

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等离子喷 涂层的摩擦磨损特性

任靖日<sup>1</sup>, 金石三<sup>2</sup>

(1. 延边大学理工学院 机械系, 延边 延吉, 133000; 2. 庆北大学 机械工学部, 韩国 大邱, 702701)

**摘要:** 研究了 AC4C 铸铝合金表面等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷粉末涂层的滑动摩擦磨损特性; 采用划痕试验方法测定了涂层与基体之间的结合强度; 用扫描电子显微镜观察分析了磨痕形貌和涂层显微组织特征. 研究表明: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的摩擦学性能优于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 涂层; 涂层的结合强度、硬度和表面空隙对磨损影响较大; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 涂层的磨损机理主要表现为塑性变形和层状剥离; 而 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层则主要为磨粒磨损.

**关键词:** 等离子喷涂; 涂层; 结合强度; 磨损机理

**中图分类号:** TG174

**文章标识码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2000)01-0018-04

用等离子喷涂技术可提高零部件的耐磨性和耐腐蚀性<sup>[1]</sup>, 其在机械和航空等领域中已获得了较为广泛的应用. 喷涂材料一般选用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、WC-Co 和 TiO<sub>2</sub> 等陶瓷粉末<sup>[2]</sup>. 在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末中掺入 TiO<sub>2</sub> 可减小涂层的孔隙率, 提高强度、韧性和耐磨性<sup>[3]</sup>. 目前关于钢基体上涂层耐磨性影响因素的研究较多<sup>[4-6]</sup>, 但针对铝合金基体上涂层的摩擦学特性的研究较少. 本文作者研究 AC4C 铸铝合金表面等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的滑动摩擦磨损特性.

## 1 试验部分

### 1.1 试样制备

试样基体为铸铝合金 AC4C, 其尺寸为  $\Phi 30$  mm  $\times$  10 mm. 将试样表面预先进行喷砂加工, 表面粗糙度  $R_a$  为 7.5  $\mu$ m. 喷涂材料用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷粉末. 将粉末原料在电炉中烧结, 再碾碎成不规则颗粒状, 其尺寸为 15~45  $\mu$ m. 将 60% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 40% 的 TiO<sub>2</sub> 粉末 (以质量分数计) 混合成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 粉末. 用 Hexa 等离子喷涂系统, 其喷涂参数和涂层性质见表 1. 在摩擦磨损试验前将各涂层试样表面进行研磨加工, 使表面粗糙度  $R_a$  为 0.1  $\mu$ m.

### 1.2 涂层表面分析

图 1 所示为涂层研磨表面形貌的扫描电子显微 (SEM) 照片. 可见, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 涂层表面上有许多气孔和热喷涂涂层的典型缺陷. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层则呈现出

较致密的结构. 这是由于制备 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 喷涂层时温度较高, 氢气 (H<sub>2</sub>) 流量较大, 喷涂时 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末已熔融, 有利于改善涂层的致密性.

### 1.3 摩擦磨损试验

摩擦磨损试验在 EFM-3-E 型回转式摩擦磨损试验机上进行, 采用如图 2 所示的球-盘接触方式. 上试样为  $\Phi 2.7$  mm 的 SiC 陶瓷球. 试验在室温、大气和干摩擦条件下进行, 滑动速度为 0.1 m/s, 载荷分别

表 1 Hexa 喷涂参数

Table 1 The parameters for Hexa plasma spraying

Parameter	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -40% TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Current/A	500	500
Primary gas/l · min <sup>-1</sup>	250 (N <sub>2</sub> )	250
Secondary gas/l · min <sup>-1</sup>	100 (H <sub>2</sub> )	120
Powder carrier gas/l · min <sup>-1</sup>	13 (Ar)	13 (Ar)
Powder inlet position	Internal	Internal
Feed rate/g · min <sup>-1</sup>	60	60
Stand-off distance/mm	160	160
Traverse speed/mm · min <sup>-1</sup>	5 000	5 000

为 50 N、100 N 和 150 N. 由于在载荷 150 N 下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 涂层很快发生破坏, 因此, 其相应载荷分别选 50 N 和 100 N. 所有试样均用丙酮超声清洗 5 min. 用 Mitutoyo Surf-500 型表面粗糙度仪和面积计测定并计算磨损体积损失. 涂层的显微硬度用 Shimadzu HMV-200 型硬度计测得. 采用划痕试验方法测定涂层破坏时的临界载荷. 所有试验数据均为

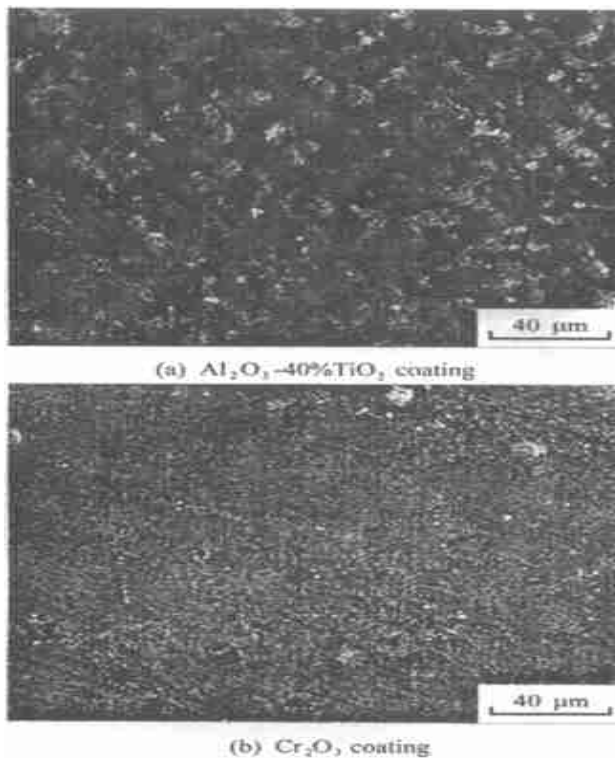


Fig 1 SEM photograph of coating surface for  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  coating and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coating

图 1  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层表面形貌 SEM 照片

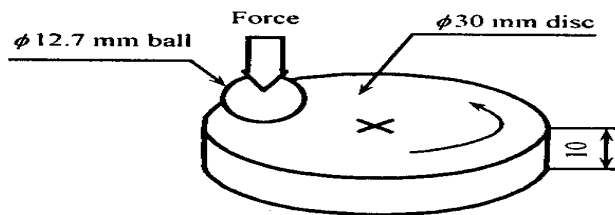


Fig 2 Schematic illustration of ball-on-disk test rig  
图 2 球-盘摩擦副接触示意图

3 个试样测试结果的平均值 用 SEM 观察磨痕形貌和涂层显微组织

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层的显微硬度和结合强度

测量硬度时,为减少软基体的影响,载荷不宜过大,本试验取载荷为 1 N. 表 2 示为试样显微硬度的

表 2 试样的硬度

Table 2 Vickers hardness of specimen

Specimen	AC4C	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -40% $\text{TiO}_2$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	SiC
Vickers hardness/GPa	0.93	7.84	14.70	28.00

测试结果 可见,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层硬度为 14.7HV, 而

$\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层硬度为 7.84HV, 前者约为后者的 2 倍 图 3 为划痕试验下,不同厚度涂层发生破坏时的临界载荷 可见,涂层厚度为 50  $\mu\text{m}$  时,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂

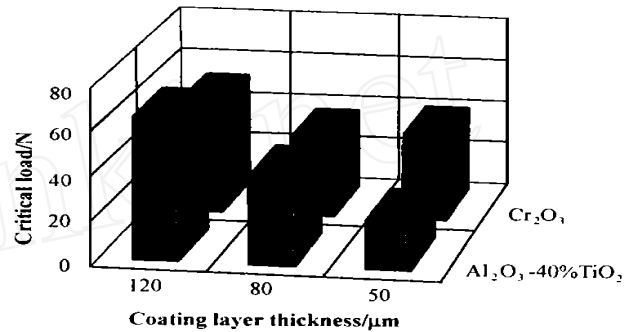


Fig 3 Critical loads for  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coatings vs thickness

图 3 不同厚度  
的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的临界载荷

层的结合强度较高 涂层较厚时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层的临界载荷较高

### 2.2 涂层的摩擦学特性

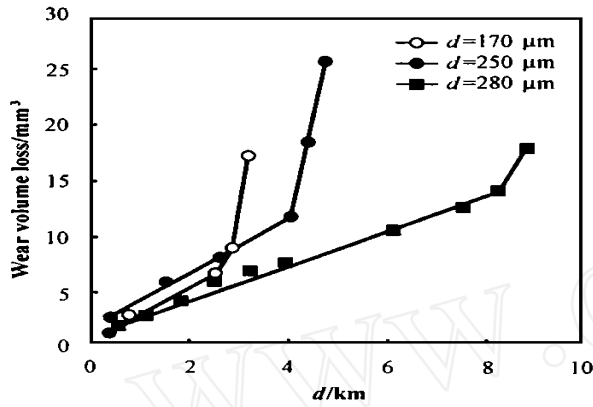
摩擦试验结果表明,在载荷分别为 50 N, 100 N 和 150 N 下,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层的摩擦系数分别为 0.62, 0.52 和 0.50; 而  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层则为 0.49, 0.42 和 0.41. 可见,摩擦系数随载荷的增加略有减小 我们认为,载荷增大时软基体变形加剧,涂层随基体的变形而变形,使 SiC 球面与涂层之间接触面积增加,导致摩擦系数减小 在相同条件下  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的摩擦系数小于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层

在载荷为 100 N 时,不同厚度的 2 种涂层的磨损体积损失与滑动距离的变化关系如图 4 所示 可见,磨损体积损失与滑动距离成正比 当滑动一定距离后,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层的磨损曲线上出现拐点,拐点以上磨损量激增 拐点可用作涂层使用寿命的衡量尺度 而  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的磨损曲线上未出现拐点 表 3 为 2 种涂层的磨损率比较 可见,在相同条件下硬度较高的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的耐磨性高于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层<sup>[7]</sup> 当载荷为 50 N 时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层的磨损率稳定在  $6.32 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ , 且随厚度变化不大; 当载荷为 100 N 时,厚 170~250  $\mu\text{m}$  涂层的磨损率为  $23.1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ ; 而厚 300  $\mu\text{m}$  涂层的磨损率约为  $14.9 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ .

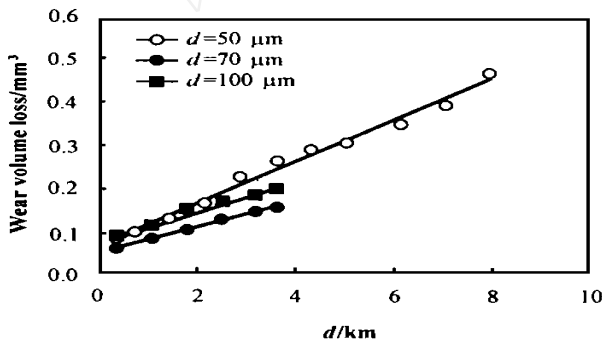
图 5 为厚 50  $\mu\text{m}$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层在载荷 50 N 下的磨损表面形貌 SEM 照片. 可见联成网状的许多裂纹和塑性流动及层状剥离和断裂迹象, 并出现

剥离后的层状颗粒界面 这是因为等离子喷涂层具有

复作用下, 缺陷处形成微裂纹, 并沿层间缺陷扩展, 造成层状颗粒的断裂与剥离 这与 Kim<sup>[8]</sup>等指出的最大拉应力使接触部后端发生表面裂纹的观点相一致 图 6 为厚 70 μm 的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层在载荷 100 N 下的磨



(a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> coating



(b) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating

Fig 4 Variation of wear volume for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings under 100 N

图 4 载荷 100 N 下不同厚度的

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的磨损体积损失变化

表 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的磨损率

Table 3 Wear rate for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings

Specimen	Wear rate/10 <sup>-4</sup> mm <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup>	Normal load/N
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -40% TiO <sub>2</sub>	6.32	50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -40% TiO <sub>2</sub>	14.90~23.10	100
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.56	100

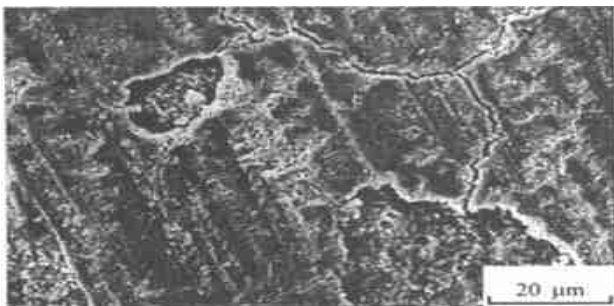


Fig 5 SEM photograph of the cracking of worn surface for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> coating

图 5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> 涂层磨损裂纹形貌 SEM 照片

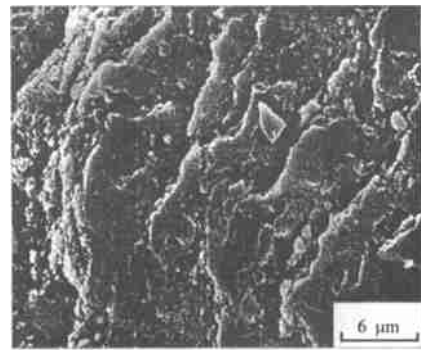


Fig 6 SEM photograph of the network cracking for Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating

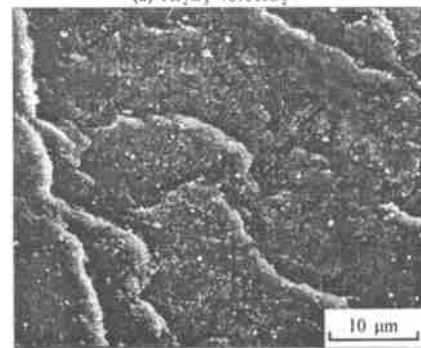
图 6 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层网状裂纹形貌 SEM 照片

损表面 SEM 照片, 可见许多网状裂纹和颗粒剥落 这是涂层的脆性和表面缺陷使裂纹生长和颗粒脱落的结果 涂层在滑动摩擦过程中受压应力和拉应力的复合作用, 导致涂层颗粒在临界应力下断裂并剥离

图(7 和 8)为图(5 和 6)的 2 种涂层磨损表面的



(a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub>



(b) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fig 7 SEM photograph of the wear track for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings

图 7 2 种涂层的磨损形貌 SEM 照片

层状结构, 层间结合力较小; 在压应力和拉应力的反

局部放大照片. 图 7 中可观察到沿滑动方向形成的

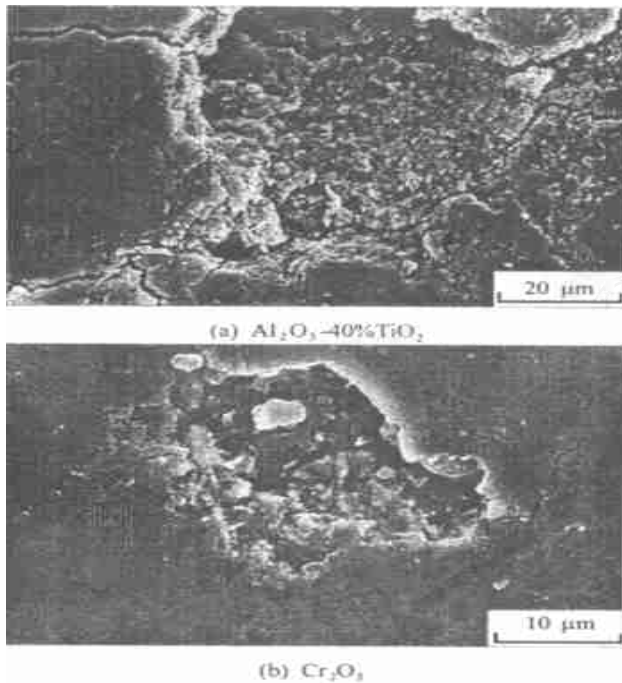
塑性流动迹象和等离子喷涂层的空隙和缺陷 图 8  $\text{TiO}_2$  涂层

Fig 8 SEM photograph of the surface crack initiation in surface defects for  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coatings

图 8 2 种涂层的磨损表面裂纹形貌 SEM 照片

显示滑动表面的塑性变形、裂纹形成和微粒脱离

### 3 结论

a  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的结合强度高于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%

b  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的摩擦系数及磨损率均小于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层的磨损率随其厚度的增加而增加, 其最佳厚度约为 300  $\mu\text{m}$ .

c  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  涂层的磨损机理主要表现为塑性变形和层状剥离; 而  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的磨损机理主要为磨粒磨损; 在较大载荷下,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的磨损呈现脆性断裂特征

### 参考文献

- [1] Sture H, Per H. Tribology Characterization of Thin, Hard Coatings [C]. Proceedings of the 6th Nordic Symposium on Tribology, 1994, 3: 735~ 747
- [2] 丁传贤, 张叶方. 等离子喷涂涂层材料[J]. 表面工程, 1994, 4: 1~ 7
- [3] Wang Y, Jin Y, Wen S. The analysis of the friction and wear mechanisms of plasma-sprayed coating at 450 [J]. Wear, 1988, 128: 267~ 276
- [4] 李剑锋, 戴玮玮, 丁传贤. 等离子喷涂碳化铬-镍铬涂层的摩擦学特性[J]. 摩擦学学报, 1996, 16(1): 14~ 20
- [5] 揭晓华, 胡树兵, 毛志远.  $\text{Ni-Cr-B-Si}$  合金粉末等离子喷涂层的高温滑动磨损特性[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(4): 306~ 311
- [6] Park B H, Chae Y H, Kim S S. Sliding wear behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiCr}$  coating [C]. Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting A, 1998, 68~ 73
- [7] 林化春, 丁润刚. 镍基合金-碳化铬复合涂层耐磨特性的研究[J]. 摩擦学学报, 1996, 16(3): 277~ 281
- [8] Kim S S, Kim S W, Hsu S M. A New Parameter for Assessment of Ceramic Wear[J]. Wear, 1994, 179: 69~ 73

## Friction and Wear Characteristics of Plasma-sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40% $\text{TiO}_2$ and $\text{Cr}_2\text{O}_3$ Coatings on Aluminum Alloy

REN Jing-ri<sup>1</sup>, KM Seock-sam<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Yanbian University, Yanji 133000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu 702701, Korea)

**Abstract:** The wear characteristics and wear mechanisms of plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coatings on casting aluminum alloy (AC4C) were investigated. The bonding strength between the substrate and the coating was measured by scratch tester. The profile of worn coating surface and microstructure of the coatings were observed with SEM. The wear mechanism is discussed as well. The experimental results indicate that the wear resistance of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coating is greater than that of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  coating. The friction coefficient of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coating in sliding against SiC ceramic ball is lower than that of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  coating against the same counterface. It has also been found that the bonding strength, voids and porosities of the coating surface govern the friction and wear properties of the coatings. The wear mechanism of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$  coating is mainly plastic deformation and delamination, whereas that of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coating is abrasive wear.

**Key words:** plasma spray; coating; bonding strength; wear mechanism