

等离子喷涂与等离子喷焊对活塞杆表面性能的影响分析

陈芳¹, 宛利鹏², 郑路路¹, 徐凯歌²

(1. 河南工学院 机械工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南工学院 材料工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 为探究等离子喷涂与等离子喷焊两种不同技术涂层的性能, 用两种技术在活塞杆基材表面分别制备了 Ni 基 WC 复合涂层, 并采用场发射扫描电镜、光学显微镜及摩擦磨损试验机等设备, 系统对比分析了两种涂层的微观组织结构、硬度与耐磨性。结果表明: 两种涂层与基体界面结合良好, 均未发现气孔、裂纹等缺陷; 其中, 喷涂涂层界面为机械结合, 而喷焊涂层界面为冶金结合。喷涂涂层中 WC 颗粒呈球形分布, 喷焊涂层中 WC 颗粒呈多棱形貌, 同时在喷焊涂层还观察到 $(\text{Cr}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{C}_2$ 、 $(\text{Cr}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{C}_3$ 两种硬质相及二次碳化物。喷涂涂层中的 WC 颗粒的维氏硬度较喷焊涂层中的高 12.7 %, 摩擦系数稳定值分别为 0.33 和 0.53。相比之下, 等离子喷涂涂层具有更好的耐磨性能。

关键词: 等离子喷涂; 等离子喷焊; 涂层; 微观组织结构; 耐磨性

中图分类号: GT146

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2025)05-0001-05

0 引言

随着工程机械不断向高压化发展, 液压系统关键零部件(如柱塞泵、伺服阀、活塞杆等)所面临的服役环境也日趋严峻。活塞杆作为液压执行元件的核心组成部分, 其可靠性直接影响整个液压系统的运行安全与效率。研究表明, 活塞杆的失效多源于表面磨损, 此类故障不仅造成显著的经济损失, 还可能引发人员伤亡^[1]。因此, 在活塞杆表面施加高性能涂层已成为延长其使用寿命的重要方式。目前表面涂层制备技术主要包括手工电弧焊、热喷涂和激光熔覆等。而手工电弧焊工作效率低, 涂层质量难以保证; 热喷涂依靠高速粒子沉积形成涂层, 存在层间结合强度较弱的问题^[2]; 激光熔覆虽可制备组织致密涂层、性能良好的涂层, 但设备价格达 200 万元/台, 成本过高^[3,4]。

相比于以上技术, 等离子喷涂与等离子喷焊技术具有自动化程度高、工艺过程简单和成本较低等优点。研究表明, 该技术在耐磨改性领域应用广泛, 已受到研究者的持续关注^[5-7]。本文分别采用等离子喷涂与等离子喷焊技术在活塞杆基材表面制备 Ni 基 WC 复合涂层, 并分别对两种涂层的微观组织结构、硬度和耐磨性进行测试和表征, 为液压系统关键零部件表面涂层技术研究提供理论依据与技术支撑。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

活塞杆基材为 Q235 低碳钢, 化学成分(质量分数, %)为: 0.18C、0.44Mn、0.15Si、0.004S、0.008P, 余量为 Fe。喷涂和喷焊所用粉末为高纯 Ni 基 WC 混合粉末, 主要化学成分如表 1 示。

表 1 混合粉末的化学成分(质量分数, %)

WC	Ni	Fe	Cr	Si	Al	Co	Mo	Mn	Cu
24.9	48.5	10.3	12.6	1.20	0.74	0.65	0.28	0.50	0.24

收稿日期: 2025-08-06

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(232102241027); 河南省高等学校重点科研项目(25B480008)

第一作者简介: 陈芳(1983—), 女, 河南新乡人, 副教授, 主要从事装备设计和金属零件表面改性研究。

1.2 试验工艺

使用等离子喷涂仪在活塞杆表面进行喷涂, 具体喷涂工艺参数为: 电流 380 A, 电压 58 V, 保护气体高纯氩气纯度 99.99 %、流量 32 L/h, 送粉压力 0.38 MPa, 喷涂距离 115 mm; 使用粉末等离子喷焊对活塞杆表面进行熔覆处理, 具体熔覆工艺参数为: 电流 150 A, 电压 25 V, 喷枪摆动速度 920 mm/min, 摆动宽度 25 mm, 送粉气体高纯氩气纯度 99.99 %、流量 380 L/min, 保护气体高纯氩气纯度 99.99 %、流量 425 L/min。

1.3 试样制备与表征

采用电火花线切割方法对工件涂层截取试样并进行打磨、抛光和腐蚀。采用 Olympus PME-3 光学显微镜 (OM) 观察涂层微观组织结构, 配合 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件对颗粒尺寸进行定量统计; 采用 JSM-5610LV 扫描电子显微镜 (SEM) 观察磨损前后涂层表面形貌, 采用设备自带的能谱仪 (EDS) 进行微区成分分析; 采用 HR150A 型洛氏硬度计 (HRA 标尺) 和 HVS-1000 型显微维氏硬度计测试涂层硬度, 维氏硬度测试条件为: 载荷 100 g, 保载时间 10 s, 每个试样测试 5 个点取平均值。

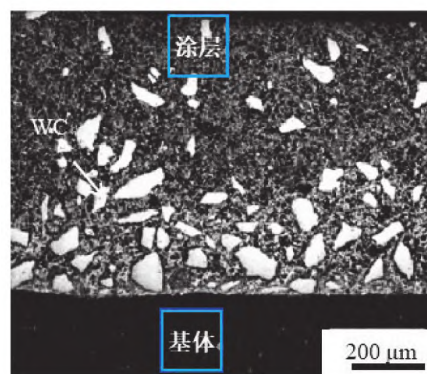
采用 MMW-1A 型砂带式摩擦磨损试验机进行耐磨性能测试, 载荷 150 g, 转速 1250 r/min; 采用 CSM Instruments 摩擦磨损测试仪进行往复摩擦磨损试验, 选用直径 10 mm 的 WC-6%Co 球作为对磨副, 法向载荷 6 N, 摩擦距离 120 m, 滑动速度 6 cm/s, 实时记录摩擦系数曲线。

2 试验结果与分析

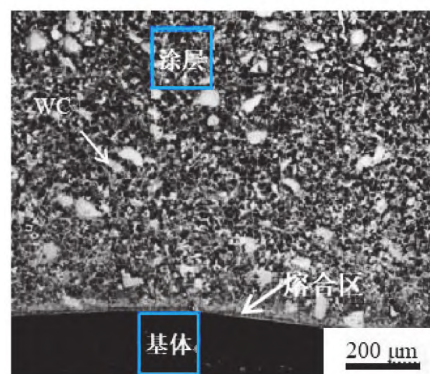
图 1 为等离子喷涂与等离子喷焊涂层截面金相微观组织结构图。由图可知, 两种工艺下涂层与基体均结合良好, 界面处无夹杂、气孔、微裂纹等缺陷存在。在等离子喷涂的涂层中, 可以观察到显著的大尺寸 WC 颗粒, 其主要聚集在界面附近, 并出现“沉底”现象^[8], 呈现出机械结合特征, 如图 1(a) 所示; 而在等离子喷焊涂层中 WC 颗粒均匀分布在界面附近, 未观察到明显聚集现象。此外, 在界面处可见清晰的熔合区, 呈现出冶金结合特征, 如图 1(b) 所示。

图 2 为两种涂层区域的 SEM 显微形貌。由图可知, 等离子喷涂涂层中的 WC 颗粒形状完整, 形貌清晰可见, 未发生明显溶解, 其周围可见大量形状不规则的黑色细小颗粒, 如图 2(a) 中箭头所示; 相比之下, 等离子喷焊涂层中的 WC 颗粒形状不完整, 呈多棱角形貌, 这是由等离子喷焊过程中的高温导致了

WC 颗粒分解。该涂层中还分布有黑色颗粒, 但其数量明显少于喷涂涂层, 如图 2(b) 中白色箭头所示。此外, 在喷焊涂层中还分布大量不同形貌的白色或者灰色颗粒, 经分析判定为二次碳化物, 如图 2(b) 中红色箭头所示。



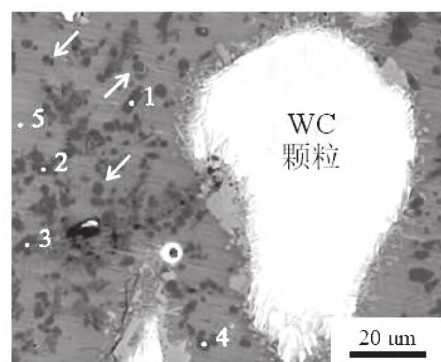
(a)



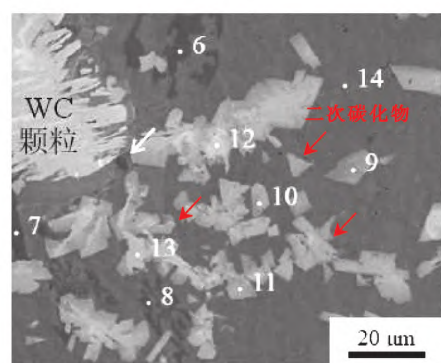
(b)

图 1 等离子喷涂 (a) 与等离子喷焊涂 (b) 涂层截面金相微观组织结构图

表 2 列出了图 2 中不同位置处黑色小颗粒的能谱分析结果。由表可知, 喷涂涂层中的黑色小颗粒 (1,2,3,4) 中的 W 元素含量均低于 1.8 %, 位置 1、2 和 3 处的 Cr+Ni+Fe 与 C 元素的原子比约等于 7 : 3, 位置 4 处 Cr+Ni+Fe 与 C 元素的原子比约等于 3 : 2。结合文献^[9]可推断, 位置 1、2 和 3 处小颗粒为 $(Cr,Ni,Fe)_7C_3$ 相, 而位置 4 处颗粒为 $(Cr,Ni,Fe)_3C_2$ 相, 这些颗粒相是 Cr_3C_2 中部分 Cr 原子被 Ni 和 Fe 原子置换所形成; 位置 5 处的灰色基体中 Ni 原子含量较高 (64.9 %)。对于喷焊涂层, 位置 6 和 7 处的成分比接近于 $(Cr,Ni,Fe)_3C_2$ 相, 位置 8 处成分接近于 $(Cr,Ni,Fe)_7C_3$ 相; 位置 9—13 处的二次碳化物中 W 元素含量均较高, 尤其在位置 12 和 13 处, W、C 含量显著高于其他位置, 该现象说明喷焊过程中高温导致了 WC 颗粒发生分解与元素扩散^[10]。



(a)



(b)

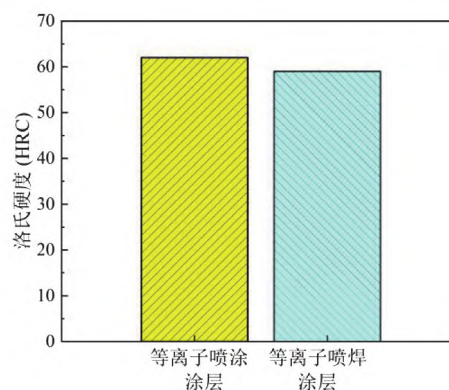
图2 等离子喷涂 (a) 等离子喷焊 (b) 涂层表面
SEM 显微形貌

表2 表面涂层不同位置处能谱分析结果 (at.%)

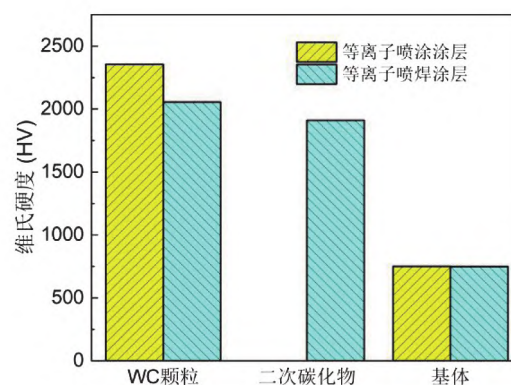
	位置	C	Cr	Ni	Fe	W	Si
等离子 喷涂涂层	1	30.7	53.7	7.9	7.7	—	—
	2	27.2	57.1	8.2	6.4	1.1	—
	3	27.0	53.8	8.3	9.1	1.8	—
	4	38.0	52.5	4.5	3.4	1.6	—
	5	10.6	7.9	64.9	11.5	1.3	3.7
	6	37.5	53.6	3.2	3.4	2.3	—
等离子 喷焊涂层	7	38.5	50.4	3.2	3.4	2.3	—
	8	29.4	53.2	9.2	6.4	1.8	—
	9	29.0	18.4	25.8	4.8	22.0	—
	10	28.1	18.9	26.1	5.2	21.7	—
	11	28.5	19.4	25.5	5.5	21.1	—
	12	35.3	13.9	15.0	4.4	31.4	—
	13	34.9	15.2	15.9	4.5	29.5	—
	14	11.5	6.9	63.3	12.8	1.8	3.6

图3为两种涂层的洛氏硬度和涂层区域内微区的维氏硬度柱状图。由图可知, 等离子喷涂涂层的洛氏硬度 (62 HRC) 高于等离子喷焊的硬度 (59 HRC), 但微区的维氏硬度表现出显著差异: 等离子喷涂涂层中 WC 颗粒的硬度显著高于等离子喷焊涂层中的 WC 颗粒, 高出 12.7 %; 尽管两种涂层的基体

硬度基本相同, 但等离子喷焊涂层中的二次碳化物颗粒硬度为 1910 HV, 介于 WC 颗粒和基体之间, 而等离子喷涂涂层中的为 0。上述结果表明, 硬度相对 WC 较低的喷焊涂层中二次碳化物的存在会使得涂层整体硬度降低。



(a)



(b)

图3 等离子喷涂与喷焊涂层的洛氏硬度
(a) 和微区维氏硬度 (b) 柱状图

图4为经过 24 h 摩擦磨损试验后的 SEM 磨损形貌图。由图可知, 经过摩擦磨损试验后等离子喷涂涂层表面观察到较浅的犁沟和划痕, 涂层中的 WC 颗粒未出现剥落现象。对磨损局部区域放大后 (图4(b)) 可进一步观察到, WC 颗粒表面存在细小划痕, 并初步出现疏松分离迹象, 这主要是因为摩擦磨损过程中涂层中的 WC 颗粒承担了主要的摩擦, 起到耐磨骨架的作用^[11]; 相比之下, 等离子喷焊涂层表面可见较多且较深的犁沟和划痕, 完整 WC 颗粒较少, 这主要是由于脆性二次碳化物在磨损过程中发生破碎和剥落所致, 表明其耐磨性能较差。

对两种工艺下的涂层进行往复摩擦磨损试验, 图5为对应的摩擦系数曲线。由图可知, 摩擦系数曲线主要分为两个阶段, 摩擦系数快速增大阶段和摩擦

系数平稳阶段。在 0—20 m 之间, 即摩擦磨损开始阶段, 摩擦系数随磨损距离增加而逐渐增大; 当磨损距离达到 20 m 后, 两种工艺涂层的摩擦系数均趋于稳定。其中, 等离子喷涂涂层的摩擦系数稳定值为 0.33,

而等离子喷焊涂层的则为 0.53。这说明等离子喷涂涂层表面的相互啮合和粘着磨损程度更小, 同时也表明该涂层具有更好的耐磨性能^[12]。

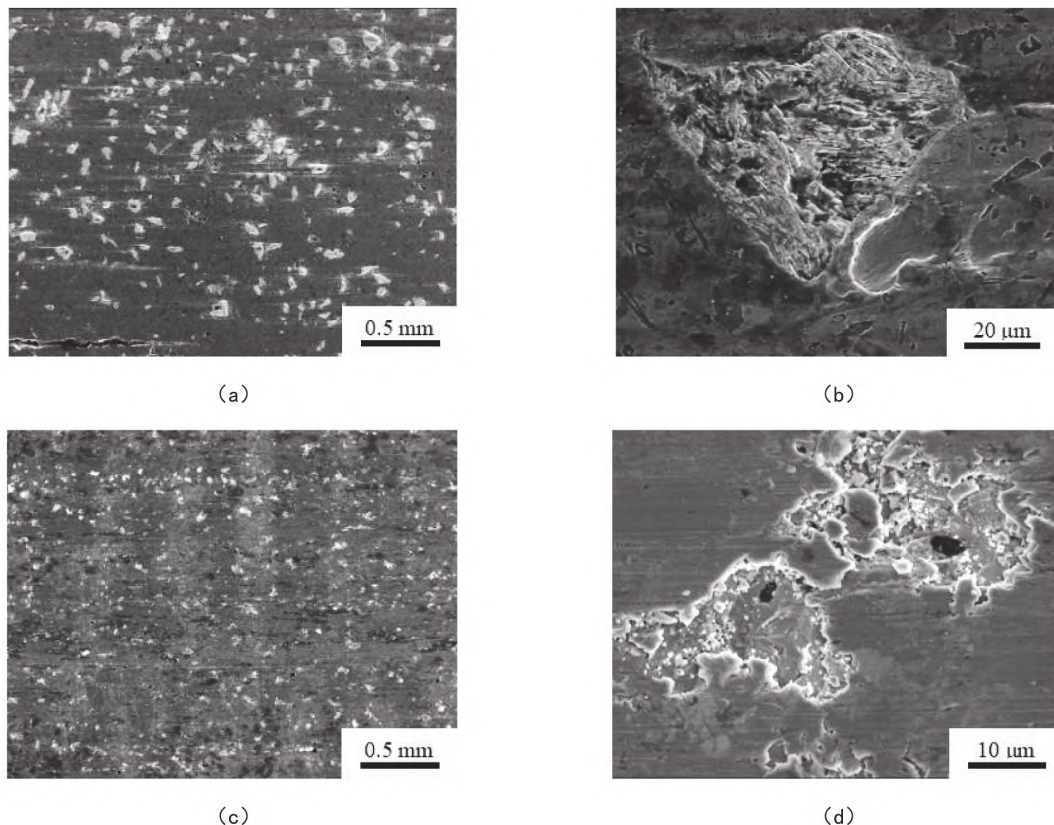


图 4 等离子喷涂 (a,b) 等离子喷焊 (c,d) 涂层的摩擦磨损形貌

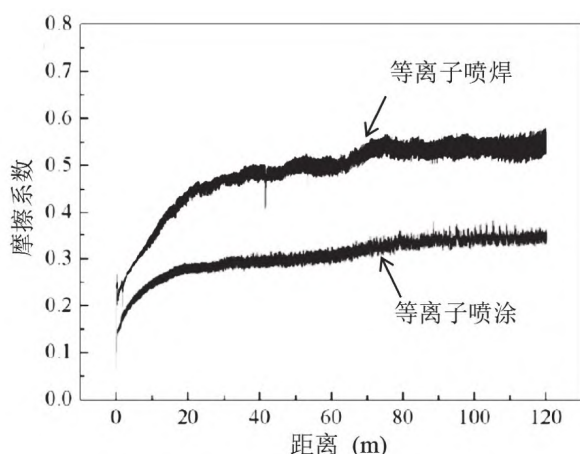


图 5 两种涂层的摩擦系数曲线

3 结论

(1) 等离子喷涂涂层与基体形成机械结合, 而等离子喷焊涂层与基体形成冶金结合, 两种涂层与基体间的界面结合状态良好, 均未观察到明显气孔、微裂纹等缺陷。

(2) 等离子喷涂和等离子喷焊涂层中均有 WC 和 Ni-Cr-Fe 相; 等离子喷涂涂层内的 WC 颗粒形状呈完整球形分布, 等离子喷焊涂层内的 WC 颗粒呈多棱形貌。此外, 等离子喷焊涂层中还包含 $(\text{Cr}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{C}_2$ 、 $(\text{Cr}, \text{Ni}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 相及大量的二次碳化物。

(3) 等离子喷涂与等离子喷焊涂层的洛氏硬度分别为 62 HRC 和 59 HRC; 喷涂涂层中的 WC 颗粒的维氏硬度较喷焊涂层中的高 12.7 %。等离子喷涂与等离子喷焊涂层的摩擦系数稳定值分别为 0.33 和 0.53, 相比之下, 等离子喷涂涂层具有更好的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 杨秀从, 李国禄, 王海斗, 等. 热喷涂 Ni 基复合涂层重熔处理的研究现状 [J]. 表面技术, 2016, 45(3): 64-71.
- [2] 袁旭同, 郝亚鸣, 胡悦, 等. 氧化铝-碳化硅涂层喷涂工艺优化及抗热震性能分析 [J]. 航空材料学报, 2025, 45(4): 45-55.
- [3] 徐悦, 何玉婷, 邓建强, 等. 激光熔覆涂层的生产应用研究 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(7): 28-30.
- [4] 全云奇, 李炫儒, 陈忠宇, 等. 扫描速度对 50CrMnMo 钢表

- 面激光熔覆铁基涂层组织与耐磨性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(7): 10–17.
- [5] 邵宇轩, 杨勇, 赵策策, 等. 等离子喷涂反应合成 YSZ-ZrC 纳米复合涂层的组织调控与性能研究[J]. 热喷涂技术, 2025, 17(2): 47–56.
- [6] 柴慧, 王勤英, 西宇辰, 等. 回收粉末再利用对等离子喷焊 Ni-WC 涂层冲刷腐蚀行为的影响机制[J]. 表面技术, 2025, 54(6): 74–86.
- [7] 刘春城, 汤铁兵, 柳亚楠, 等. 等离子喷焊原位合成 TiC 增强 Fe 基合金改性层的组织与性能[J]. 焊接技术, 2024, 53(5): 34–38.
- [8] ZHANG H X, LUO C, ZHAO H L, et al. Interface and wear resistance of high frequency induction remelted Ni-based WC coating[J]. Advanced Materials Research, 2010, 105–106: 509–512.
- [9] 陈芳, 罗明辉, 陈丽蓉. 机械液压零部件的表面涂层与耐磨性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(5): 60–64.
- [10] 王敏, 王海东. 等离子喷涂 Ni 基 WC 涂层的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(12): 134–136.
- [11] 伏利, 陈小明, 刘伟, 等. 超音速活性电弧制备锅炉用耐磨涂层性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(1): 34–37.
- [12] 刘乐卿, 单奇艺, 安宇龙, 等. WC-(W,Cr)2C-Ni/Ag 复合涂层的制备及摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 10–16.

Effect of Plasma Spraying and Plasma Spray Welding on the Surface Properties of Piston Rods

CHEN Fang¹, YAN Lipeng², ZHENG Lulu¹, XU Kaige²

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: To investigate the influence of different processes on coating performance, this study employed plasma spraying and plasma spray welding technologies to successfully prepare Ni-based WC composite coatings on the surface of piston rod substrates. The microstructures, hardness, and wear resistance of the two coatings were systematically compared and analyzed using field emission scanning electron microscopy, optical microscopy, and a friction and wear tester. The results indicate that both coatings exhibited good interfacial bonding with the substrate without defects such as pores or cracks. The sprayed coating interface was characterized by mechanical bonding, whereas the spray-welded coating interface demonstrated metallurgical bonding. In the sprayed coating, WC particles were spherical in shape, while in the spray-welded coating, WC particles showed a polygonal morphology. Additionally, two types of hard phases— $(\text{Cr}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{C}_2$ and $(\text{Cr}, \text{Ni}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ —as well as secondary carbides were observed. The hardness of the sprayed coating (62 HRC) was 5.1% higher than that of the spray-welded coating (59 HRC). The steady-state friction coefficient of the sprayed coating (0.33) was significantly lower than that of the spray-welded coating (0.53), and the wear rate decreased by 37.7%. These results demonstrate that the plasma-sprayed coating possesses superior wear resistance.

Key words: plasma spraying; plasma spray welding; coating; microstructure; wear resistance

(责任编辑 吕春红)