

# Preparation of Fe316L Coating and its Tribological Performance Under Different Working Conditions

Yutian Chen<sup>1,2</sup> Feng Liu<sup>1\*</sup> Shanhong Wan<sup>2\*</sup> Gewen Yi<sup>2</sup> Huwei Sun<sup>2</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu, 730000, China

## Abstract

The Fe316L stainless steel coating was prepared on a high-silicon aluminum alloy substrate by plasma spraying process, and the tribological properties of the coating were evaluated by SRV-4 reciprocating micromotor wear tester under oil lubrication at 80 °C, and the microstructure, hardness, bond strength, physical phase composition and wear mechanism of the coating were investigated by scanning electron microscope (SEM), spectrum analyzer (EDS), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Raman spectrometer (Raman) and other analytical methods. The results show that the mechanical properties of Fe316L coating are excellent, with a microhardness of 268.38HV<sub>0.1</sub>, a bond strength of 39.97MPa, and a tensile strength of 42.22MPa. In the oil lubrication environment, the wear mechanisms of the coatings and the aluminum alloy surfaces were slight abrasive wear and severe abrasive wear accompanied by spalling, respectively, and the friction coefficients and wear rates of the coatings were as low as 0.14 and 5.57×10<sup>-7</sup>mm<sup>3</sup>/(N·m), respectively. Therefore, the Fe316L stainless steel coating prepared by plasma spraying can significantly improve the anti-wear performance of aluminum alloy engine cylinders.

## Keywords

atmospheric plasma spraying; Fe316L coating; aluminum alloy; wear mechanism

## Fe316L 涂层制备及在油润滑工况下摩擦学性能研究

陈玉田<sup>1,2</sup> 刘峰<sup>1\*</sup> 万善宏<sup>2\*</sup> 易戈文<sup>2</sup> 孙虎伟<sup>2</sup>

1. 西安石油大学材料科学与工程学院, 中国·陕西 西安 710065;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 中国·甘肃 兰州 730000

## 摘要

利用等离子喷涂工艺在高硅铝合金基体上制备了Fe316L不锈钢涂层, 通过SRV-4往复式微动磨损试验机评价了涂层在80℃油润滑环境下的摩擦学性能, 并采用扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)、X射线光电子能谱(XPS)、拉曼光谱仪(Raman)等分析手段研究了涂层微观组织、硬度、结合强度、物相组成以及磨损机理。结果表明: Fe316L涂层力学性能优异, 显微硬度为268.38HV<sub>0.1</sub>, 结合强度为39.97MPa, 拉伸强度为42.22MPa。在油润滑环境下, 涂层和铝合金表面的磨损机制分别为轻微的磨粒磨损及严重的磨粒磨损伴随着剥落, 涂层的摩擦系数和磨损率分别低至0.14和5.57×10<sup>-7</sup>mm<sup>3</sup>/(N·m)。因此, 采用等离子喷涂制备Fe316L不锈钢涂层可显著提升铝合金发动机汽缸的抗磨损性能。

## 关键词

等离子喷涂; Fe316L涂层; 铝合金; 磨损机制

**【基金项目】**本研究得到了中国科学院战略重点研究计划(批准号: XDB 0470302)、国家自然科学基金(批准号51505378, 52072380和52405229)、甘肃省重大科技项目(批准号23ZDGA011)和甘肃省基础研究创新群体项目(批准号24JRRA785)、中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室开放项目(批准号LSL-2311)、中央引导地方科技发展基金(批准号211084337120)的资助和陕西省自然科学基金基础研究项目(2023-JC-YB-466)资助。

## 1 引言

随着人们节能减排意识的增强和对汽车性价比要求的提高, 降低能耗、实现轻量化及提升发动机性能已成为亟待解决的重要课题。为此, 开发了大量以铝合金为代表的轻合金, 以减轻汽车重量, 典型部件包括发动机缸体、活塞等[1]。尽管铝合金发动机缸体满足轻质要求, 但其耐磨损性能较差, 容易导致内表面磨损失效。因此, 本研究在以往基础上, 利用等离子喷涂技术进行模拟实验室条件下的油润滑摩擦试验, 探讨316L涂层的硬度、微观结构、结合强度和摩擦学性能, 为车用发动机的减摩抗磨和高服役性能提供技术支持和参考。

## 2 试验部分

### 2.1 原材料和试验仪器

#### 2.1.1 商用原材料

涂层基体材料选用高硅铝合金 (AlSi12, 河北新立中有色金属集团有限公司), 加工成  $\Phi 24.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的圆柱试样。在油润滑试验中, 选择市场中商用烯劲 5W-30 发动机润滑油 (CK-4 E7/E9, 杭州烯创科技有限公司), 测得润滑油的相关理化性能, 列于表 1 中。

表 1 5W-30 润滑油理化性能

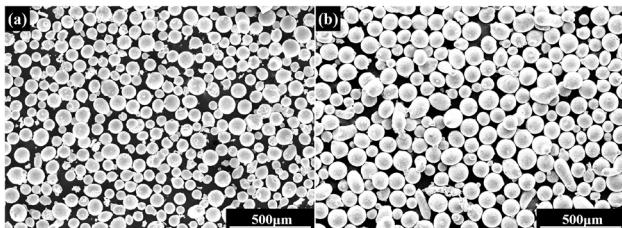
Item	Specification	Test standard
Viscosity(40°C, mm <sup>2</sup> /s)	88.11	GB/T 265
Viscosity(100°C, mm <sup>2</sup> /s)	13.64	GB/T 265
Viscosity index	157	GB/T 265

#### 2.1.2 试验仪器

采用 Sulzer Metco 9MC 型大气等离子喷涂系统 (Oerlikon Metco Inc, 美国) 制备涂层; 采用显微硬度计 (MH-5-VM, 上海恒仪科技有限公司) 测定涂层显微硬度; 采用微机控制万能材料试验机 (WDW-200, S&D 仪器制造有限公司) 测试涂层结合强度; 采用微动磨损试验机 (SRV-4, 德国) 在 80°C 下进行往复油润滑摩擦试验, 对偶球采用直径为 10mm 的 GCr15 钢球, 法向载荷为 20N、40N 及 80N, 行程为 2mm, 涂层和铝合金的磨损时间分别为 80min (预加载 20min) 和 30min; 采用三维轮廓仪 (MicroXAM-800, KLA-tencor Corp, 美国) 测量涂层及铝合金磨损体积; 采用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, ESCALAB250XI, Thermo Fisher Scientific, 美国) 对涂层及铝合金基体磨损表面成分组成进行分析; 用扫描电子显微镜 (SEM, FEI Apreo S, FEI Company, 美国) 观察喷涂粉末、涂层及铝合金表面和截面, 以及磨损表面和截面形貌, 配合 X 射线能量色散谱仪 (EDS) 分析涂层截面元素分布。

#### 2.2 涂层喂料及涂层制备

图 1 所示为喷涂粉末以及粘结层粉末 SEM 形貌图。涂层粉末选用兰州理工合金粉末有限责任公司制备的 Fe316L 合金粉末, 粉末粒径为 140~325 $\mu\text{m}$ , 粘结层粉末选用 NiCrAlY 粉末, 粉末粒径为 40~107 $\mu\text{m}$ 。由图 1 可见, 喷涂粉末多数呈现球形, 少数形状不规则, 使得粉末具备较优的流动性。



(a) Fe316L 喷涂粉末 (b) NiCrAlY 粘结层粉末

图 1 粉末 SEM 形貌

喷涂前对基材表面喷砂处理, 满足表面粗糙度  $Ra=3.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。采用丙酮超声清洗喷砂表面以去除污染物。喷涂前预热基底至  $120 \pm 5^\circ\text{C}$ , 减缓喷涂过程中因高冷却速率导致大量非晶相和缺陷形成 [2]。采用大气等离子喷涂系统 (APS, Sulzer Metco 9MC, Oerlikon Metco Inc., 美国) 先喷涂 NiCrAlY 作为粘结层, 再喷涂 Fe316L 涂层, 喷涂工艺参数如表 2 所示。

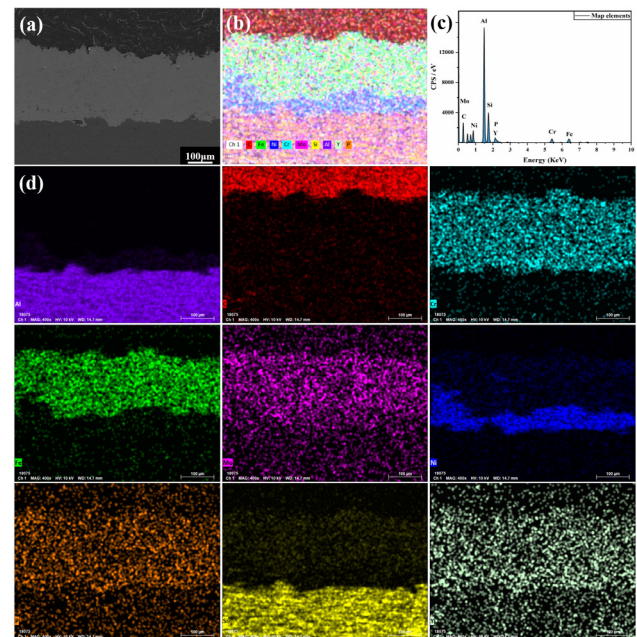
表 2 Fe316L 涂层喷涂工艺参数

参数	粘结层	涂层
电流 (A)	550	550
电压 (V)	60	60
喷涂距离 (mm)	150	150
喷枪移动速度 (mm/s)	10	10
转盘转速 (Rpm)	150	150
基底预热温度 ( $^\circ\text{C}$ )	$120 \pm 10$	$120 \pm 10$
送粉率 (g/min)	$23 \pm 5$	$25 \pm 5$
氢气流量	40	40
氩气流量	5	5

## 3 结果与分析

### 3.1 涂层截面分析

图 2 为铝合金表面上等离子喷涂的 Fe316L 涂层的截面 SEM 形貌及 EDS 元素分布图。从图 2a 可见, 涂层内部熔化良好且致密, 平均厚度为 254.60 $\mu\text{m}$ 。虽然涂层内部有少量孔隙和裂纹, 微缺陷的产生主要有以下原因: 颗粒的冷却速率超过了熔滴的铺展速率, 导致冷却收缩和孔隙生成; 熔滴堆叠时未完全重叠, 边界处出现裂纹或孔隙; 熔滴撞击时内部气体未能及时逸出, 导致孔隙形成。图 2b 至图 2d 显示, 涂层截面元素分布呈层状且均匀, 但截面上 Al、Si 元素含量较高。

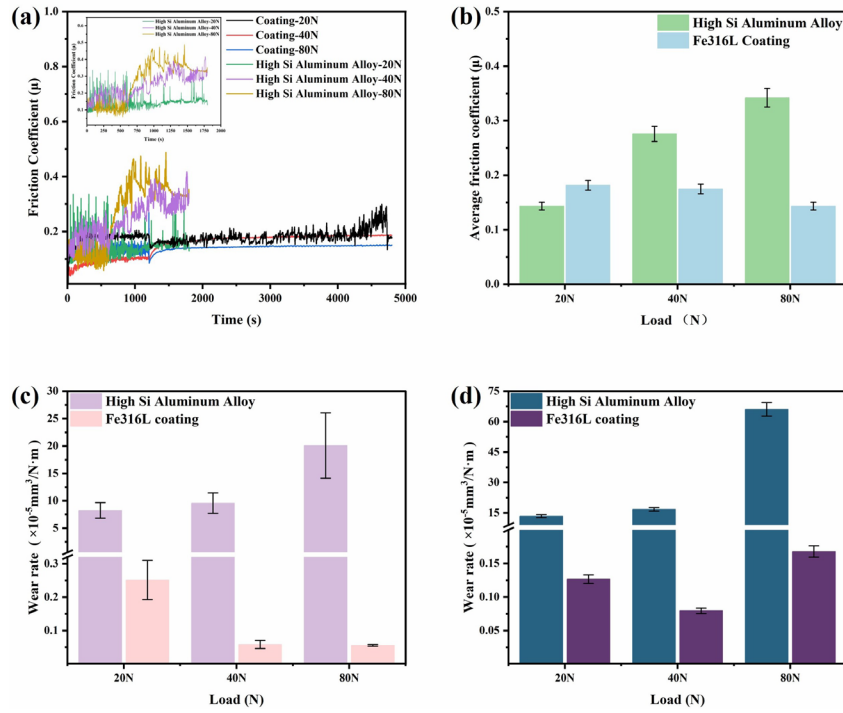


(a) 400 倍下涂层形貌; (b) 全元素分布; (c) EDS 能谱; (d) 各元素含量分布

图 2 Fe316L 涂层截面 SEM 形貌及 EDS 分布





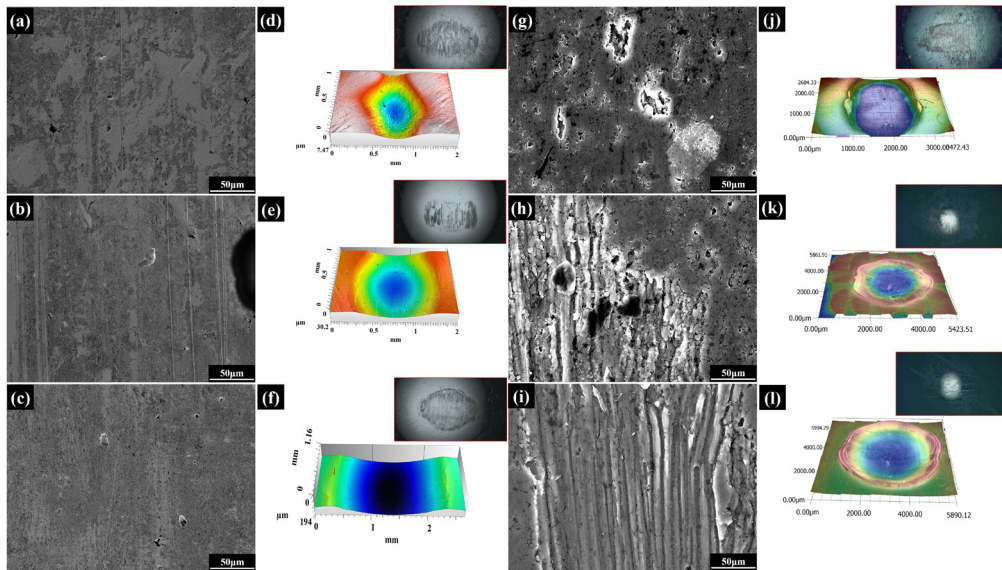


(a) 摩擦系数；(b) 涂层和铝合金基底平均摩擦系数；(c) 试验盘磨损率；(d) 对偶球磨损率  
图 5 油润滑下 Fe316L 涂层与高硅铝合金基底摩擦学性能对比

图 6 为 Fe316L 涂层和铝合金在油润滑环境下磨损后的表面形貌、三维轮廓及摩擦副磨斑形貌。图 6a 至图 6c 显示，油润滑环境下，Fe316L 涂层表面仅有轻微擦伤，沟槽不明显，且在大载荷下仍保持平整。三维轮廓和球磨斑形貌表明磨损区域相对光滑，主要呈现轻微的磨粒磨损（见图 6d 至图 6f）。相比之下，磨损后的高硅铝合金表面表现出截然不同的情况。在低载荷下，表面有大量剥落和少量塑性变形，主要磨损形式为粘着磨损 [3]。随着载荷增加，铝合金的磨损加剧，表面出现严重沟槽、剥落坑和显著的塑性变

形，磨粒磨损成为主要形式，并伴随疲劳磨损（见图 6g 至图 6i）。铝合金的硬度显著低于 GCr15 钢球，三维轮廓显示载荷造成严重塑性变形，而对应的对偶球表面则保持光滑（见图 6j 至图 6l）。

深入分析磨损机理，Fe316L 涂层的优越表现可归因于其较高的硬度及耐磨性，抑制了塑性变形和表面裂纹的产生。从高载荷条件下铝合金的表现来看，显然其结构稳定性不足以支撑长时间的摩擦接触，这导致了更为严重的磨损形式及材料失效。



(a-c) Fe316L 涂层在 80°C 20N、40N、80N 下磨损形貌；(d-f) 三维轮廓及摩擦副副磨斑形貌；  
(g-i) 高硅铝合金基底在 80°C 20N、40N、80N 下试磨损形貌；(j-l) 三维轮廓及摩擦副副磨斑形貌

图 6 Fe316L 涂层和铝合金在油润滑环境下磨损后的表面形貌、三维轮廓及摩擦副副磨斑形貌

### 3.4 油润滑试验涂层磨损表面分析

X射线光电子能谱(XPS)用于分析样品最外层的化学成分(约几纳米)。为去除表面污染,样品先经过20 keV的Ar<sup>+</sup>离子溅射清洗30秒。图7为80℃ 20N条件下,5W-30润滑油润滑后涂层磨损表面经过Ar<sup>+</sup>离子溅射的主要XPS光谱成分的峰拟合,包括Fe 2p、C 1s、Ca 2p、Mg 1s、O 1s、P 2p、S 2p、Zn 2p和Al 2p。

图7显示了Fe316L涂层磨损区域的XPS光谱,C 1s谱有三个合成峰,分别在结合能284.80 eV(C-C键)、286.94 eV(C-O-C键)和288.65 eV(O-C=O,羰基)。O 1s在

531.68 eV和532.43 eV的峰值对应于金属氧化物和氢氧化物。Fe 2p在711.22eV和725.02 eV的峰值对应Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。Mg 1s在1303.84 eV,Zn 2p在1022.08 eV和1044.08 eV,Ca 2p在347.40 eV和350.70 eV的峰值分别归属于金属氧化物和金属碳酸盐,这些均源于5W-30润滑油中的清净剂和极压添加剂,Zn元素来自ZDDP的分解。P 2p在132.93 eV和133.83 eV的信号对应金属磷化物,139.92 eV的峰为Zn 3s自旋造成的。S 2p在162.49 eV和163.59 eV及168.09 eV和169.27 eV的峰值应归因于金属硫化物、硫酸盐或硫酸氢氧化物。

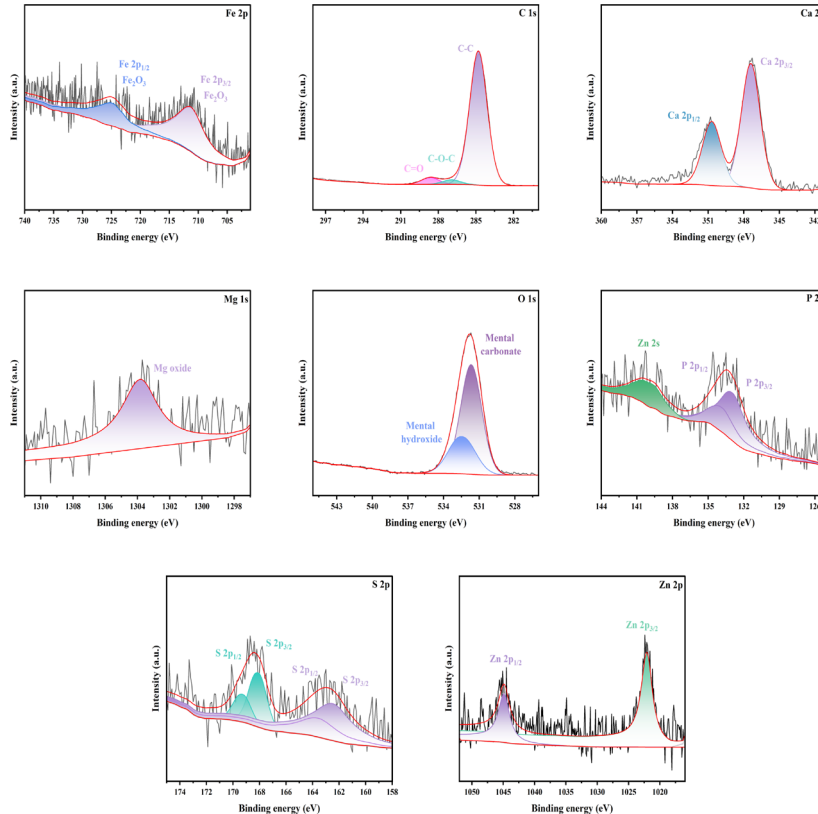


图7 Fe316L涂层磨损区域XPS分析

## 4 结论

①采用等离子喷涂工艺制备了Fe316L涂层,涂层的平均硬度为268.93HV<sub>0.1</sub>,约为基体硬度的7倍,结合强度为39.37MPa,拉伸强度为42.2MPa。

②针对不同温度和负荷条件下的实验结果表明,Fe316L涂层在高温及高负荷环境下仍能保持良好的表面完整性和稳定的摩擦性能,显示出优异的热稳定性与抗磨损能力。涂层的摩擦系数在油润滑条件下降低至0.14。随着摩擦处理时间的延长,涂层的摩擦系数趋于稳定,证明其在长时间使用中仍能保持低摩擦特性。

③在油润滑试验中,涂层磨损面形成的摩擦膜主要包含铁氧化物、铁/硫化物、铁/硫酸盐和铁/磷酸盐等成分;在油润滑状态下,基体的最大磨损率为 $2.01 \times 10^{-4} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,

涂层为 $2.5 \times 10^{-6} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,铝合金磨损率为涂层的165倍。涂层磨损表面平整,主要磨损机制为磨粒磨损。

④结合强度测试结果显示,Fe316L涂层与基体铝合金之间的结合良好,表明涂层在应用过程中不易脱落,这为其在实际应用提供了良好的保障。

### 参考文献

- [1] 毛俊元, 郑卫刚. 激光重熔-等离子喷涂陶瓷纳米涂层在气缸套内壁中的研究[J]. 叉车技术, 2014(4):22-24.
- [2] 杜忠泽, 芮星, 王强, 等. 铝合金汽车发动机缸体内壁表面改性的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 336-340.
- [3] S.K. Balijepalli, L. Ceschini, I. Ciancaglioni, S. Kaciulis, A. Mezzi, R. Montanari, C. Martini, G. Verona Rinati, Corrosion effect to the surface of stainless steel treated by two processes of low temperature carburization, Surf. Interface Anal. 46 (2014) 731-734.