

表面摩擦磨损与润滑

# 铝合金表面 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 涂层的制备及耐磨性研究

邵若男<sup>1a</sup>, 贺甜甜<sup>1a,2</sup>, 杜三明<sup>1a</sup>, 王家威<sup>1b</sup>,  
蔡宏章<sup>1a</sup>, 张永振<sup>1a</sup>

(1.河南科技大学 a.高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室 b.材料科学与工程学院,  
河南 洛阳 471023; 2.清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** **目的** 研究  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量对  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 复合涂层摩擦磨损性能的影响。**方法** 采用大气等离子喷涂技术, 在 6082-T6 铝合金基体表面分别制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 30%、50% 和 70% 的 30% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70%Ni、50% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -50%Ni、70% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%Ni 复合涂层。对三种涂层的显微硬度和摩擦磨损性能进行对比研究, 并分析原始粉末和涂层的相组成、涂层组织结构、磨损形貌和磨损机制。**结果** 原始粉末中的部分  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  相在急冷条件下转变成  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  新相, 涂层中各衍射峰出现明显的宽化现象, 有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  非晶相生成。三种试样均由基体、打底层、涂层组成, 基体与打底层之间有明显的分界面, 打底层因与涂层化学成分相似使分界面不明显, 层与层之间结合良好。涂层的显微硬度明显高于基体, 约为基体硬度的 4~5 倍, 且其随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加而增加。在试验条件下, 涂层的摩擦系数、磨痕宽度、磨损率均随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加而减小, 相较于 30% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70%Ni 涂层, 70% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%Ni 涂层的摩擦系数降低了 13%, 磨损率降低了 66.7%。30% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70%Ni 涂层磨损最严重, 磨痕表面剥落明显, 而 50% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -50%Ni 涂层与 70% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%Ni 涂层磨损后, 磨痕表面产生大量即将剥落的“橘皮状”氧化物, 磨损机制均为氧化磨损与粘着磨损的混合。**结论**  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 复合涂层中增加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量可以提高复合涂层的耐磨性。

**关键词:** 等离子喷涂;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 涂层; 摩擦系数; 磨损率; 磨损机制

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0173-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.019

## Preparation and Wear Resistance of $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni Coating on Aluminum Alloy Surface

SHAO Ruo-nan<sup>1a</sup>, HE Tian-tian<sup>1a,2</sup>, DU San-ming<sup>1a</sup>, WANG Jia-wei<sup>1b</sup>,  
CAI Hong-zhang<sup>1a</sup>, ZHANG Yong-zhen<sup>1a</sup>

(1.a. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology,

b. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

收稿日期: 2019-08-28; 修订日期: 2019-11-23

Received: 2019-08-28; Revised: 2019-11-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51905153); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLTKF18B14)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51905153), the Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology of Tsinghua University (SKLTKF18B14)

作者简介: 邵若男 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事材料摩擦学研究。

**Biography:** SHAO Ruo-nan (1995—), Female, Master, Research focus: material tribology.

通讯作者: 贺甜甜 (1986—), 女, 博士, 讲师, 主要从事材料表面改性研究。邮箱: tthe@haust.edu.cn

**Corresponding author:** HE Tian-tian (1986—), Female, Doctor, Lecturer, Research focus: surface modification of materials. E-mail: tthe@haust.edu.cn

引文格式: 邵若男, 贺甜甜, 杜三明, 等. 铝合金表面  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 涂层的制备及耐磨性研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 173-179.

SHAO Ruo-nan, HE Tian-tian, DU San-ming, et al. Preparation and wear resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni coating on aluminum alloy surface [J]. Surface technology, 2020, 49(4): 173-179.

2.State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** The purpose of this paper is to study the effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content on friction and wear properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni composite coating. The 30wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70wt.%Ni, 50wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -50wt.%Ni, 70wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30wt.%Ni composite coatings which contained 30%, 50% and 70%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  were deposited on the 6082-T6 aluminum alloy surface by air plasma spraying. The microhardness, friction and wear properties of the three coatings were compared and the phase composition of the original powder and the coating, the coating microstructure, wear morphology and wear mechanism were analyzed. Part of the original powder of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  phase were transformed into a new phase of  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  under quench condition. Various diffraction peaks in the coating showed obvious broadening phenomenon. Meanwhile, the amorphous phase of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  generated. The three kinds of samples were composed of the substrate, the priming coating and the coating. There was an obvious interface between the substrate and the priming coating. While the interface between the priming coating and the coating was not obvious because of its similar chemical composition. The good bonding formed between the layers. The microhardness of the coating was significantly higher than the substrate, which was about 4~5 times of the substrate. What's more, it increased with the increase of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content. The friction coefficient, wear width and wear rate decreased with the raising of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content under the test condition. Compared to the 30wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70wt.%Ni coating, the friction coefficient and the wear rate of the 70wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30wt.%Ni coating reduced by 13% and 66.7%, respectively. The 30wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70wt.%Ni coating had the most serious wear, which with obvious peeling on the surface of wear scar, while 50wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -50wt.%Ni coating and 70wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30wt.%Ni coating produced a large number of "orange dermatoid" oxide. The wear mechanism was a mixture of oxidation wear and adhesive wear. The wear resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni composite coating can be improved by increasing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content.

**KEY WORDS:** plasma spraying;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni coating; friction coefficient; friction wear; wear mechanism

轻量化是解决世界各国资源供需不平衡这一问题的有效途径。铝及其合金由于硬度低、耐磨性差等缺陷,在实际大范围应用中受到限制<sup>[1]</sup>。表面工程技术通常在不改变整体材质的情况下即可获得本体材料不具备的一些特殊性能,故许多情况下选择采用涂层材料比整体材料更方便<sup>[2]</sup>。等离子喷涂与渗碳、电镀等相比,喷射粒子速度高、热源温度高、沉积效率高,形成的涂层中氧化物和杂质含量少、孔隙率低、致密、结合强度高,尤其适合陶瓷材料的喷涂<sup>[3]</sup>。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷涂层熔点高、硬度高、耐磨性好,在航空航天等领域均有广泛应用。

近年来,为研究  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层的性能,国内外专家学者做了广泛的研究。E. Klyatskina 等<sup>[4-5]</sup>采用悬浮等离子喷涂技术加工的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  陶瓷涂层的耐磨性明显高于纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层。陈斌星等<sup>[6]</sup>发现,在相同试验条件下,Al-25% $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层相较于纯 Al 涂层有更小的磨损率。周建忠等<sup>[7]</sup>发现采用激光熔覆工艺制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  增强 Fe901 金属陶瓷复合涂层,添加适量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷有助于提高涂层的显微硬度及耐磨性。M. Mittal 等<sup>[8]</sup>尝试用 10%、20%、30% 的氧化铝增强等离子喷涂羟基磷灰石的力学性能,发现显微硬度、抗拉强度和耐磨性随氧化铝含量的增加而增加。宋博等<sup>[9]</sup>发现采用大气等离子喷涂法在 FeAl 中添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  可显著提高涂层的显微硬度、结合强度以及干滑动摩擦条件下的耐磨性。P. Suresh Babu 等<sup>[10]</sup>发现,与  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层相比, $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层的致密无裂

纹结构使其摩擦学性能和耐蚀性得到提高。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层的耐磨性好,但单一的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  流动性差、脆性大、易剥落,制成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层孔隙度高、结合强度低,耐磨性不能得到保证<sup>[11-12]</sup>。在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层中加入第二相或在其他涂层中添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒,均可显著提高涂层的耐磨性能。

Ni 的延展性和耐腐蚀性好、熔点低、加热后流动性好,易于填充  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末所形成的孔隙,作为粘结相可以显著增强涂层与基体的结合强度和韧性。S. Pourhosseini 等<sup>[13]</sup>采用化学镀 Cu、Ni、Co 对氧化铝纳米粒子进行改性,发现 Ni 镀层法是降低纳米复合材料结构缺陷的最有效方法,且在不同的涂层剂中,Ni 对提高纳米复合材料的硬度和抗压强度具有较好的效果。江健等<sup>[14]</sup>发现采用电沉积法在 45# 钢表面制备 Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合镀层可有效提高其耐磨性。兰州理工大学蔡龙龙等<sup>[15-16]</sup>发现,在 45# 钢表面采用超音速等离子喷涂技术,在 Ni60A 中添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  可提高涂层的硬度和耐磨性,且当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  体积分数为 25% 时,涂层的显微硬度和耐磨性能最好。目前对铝合金表面 Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层耐磨性的研究较少,本文选择将微米级的 Ni60 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末进行混合,采用大气等离子喷涂技术将 Ni60 优良的导热性、塑韧性、抗氧化性和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  耐磨性相结合,在 6082-T6 铝合金基体表面,经过多次喷涂参数测试后,制备出  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 金属陶瓷复合涂层,研究  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量对  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 复合涂层显微硬度和摩擦磨损性能的影响,为其使用领域的

拓展提供一定的理论参考。

## 1 试验

### 1.1 涂层原料

本试验原料选用颗粒尺寸在 40~60 μm 之间、纯度为 99.9% 的上海允复科技生产的 Ni60 粉末和北京桑尧科技生产的铝包镍 (Ni/Al) 粉末、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ni 分别按质量比 3:7、1:1、7:3 配制成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 复合混料, 在 V-100L 混料机上混料 1 h, 混料时需在复合混料中加入质量约为混料质量 1.5 倍的氧化铝陶瓷球。混料后的 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70%Ni 粉末形貌如图 1 所示, 可知 Ni60 粉末为平均粒径约为 30~60 μm 的灰白色球状, 粒径相对均匀, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末混料后呈不规则块状, 因在球磨过程中发生破碎, 平均粒径由 40~60 μm 减小到约 20~40 μm。

### 1.2 涂层制备

本试验基体材料选用尺寸为 φ30×7 mm 的 6082-T6 铝合金, 打底层选用 Ni/Al 粉, 喷涂前将混好的粉末在 100 °C 箱式烘干机中烘烤 1 h, 并对试样

进行预处理和预热。预热是为去除基体中的水分, 提高喷涂时基体表面温度, 减小基体与涂层材料之间在喷涂中造成的残余应力, 从而避免喷涂后涂层开裂, 提高涂层与基体之间的结合强度。采用 ZB-80K 等离子控制系统设备, 制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数为 30%、50%、70% 的 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70%Ni、50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-50%Ni、70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%Ni 复合涂层和 Ni/Al 打底层, 本试验喷涂工艺参数如表 1 所示。

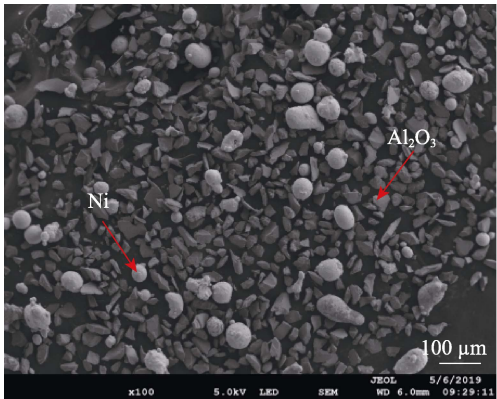


图 1 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70%Ni 粉末形貌  
Fig.1 Morphology of 30wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70wt.%Ni Powder

表 1 等离子喷涂工艺参数  
Tab.1 Plasma spraying process parameters

Parameters	Current/A	Voltage/V	Ar/(L·min <sup>-1</sup> )	H <sub>2</sub> /(L·min <sup>-1</sup> )	Spray distance/mm	Spray angle/(°)	Feeding rate/(r·min <sup>-1</sup> )
Ni/Al	500	50	40	1	100	90	0.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ni	550	55	40	1	100	90	0.45

### 1.3 物相分析、组织结构与力学性能表征

采用 D8-advanced 型 X 射线衍射仪对喷涂前的粉末和喷涂后的涂层进行物相分析, 扫描角度为 20°~90°, 速度为 0.2 (°)/s。采用 JSM-5610LV 型扫描电镜观察三种涂层截面组织与磨痕形貌。显微硬度采用 HVS-1000A 型数显显微硬度仪进行测试, 载荷为 50 g, 保荷时间为 15 s。

### 1.4 涂层摩擦磨损性能

在常温 24 °C、相对湿度为 32%、恒定载荷为 720 g、恒定转速为 400 r/min、摩擦半径为 2 mm、时间为 15 min、总转数为 6000 r 的条件下, 在中国科学院兰州中科凯华科技开发有限公司生产的 QG-700 型高温气氛摩擦磨损试验机上, 进行涂层的摩擦磨损试验, 选用球-盘式接触方式, 对磨球选用 φ6.3 mm 的 GCr15 钢球。

摩擦系数由主控计算机程序自动采集, 并在电脑上直观显示。磨损率按照公式 (1) 计算, 其中,  $w$  为磨损率, 是单位载荷、单位滑动距离的磨损体积, mm<sup>3</sup>/(N·m);  $\Delta V$  为磨损体积, mm<sup>3</sup>,  $\Delta V=2\pi rA$ , 其

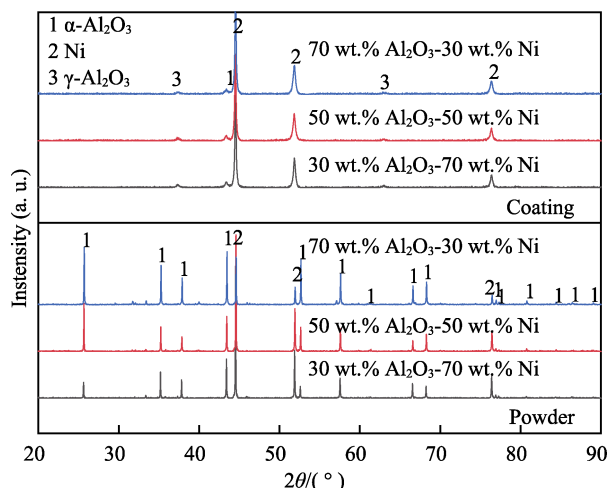
中  $A$  为采用 Nanofocus AG 型三维表面轮廓仪表征的涂层的磨痕截面积 (mm<sup>2</sup>);  $r$  为摩擦半径, mm;  $n$  为总转数, r;  $F$  为载荷, N。

$$w = \frac{\Delta V}{2\pi rnF} \tag{1}$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层物相分析

图 2 为三种不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 原始粉末和涂层的 XRD 图谱。从图 2 中可以看出: 除峰强外, 三种原始粉末晶相组成相同, 其相应的涂层晶相组成也相同, 故三种涂层显微硬度和耐磨性能的差异主要是由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Ni 含量差异所致。原始粉末中部分 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 转变为 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 与对应的原始粉末相比, 涂层中各衍射峰出现明显的宽化现象。α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末在等离子喷涂过程中快速熔化, 急冷状态下, 亚稳态低界面能的 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在固液界面处优先形核并长大, 所以喷涂后涂层中有新相 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生成<sup>[17]</sup>。而涂层中的 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 则是在喷涂过程中以未完全熔化的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗

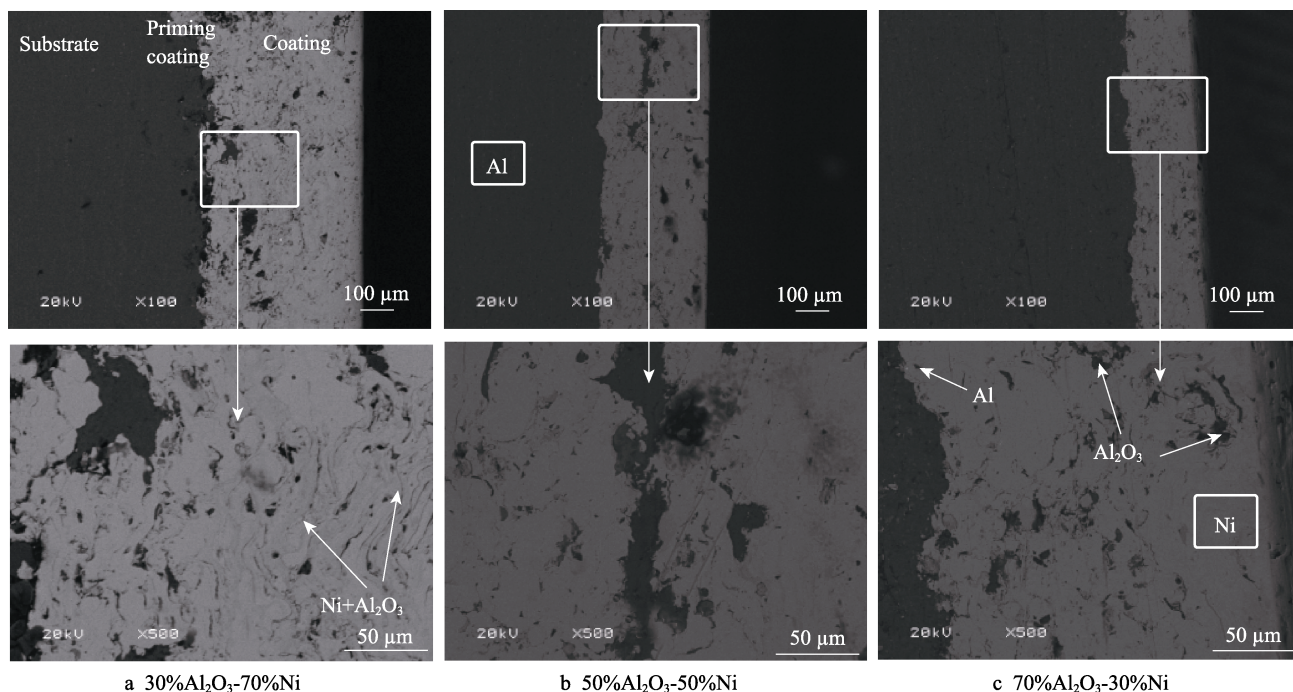
图2 不同成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 原始粉末和涂层的 XRD 图谱Fig.2 XRD patterns of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni original powders and coatings with different components

粒为晶核,在凝固过程中生长而保留下来的。峰形宽化一方面可能是由于晶粒细化,另一方面可能是晶化不完全。结晶度越好,峰越尖锐,而晶化程度低则会出现明显的峰形宽化<sup>[18]</sup>。相较于原始粉末,涂层中

Ni 相的衍射峰高,而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相的衍射峰低、衍射峰面积小、晶相含量低,故可推测涂层的 Ni 相含量多,而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相明显减少一方面可能是 Ni 抑制  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶化,另一方面则可能是在等离子喷涂过程中生成的小颗粒容易过热或过冷,从而形成非晶结构<sup>[19]</sup>。

## 2.2 涂层微观组织

图3为不同成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 涂层截面形貌。由图3可以看出,图中左侧整片黑色区域为铝合金基体,右侧为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 涂层,涂层与基体中间区域则为 Ni/Al 打底层。涂层中灰白色区域成分为 Ni,灰白区域上黑色区域为 Al 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,水流状区域则为 Ni 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的混合。三种涂层均由基体、打底层、涂层组成,各层之间结合良好,基体与打底层之间有明显的界面,打底层与涂层中均含有 Ni 与 Al,故界面不明显。随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加,扫描图中的黑色区域逐渐增加,且 30% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70%Ni 涂层中可以明显看到呈水流状的 Ni 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的混合,这是因为 30% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70%Ni 涂层中 Ni 含量高、熔点低,加热过程中易熔化,熔融状态下的流动性好。

图3 不同成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 涂层截面形貌Fig.3 Section morphologies of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni coating with different components: (a)30wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -70wt.%Ni, (b)50wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -50wt.%Ni, (c)70wt.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30wt.%Ni

## 2.3 涂层显微硬度

硬度关系到涂层的使用性能和寿命<sup>[20]</sup>。图4为不同成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni 涂层显微硬度,由图4可知,涂层的显微硬度明显高于铝合金基体,约为基体硬度的4~5倍,且其随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加而增大。硬度

与表面质量及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量有关,具有更高硬度的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒在涂层中形成弥散分布状态,从而促进整个涂层硬度的提升,且  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量越高,硬度越大。但涂层中分布不均匀的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒造成了涂层表面硬度波动,从而造成涂层各部位硬度偏差值也明显高于基体。



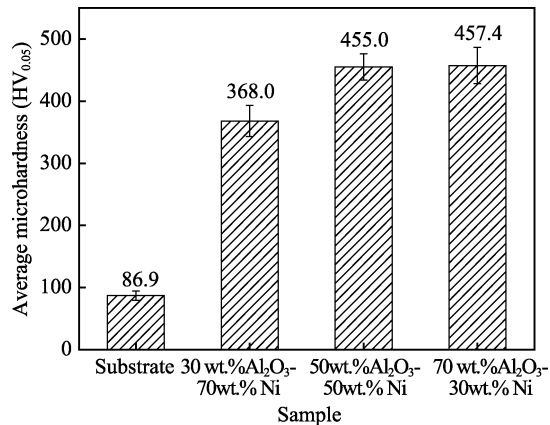


图 4 不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层显微硬度  
Fig.4 Comparison of microhardness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni coating with different components

2.4 涂层的摩擦磨损性能

图 5 为不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层摩擦系数与磨损率对比。图 5a 为三种涂层的摩擦系数随时间变化的关系曲线。从图 5a 可以看出，在相同试验条件下，不同成分的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层摩擦系数在开始时急剧增大，经过一小段时间磨合后趋于动态平衡，且 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni

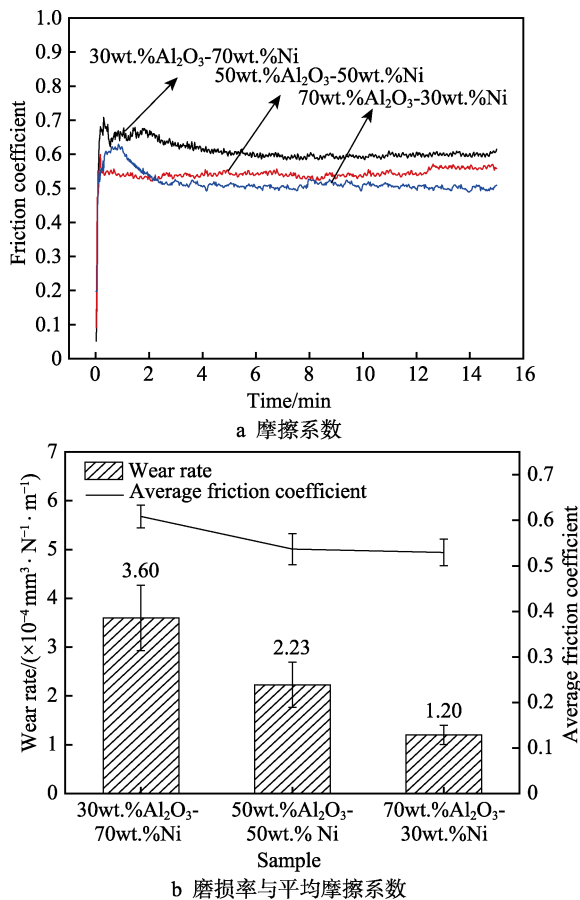


图 5 不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层摩擦系数与磨损率对比  
Fig.5 Comparison of friction coefficient and wear rate of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni coating with different components: (a) friction coefficient, (b) wear rate and average friction coefficient

涂层的摩擦系数随着涂层中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加而逐渐减小。球盘式的接触方式导致在试验初始阶段，试样与对磨球为点接触，粗糙度相差较大的涂层表面和 GCr15 对磨球在实际接触时只有少数 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒微凸起与对磨球相接触，较少的微凸起数目使顶端承载能力小，涂层所能提供的切向阻力也比较小，故此时的摩擦力较小，摩擦系数低。随着摩擦时间的延长，涂层表面微凸起在摩擦过程中被磨平或脱落，表面粗糙度降低，同时接触方式也由初始阶段的点接触逐渐转变为面接触，实际接触面积增大导致摩擦系数提高，摩擦接触状态逐渐趋于稳定，摩擦系数达到动态平衡。

从图 5b 可以看出，不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层磨损率与平均摩擦系数均随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加而减小，摩擦系数由 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70%Ni 涂层的 0.61 降到了 70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%Ni 涂层的 0.53，磨损率也由 3.60×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)降到了 1.20×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)。涂层表面硬度随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加而增加，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量越高，相同条件下磨痕宽度越窄，试样与对磨球的接触面积就越小，摩擦系数也就越低。且涂层中作为强化作用的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒子与对磨球接触时，抗剪切强度比 Ni 大，承载能力强，可有效地保护涂层，从而使涂层磨损减少<sup>[21]</sup>。

2.5 涂层的磨损机制分析

表 2 为不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层不同位置处的元素原子数分数，从表 2 中可以看出，涂层磨损表面均存在 Fe 元素，且磨损表面黑色区域处的 Fe 含量明显增加，磨损区域的氧含量明显高于未磨损区域，说明干滑动摩擦磨损时，与摩擦副实际接触面处均发生有氧化磨损和粘着磨损。

表 2 不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层不同位置处的元素原子数分数  
Tab.2 Atomic percentages of elements at different positions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni coating with different components at%

Coating	Position	Al	O	Fe	Ni
30wt.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -70wt.%Ni	1	1.28	7.37	0.53	90.82
	2	2.6	30.72	10.03	56.65
	3	2.15	47.79	22.64	27.42
50wt.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -50wt.%Ni	4	1.62	11.52	0.53	86.33
	5	1.73	39.37	10.47	48.43
	6	47.70	50.98	0.33	0.99
70wt.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -30wt.%Ni	7	2.03	20.97	0.39	76.61
	8	3.42	38.89	1.28	56.41
	9	3.17	40.47	10.35	46.01

图 6 为不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层磨损后形貌。从图 6 中可以看出，涂层中含有许多半熔和未熔的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒，且随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒数目增多。图 6a—c 中磨痕宽度依次变窄，30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-

70%Ni 涂层磨损最严重,磨痕处存在许多磨损后脱落的片状组织,剥落明显,而 50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-50%Ni 涂层与 70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%Ni 涂层磨损后,磨痕表面存在大量的“橘皮状”氧化物,磨损机制为氧化磨损与粘着磨损的混合。裂纹存在于涂层次表面,剥落坑主要由裂纹引起。GCr15 对磨球硬度高,在常温下难以发生塑性变形,摩擦能量难以及时释放;同时在缺陷处容易造成应力集中,从而产生裂纹源,裂纹沿着缺陷不断增长直至断裂,各个方向的裂纹相互连接就会形成如图 6a 中所示的剥落坑<sup>[22]</sup>。等离子喷涂过程中生成的

γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 新相比表面积大,多孔易分散,在等离子焰流中因动量不够无法在撞击铝合金基体时铺展开,各层之间的接触面积小、内聚力差、结构疏松,在摩擦磨损过程中容易造成成片剥落<sup>[22]</sup>。然而大部分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒镶嵌在基体组织中,起到了增韧的效果,使得涂层的韧性得以改善,裂纹扩展时所需要的能量被吸收,裂纹扩展速度降低<sup>[23]</sup>。故 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70%Ni 涂层磨痕处剥落明显,50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-50%Ni 涂层与 70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%Ni 涂层摩擦磨损后,表面产生大量的“橘皮状”氧化物而未完全剥落。

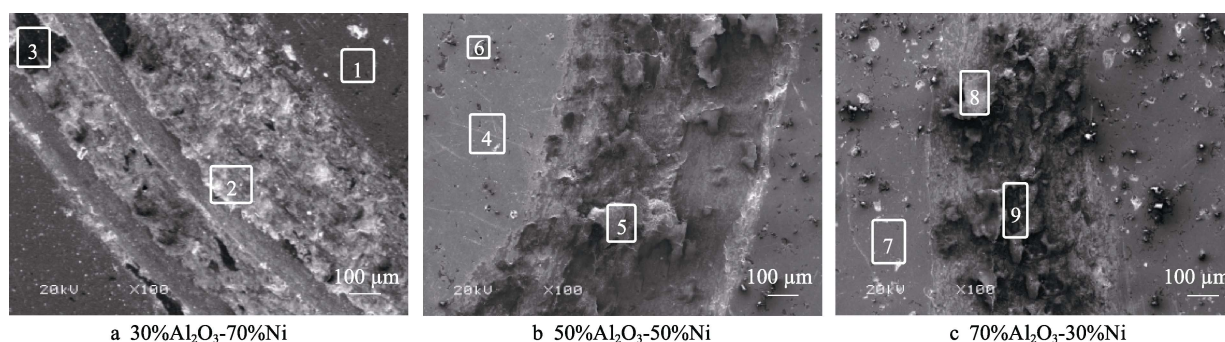


图 6 不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层磨损后形貌

Fig.6 Morphologies of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni coatings with different components after wear: (a)30wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70wt.%Ni, (b)50wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-50wt.%Ni, (c)70wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30wt.%Ni

### 3 结论

1) 等离子喷涂过程中部分 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相转变为 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 新相,同时由于 Ni 抑制 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶化或新生成的小颗粒过热或过冷导致 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 非晶相生成。

2) 不同成分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 涂层的显微硬度明显高于基体,由基体的 86.9HV<sub>0.05</sub> 增加到了 70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%Ni 涂层的 457.4HV<sub>0.05</sub>,涂层硬度约为基体硬度的 4~5 倍,且涂层显微硬度随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加而增加。

3) 相同条件下,涂层摩擦系数和磨损率均随着涂层中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加而减小,摩擦系数由 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70%Ni 涂层的 0.61 降到了 70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%Ni 涂层的 0.53,磨损率则由 3.60×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)降到了 1.20×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m),摩擦系数降低了 13%,磨损率降低了 66.7%。

4) 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-70%Ni 涂层摩擦磨损后剥落明显,而 50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-50%Ni 涂层与 70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%Ni 涂层摩擦磨损后,表面产生大量即将剥落的“橘皮状”氧化物,三种涂层的磨损机制均为氧化磨损和粘着磨损的混合。综合分析认为:增加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量可以提高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni 复合涂层的耐磨性。

#### 参考文献:

[1] LUO H, SONG P, KHAN A, et al. Effects of the metal-

- ceramic transition region on the mechanical properties and crack propagation behavior of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40wt% TiO<sub>2</sub> coating[J]. Surface & coatings technology, 2017, 321: 200-212.
- [2] 税国红, 杨屹, 吴明霞, 等. 铁基金属摩擦副表面自修复层分析[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 139-146.
- SHUI Guo-hong, YANG Yi, WU Ming-xia, et al. Self-repairing layers analysis on the surface of iron-based metal friction pairs[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 139-146.
- [3] 曹玉霞, 杜令忠, 张伟刚, 等. 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的制备及摩擦性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 62-66.
- CAO Yu-xia, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang et al. Study on preparation and tribological properties of atmospheric plasma-sprayed NiCoCrAlY/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wear-resistant coatings[J]. Surface technology, 2015, 44(5): 62-66.
- [4] KLYATSKINA E, RAYÓN E, DARUT G, et al. A study of the influence of TiO<sub>2</sub> addition in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings sprayed by suspension plasma spray[J]. Surface & coatings technology, 2015, 278(25): 25-29.
- [5] KLYATSKINA E, ESPINOSA-FEMÁNDEZ L, DARUT G, et al. Sliding wear behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by the suspension plasma spraying technique[J]. Tribology letter, 2015, 59(1): 8.
- [6] 陈斌星, 陈伟. 汽车用 AZ80 镁合金表面冷喷涂 Al-25% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层组织及摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2019, 52(5): 44-47.
- CHEN Bin-xing, CHEN Wei. Microstructure and friction property of cold-sprayed Al-25%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on the surface of AZ80 magnesium alloy for automobile[J]. Mate-

- rials protection, 2019, 52(5): 44-47.
- [7] 周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe901}$  复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 219-227.  
ZHOU Jian-zhong, HE Wen-yuan, XU Jia-le, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe901}$  composite coating prepared by laser cladding[J]. Acta optica sinica, 2019, 39(5): 219-227.
- [8] MITTAL M, NATH S K, PRAKASH S. Improvement in mechanical properties of plasma sprayed hydroxyapatite coatings by  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reinforcement[J]. Materials science and engineering: C, 2013, 33(5): 2838-2845.
- [9] SONG B, DONG S J, LIAO H L, et al. Microstructure and wear resistance of  $\text{FeAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$  intermetallic composite coating prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Surface & coatings technology, 2015, 268: 24-29.
- [10] SURESHBABU P, SEN D, JYOTHIRMAYI A, et al. Influence of microstructure on the wear and corrosion behavior of detonation sprayed  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  and plasma sprayed  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coatings[J]. Ceramics international, 2018, 44(2): 2351-2357.
- [11] AN Y L, LI S J, HOU G L, et al. Mechanical and tribological properties of nano/micro composite alumina coatings fabricated by atmospheric plasma spraying[J]. Ceramics international, 2017, 43(6): 5319-5328.
- [12] KLYATSKINA E, RAYÓN E, DARUT G, et al. A study of the influence of  $\text{TiO}_2$  addition in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings sprayed by suspension plasma spray[J]. Surface & coatings technology, 2015, 278(25): 25-29.
- [13] POURHOSSEINI S, BEYGI H, SAJJADI S A. Effect of metal coating of reinforcements on the microstructure and mechanical properties of  $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocomposites[J]. Materials science and technology, 2018, 34(2): 145-152.
- [14] 江健.  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  复合镀层制备及其在棘轮轴轴颈的应用[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(10): 42-46.  
JIANG Jian. Preparation of  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  composite coatings and its application on ratchet shaft journal[J]. Plating and finishing, 2017, 39(10): 42-46.
- [15] 刘大娇, 牛显明, 蔡龙龙, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒增强  $\text{Ni60A}$  涂层的耐磨性及组织研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(22): 189-191.  
LIU Da-jiao, NIU Xian-ming, CAI Long-long, et al. Research on wear resistance and microstructure of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles reinforced  $\text{Ni60A}$  coating[J]. Hot working technology, 2017, 46(22): 189-191.
- [16] 蔡龙龙.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒增强  $\text{Ni60A}$  复合涂层组织与耐磨性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.  
CAI Long-long. Study on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles reinforced Ni-based alloy composite coating of microstructure and wear resistance[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [17] 李长青, 叶雄林, 邓智昌. 超音速等离子喷涂纳米结构  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  涂层的形成机理[J]. 金属热处理, 2016, 41(10): 71-74.  
LI Chang-qing, YE Xiong-lin, DENG Zhi-chang. Formation mechanism of nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  coating fabricated by supersonic plasma spraying[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(10): 71-74.
- [18] 翁鹏翔, 郭平, 郑振环, 等.  $\text{TiO}_2$  含量对等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  涂层物相组成和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(1): 13-19.  
WENG Peng-xiang, GUO Ping, ZHENG Zhen-huan, et al. Effects of  $\text{TiO}_2$  content on phase and mechanical properties of plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  coatings[J]. Materials for mechanical engineering, 2017, 41(1): 13-19.
- [19] 胡传恒, 杜三明, 牛永平, 等. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  防滑涂层制备及其耐磨性[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 171-175.  
HU Chuan-heng, DU San-ming, NIU Yong-ping, et al. Fabrication and wear resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  non-skidding coating by plasma spraying[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2014, 35(5): 171-175.
- [20] 尹志坚, 王树保, 傅卫, 等. 热喷涂技术的演化与展望[J]. 无机材料学报, 2011, 26(3): 225-232.  
YIN Zhi-jian, WANG Shu-bao, FU Wei, et al. Evolution and prospect of thermal spraying technique[J]. Journal of inorganic materials, 2011, 26(3): 225-232.
- [21] 靳生, 刘谦, 戴庆荣. 电弧喷涂制备  $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$  耐磨防滑涂层工艺优化和摩擦学性能研究[J]. 中国表面工程, 2003(2): 10-12.  
JIN Sheng, LIU Qian, DAI Qing-rong. Study on the tribological properties and optimized parameters of non-skidding coating produced by arc spraying[J]. China surface engineering, 2003(2): 10-12.
- [22] 易德亮, 冶银平, 刘光, 等. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30% $\text{TiO}_2$  微米/纳米复合涂层的结构与耐磨性能[J]. 材料工程, 2012(5): 24-29.  
YI De-liang, YE Yin-ping, LIU Guang, et al. Structure and wear properties of plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30% $\text{TiO}_2$  micro/nano-composite coatings[J]. Journal of materials engineering, 2012(5): 24-29.
- [23] 邸英浩, 张建新, 阎殿然, 等. 等离子喷涂纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  涂层耐磨性的研究[J]. 金属热处理, 2005, 30(5): 4-7.  
DI Ying-hao, ZHANG Jian-xin, YAN Dian-ran, et al. Friction and wear resistance of plasma sprayed nano- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  coating[J]. Heat treatment of metals, 2005, 30(5): 4-7.