

颜/填料分散工艺对环氧耐热涂层性能的影响

肖军¹, 樊会涛¹, 周惠娣²

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所, 兰州 730000)

摘要: **目的** 研究涂料颜/填料的分散工艺与涂料的成膜过程以及涂层耐热性能、环境适应性的关联。**方法** 采用不同方法对涂料进行分散,并喷涂于钢基、钛合金基体及铝合金基体表面,对比分析涂层的物理性能、耐热性能及环境适应性。**结果** 分散良好的涂料细度约为 60 ~ 70 μm 。实验室烧蚀试验和空中搭载试验结果验证了良好分散有助于降低内应力,增强涂层的环境适应性,延长涂层的服役寿命,提高涂层的热防护性能。**结论** 经过充分分散得到的涂层,其外观、耐热性能及寿命均达到最优。

关键词: 分散工艺; 颜/填料; 耐热涂层

中图分类号: TQ630.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)02-0150-06

Effect of Dispersing Technique of Fillers and Paints on the Properties of Epoxy Thermo-protective Coating

XIAO Jun¹, FAN Hui-tao¹, ZHOU Hui-di²

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: **Objective** To discuss the study on relationships between the process of filler and paints decentralization and the film formation of paints, as well as the thermal protection and environment adaptability of the coating. **Methods** The applied paint was dispersed with different techniques, and then sprayed on steel, titanium and aluminum alloy substrates. The physical properties, thermal protective performance and environmental adaptability of the coating were compared and analyzed. **Results** The results showed that the degree of fineness of the effectively dispersed coating could reach 60 ~ 70 μm . Ablation experiments and air-e-quipped laboratory test results verified that grinding and dispersion helped reduce stress, increase the coating's environmental adaptability, prolong the service life of the coating and improve the thermal protective performance. **Conclusion** The coating with full dispersion had the best appearance, performance and service life.

KEY WORDS: dispersing process; fillers & pigments; thermo-protective coating

耐热涂层可以阻隔热传导,改变飞行器壳体表面热物理特性,防止壳体内部仪器仪表因工作温度过高而发生故障,是保障飞行器在大气中高速飞行时不因

气动过热导致结构灾难性故障的主要措施之一^[1-3]。耐热涂层的性能和质量与耐热涂料的工艺控制直接相关。耐热涂料的分散效果和稳定性一般与颜/填料

收稿日期: 2013-11-10; 修订日期: 2013-12-10

Received: 2013-11-10; Revised: 2013-12-10

基金项目: 航空科学基金(2010ZD12009)

Fund: Aeronautical Science Foundation of China(2010ZD12009)

作者简介: 肖军(1962—),男,河南洛阳人,博士,高工,主要从事材料科学方面的研究。

Biography: XIAO Jun (1962—), Male, from Luoyang, Henan, Ph. D., Senior engineer, Research focus: material science.

的形状、粒径、分布、表面性质等有关,这些因素显著影响涂层的力学和热性能。同时,颜/填料对耐热涂层的强度、着色力、附着力、遮盖力、光泽、流平性、耐久性等性能也有十分重要的作用和影响^[4-7]。良好分散的颜/填料可赋予涂层光滑平整的外观和优良的综合力学性能^[8-9];填料的性质和分散状态决定着涂料体系的稳定性;填料的形态、尺寸以及表面状态对涂料的分散效果产生直接影响^[10-11],涂料的黏度随研磨分散的完善逐步趋于稳定,涂料分散程度越高,则流平性越好,涂层越致密。文中研究分析了颜/填料分散工艺对一种高速飞行器外用环氧耐热涂层性能的影响,为相关应用研制提供借鉴。

1 实验

所用涂层材料包括环氧型耐热涂层(T1)、S04-60 丙烯酸-聚氨酯面漆(T2)、姜黄色/铁红色环氧底漆(D1)、S06-N-2 锌黄环氧聚酰胺底漆(D2)。

所用基体材料包括 2A12 铝合金(S1)、阳极氧化 LY12CZ 试片、TC4 钛合金(S2)、高强不锈钢(S3)、20#钢(S4)、马口铁(S5)。阳极氧化 LY12CZ 试片尺寸为 25 mm×200 mm×0.5 mm,S1,S2,S3,S4 试样尺寸为 50 mm×100 mm×(0.2~0.3) mm。用于剪切试验的试样尺寸为 25 mm×100 mm×1.5 mm,烧蚀试样的尺寸为 100 mm×100 mm×(1.5~1.8) mm。

按配方将基础树脂、颜/填料、溶剂和其他助剂等混合,对比未分散处理、手工搅拌分散、三辊研磨机分散(1.0 h)及高速剪切分散(2000 r/min,1.0 h)工况下的涂层性能,分散采用 QQM 三辊研磨机和 R41-25/4/FDA 高速搅拌器。将混合均匀的浆料用喷枪喷涂在基材表面,在一定温度下固化一定时间,具体实

验参数见后文表 1。分别采用 MINITEST 1100 手持涡流测厚仪和刮板细度计对涂层厚度和涂料细度进行测量。对制备的试样进行以下性能测试:1)采用 WDW-200 万能拉力试验机,按 GB/T 7124—2008 和 GB/T 5210—2006 分别测试涂层的剪切强度、附着力;2)采用丙烷喷灯进行烧蚀耐热试验;3)按 GJB 150.3 高温储存(+70 ℃×48 h),GJB 150.4 低温储存(-55 ℃×24 h),GJB 150.5 温度冲击(+70~-55 ℃,3 循环),GJB 150.9 湿热试验(240 h),GJB 150.11 盐雾试验(96 h)及 GJB 150.16 振动试验,进行环境适应性分析,所用设备为 Y7090 II 程序环境条件试验箱(美国)。

2 结果与讨论

2.1 颜/填料的分散对涂覆效果的影响

采用常用航空材质的壳体进行两组试验,1~4 号采用钢基体试件,5~8 号采用钛合金试件,耐热涂层的保留厚度为 0.5 mm,每组 3~5 件。实验中发现,研磨分散的涂层细度为 60~70 μm,而未分散涂层的细度可达到 150~200 μm。表 1 归纳了涂料分散与涂层外观、材料损耗、后期修饰打磨的关系。结果表明,分散良好的涂料有利于获得良好的涂层外观(见图 1)和尺寸精度,并能减少原材料的耗用量和后期修饰打磨的工作量,与参考文献[12]的研究结论一致。

以上结果可根据牛顿流体中单一球形颗粒的沉降速度公式^[13]加以解释。公式如(1)式所示,式中: V 为沉降速度; r 为固体颗粒的粒径; ρ 为颗粒的密度; ρ_1 为液体密度; η 为溶液的黏度。从公式和图 1 可知,

表 1 T1 涂料的分散对涂覆效果的影响

Tab.1 The effect of dispersion of T1 pigment on the quality of the coatings

序号	喷涂用料/kg	干燥条件	涂层外观	涂层厚度/mm	修饰工时/h	分散方式
1	2.75	(15~25)℃×8 d	凸凹不平,似蛤蟆皮	0.8	10	未分散
2	2.45	(15~20)℃×8 d	凸凹不平	0.7	9	手工搅拌分散
3	2.00	(15~25)℃×7 d	平整光滑,无粗粒	0.5	1~2	三辊研磨机分散
4	2.20	(15~25)℃×7 d	平整光滑,无粗粒	0.6	1~2	高速剪切分散
5	0.70	(40~60)℃×3 d	凸凹不平,似蛤蟆皮	0.8	4.5~5	未分散
6	0.65	(40~60)℃×3 d	凸凹不平	0.7	4.5	手工搅拌分散
7	0.50	(40~60)℃×2.5 d	平整光滑,无粗粒	0.5	0.5~1	三辊研磨机分散
8	0.55	(40~60)℃×2.5 d	平整光滑,无粗粒	0.6	1	高速剪切分散

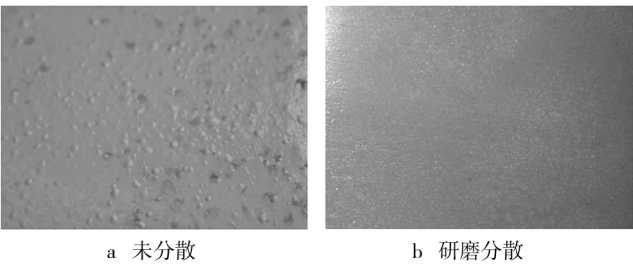


图 1 未分散与研磨分散得到的涂层外观
Fig. 1 Appearance of a. undispersed b. dispersed coatings

若颜/填料粒径和密度偏大,容易引起沉降分离。因此,研磨分散有助于得到稳定的涂料体系。

$$V=218r^2(\rho-\rho_1)/\eta \tag{1}$$

颜/填料的分散是隔热涂层制备的重要环节,其机理已被广为研究^[13-15]。颜/填料的分散主要是依靠机械剪切力将团聚体粉碎成尺寸细小、均匀的碎片,分散在涂料溶液中,如图 2 所示。分散与团聚的平衡取决于机械剪切力和溶液浸渗性与粒子之间亲和团聚力的竞争,有多种物理和化学因素影响图 2 所

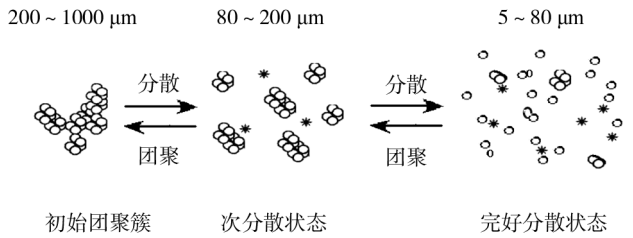


图 2 颜/填料的团聚与分散过程
Fig. 2 States of fillers and paints during dispersing

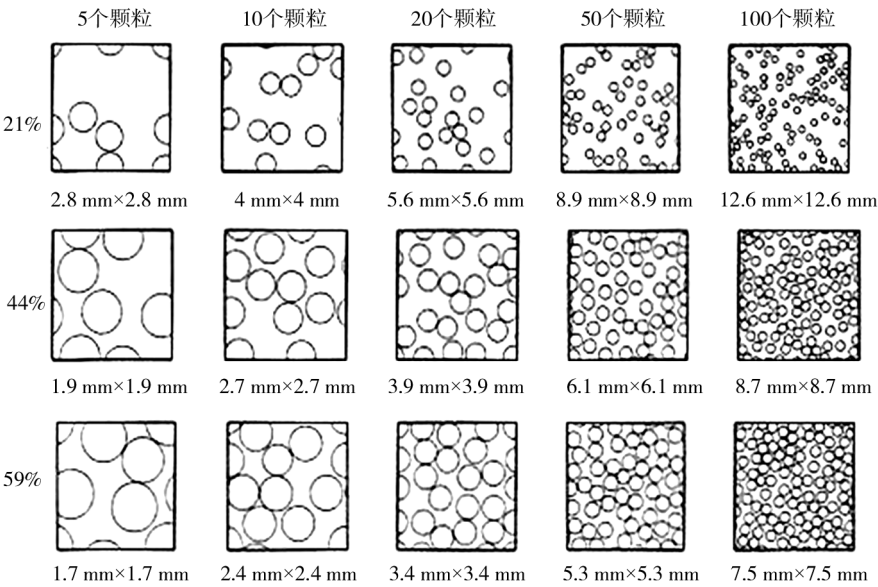


图 3 单位空间球体分散状态二维图像

Fig. 3 Two-dimensional image of dispersing state of the particles in unit space

示的平衡过程^[16],如粒子亲和力、表面活性、溶液和粒料之间的化学作用等。

图 3 是单位空间球体分散状态示意图^[17],将颜/填料视为大小均一、规整、无相互作用的圆球,以 21%、44%、59% 的体积分数分散后,进行表面积和在单位空间中分布形态的计算。可以看出,同体积分数的颜/填料越分散,则粒径越小,其界面越大,体系结构和稳定性越好。颜/填料细化并均匀分散在基料树脂中,有助于在同配比情况下减少局部树脂富集区和厚薄不均区域,由于干燥时间取决于溶剂挥发最慢的局部树脂富集区域和挂流部位,所以分散有利于缩短干燥时间。

在阳极氧化 LY12CZ 试片表面涂覆 1 mm 厚的 T1 涂层,烘干后,试片出现翘曲,这与涂层在固化过程中产生应力有关。分析认为,环氧树脂的交联固化是一个渐进的过程,会产生约 1% ~ 2% 的体积收缩。在干燥(固化)过程中,分子链的运动逐渐受到限制,并产生一定的应力,如果过程控制良好,由于应力小,产品的综合性能良好;反之,如果固化过快,一部分受热快的树脂先固化,就会导致后固化的树脂部分产生较大应力,在环境温度从高温到低温循环的过程中,环境应力 and 材料内应力共同作用,当应力超过局部缺陷或薄弱环节的强度时,就会产生开裂破坏^[18]。所以要确保足够晾置,并在 40 ~ 60 ℃ 条件下按规定干燥,避免骤冷骤热冲击。实验发现,未研磨涂层的翘曲可达 10 ~ 12 mm,而良好分散涂层的翘曲仅 5 ~ 7 mm,说明分散有利于减少变形,获得较为准确的尺寸。

耐热涂层通常需要多遍反复涂覆,累计叠加到设计要求的厚度,而施工过程中单层的厚度、均匀性、干燥条件和时间决定了整个涂层体系的性能。环氧树脂涂层的干燥条件对涂层性能的影响十分显著,T1 耐热涂层最终确定的干燥条件如下:D2 底层涂料(姜黄或铁红色),常温 24 h($\leq 20^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 65\% \text{RH}$)或(50 ± 5) $^{\circ}\text{C}\times 8 \text{ h}$;T1 耐热涂层,每层晾置不少于 60 min($\leq 20^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 65\% \text{RH}$)+常温 24 h(表干)+40~60 $^{\circ}\text{C}\times 3 \text{ d}$ (实干/固化)。

2.2 研磨分散对耐热性能的影响

2.2.1 实验室耐热性测试分析

实验室采用的喷灯烧蚀实验简便易行,图 4、图 5 所示分别为 T1-D1 (或 T2-D2/T1-D1) 试件的烧蚀升温曲线与烧蚀试片形貌,实验时直接加热 T1 耐热涂层一面约 90 s。实验发现,研磨分散良好的 T1 无面漆试件在室温~800 $^{\circ}\text{C}$,84 s 内无表层开裂、脱落现象,400 $^{\circ}\text{C}$ 以上烧蚀过程平稳,背温随时间变化较小,基本平稳,其耐热性能较好,烧蚀面最高温度为 800 $^{\circ}\text{C}$,耐烧蚀的最长时间为 90 s,满足设计要求;而未研磨 T1 涂层在 25~90 s 时间段出现开裂现象,250 $^{\circ}\text{C}$

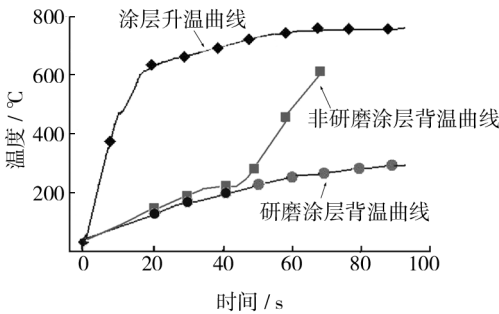


图 4 耐热涂层升温曲线

Fig. 4 Ablation test curves of the heat-resistant coatings

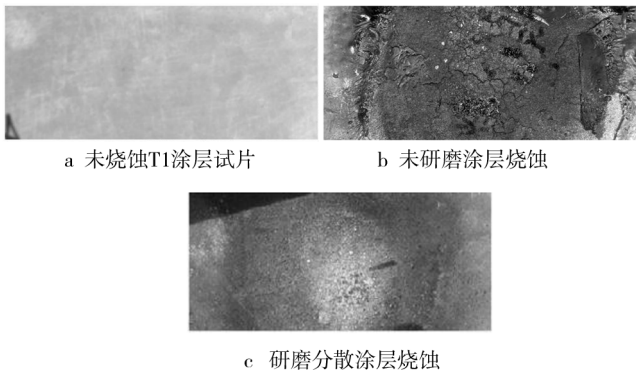


图 5 耐热涂层烧蚀前后对比

Fig. 5 The thermal protective coatings before and after ablation tests

以上开始出现鼓包及脱落。背面温度测试表明,正常工艺喷涂的 0.5 mm 厚 T1 耐热涂层背温 $\geq 375^{\circ}\text{C}$,隔热效果均 $\geq 200^{\circ}\text{C}$ 。从图 5 可以看出,经过烧蚀试验后,相比未研磨分散的涂层(图 5b),研磨分散良好的涂层(图 5c)烧蚀程度明显减轻。

2.2.2 飞行实验分析

图 6 为壳体表面喷涂研磨分散与未研磨耐热涂层 T2-D2/T1-D1 飞行试验后的照片。飞行器在大气环境中飞行的峰值速度大于 1700 m/s,飞行持续时间约 100 s。观察飞行后的实物发现,壳体表面未研磨耐热涂层气动加热后,出现大量“麻点”状小凹坑,表面残留较多鼓包和待脱落小区域,主要存在于 T1 耐热涂层,底漆层基本完好。经观察,“麻点”的尺寸约为 3~5 mm,个别达到 7 mm,深度约为 0.3~0.4 mm,用手触摸有明显粗糙感觉,局部麻点接近 D2 底漆。通过观察和分析,推测其产生机理是:未良好研磨分散的涂层组成不均匀,局部颜/基比差异大,在高速飞行气动热的作用下,带有 D2-T2 面漆的 D1-T1 耐热涂层树脂富集区因不耐烧蚀而分解气化(固体含量低的热失重分解温度低),导致局部出现鼓包、起泡,并被气流带走,留下“麻点”状蚀坑。“麻点”状蚀坑导致涂层非均匀损失,造成表面粗糙度显著增大,进一步增大了气动热效应和飞行阻力,不仅不利于热防护,也不利于在大气中高速飞行。根据以上结果可以推断,颜料、填料分散越不均,起泡的程度就会越明显,反之则起泡少,这与实际情况吻合。

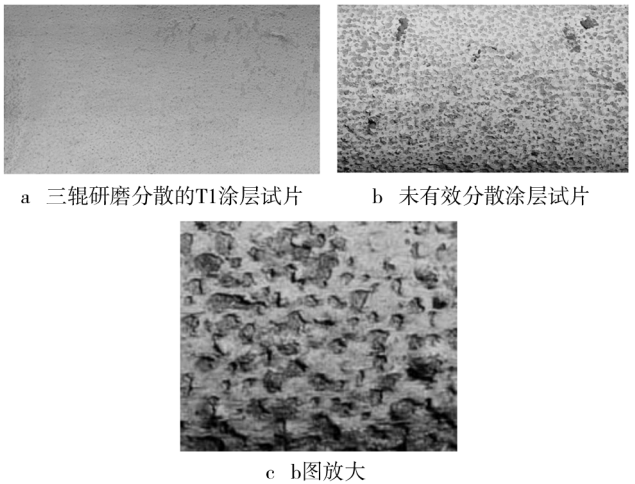


图 6 高速飞行试验后的耐热涂层

Fig. 6 The heat-resistant coating after high-speed flying tests

2.3 分散与环境适应性和服役性能的关系

采用 T1-D1/T2-D2 组合的试验件,按照第 1 章节

所述的环境适应性实验方法开展实验研究,结果见表 2。分析表 2 可知,分散可减少内应力,有利于避免环境应力开裂,提高常温和高温机械强度,延长服役寿命。

表 2 T1 防热涂层环境适应性实验结果
Tab.2 Environmental adaptability related experiment of the T1 heat-resistant coatings

序号	基材	分散工艺	涂层外观	剪切强度/MPa	环境试验外观
1	T1/钛合金(吹砂)	未分散	凸凹不平,似蛤蟆皮	7.45	严重开裂、脱落
2	T1/钛合金(吹砂)	手工搅拌分散	凸凹不平	10.50	有开裂、脱落
3	T1/钛合金(吹砂)	研磨分散	平整光滑,无粗粒	12.35	无开裂、脱落
4	T1/钢试片(发蓝处理)	研磨分散	平整光滑,无粗粒	13.25	无开裂、脱落
5	T1/铝合金(阳极化)	未分散	凸凹不平,似蛤蟆皮	9.45	开裂、脱落
6	T1/铝合金(阳极化)	研磨分散	平整光滑,无粗粒	18.25	无开裂、脱落

3 结论

- 1) 研磨分散的涂料细度约为 60 ~ 70 μm,分散良好,有利于获得良好的涂层外观和尺寸精度,并减少原材料的耗用量和后期修饰打磨的工作量。
- 2) 分散对防热涂料的施工以及成型后的防热性能十分重要,应根据涂料的组成和特性选择适当的方法加以分散。良好分散有利于喷涂作业和提高涂层的抗烧蚀性能。
- 3) 良好分散有利于降低产品防热涂层的内应力,提高环境适应性,并延长服役寿命。

参考文献

[1] 马彬. 基于三维镍结构防热涂层的制备及表征[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
MA Bin. Preparation and Characterization of Thermal Protection Coatings Based on Three Dimensional Nickel Structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010.

[2] 郭亚林,梁国正,丘哲明,等. 某固体发动机壳体外防热涂层研究[J]. 宇航材料工艺,2003(3):21—24.
GUO Ya-lin, LIANG Guo-zheng, QIU Zhe-ming, et al. A Study on External Thermal Insulation Coating for SRM Case [J]. Aerospace Materials & Technology,2003(3):21—24.

[3] 洪建华,李伟. 一种新型防热涂层复合材料的研究与试验[C]//复合材料:生命、环境与高技术. 天津:天津大学出版社,2002:728—732.
HONG Jian-hua, LI Wei. Research and Testing of a New Heat-resistant Coating Composite Materials[C]//Composite Materials: Life, Environment and High Technolgy. Tianjin: Tianjin University Press,2002:728—732.

[4] 郑小玲,游敏,张露露,等. 填料与固化工艺对环氧胶粘涂层硬度的影响[J]. 表面技术,2004,33(4):22—23.
ZHENG Xiao-ling, YOU Min, ZHANG Lu-lu, et al. Effects of Filler and Curing Parameters on the Hardness of Epoxy Adhesive Coating [J]. Surface Technology, 2004, 33(4): 22—23.

[5] 廖兴明. 颜料——涂料的重要组成部分[J]. 涂料涂装与电镀,2006,4(2):11—16.
LIAO Xing-ming. Pigment—An Important Part of the Paint [J]. Painting & Electroplating,2006,4(2):11—16.

[6] 李赫亮,刘敬福,李智超. 填料对环氧胶粘涂层耐蚀及耐磨性影响[J]. 表面技术,2003,32(3):46—48.
LI He-liang, LIU Jing-fu, LI Zhi-chao. Effect of Filler on Corrosion and Wear Resistance of Epoxy Coating [J]. Surface Technology,2003,32(3):46—48.

[7] AKASHI R, TSUTSUI H, KOMURA A. Polymer Gel Light-modulation Materials Imitating Pigment Cells[J]. Advanced Materials,2002,14:1808—1811.

[8] 王铎. 活性剂对颜料的分散及稳定性的研究探讨[J]. 中国涂料,2010(9):39—43.
WANG Duo. Study on the Influence of Active Agent on Dispersion and Stability of Pigment [J]. China Coatings,2010(9):39—43.

[9] FU Jin-mei, LI Yong. Optical Behavior of Organic Pigments in Aqueous Dispersions and Its Application [J]. Journal of Colloid and Interface,1998,202:450—455.

[10] 石森森. 耐磨耐蚀涂膜材料与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
SHI Miao-sen. Wear and Corrosion Resistant Coating Materials and Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2003.

[11] 靳涛,刘立强. 颜填料研究现状及其在隔热涂料中的应用[J]. 材料导报,2008,22(5):26—30.
JIN Tao, LIU Li-qiang. Research Status and Application of

- Pigments and Fillers in Thermal Insulation Coatings [J]. Materials Review, 2008, 22(5): 26—30.
- [12] 马淑雅, 吴松林. 室温固化 RT-III 耐热涂层及其应用 [J]. 航天制造技术, 2002(4): 22—25.
- MA Shu-ya, WU Song-lin. RT-III Heat-resistant Coatings Cured at Room Temperature and Its Application [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2002(4): 22—25.
- [13] 钱逢麟, 笠玉书. 涂料助剂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- QIAN Feng-lin, LI Yu-shu. Paint Additives [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [14] 付学勇. 颜料分散机理的探讨及新的分散方法 [J]. 涂料工业, 2010(7): 67—68.
- FU Xue-yong. Discussion on Pigment Dispersion Mechanism and New Dispersion Method [J]. Paint & Coatings Industry, 2010(7): 67—68.
- [15] 李琳, 许韶华, 杨久霞, 等. 树脂对颜料分散体系的影响 [J]. 现代显示, 2008(1): 71—74.
- LI Lin, XU Shao-hua, YANG Jiu-xia, et al. The Influence of Resin on the Dispersive System of Pigment [J]. Advanced Display, 2008(1): 71—74.
- [16] 王强华. 一种新的填料分散技术(一) [J]. 玻璃钢, 2009(2): 39—45.
- WANG Qiang-hua. A New Filler Dispersion Technology [J]. Fiber Reinforced Plastics, 2009(2): 39—45.
- [17] 肖军. 抗高温高速烧粘腐蚀结构设计及表面防护研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- XIAO Jun. Research on High Temperature and High Corrosion Resistant Burning-sticking Structural Design and Surface Protection [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [18] 高焕方. 填料及液体橡胶对降低环氧厚涂层内应力的作用 [J]. 表面技术, 2002, 31(4): 53—54.
- GAO Huan-fang. The Role Filler and Liquid Rubber Plays in Reducing the Internal Stress of Thick Epoxy Coatings [J]. Surface Technology, 2002, 31(4): 53—54.

(上接第 108 页)

- [12] ANDRADE L S, XAVIER S C, ROMEU C, et al. Electropolishing of AISI-304 Stainless Steel Using an Oxidizing Solution Originally Used for Electrochemical Coloration [J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(13): 2623—2627.
- [13] KREISKOTT S, ARENDT P N, BRONISZ L E, et al. Continuous Electropolishing of Hastelloy Substrates for Ion-beam Assisted Deposition of MgO [J]. Superconductor Science and Technology, 2003, 16(5): 613—616.
- [14] CHEN S C, TU G C, HUANG C A. The Electrochemical Polishing Behavior of Porous Austenitic Stainless Steel (AISI 316L) in Phosphoric-Sulfuric Mixed Acids [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7): 2065—2071.
- [15] 李青. 电抛光 [J]. 表面技术, 1994, 23(2): 53—55.
- LI Qing. Electropolishing [J]. Surface Technology, 1994, 23(2): 53—55.
- [16] 曾华良. 电镀工艺手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- ZENG Hua-liang. Electroplating Process Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [17] 张玉萍, 鞠鹤, 蔡天晓. 外加金属阴极保护用钛阳极 [J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 96—99.
- ZHANG Yu-ping, JU He, CAI Tian-xiao. Titanium Anodes for Impressed Current Cathodic Protection [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 96—99.
- [18] ANDRADE L S, XAVIER S C, ROCHA-FILHO R C, et al. Electropolishing of AISI-304 Stainless Steel Using an Oxidizing Solution Originally Used for Electrochemical Coloration [J]. J Electrochem Soc, 1990, 137(10): 3016—3023.

(上接第 141 页)

- [49] 朱振, 张宏, 张箭, 等. 超音速火焰喷涂 WC-CrNi 涂层的滑动磨损特性研究 [J]. 表面技术, 2012, 41(3): 12—15.
- ZHU Zhen, ZHANG Hong, ZHANG Jian, et al. Study on Sliding Wear Characteristic of HVOF Sprayed WC-CrNi Composite Coatings [J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 12—15.
- [50] 时海芳, 郜世喜, 李智超. 坡缕石对三元硼化物陶瓷涂层磨损性能的影响 [J]. 表面技术, 2012, 41(1): 41—43.
- SHI Hai-fang, GAO Shi-xi, LI Zhi-chao. Effect of Palygors-kite on Wear Performance of Mo_2FeB_2 [J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 41—43.
- [51] 谢小鹏, 冯伟, 黄敦烈. 基于能量耗损的摩擦学系统状态识别方法研究 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(2): 27—31.
- XIE Xiao-peng, FENG Wei, HUANG Dun-lie. Study on State Recognition Method of Tribological System Based on Energy Loss [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(2): 27—31.