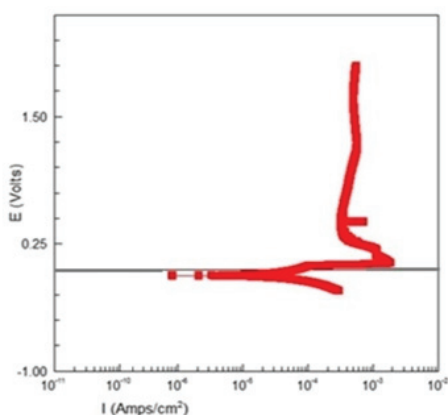


图 4 涂层极化曲线

Fig.4 Polarization curve of coatings

3 结论

(1) 本文采用铝包镍打底, 在 GTV F6 等离子喷涂系统上采用以下工艺参数: 氩气: 50L/min, 氢气: 10L/min, 载气: 5L/min, 送粉速率: 60g/min, 喷距 115mm, 功率 42kw, 制备较优异的银基涂层, 该涂层孔隙率低至 0.55%, 结合强度高达 56.32Mpa, 硬度 65.15HV_{0.10}。

(2) 银基涂层具有较好的减磨润滑性能, 磨合期摩擦系数较高, 进入稳定磨损期后, 摩擦系数显著下降, 摩擦系数低至 0.1683, 实验条件下磨损量仅 0.61mg。

(3) 银基涂层腐蚀速率为 $1.874 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$, 耐蚀性能优异。

参考文献

- [1] 胡志彪, 李贺军, 付前刚, 等. 低摩擦系数固体润滑涂层研究进展 [J]. 材料工程, 2006 (3): 60-63.
- [2] 万宏启, 许涛, 王军, 等. 长寿命黏结固体润滑涂层的制备及其摩擦学性能研究 [J]. 润滑与密封, 2014, 39 (7): 1-4.
- [3] 陈俊寰, 夏延秋, 曹正锋. 铜基银镀层的导电性及摩擦磨损性能 [J]. 材料保护, 2016, 49 (10): 1-4.
- [4] J Chen, Y Xia, Y Hu, et al. Tribological Performance and Conductive Capacity of Ag Coating under Boundary Lubrication [J]. Tribology International, 2017, 110: 161-172.
- [5] XT Yang, ZP Wang, Y Lu, et al. Boundary lubrication tribological property of high-aluminium copper alloy coarse powders coating made by supersonic plasma spraying [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22 (11): 3100-3106.
- [6] 章海维, 施炳航, 罗旭东, 等. 等离子喷涂铝青铜涂层制备工艺研究 [J]. 冶金丛刊, 2015, (4): 4-8.
- [7] 鲍君峰, 马尧, 胡宇. 不同制粉工艺对 CuNiIn 粉末及涂层组织性能的影响研究 [J]. 热喷涂技术, 2013, 5(2): 52-55.
- [8] 白智辉, 高峰, 王大峰, 等. 不同颗粒度碳化钨的 WC-17Co 等离子涂层组织及摩擦学特性研究 [J]. 热喷涂技术, 2017, 7(3): 48-53.