

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.06.009

# 活塞环材料等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 复合陶瓷涂层的高温耐磨性能

唐毅<sup>1</sup>, 邓成尧<sup>2</sup>

(1. 武警警官学院 基础部, 四川 成都 610213; 2. 西南交通大学希望学院 机电与轨道车辆工程系, 四川 成都 610400)

**摘要:** 选用适合制造活塞环的 ZL110 铝合金作为基体, 将  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  粉末按照不同质量比例混合, 采用等离子喷涂技术在其表面制备出 3 种复合陶瓷涂层, 分别为: 97%  $\text{Al}_2\text{O}_3+3\% \text{TiO}_2$  涂层、80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  涂层、40%  $\text{Al}_2\text{O}_3+60\% \text{TiO}_2$  涂层。通过观察形貌、计算孔隙率, 分析复合陶瓷涂层的平整度和致密性。通过测定厚度、硬度并进行高温摩擦实验, 分析复合陶瓷涂层的高温耐磨性能。结果表明: 97%  $\text{Al}_2\text{O}_3+3\% \text{TiO}_2$  涂层、80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  涂层和 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3+60\% \text{TiO}_2$  涂层均呈现片层堆叠结构, 厚度基本一致, 为  $(204\pm 1) \mu\text{m}$ , 且物相相同。与 97%  $\text{Al}_2\text{O}_3+3\% \text{TiO}_2$  涂层和 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3+60\% \text{TiO}_2$  涂层相比, 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  涂层表面相对平整且致密性较好, 其硬质相  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  含量达到 20.5%。80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  涂层的硬度为 856.4 HV, 较基体 ZL110 铝合金提高约 9 倍, 同时表现出良好的高温耐磨性能。

**关键词:**  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  复合陶瓷涂层; 活塞环; ZL110 铝合金; 等离子喷涂

中图分类号: TQ153; TG174.4

文献标志码: A

## High-temperature wear resistance of plasma sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ composite ceramic coatings on piston ring materials

TANG Yi<sup>1</sup>, DENG Chengyao<sup>2</sup>

(1. Basic Department, Officers College of PAP, Chengdu 610213, China; 2. Department of Mechanical, Electrical and Rail Vehicle Engineering, Southwest Jiaotong University Hope College, Chengdu 610400, China)

**Abstract:** ZL110 aluminum alloy, which was selected as the substrate, was suitable for manufacturing piston ring.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  powders were mixed in different mass ratios, and three composite ceramic coatings were prepared on its surface by plasma spraying, namely 97%  $\text{Al}_2\text{O}_3+3\% \text{TiO}_2$  coating, 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  coating and 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3+60\% \text{TiO}_2$  coating. The flatness and compactness of composite ceramic coating were analyzed by observing the morphology and calculating the porosity. The high-temperature wear resistance of composite ceramic coating was analyzed by measuring the thickness, hardness and conducting high-temperature friction test. The results show that 97%  $\text{Al}_2\text{O}_3+3\% \text{TiO}_2$  coating, 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  coating and 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3+60\% \text{TiO}_2$  coating all present a layered stacking structure, with a consistent thickness of  $(204\pm 1) \mu\text{m}$  and the same phase. Compared with 97%  $\text{Al}_2\text{O}_3+3\% \text{TiO}_2$  coating and 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3+60\% \text{TiO}_2$  coating, 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  coating has a relatively flatter surface and better compactness, and the content of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  hard phase reaches 20.5%. The hardness of 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\% \text{TiO}_2$  coating is 856.4 HV, which is about 9 times higher than that of the ZL110 aluminum alloy substrate, and it also shows good high-temperature wear resistance.

**Keywords:**  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  composite ceramic coating; piston ring; ZL110 aluminum alloy; plasma spraying

收稿日期: 2025-08-19

修回日期: 2025-10-01

作者简介: 唐毅(1985—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为车辆材料、性能检测, e-mail: College\_610213@163.com

通信作者: 邓成尧(1967—), 男, 教授, 教授级高级工程师, 研究方向为车辆材料、表面技术等, e-mail: dcydyb@126.com

基金项目: 四川省教育厅项目(18ZB0692)

引用信息: 唐毅, 邓成尧. 活塞环材料等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  复合陶瓷涂层的高温耐磨性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(6): 71-78.

TANG Yi, DENG Chengyao. High-temperature wear resistance of plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  composite ceramic coatings on piston ring materials[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(6): 71-78.

活塞环是发动机的关键部件, 承载着密封、导热和支撑等功能。由于活塞环长期处在高温高压环境中, 还承受机械冲击、摩擦磨损以及润滑油在高温下反应产物的腐蚀作用<sup>[1-3]</sup>, 这种复杂且苛刻的工况条件对活塞环材料的热稳定性能、硬度、耐腐蚀性能和耐磨性能提出了很高要求。目前, 适合制造活塞环的材料主要有铸铁、合金钢、铝合金和复合材料(如陶瓷基复合材料)<sup>[4]</sup>。随着发动机向轻量化方向发展, 铝合金以其密度小、成本低、导热性能好等优点逐渐成为制造活塞环理想的材料。然而, 铝合金的硬度相对低, 高温耐磨性能不理想, 这限制了铝合金活塞环在重载、高转速发动机中的应用。鉴于此, 有必要通过表面改性提高铝合金的硬度和高温耐磨性能, 将拓展铝合金活塞环的应用范围。

等离子喷涂作为一种高效的表面改性技术, 其原理是通过在金属或非金属基体上形成金属涂层、金属基复合陶瓷涂层或陶瓷涂层, 显著提高基体性能<sup>[5-6]</sup>。与金属涂层和金属基复合陶瓷涂层相比, 陶瓷涂层因具有独特的材料特性(如熔点高、化学稳定性优异), 在高温摩擦、高温氧化等工况条件下展现出优势。将 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 粉末混合后进行等离子喷涂制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 复合陶瓷涂层综合性能良好, 受到广泛关注并推广应用。目前, 该涂层的性能研究已涵盖硬度、耐腐蚀性能、摩擦性能、抗热震性能和绝缘性能等方面<sup>[7-11]</sup>, 但现有的摩擦性能研究多局限于常规条件<sup>[12-13]</sup>, 针对 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 复合陶瓷涂层在高温条件下的摩擦性能鲜有报道。鉴于铝合金活塞环通常在高温环境中服役, 亟待开展 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 复合陶瓷涂层的高温耐磨性能研究, 研究结果对评估该涂层是否匹配铝合金活塞环的服役工况具有参考价值。

研究表明,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 粉末的配比是调控 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 复合陶瓷涂层性能的关键参数<sup>[14]</sup>。基于此, 本文选用适合制造活塞环的ZL110铝合金作为基体, 通过改变 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 粉末的配比, 采用等离子喷涂技术制备3种复合陶瓷涂层。通过模拟铝合金活塞环的服役环境温度进行高温摩擦实验, 结合平整度、致密性、硬度和磨痕分析复合陶瓷涂层的高温耐磨性能, 以期对铝合金活塞环表面改性提供实验依据和技术参考。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料及预处理

采用ZL110铝合金, 其化学成分主要为: 4.0%~

6.0% Si、5.0%~8.0% Cu、0.2%~0.5% Mg, 余量为Al; 放入无水乙醇中浸泡5 min, 除油后用清水冲洗接着吹干。最后进行喷砂粗化处理, 即在除油清洗后ZL110铝合金表面喷涂粒径约为400  $\mu\text{m}$ 的刚玉砂, 以增大涂层与基体的接触面积, 有利于提高涂层的结合力。选用粒径范围均为20~50  $\mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末、 $\text{TiO}_2$ 粉末, 喷涂前需进行预热, 以改善粉末的流动性同时提高粉末熔融效率。

### 1.2 等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 复合陶瓷涂层

采用由等离子喷枪、电源、控制模块、送粉器、气体供应系统、冷却设备和机械手臂组成的系统, 在预处理后基体表面等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 复合陶瓷涂层。为了制备不同类型的复合陶瓷涂层, 将 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 粉末按照不同质量比例混合, 分别为97% $\text{Al}_2\text{O}_3+3\%\text{TiO}_2$ 、80% $\text{Al}_2\text{O}_3+20\%\text{TiO}_2$ 、40% $\text{Al}_2\text{O}_3+60\%\text{TiO}_2$ , 喷涂工艺参数见表1。为便于表述, 下文将制备的3种复合陶瓷涂层依次命名为涂层I、涂层II、涂层III。

表1 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  复合陶瓷涂层的工艺参数  
Tab.1 Process parameters of  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  plasma spray composite ceramic coatings

参数	设定值
工作电压/V	60
工作电流/A	600
氩气流量/( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )	40
氢气流量/( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )	8
送粉率/( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ )	30
喷涂距离/mm	100

### 1.3 性能测试

#### 1.3.1 形貌和孔隙率

采用扫描电镜(SEM, MERLIN Compact型)观察复合陶瓷涂层的形貌, 设置加速电压为10 kV, 束斑尺寸和工作距离采用默认值。由于复合陶瓷涂层不导电, 需进行表面喷金使其导电, 以消除电荷干扰获得清晰、无畸变的图像。然后将扫描电镜拍摄的形貌图像导入Image J软件中, 用黄色细实线沿着轮廓标记出所有孔洞以更直观的形式呈现, 再经过格式转换、设置比例尺和测量方法、调整阈值等步骤获得孔隙率, 作为辅助分析复合陶瓷涂层致密性的参考指标。

### 1.3.2 物相和厚度

采用X射线衍射仪(XRD, D/Max-2000/PC型)获得复合陶瓷涂层的XRD谱图, 导入Jade软件中分析物相。设置仪器的电压和电流分别为45 kV、40 mA, 扫描速度为5°/min, 角度范围30°~90°。

采用便携式测厚仪(PosiTector 6000型)测定复合陶瓷涂层的厚度, 在每种涂层表面任意选3个点, 测定结果取平均值。

### 1.3.3 硬度

采用显微硬度计(MV-TEST1000型)测定复合陶瓷涂层的硬度, 垂直施加的载荷为100 g, 保持15 s后缓慢卸载。通过测量复合陶瓷涂层表面形成的压痕对角线长度, 自动计算出硬度值。鉴于等离子喷涂涂层具有层片状结构, 为了使测定结果反映复合陶瓷涂层的真实硬度, 在每种涂层表面任意选7个点, 测定结果中舍弃最大值和最小值后取平均值。

### 1.3.4 高温耐磨性能

采用球-盘式摩擦磨损试验机(MFT-4000型)进行高温摩擦实验, 实验过程中环境温度分别保持200和400 °C。采用干摩擦方式, 摩擦副由待磨试样和Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷球构成, 实验参数如下: 载荷20 N、陶瓷球的旋转半径3 mm、持续摩擦15 min。结束后将试样放入无水乙醇中浸泡5 min, 取出待表面风干后, 采用扫描电镜观察磨痕形貌并分析磨痕表面成分, 同时测量磨痕宽度。结合磨痕形貌、表面成分和磨痕宽度分析复合陶瓷涂层的高温耐磨性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 形貌和孔隙率

图1为ZL110铝合金和3种复合陶瓷涂层的SEM照片。从图1(a)看出, ZL110铝合金表面较光滑。从图1(b)~(d)看出, 涂层I、涂层II和涂层III均呈现片层堆叠结构, 由大量片层堆叠形成。等离子喷涂过程中, 高温焰流持续加热使大部分Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>粉末熔融, 然后高速喷射到基体表面, 因惯性力和表面张力共同作用熔融态粉末呈现扁平化, 在基体表面铺展形成片层<sup>[15]</sup>。随着熔融态粉末持续喷射并堆叠在已形成的片层上, 逐渐形成片层堆叠结构。从图1(b)~(d)还看出, 涂层I、涂层II和涂层III中都存在孔隙和微裂纹, 无规律分布。孔隙的形成是由于熔融态和半熔融的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>粉末在扁平化过程中夹杂的气体未及时排出, 还可能由于熔融态和半熔融的粉末冷却速度不一致, 局部快速冷却导致形成

孔隙。微裂纹的形成是由于基体与粉末的热膨胀系数差异较大, 熔融态和半熔融的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>粉末高速喷射到基体后快速冷却, 因热收缩和冷热循环而产生内应力。当内应力累加超过涂层的断裂强度时, 会形成微裂纹。

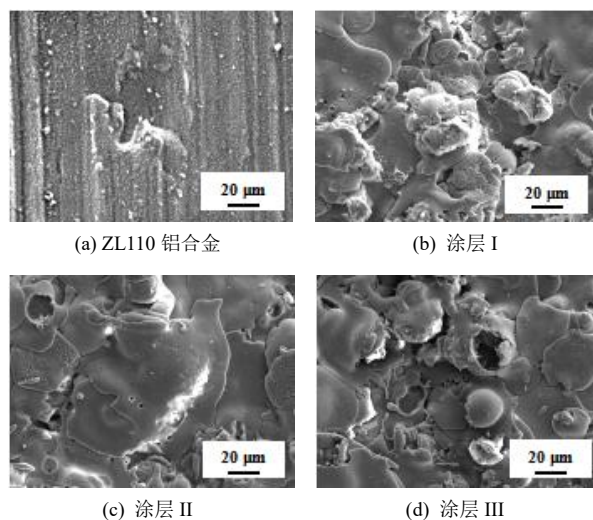


图1 ZL110铝合金和3种复合陶瓷涂层的SEM照片  
Fig.1 SEM images of ZL110 aluminum alloy and three composite ceramic coatings

涂层I和涂层III表面粗糙, 存在一些半熔融的粉末, 形态接近球形。另外, 涂层I和涂层III的片层边缘呈现不同程度凸起, 甚至出现部分片层孤立的情况, 未形成连续的片层堆叠结构。而涂层II表面相对平整, 几乎不存在半熔融的粉末。并且涂层II的片层边缘较平滑, 连续堆叠形成较致密的片层结构。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末的熔点超过2 000 °C, 而TiO<sub>2</sub>粉末的熔点为1 840 °C左右。当TiO<sub>2</sub>粉末的质量分数较低时, 喷涂材料以高熔点的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末为主, 在等离子焰流中可能存在一些半熔融或仅表面熔融的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末, 当这些粉末喷射到基体表面无法充分变形铺展, 导致错乱堆叠, 因而涂层表面粗糙, 并且存在无规律分布的孔隙。另外, 半熔融或仅表面熔融的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末掺杂在涂层中容易引起应力集中, 诱发微裂纹。随着TiO<sub>2</sub>粉末的质量分数升高(比如掺杂量为20%时), 更多TiO<sub>2</sub>粉末会在等离子焰流中率先熔融, 形成液态黏结相, 可浸润并包覆处于半熔融或仅表面熔融状态的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末, 进而促进Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末完全熔融并均匀铺展。同时, TiO<sub>2</sub>熔滴通过热传导提高周围Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末的受热效率, 降低其有效熔融温度, 加速Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末向熔融态转变。这一过程能减少半熔融或仅表面熔融的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末数量, 从而降低因Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉

末熔融不均匀产生的孔隙率。此外，TiO<sub>2</sub>粉末熔融形成的液态黏结相还可填充Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>熔滴间隙，冷却后形成连续结合相，避免因间隙留存形成孔隙。因此，涂层II表面相对平整，结构较致密。但TiO<sub>2</sub>粉末的质量分数过高时，一方面，大量TiO<sub>2</sub>粉末在等离子焰流中过度熔融，高速喷射到基体表面冷却后，易形成边缘凸起明显的片层，并且片层易发生错乱堆叠，导致涂层表面粗糙、致密性较差。另一方面，过度熔融的TiO<sub>2</sub>粉末喷射到基体表面后，在冷却过程中可能因收缩率较大诱发微裂纹。另有研究表

明<sup>[6]</sup>，过度熔融的TiO<sub>2</sub>粉末可能降低周围Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末的受热效率，导致半熔融或仅表面熔融的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末增多，加剧涂层表面粗糙程度。

图2展示了3种复合陶瓷涂层的孔洞形状及分布状况，对应的孔隙率如图3所示。孔隙率是衡量涂层致密性的重要参考指标，与涂层的硬度和耐磨性能密切相关。从图中看出，涂层I、涂层II和涂层III中的孔隙均呈不规则形状，且无规律分布。按照孔隙率由高到低排序为：涂层III>涂层I>涂层II，其中，涂层II的孔隙率仅为1.37%，进一步表明其致密性较好。

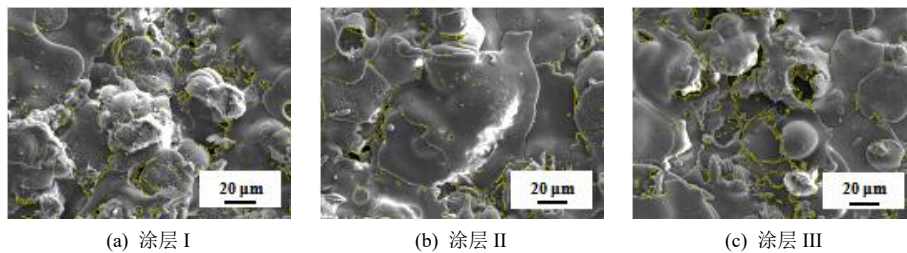


图2 3种复合陶瓷涂层的孔隙形状及分布状况

Fig.2 Shape and distribution of pores in three composite ceramic coatings

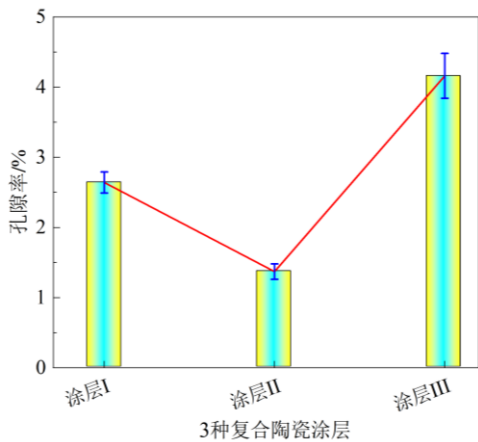


图3 3种复合陶瓷涂层的孔隙率

Fig.3 Porosity of three composite ceramic coatings

## 2.2 物相和厚度

图4为3种复合陶瓷涂层的XRD谱图。从图4中看出，涂层I、涂层II和涂层III的XRD谱图都显示多个特征峰，对应不同物相： $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>。等离子喷涂使用的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>生粉物相为 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，而复合陶瓷涂层中存在 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>两种不同晶型的物相，表明 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在喷涂过程中发生晶型转变，由稳定态转变成亚稳态。等离子喷涂过程中，高温焰流持续加热使大部分Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末熔融，随后熔融态Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>高速喷射到基体表面，快速变形冷却。该过程满足亚稳态 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相的临界成核条件，由于 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

具有较低的临界成核自由能易于成核<sup>[17]</sup>，因而复合陶瓷涂层中存在 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相。但半熔融或仅表面熔融的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>不会发生相变，仍然以原始晶型存在，所以复合陶瓷涂层中还存在 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相。

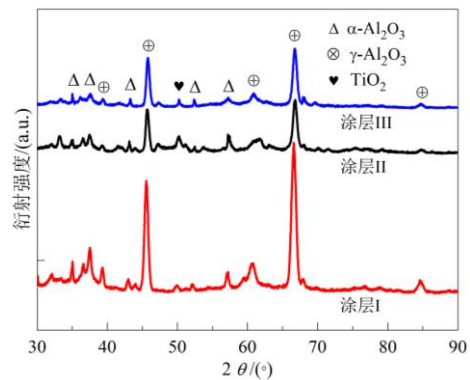


图4 3种复合陶瓷涂层的XRD谱图

Fig.4 XRD patterns of three composite ceramic coatings

根据文献[18]给出的公式计算得到不同复合陶瓷涂层中 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相含量，如图5所示。从图中看出，涂层II中 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相含量最高，达到20.5%，而涂层I中 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相含量最低，不到10%。研究发现， $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相含量对等离子喷涂层的硬度、耐磨性能、耐腐蚀性能和热稳定性能都会造成影响<sup>[19]</sup>。因此，可以将 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相含量作为分析复合陶瓷涂层硬度和高温摩擦性能的依据。

表2为3种复合陶瓷涂层的厚度测定结果。可知涂层I、涂层II和涂层III都具有较好的厚度均匀性,并且厚度基本一致( $204\pm 1$ )  $\mu\text{m}$ 。厚度均匀性较好并且基本一致可以排除因厚度差异对硬度测定结果和高温摩擦实验结果造成的干扰,使硬度和耐磨性能的差异主要归因于复合陶瓷涂层的致密性和物相不同。

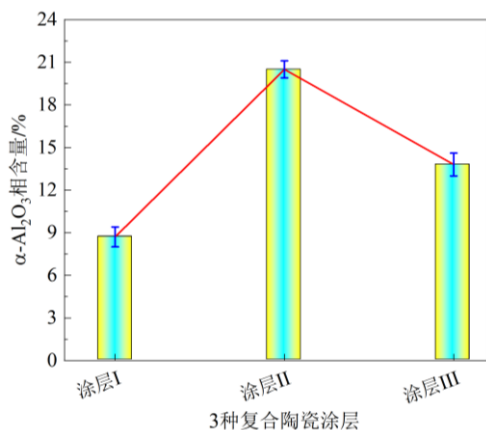


图5 3种复合陶瓷涂层中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相含量

Fig.5 Content of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  phase in three composite ceramic coatings

表2 3种复合陶瓷涂层的厚度测定结果

Tab.2 Thickness measurement results of three composite ceramic coatings

试样名称	厚度/ $\mu\text{m}$			
	测量值 1	测量值 2	测量值 3	平均值
涂层 I	204	206	202	204
涂层 II	205	207	204	205
涂层 III	203	202	205	203

### 2.3 硬度

图6为3种复合陶瓷涂层的硬度,可知涂层I、涂层II和涂层III的硬度远高于ZL110铝合金(低于110 HV),表明喷涂复合陶瓷涂层对ZL110铝合金起到表面强化作用,提高了ZL110铝合金抵抗外力压入和局部变形能力。但随着 $\text{TiO}_2$ 粉末的质量分数升高,涂层硬度呈现先升高后降低的趋势,从730.6 HV升至856.4 HV然后降至705.2 HV。等离子喷涂层的硬度主要与其致密性、厚度和物相有关,2.2节分析得知涂层I、涂层II和涂层III的厚度均匀性较好且厚度基本相同,因而它们的硬度存在差异归因于致密性和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相含量不同。

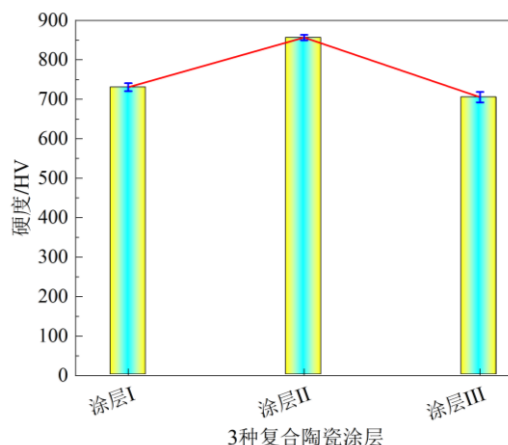


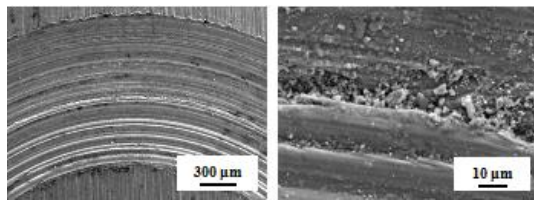
图6 3种复合陶瓷涂层的硬度

Fig.6 Hardness of three composite ceramic coatings

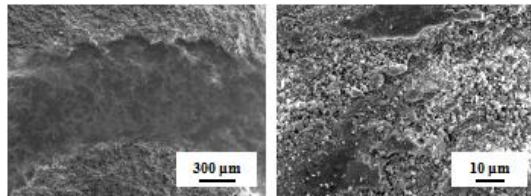
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相属于硬质相,其硬度处在1 800~2 200 HV范围内,而 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相和 $\text{TiO}_2$ 相的硬度均为800~1 200 HV,明显低于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相。结合2.1节分析结果,涂层II的孔隙率低,其致密性较好,当外力压入涂层时有效承载区域的面积较大,并且形成的压痕周围不易出现应力集中。此外,涂层II中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相含量最高,这种硬质相结合形成的结构使涂层抵抗外力压入和局部变形能力增强,因而表现出较高硬度。涂层III的孔隙率最高,多孔疏松结构导致其承受外力压入和局部变形能力较弱,形成的压痕周围容易出现应力集中。涂层I中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相含量最低,意味着 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 相含量较高,由于这两种物相的结构稳定性和硬度都不如 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相,因而涂层I和涂层III的硬度明显低于涂层II。

### 2.4 高温耐磨性能

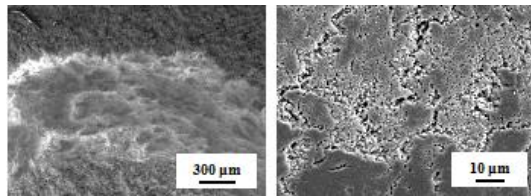
图7和图8分别为ZL110铝合金和3种复合陶瓷涂层在200和400  $^{\circ}\text{C}$ 下形成的磨痕形貌,对应的磨痕宽度如表3所示。当摩擦实验环境温度为200  $^{\circ}\text{C}$ 时,ZL110铝合金的磨痕宽(1 200  $\mu\text{m}$ )且边缘粗糙,磨痕内部及周边堆积大量块状和细小粒状磨屑。相比之下,涂层I和涂层II的磨痕较窄,宽度分别为950和880  $\mu\text{m}$ ,但两者表面均呈现非均匀磨痕特征,表现为局部崩裂形成不规则剥落坑,坑内及周边堆积磨屑,该现象源于等离子喷涂层具有片层堆叠结构并且涂层中的孔隙无规律分布。涂层III的磨痕宽度为1 060  $\mu\text{m}$ ,较涂层II增大,同样呈现非均匀磨痕特征。综合来看,涂层I、涂层II和涂层III的高温耐磨性能均优于ZL110铝合金。其中,涂层II的磨痕最窄且磨损程度最轻,未出现扩展性崩裂和大量磨屑堆积,其高温耐磨性能优于涂层I和涂层II。



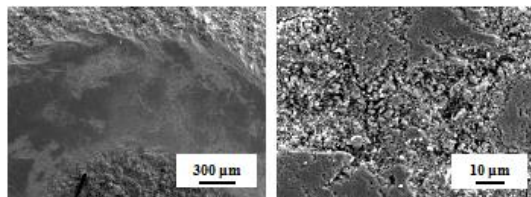
(a) ZL110 铝合金



(b) 涂层 I



(c) 涂层 II



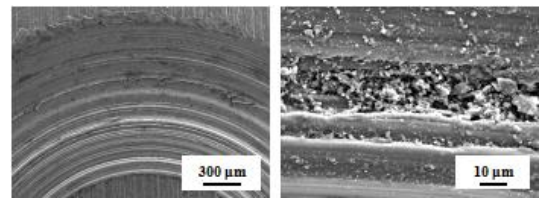
(d) 涂层 III

图7 ZL110 铝合金和 3 种复合陶瓷涂层在 200 °C 下形成的磨痕形貌

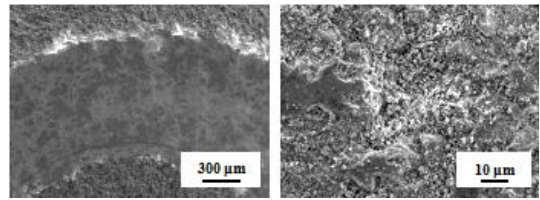
Fig.7 Morphology of wear scars formed at 200 °C on ZL110 aluminum alloy and three composite ceramic coatings

随着摩擦实验环境温度升至400 °C, ZL110铝合金、涂层I、涂层II和涂层III的磨痕宽度均增大, 崩裂和剥落区域扩大且磨屑堆积量增加, 表明磨损程度加重。结合前面内容分析, 高温环境可能导致涂层内部残余应力释放, 使涂层承受压入和抵抗剪切能力下降; 同时片层堆叠结构的黏结强度可能随着温度升高而降低, 易发生局部剥落, 导致陶瓷球嵌入涂层的体积增大, 因而磨损程度加重。即便如此, 涂层II的磨痕宽度仍小于涂层I和涂层III, 磨损程度较轻, 进一步证实其高温耐磨性能良好。

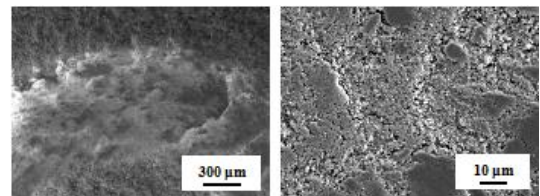
为辅助分析高温耐磨性能并探讨涂层I、涂层II和涂层III的磨损机制, 采用能谱仪对上述试样的未磨损区域以及在200和400 °C下形成的磨痕区域进行面扫描, 表面成分分析结果如图9和图10所示。对比得知, 涂层I、涂层II和涂层III的磨痕区域O元素



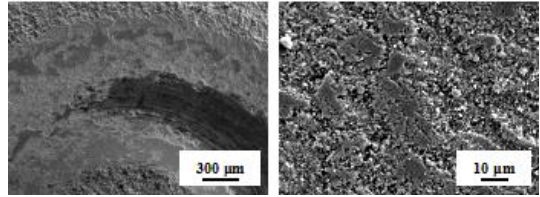
(a) ZL110 铝合金



(b) 涂层 I



(c) 涂层 II



(d) 涂层 III

图8 ZL110 铝合金和 3 种复合陶瓷涂层在 400 °C 下形成的磨痕形貌

Fig.8 Morphology of wear scars formed at 400 °C on ZL110 aluminum alloy and three composite ceramic coatings

表3 ZL110 铝合金和 3 种复合陶瓷涂层的磨痕宽度

Tab.3 Width of ZL110 aluminum alloy and other three composite ceramic coatings

试样名称	磨痕宽度/μm	
	200 °C	400 °C
ZL110 铝合金	1 200	1 315
涂层 I	950	1 040
涂层 II	880	970
涂层 III	1 060	1 220

的质量分数均高于未磨损区域, 且随着实验环境温度升高, O元素质量分数呈升高趋势。这一现象表明, 涂层I、涂层II和涂层III在200和400 °C条件下摩擦时表面均发生氧化。由于磨损会破坏涂层表面原

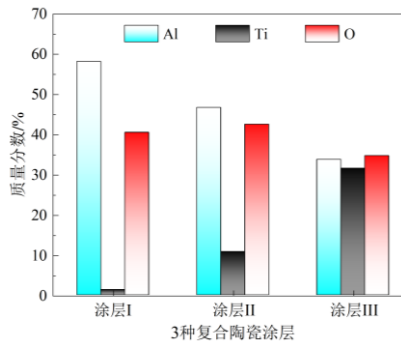


图9 3种复合陶瓷涂层的未磨损区域表面成分

Fig.9 Surface composition of unworn areas of three composite ceramic coatings

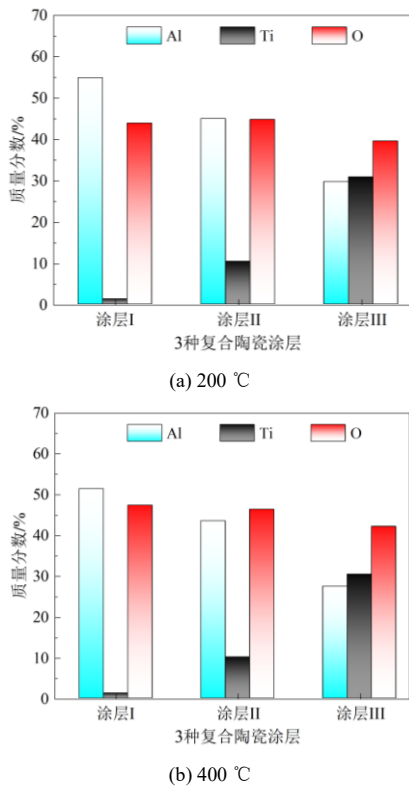


图10 3种复合陶瓷涂层在不同温度下的磨损区域表面成分 Fig.10 Surface composition of wear scar areas in three composite ceramic coatings at different temperature

始氧化层, 导致新鲜表面持续暴露, 氧化反应活性增强, 因而磨损区域O元素的质量分数升高。

结合磨损形貌与磨损区域的表面成分分析可知, 当温度为200 °C时, 涂层I和涂层II的磨损机制均以磨粒磨损为主, 而涂层III的磨损机制为磨粒磨损+轻度粘着磨损。当温度升至400 °C时, 涂层I和涂层II的磨损机制均转变为磨粒磨损+氧化磨损, 涂层III的磨损机制则转变为磨粒磨损+氧化磨损+重度粘着磨损。实验环境温度为400 °C时, 涂层磨损区

域因持续暴露在高温环境中会形成较厚的氧化层, 加之该区域本身存在剥落坑和微裂纹, 高温会加剧氧化层内应力累加, 导致其脆化易开裂。而开裂的氧化层会产生大量易剥落的氧化产物, 成为磨粒进一步诱发并加剧氧化磨损, 这是涂层I、涂层II和涂层III均发生氧化磨损的主要原因。相比较而言, 在200及400 °C条件下, 涂层II磨损区域O元素的质量分数升高幅度最小, 表明其氧化磨损程度最轻。

图11为以3种复合陶瓷涂层的孔隙率、α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相含量、硬度和磨痕宽度作为性能指标绘制的雷达图, 可直观反映涂层微观结构参数与宏观性能指标的关联性。由于4个指标的优劣评价标准不同, 需先对数据进行归一化处理。在此基础上, 通过比较雷达图中各指标围成的图形面积, 并结合指标间的均衡性, 综合衡量3种复合陶瓷涂层的高温耐磨性能。通常图形面积越大、各指标的均衡性越好, 对应涂层的高温耐磨性能良好。从图11看出, 涂层II的4个性能指标分布均衡, 无明显短板, 且4个性能指标围成的图形面积最大, 表明其高温耐磨性能良好。

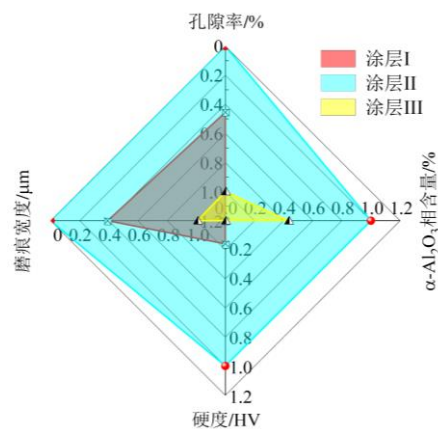


图11 3种复合陶瓷涂层的性能指标雷达图

Fig.11 Radar chart of performance indicators for three composite ceramic coatings

由于涂层I和涂层III表面粗糙且孔隙率较高, 在高温摩擦过程中易产生应力集中, 导致韧性下降并发生局部碎裂, 进而加速涂层剥落。同时, 这两种涂层的硬度相对低, 抵抗局部变形与磨粒压入犁削的能力较弱, 易形成“局部变形—碎裂剥落”的恶性循环。此外, 随着温度升高, 氧化磨损程度加重, 多重因素共同作用下, 最终导致涂层I和涂层III的高温耐磨性能较差。相比之下, 涂层II表面平整、孔隙率低且致密性较好, 在高温摩擦过程中应力分布相对均匀, 可承受较高的循环应力, 并且氧化磨损程

度较轻。同时,平整致密的表面不易滞留磨屑,能减轻额外磨损源造成的损伤<sup>[20]</sup>。加之该涂层硬度较高,在高温摩擦过程中表现出较强的抵抗局部变形和磨粒压入犁削能力,有效减轻碎裂剥落程度,因而其高温耐磨性能良好。

### 3 结论

(1) 将 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 粉末按照不同质量比例混合,采用等离子喷涂技术在适合制造活塞环的ZL110铝合金表面制备出3种复合陶瓷涂层,分别为:97% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +3% $\text{TiO}_2$ 涂层、80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +20% $\text{TiO}_2$ 涂层、40% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +60% $\text{TiO}_2$ 涂层。3种复合陶瓷涂层均呈现片层堆叠结构,厚度基本一致,为 $(204\pm 1)\mu\text{m}$ ,且都含有 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 相,硬度远高于ZL110铝合金,高温耐磨性能也优于ZL110铝合金。

(2) 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +20% $\text{TiO}_2$ 涂层表面相对平整,孔隙率仅为1.37%,其硬质相 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 含量较高(20.5%),硬度达到856.4 HV,高温耐磨性能优于97% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +3% $\text{TiO}_2$ 涂层和40% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +60% $\text{TiO}_2$ 涂层。得益于良好的致密性、高硬质相含量以及较强的抵抗外力压入和局部变形能力,80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +20% $\text{TiO}_2$ 涂层表现出良好的高温耐磨性能。

### 参考文献

- [1] 张利敏,袁晓帅,强慧,等.基于活塞环-缸套边界润滑模型的表面织构摩擦学性能评估[J].车用发动机,2024(5):12-17.
- [2] 何星,王宪成,李奇,等.车辆发动机缸套-活塞环磨损失效分析[J].润滑与密封,2013,38(10):1-5.
- [3] 汤春峰,曲选辉,段柏华.内燃机活塞环材料及其表面处理[J].内燃机配件,2006(5):3-6.
- [4] 刘伟,谭泽飞,陈文刚,等.内燃机活塞环材料及表面处理技术研究现状与发展趋势[J].表面技术,2024,53(12):36-49.
- [5] 韩冰源,高祥涵,杜文博,等.不同温度下铝合金表面等离子喷涂镍基涂层的摩擦学性能研究[J].机械工程学报,2024,60(24):177-187.
- [6] TEMEL M, CELIK I, BENLI B. Improvement and characterization of the surface properties of AA5083 aluminum alloy by plasma spraying methods[J]. Metallic Materials, 2024, 62(5): 313-325.
- [7] 宋仁国,王超,姜彦,等.等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 纳米陶瓷复合涂层的微观结构及性能[J].材料热处理学报,2012,33(s2):145-150.
- [8] ZENG X, CHEN X X, WANG Y J, et al. Corrosion behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40% $\text{TiO}_2$  coating deposited on 20MnNiMo steel via atmospheric plasma spraying in hydrogen sulfide seawater stress environments[J]. Coatings, 2024, 14(5): 588.
- [9] YU X, JIANG R, GAO Y, et al. Microstructure and wear-resistant behaviors of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  reinforced Ni-based composite coating plasma-sprayed on 6061 aluminum alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2024, 487: 131032.
- [10] 吴护林,黄安畏,李忠盛,等. $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$ 绝缘防护复合涂层组织及电偶腐蚀性能[J].表面技术,2023,52(3):266-286.
- [11] 王超,宋仁国.等离子喷涂纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷复合涂层高温氧化和热震性能研究[J].热加工工艺,2012,41(14):145-147.
- [12] 宋仁国,王超,卢果.等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40% $\text{TiO}_2$ 陶瓷复合层的微观结构及耐磨性能[J].材料保护,2012,45(8):58-59.
- [13] HE L, TAN Y F, ZHOU C H, et al. Tribological properties of nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40% $\text{TiO}_2$  multiphase ceramic particles reinforced Ni-based alloy composite coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013(23): 2618-2627.
- [14] 田博,丁庆军,赵盖,等.等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ 陶瓷涂层摩擦学性能研究[J].热加工工艺,2014,43(22):142-148.
- [15] 宫文彪,孙大千,孙喜兵,等.等离子喷涂纳米团聚体粉末的熔化特性研究[J].材料热处理学报,2007,28(4):125-129.
- [16] JIA S K, ZOU Y, XU J Y, et al. Effect of  $\text{TiO}_2$  content on properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thermal barrier coatings by plasma spraying[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015(25): 175-183.
- [17] 王晓辉,李新梅,张景.喷涂距离对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ 涂层组织与干摩擦性能的影响[J].电镀与精饰,2019,41(11):1-5.
- [18] 贺耿超.2A12铝合金表面等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层及其耐磨与热控性能研究[D].西安:西安理工大学,2023.
- [19] 李荣泽,赵晓琴,段文山,等.等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层与高硬配副的摩擦学性能研究[J].表面技术,2021,50(9):184-195.
- [20] 孙琛扬,王疆瑛,张高会,等.溅射功率对直流磁控溅射 $\text{TiAlN}$ 涂层组织和摩擦学性能的影响[J].机械材料,2024,48(5):116-122.