

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.06.012

界面接触温度对等离子喷涂封严涂层性能的影响

陈志坤, 刘自敬, 朱晖朝, 张忠诚

(广州有色金属研究院 材料表面研究所, 广州 510650)

摘 要: 用等离子喷涂制备航空封严涂层。通过改变冷却气压力的方式, 调节喷涂过程中的基体温度, 从而研究界面接触温度对涂层性能的影响。用 OM 和 SEM 观察封严涂层的组织形貌, 用 XRD 分析封严涂层的物相组成, 并对封严涂层进行摩擦磨损试验和冲蚀试验, 研究界面接触温度对封严涂层的磨损性能和冲蚀性能的影响。试验结果表明, 等离子喷涂封严涂层能够获得典型的蜂窝状组织结构。提高喷涂过程中接触温度能够提高涂层的显微硬度、沉积率与抗冲蚀性能, 但涂层的可磨耗性能有所降低。

关键词: 等离子喷涂; 封严涂层; 界面接触温度; 沉积率; 可磨耗性能; 抗冲蚀性能

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)06-0073-06

Impact of Interface Contact Temperature on the APS Seal Coating

CHEN Zhi-kun, LIU Zi-jing, ZHU Hui-zhao, ZHANG Zhong-cheng

(Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals Research department of new materials, Guangzhou 510650)

Abstract: The seal coating were prepared by air plasma spray (APS). The interface contact temperature was adjusted by changing the cooling blast in the spraying process. Optical microscope and scan electron microscope are used to observe the micrograph of the seal coating. The X-ray diffraction is used to analyze the phase in the seal coating. The abrasible property and anti-erosion test were performed to investigate the impact of the interface contact temperature on the seal coating property. Results show that plasma spraying seal coating can obtain the typical cellular microstructure. With increasing interface contact temperature, the micro-hardness, deposit rate, and the anti-erosion performance are improved; however, the abrasibility is reduced.

Key words: APS; seal coating; interface contact temperature; deposit rate; abrasibility; anti-erosion

0 引 言

油套管随着航空工业的发展, 对航空发动机的性能也提出了更高的要求。减少压气机、涡轮机叶尖与机匣间隙的气路封严技术是提高发动机效率的重要手段。用热喷涂方式制备封严涂层已经成为航空封严气路密封部件的重要制备工艺^[1-4]。封严涂层一般质地较软, 孔隙率较高, 要具有润滑性能、可磨耗性能、抗冲蚀性能、抗热震性能、以及与基体具有良好的结合性能^[5-7]。

在制备航空封严涂层过程中, 封严涂层性能会受到界面接触温度的影响。喷涂过程中, 在撞

击基材时颗粒与基材界面的温度, 被称为界面接触温度。界面接触温度将间接影响涂层沉积率以及涂层性能。文中通过研究喷涂过程中接触温度对涂层性能的影响, 来摸索封严涂层制备的最佳冷却工艺。

1 试验部分

1.1 材料选择

基体材料选择 304 不锈钢钢板, 在喷涂前进行表面吹沙处理, 吹沙压力 0.35MPa, 砂粒为 46 号锆刚玉。试验选用 Metco450NS 粉末作为喷

收稿日期: 2012-09-04; 修回日期: 2012-11-12

作者简介: 陈志坤(1983—), 男(汉), 河北邯郸市人, 工程师, 硕士; 研究方向: 热喷涂、激光表面处理技术

网络出版日期: 2012-11-28 16:06; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20121128.1606.002.html>

引文格式: 陈志坤, 刘自敬, 朱晖朝, 等. 界面接触温度对等离子喷涂封严涂层性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 73-78.

涂底层粉末,选用 Metco320NS 粉末作为喷涂面层粉末。450NS 粉末和 320NS 粉末化学成分见表 1。

表 1 喷涂粉末化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of the seal coating powders($\omega/\%$)

Factor	Al	Si	Ni	h-BN	Polyester
450NS	5.02		Bal.		1.06
320NS	Bal.	8		20	10

图 1 为 450NS 粉末和 320NS 粉末形貌图,

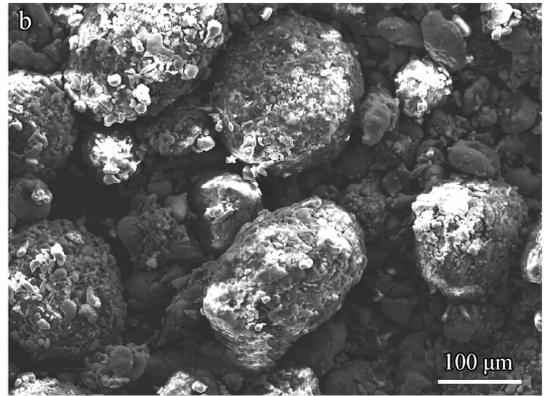
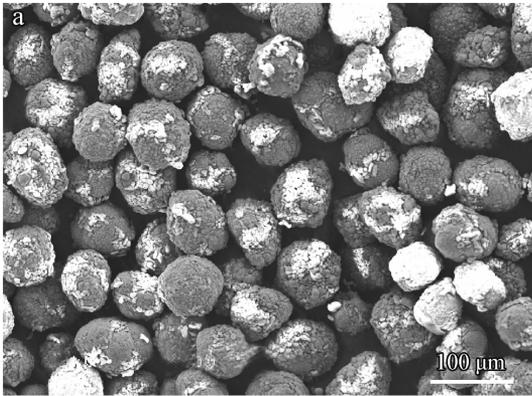


图 1 Metco450NS(a)和 Metco320NS 粉末(b)的形貌图

Fig. 1 Morphologies of the Metco450NS (a) and Metco320NS (b) powders

表 2 等离子喷涂参数

Table 2 Spray parameters of APS process

Factor	I/ A	Ar/ (m^3/h)	H ₂ / (m^3/h)	N ₂ / (m^3/h)	Powder feeder rate/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	Spray distance/ mm	Gun moving speed/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Metco450NS	600	40	10	2.5	28	130	1000
Metco320NS	400	47	7.5	5	19	130	1000

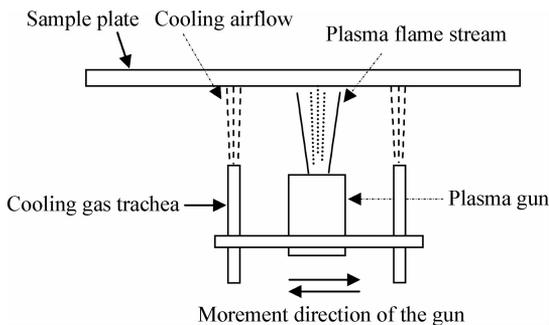


图 2 等离子喷涂喷枪与冷却气装置示意图

Fig. 2 Abridged general view of plasma spraying gun and cooling blast device

其中 450NS 粉末粒度为 $45 \sim 90 \mu\text{m}$,粉末密度为 7.4 g/cm^3 ;Metco320NS 粉末粒度为 $45 \sim 212 \mu\text{m}$,粉末密度为 1.7 g/cm^3 。

1.2 等离子喷涂

采用 MF-P-1500 型高能等离子喷涂设备,喷涂参数见表 2。由于等离子喷涂火焰温度高,往往造成基体升温过高,产生变形或涂层失效,所以必须通过使用外加冷却气的方式,对喷涂样品进行冷却。冷却气以一定角度安装在等离子喷枪两侧,随枪体同步移动,保证均匀冷却基体,如图 2 所示。

在喷涂工艺参数相同的情况下,基体温度控制靠调节冷却气体压力来实现,如表 3 所示。将 FLUKE 红外测温仪固定在喷涂工件背后斜下方约 1 m 位置,红外测试点指向基体,实时采集温度数据。喷涂过程中,等离子焰流、熔融粒子热能与动能等都会对基体材料进行加热作用,同时在冷却气体的降温作用下,基体和涂层的温度能够达到一个平衡区间。红外测温仪测得的温度值即取其喷涂过程中平衡区间温度。

用 0.1 mg 的分析天平称量喷涂前和喷涂后样品增重 ΔW 。通过沉积率计算式(1)可得涂层

表 3 喷涂 320NS 涂层温度控制范围与测量值

Table 3 Temperature range and measured value of the spraying 320NS coating

Factor	Cooling air pressure/MPa	Temperature range/°C	Observed temperature/°C
1	0.14	130~150	141±2
2	0.29	110~130	123±3
3	0.45	100~110	106±3
4	0.7	80~100	88±5

的沉积效率:

$$D=30V \times \Delta W / L \times T \times R \quad (1)$$

其中, L 为样品宽度(mm); T 为喷涂遍数; V 为枪体运动速度(mm/s); R 为送粉量(g/min)。

1.3 金相样品检测

采用 Leica DMIRM 金相显微镜及 JSM5910 SEM 扫描电子显微镜对试样横截面进行显微组织形貌观察。用 Leica 金相显微镜自带分析软件, 测量涂层的孔隙率和涂层厚度。用 D/MAX-RC 型 X 射线衍射仪器分析涂层的物相组成。采用 HSRD-45 电动表面洛氏硬度计测量涂层硬度, 压头直径 $\Phi 12.7$ mm, 测量 10 个点, 取显微硬度平均值。

1.4 涂层抗冲蚀试验

抗冲蚀设备采用 AS600 虹吸式喷砂机, 使用具有不规则棱角的 280 号白刚玉砂粒作为微喷砂磨料。微喷砂工艺为: 喷砂压力 0.2 MPa, 喷砂距离 10 mm, 喷砂角度 30° , 喷砂速度 30 m/s。样品经微喷砂处理后, 需用压缩空气吹净样品表面灰尘, 用 0.1 mg 的分析天平测量冲蚀失重, 并计算冲蚀率。冲蚀率计算公式为^[8]:

$$E_w = (W_0 - W_1) / M_a \quad (2)$$

其中, E_w 为冲蚀率(mg/g); W_t 为试样冲蚀前的质量(mg); W_s 为试样冲蚀后的质量(mg); M_a 为每个试样消耗的磨料质量(g)。

1.5 涂层可磨耗性能试验

涂层的可磨耗性能试验在 SUGA 轮式磨耗试验机上进行, 如图 3 所示。摩擦磨损试验符合 ASTM D6037 标准。使用 600 号 SiC 砂纸带, 压力为 5N, 往复速度为 40 次/min。砂纸轮转动一次的角度为 0.9° , 转动一周, 样品往复磨损 400 回, 磨损完成一遍。每次摩擦磨损试验后, 用压

缩空气吹干净样品表面, 用精度为 0.1 mg 的分析天平测量磨损失重。每种样品磨损 5 遍, 计算其磨损失重的平均值。

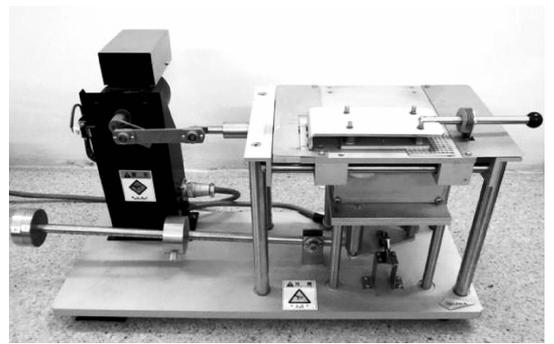


图 3 SUGA 轮式磨耗试验机

Fig. 3 SUGA abrasion test machine

2 试验结果与分析

2.1 组织结构分析

图 4 为封严涂层金相形貌图, 从图 4 可以看出, 450 NS 粘结层的涂层致密、均匀, 与基体、面层结合良好, 气孔率较低、约为 2%。底层 450NS 厚度约为 50~80 μm 。320 NS 面层涂层疏松、金

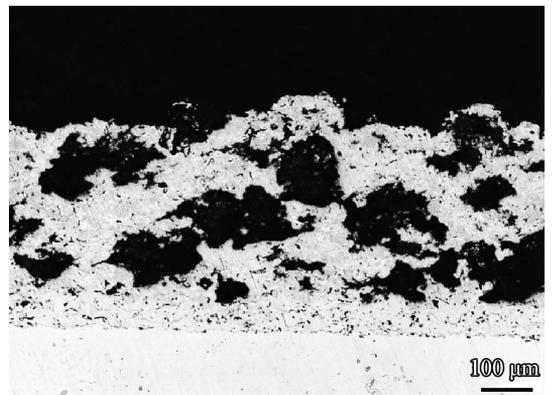


图 4 封严涂层金相形貌图

Fig. 4 Micrographs of the seal coating

属相熔化充分,金属相作为骨架支撑着整个涂层,呈现典型的蜂窝状,气孔率在34%以上。较大的气孔率能够保证涂层具有较好的可磨削性。面层320NS厚度320~360 μm 。

通过对320NS粉末与涂层做XRD分析,如图5所示,可以看出涂层和粉末的主要组成相为AlSi和h-BN,且喷涂后,h-BN相有较多的损失,说明h-BN在等离子喷涂过程中发生的气化蒸发现象比AlSi相更为剧烈。

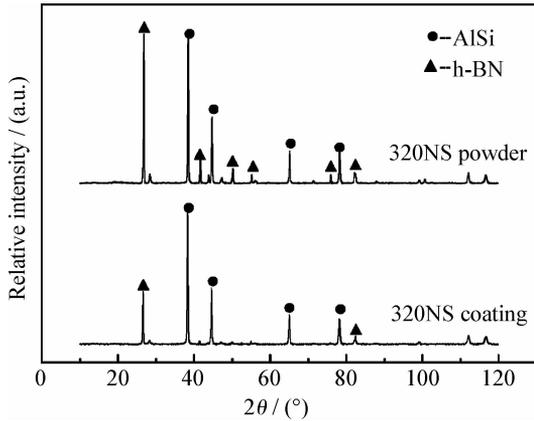


图5 320NS喷涂粉末与320NS涂层XRD图谱

Fig. 5 XRD pattern of the 320 NS powder and 320 NS coating

分别对图6中A、B处进行能谱分析,由图6(b)(c)和表4可以看出,A处位置为AlSi相。B处位置为h-BN。从图6可以看出,封严涂层是以AlSi金属相为基体,细小的h-BN紧密镶嵌其中的组织结构。

AlSi金属相的作用是抗腐蚀、抗氧化、保证涂层自身的强度以及基体的结合强度。h-BN本身比较松软且轻,熔点高,h-BN在高温时有较好的润滑性,避免叶尖与涂层之间的粘着。h-BN以细小颗粒状紧密夹杂在AlSi相中,这种结构能够在涂层发生磨削时,起到均匀自润滑作用,有助于提升涂层的可磨削性能。

2.2 涂层性能分析

由图7可以看出,随着基体温度的升高,320NS粉末的沉积率提高,涂层显微硬度升高,涂层的冲蚀率较低,抗冲蚀性能增强,平均磨损损失重减少,可磨耗性能下降。

由于320NS粉粒度分布较大,粉末密度较小。在等离子喷涂过程中,部分颗粒较小、质量

较轻的320NS熔融粒子,被裹挟的等离子焰流气体带离焰流中心。偏离焰流气体中心、加热不完全的半熔融粒子,温度降低较快,颗粒在接触基体时已经开始冷却。部分粒子在等离子焰流和冷却气气流形成的对流作用下,无法沉积在基体表面^[10]。冷却气流量越大,与焰流气体的对流作用越大,从而使沉积率降低。接触界面温度升高,能够使得颗粒在扁平化过程中,与已喷涂涂层之间的温度差小,降低喷涂应力,涂层粒子间结合性能更好^[9]。

涂层的抗冲蚀性能和显微硬度有着直接的关系。随着显微硬度的增加,涂层的抗冲蚀性能也提高,涂层的可磨耗性能降低。

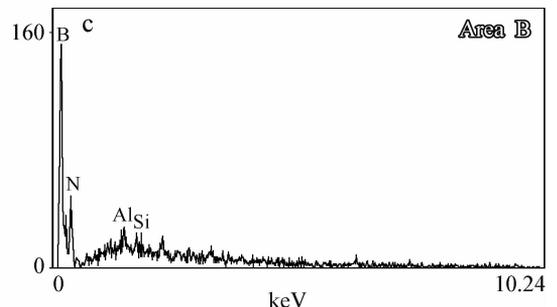
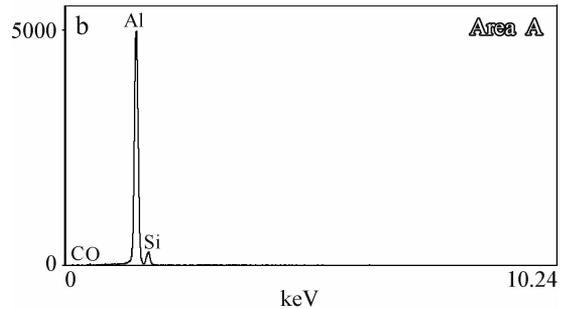
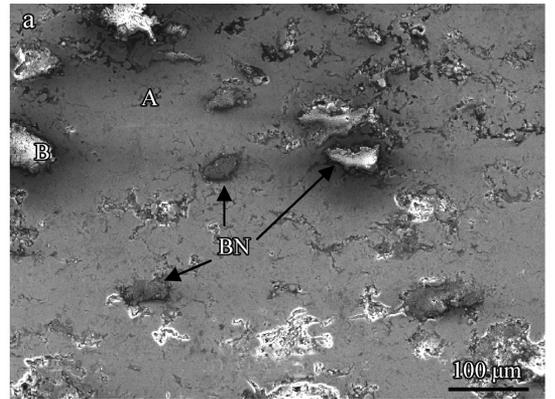


图6 320NS封严涂层中h-BN颗粒形貌(a)和EDS结果(b)(c)

Fig. 6 Morphologies of the h-BN particle (a) and EDS results (b) (c) of the 320NS coating

表 4 320NS 封严涂层的 EDS 分析结果(质量分数/%)

Table 4 Spot-scanning EDS results of the 320 NS coating ($w/\%$)

Factor	Al	Si	B	N	C	O
A	88.06	9.65			2.54	1.75
B	0.37	0.05	77.51	22.07		

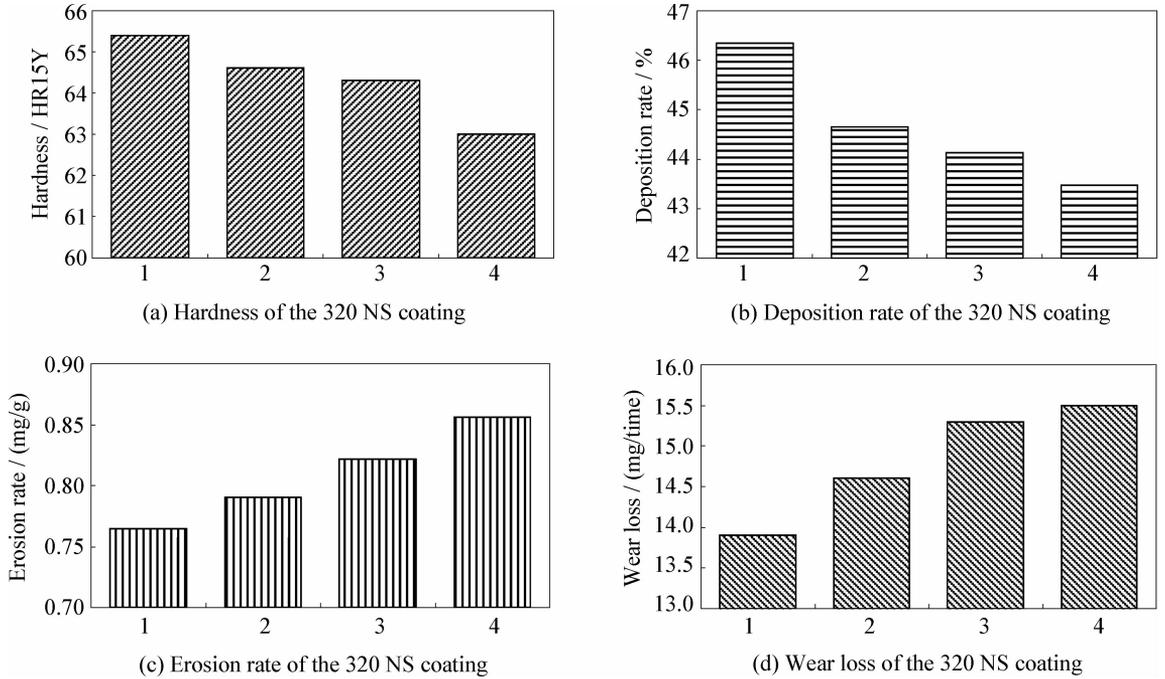


图 7 不同温度下封严涂层的硬度(a)、沉积率(b)、冲蚀性能(c)和可磨耗性能(d)的比较

Fig. 7 Comparison of hardness(a), deposition rate(b), erosion rate(c) and abrasibility(d) of the seal coating with different spraying temperature

涂层的抗冲蚀性能与可磨耗性能是一对矛盾。显微硬度升高,抗冲蚀性能提升,伴随着可磨耗性能就相应有所下降。制订封严涂层喷涂工艺必须要综合考虑接触界面温度因素。较高的界面接触温度,封严涂层的沉积率较高,抗冲蚀性能较好,但可磨耗性能下降。界面接触温度为 $100\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间时,所喷涂封严涂层既具有较高硬度、耐冲蚀性能和沉积率,又能满足涂层的可磨耗性能,为最佳冷却区间。

3 结 论

(1) 等离子喷涂 NiAl 粘结层致密、均匀,与基体和面层界面结合良好,孔隙率较低。

(2) AlSiBN 涂层呈现典型的蜂窝状组织,具有较高的气孔率,h-BN 以细小颗粒形式均匀分布在 AlSi 相内部,该种涂层结构能够保证涂层的

可磨削、自润滑性能。

(3) 喷涂时基体温度会对涂层性能产生影响。以增大外加冷却气方法获得的较低界面接触温度的封严涂层具有较好的可磨耗性能。

(4) 提高界面接触温度,封严涂层的沉积率较高,抗冲蚀性能较好。综合考虑,界面接触温度为 $100\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间时,所喷涂封严涂层既具有较高硬度、耐冲蚀性能和沉积率,又能满足涂层的可磨耗性能,为最佳冷却区间。

参考文献

- [1] 郝兵,李成刚.表面涂层技术在航空发动机上的应用[J].航空发动机,2004,30(4):38-40.
- [2] 朱佳,冀晓鹏,揭晓,等.封严涂层材料及应用[J].材料开发与应用,2008,8(4):78-84.
- [3] 戴赫,汪礼敏,张佳萍,等.新型高温隔热可磨耗封严涂层研究及展望[J].材料导报,2008,22(7):18-21.

[4] 肖巍, 王珂, 闵捷, 等. 纳米 Y-PSZ 高温封严涂层围观结构的研究 [C]. 第十二届国际热喷涂研讨会暨第十三届全国热喷涂年会论文集, 2009: 44-48.

[5] 刘凤伟, 李曙, 刘阳, 等. 封严涂层材料及其可刮削性的评价 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 12-18.

[6] Xiao Ma, Allan Matthews. Evaluation of abradable seal coating mechanical properties [J]. Wear, 2009: 1501-10.

[7] Bolot R, Seichepine J L, Qiao J H, et al. Predicting the thermal conductivity of AlSi/polyester abradable coatings: effects of the numerical method [C]. Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 2010: 651-656.

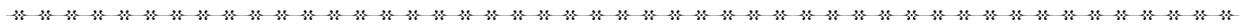
[8] 张先龙, 易茂中. 典型中温封严涂层的抗冲蚀性能 [J]. 新

工艺新技术新设备, 1998 (5) : 28-34.

[9] 戴达煌, 周克崧, 袁镇海. 现代材料表面技术科学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.

[10] Lech Pawlowski. The science and engineering of thermal spray coatings [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

作者地址: 广州市天河区长兴路 363 号 510650
 广州有色金属研究院 材料表面研究所
 Tel: (020) 6108 6651
 E-mail: chenzhikun001@yahoo.com.cn



• 本刊讯 •

《中国表面工程》11 篇文章入选中国精品科技期刊顶尖论文

12 月 7 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京召开, 中国科学技术信息研究所公布了“领跑者 5000——中国精品科技期刊顶尖论文”, 其原则是中国科学技术信息研究所按照一定的评价指标在中国精品科技期刊 2007~2012 年所刊载的论文中遴选的优秀学术论文。本刊根据论文下载情况及专家评审等情况, 推荐并入选了 2012 年的论文 2 篇, 另有 2007~2011 年的 9 篇文章由中信所采用定量分析法择优选取。本刊入选的 11 篇顶尖论文如下:

[1] 徐滨士, 刘世参, 史佩京. 再制造工程的发展及推进产业化中的前沿问题 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 1-5.

[2] 赵景茂, 陈胜利, 赵旭辉, 等. 铈盐在电场作用下对 LY12 铝合金阳极氧化膜的封闭作用 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 28-32.

[3] 张嗣伟. 我国摩擦学工业应用的节约潜力巨大——谈我国摩擦学工业应用现状的调查 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(2): 50-52.

[4] 李长久. 中国冷喷涂研究进展 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(4): 5-14.

[5] 秦铁男, 马立群, 刘敏基, 等. 非金属材料表面化学镀中活化工艺的改进及发展方向 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 69-74.

[6] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.

[7] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 1-12.

[8] 朱胜, 姚巨坤. 装备再制造设计及其内容体系 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 1-6.

[9] 崔爱永, 胡芳友, 回丽, 等. 钛基梯度功能涂层组织和腐蚀行为研究 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 18-21.

[10] 李灿民, 魏荣华. 等离子增强磁控溅射沉积 Ti(Al) 基纳米复合涂层在铸铝模具上的应用 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 1-7.

[11] 万珍平, 赵小林, 汤勇, 等. LED 芯片取光结构研究现状与发展趋势 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 6-12.

(编辑部 供稿)