

文章编号: 1000-6893(2000)S0-0585-05

## 飞机发动机封严涂层的研究

朱立群<sup>1</sup>, 刘孟兰<sup>1</sup>, 王建华<sup>1</sup>, 李雪源<sup>1</sup>, 沈德逵<sup>1</sup>, 宋定宇<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 材料与工程系, 北京 100083)

(2. 南方航空动力机械公司, 湖南 株洲 412002)

## STUDY OF THE ABRADABLE SEAL COATING USED IN AIRCRAFT ENGINE

ZHU Li-qun<sup>1</sup>, LIU Meng-lan<sup>1</sup>, WANG Jian-hua<sup>1</sup>, LI Xue-yuan<sup>1</sup>, SHEN De-kui<sup>1</sup>, SONG Ding-yu<sup>2</sup>

(1. Department of Materials Science and Engineering, Beijing University of

Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. National South Aeroengine &amp; Machinery Corporation, Zhuzhou 412002, China)

**摘 要:** 采用正交设计实验方法对 BH 封严涂层的组成进行了优选, 并对涂层的固化工艺进行了优选, 确定了 BH 封严涂层的最佳组成和固化工艺。BH 封严涂层的外观均匀细致、气孔数量少, 且孔径小。涂层的耐冷热循环性能比目前使用的封严涂层提高了 1 倍以上, 可耐 38 次冷热循环, 且涂层的固化工艺比较简便。研究发现, BH 封严涂层满足了 300℃ 条件下热稳定性的要求; 石墨填料有利于改善涂层的附着性能; 涂层的硬度主要取决于石棉、ZL 填料的含量; 封严涂层的耐冷热循环性能主要取决于涂层与基体热膨胀系数的差异。

**关键词:** 发动机; 封严涂层; 冷热循环

**中图分类号:** V23; V254.2 **文献标识码:** A

**Abstract:** A new abradable seal coating was investigated. Its composition was optimized by orthogonal tests and the cure process was optimized. The effects of composition and cure process on the properties of the abradable seal coating were investigated and the best composition and cure process were determined. The new abradable seal coating called BH abradable seal coating has better appearance and cool-hot cycle resistance than the currently used abradable seal coating. It has little pores, the diameter of the pores is less than 1mm and the cool-hot resistance is better. It spalled from the substrate after 38 cool-hot cycles. The relations of composition to properties were investigated. The appearance and hardness mainly depend on composition and cure process; the ability of cool-hot resistance mainly depends on the difference of thermal expansion coefficient between coating and substrate. The lower the difference, the better the cool-hot resistance.

**Key words:** engine; abradable seal coating; cool-hot cycle

随着航空技术的日益发展及能源的日渐短缺, 要求发动机具有更高的效率。提高发动机效率的重要措施之一便是采用封严涂层。封严涂层应具有较好的表面质量(气孔数量少且孔径 $\leq 1\text{mm}$ )和优良的耐磨损性、热稳定性、较小的摩擦系数以及良好的与基体材料的附着特性。理想的封严涂层应既有足够的强度抵抗外部颗粒及气体的冲蚀, 又可被刮削, 在叶片与涂层发生摩擦接触时, 涂层被刮削而叶片尖端不磨损, 涂层不脱落, 同时缩小气路, 封严间隙, 减少气体漏泄, 提高飞机发动机的工作效率等性能<sup>[1,2]</sup>。

本文针对飞机发动机压气机第 6~9 级工作环, 第 7~8 级整流器和封严环等零件, 研究出新型的 BH 封严涂层, 经过实验室和工厂试生产考

验, 表明其综合性能能够满足飞机发动机的使用要求, 比工厂现有的封严涂层的表面质量、涂覆固化工艺、耐冷热循环次数(涂层与基体的附着性能)等方面有了很大提高。

## 1 实验与实验结果

试样材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 使用的涂料为耐热有机硅树脂, 再加入石墨、石棉等填料配制而成。搅拌均匀并用二甲苯稀释至便于刮涂的粘度, 用刮刀刮涂第 1 层, 在空气中晾干不少于 30min, 再涂第 2 层、第 3 层, 一直涂至所要求的厚度(一般涂 5~6 层)。将封严涂层涂覆好后, 自然干燥不少于 24h, 然后固化并进行性能测试。

使用德国产的拉力试验机(FM-10kN)进行涂层附着强度的测定, 加载速度为 10mm/min。附着强度的计算公式为

$$F = G/S$$

收稿日期: 1999-06-03; 修订日期: 1999-08-23

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2000/S0/0585/>

式中:  $F(\text{N}/\text{m}^2)$  为涂层的附着强度;  $G(\text{N})$  为试样被拉开破坏时的负荷值;  $S(\text{m}^2)$  为涂覆被测涂层试柱的横截面积。试样为  $\varnothing 17.5\text{mm} \times 30\text{mm}$ 。

根据发动机实际使用的冷热变化情况(工作时的压气机封严环所处温度  $\leq 300^\circ\text{C}$ ; 停止工作时为室温), 故采用冷热循环法测定涂层的附着性能, 即将试样放于热处理炉中加热到  $300^\circ\text{C}$ , 保温 30min 后, 迅速取出淬入室温的自来水中, 然后取出检查涂层是否出现裂纹、翘起及剥落等现象。耐冷热循环次数越多则表明涂层与基体的附着性能越好。这种冷热循环法测定涂层的结合性能也更能反映封严涂层的实际使用情况。

封严涂层的硬度采用表面洛氏硬度计(型号为 HR2-45)测量, 载荷为 147N, 所测硬度为 HRY 硬度。通常封严涂层涂覆后要进行切削加工, 将涂层铣去一层后, 检查表面是否平整光滑、气孔的数量、直径以及气孔面积占涂层总面积的比例。采用 Dheometric Scientific Instrument Company DSC SP 差示扫描量热仪进行涂层的 DSC 曲线和 TGA 曲线的测定。通过 DSC 曲线和 TGA 曲线判定涂层的热稳定性。

(1) BH 封严涂层基料的耐热性和热交变实验 根据对发动机压气机封严环等零件的使用要求, 选择了 W61-55 聚酯有机硅树脂作为封严涂层的基料和涂层的骨架<sup>[3,4]</sup>, 作为高温封严涂层基料的聚酯有机硅树脂, 要求应当具有一定的耐热性和与基体的良好结合性能。图 1 和图 2 分别是 W61-55 聚酯有机硅树脂涂层的 DSC 曲线和 TGA 曲线。由图可以看出, W61-55 聚酯有机硅树脂涂层的 DSC 曲线在温度低于  $300^\circ\text{C}$  时, DSC 曲线平稳, 无放热峰和吸热峰; 到  $450^\circ\text{C}$  时, 出现了一个比较大的放热峰, 这表明树脂发生了结构变化。其 TGA 曲线也表现出当温度低于  $300^\circ\text{C}$  时, 曲线平稳, 涂层的质量百分数无明显变化; 当温度  $> 300^\circ\text{C}$  后, 涂层的质量百分数急剧变化。表明这种 W61-55 聚酯有机硅树脂是完全可以满足发动机压气机封严部件的使用温度环境的。而且, 在 W61-55 聚酯有机硅树脂中再加入适当的颜填料, 会进一步提高这种涂层的热稳定性。

表 1 是 W61-55 聚酯有机硅涂层在不同的温度下保持 24h 后的热失重结果。在温度  $< 300^\circ\text{C}$  时, 涂层仅有轻微失重, 当温度在  $450^\circ\text{C}$  下保温 24h 后, 涂层失重急剧增加并出现了粉化、脱落现象。这与 W61-55 聚酯有机硅树脂涂层的 TGA 曲线中得到的结果是一致的。

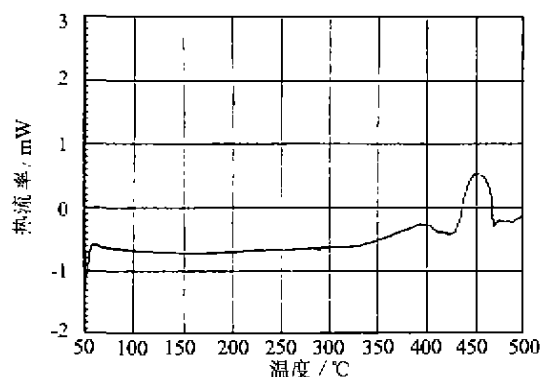


图 1 W61-55 聚酯有机硅树脂涂层的 DSC 曲线

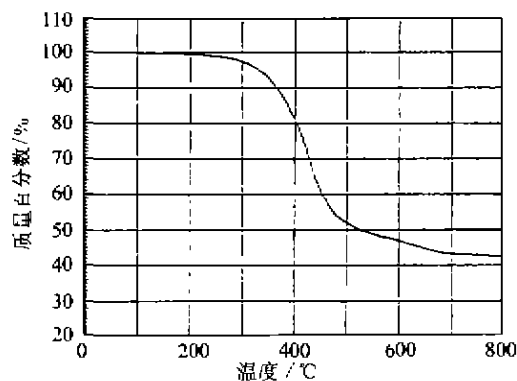


图 2 W61-55 聚酯有机硅树脂涂层的 TGA 曲线

表 1 W61-55 聚酯有机硅树脂涂层  
在不同温度下的热失重(保温 24h)

温度/ $^\circ\text{C}$	200	300	350	450
失重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.00392	0.00825	0.0045	0.0413

在 W61-55 聚酯有机硅树脂中加入铝粉能使涂层的耐热性能大大提高<sup>[5]</sup>, 在 W61-55 聚酯有机硅树脂中加入质量百分数约为 10% 的铝粉, 可以耐  $500^\circ\text{C}$  的高温。但随着铝粉含量的增加, 涂层表面气孔严重。因此, 在后面的试验中将涂料中的铝粉的质量百分数固定在 10%。

图 3 是聚酯有机硅树脂含量的变化与涂层耐冷热循环次数、硬度的关系。随着聚酯有机硅树脂含量的增加, 涂层的硬度值是下降的。而涂层的耐冷热循环次数(18~20 次)不高, 只有聚酯有机硅树脂的质量百分数为 60% 时, 涂层的耐冷热循环次数(25 次)才稍微有所提高。

(2) 填料对涂层性能的影响 在树脂中添加颜填料可以进一步提高涂层的热稳定性和硬度等性能。适合于封严涂层的耐高温无机填料主要有: 滑石粉、石墨粉、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉、石棉粉、钛白粉等。将填料分别加入到聚酯有机硅树脂中(铝粉的质量百分数为 10%), 考察其对涂层的耐冷热循环性能和涂层外观、硬度等性能的影响。

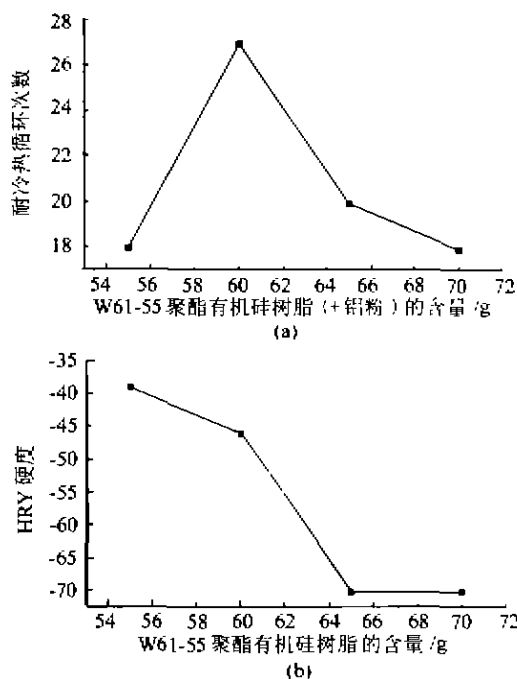


图3 W61-55 聚酯有机硅树脂的含量与封严涂层性能的关系

(a) W61-55 聚酯有机硅树脂与涂层耐冷热循环次数的关系; (b) W61-55 聚酯有机硅树脂与涂层硬度的关系

由于石墨本身的层状结构,构成的封严涂层具有良好润滑性能和低摩擦系数<sup>[6]</sup>,因而涂层表面光滑、细致,可切削性好,涂层的耐冷热循环次数可以提高很多,但涂层与基体的附着强度值比较低(图4)。由于附着强度值是在室温下测定的,不太符合实际飞机压气机的工作环境温度,而耐冷热循环试验更能说明实际情况,因此以耐冷热循环次数的提高来说明封严涂层的结合性能会更好些。综合考虑石墨的加入量在20~25g为好。

将滑石粉加入到 W61-55 聚酯有机硅树脂中,构成的封严涂层表面容易出现微裂纹,而且随着涂层厚度的增加,表面的微裂纹也会增多变长,引起涂层开裂。因此,这种填料不能使用。

在涂层中加入少量的针状石棉可以提高涂层的抗龟裂性和阻燃性<sup>[3]</sup>。并且随着加入石棉含量的增加,涂层的耐冷热循环次数和硬度增加(图5)。但是石棉与涂层的附着强度比较低,在1.85~3.10MPa之间。

为了改善石棉、石墨填料加入后,涂层与基体的附着强度降低的情况,又选择了一种纤维状 ZL 填料。从图6的结果可以看出,随着 ZL 填料加入量的增加,涂层的附着强度和硬度都得到提高,附着强度值提高到3.3~3.8MPa之间,基本接近了聚酯有机硅树脂本身的附着强度值。说明这种填料在改善涂层与金属基体材料的附着性能方面还

是有作用的。

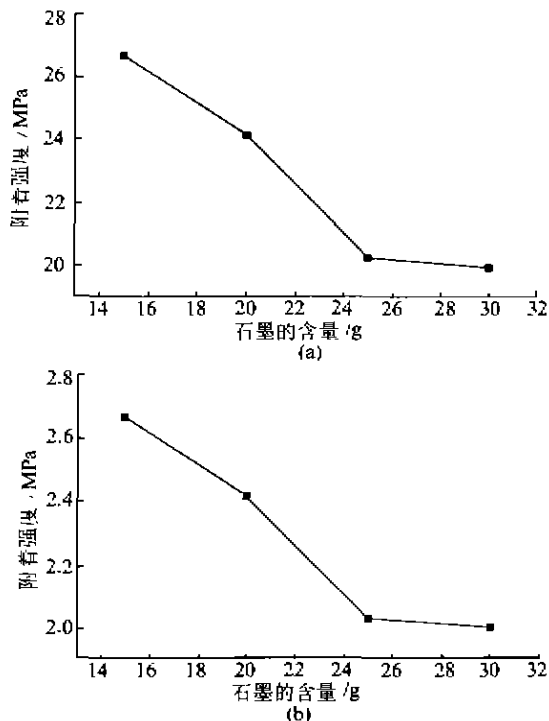


图4 石墨的含量与封严涂层性能之间的关系

(a) 石墨与涂层的耐冷热循环次数的关系; (b) 石墨与涂层的附着强度的关系

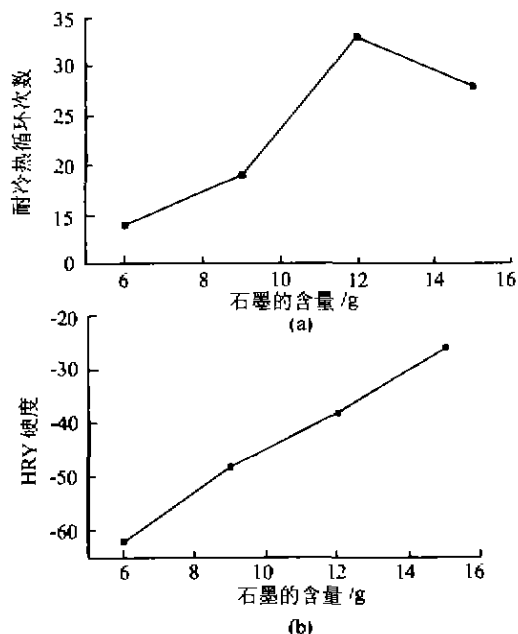


图5 石棉的含量与封严涂层性能的关系

(a) 石棉与涂层的耐冷热循环次数的关系; (b) 石棉与涂层硬度的关系

这样,综合几种填料对封严涂层的附着强度、表面外观质量(气孔的数量和大小)以及涂层的耐冷热循环次数的影响关系。确定在 W61-55 聚酯有机硅树脂+铝粉的基础上,加入石棉、石墨和纤维状 ZL 等填料,构成 BH 封严涂层。其质量百

分数为:聚酯有机硅树脂+铝粉为 60%~65%;复合填料为 35%~40%。

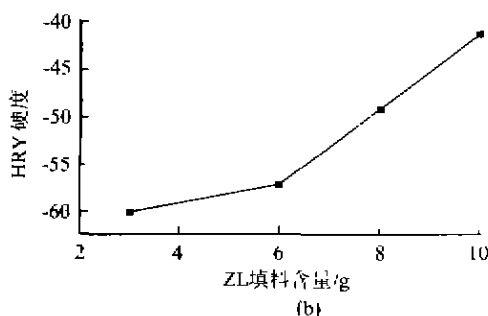
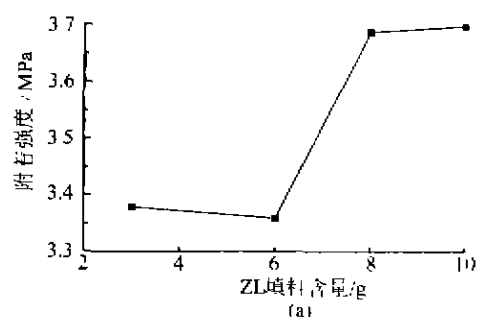


图 6 ZL 填料的含量与封严涂层性能的关系

(a) ZL 填料含量与涂层附着强度的关系;

(b) ZL 填料含量与涂层硬度的关系

通过对优选的 BH 封严涂层与基体的附着强度、表面质量、耐冷热循环次数和热稳定性等进行测试,表明这种优选的涂层性能优良。经过工厂的试生产考验,BH 封严涂层的主要性能指标超过现有的封严涂层,耐冷热循环次数提高 4 倍以上。

(3) 固化工艺对涂层性能的影响 试验中发现,除了涂层的组成对涂层的性能影响之外,涂层的固化工艺也会影响涂层的性能。因此采用了不同的 5 种固化工艺,并通过其耐热循环性能、外观及硬度指标来进行优选,试验条件与结果见表 2。从表 2 中可以看出第 1 种和第 2 种固化工艺虽然

简单,但得到的涂层硬度低,表面质量差,气孔严重,见图 7(a)。第 3 种固化工艺虽然可以提高涂层的硬度,但表面仍然有较多的气孔和鼓泡。第 4 种和第 5 种固化工艺得到的涂层表面质量高,气孔数量少,见图 7(b),硬度值也高,而且还有比较好的耐冷热循环性能。综合考虑,确定第 5 种工艺为 BH 封严涂层的固化工艺(共分 7 个加热台阶,需要 16h),相对于工厂使用的封严涂层需要 33h,11 个加热台阶的固化工艺来说,要简便得多。

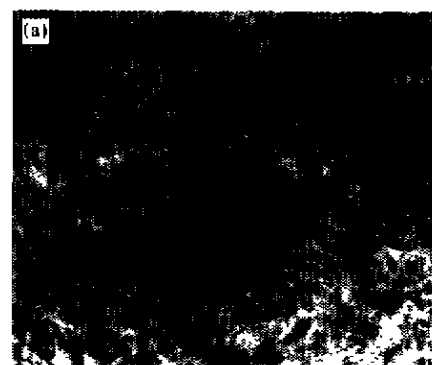


图 7 不同固化工艺条件下的表面形貌(2×)

(a) 固化工艺 1,2; (b) 固化工艺 4,5

表 2 不同的固化工艺与试验结果

固化工艺	试验结果
1. 涂覆完毕立即进行烘烤干燥,室温→180℃,3h	涂层耐冷热循环次数为 15 次,表面气孔严重,HRV 硬度值为-100
2. 涂覆完毕后,自然干燥 24h 后,室温→180℃,3h	涂层耐冷热循环次数为 23 次,表面气孔严重,HRV 硬度值为-85
3. 涂覆完毕立即进行烘烤干燥,室温 50℃,3h→80℃,3h→120℃,2h→150℃,2h→180℃,2h→220℃,2h	涂层耐冷热循环次数为 32 次,表面气孔严重,HRV 硬度值为-40
4. 涂覆完毕,自然干燥 24h 后,室温→50℃,3h→80℃,3h→120℃,2h→150℃,2h→180℃,2h→220℃,2h	涂层耐冷热循环次数为 36 次,表面气孔数量少,孔径小,HRV 硬度值为-37
5. 涂覆完毕后自然干燥 24h 后,室温→50℃,3h→80℃,3h→120℃,2h→150℃,2h→180℃,2h→220℃,2h→250℃,2h	涂层耐冷热循环次数为 40 次,表面气孔数量少,孔径小,HRV 硬度值为 39

## 2 关于提高涂层附着强度机理的讨论

BH 对封严涂层在冷热循环交替变化的条件下表现出了优良的附着强度,比工厂现在使用的封严涂层提高了 4 倍以上(按照同样条件,对工厂现有封严涂层的耐冷热循环次数测定只有 4~8 次)。其内在原因可以从 BH 封严涂层的基本组成进行探讨。

不锈钢基体材料的热膨胀系数为  $11.7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,而有机硅树脂的热膨胀系数大于  $25 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,两者相差很大,这样在冷热循环交替变化的条件下,涂层和基体金属受冷热变化引起的体积变化在涂层内部产生热应力<sup>[7,8]</sup>,经过十几个冷热循环交替变化,最后应力积聚到足以使涂层从基体脱落。由表 3 可看出,由于所加入的石棉、石墨和 ZL 填料具有更小的热膨胀系数,且工厂

现有封严涂层中热膨胀系数比较大的有机硅树脂(十铝粉)、醇酸树脂在涂层中的体积百分数为 65%,而 BH 封严涂层中热膨胀系数比较大的有机硅树脂(十铝粉)在涂层中的体积百分数为 35%。这样,主要有热膨胀系数比较小的石棉、石墨和 ZL 填料构成的 BH 封严涂层的综合热膨胀系数就会降低到与不锈钢基体材料的热膨胀系数比较相近的程度。在冷热循环试验中涂层和基体金属受冷热变化引起的体积变化在涂层内部产生热应力就会变小,使得涂层与基体不易脱落,因此,耐冷热循环次数就会得到提高。

当然,加入的这些填料除了考虑降低树脂的热膨胀系数提高耐冷热循环次数之外,还要考虑加入后对封严涂层的表面气孔数量、硬度、可切削性等的影响。

表 3 涂层中各组分的含量(体积百分数)及热膨胀系数

组分 含量与热膨胀系数	铝粉	石棉	石墨	ZL 填料	有机硅树脂	醇酸树脂
工厂现有封严涂层/%	35	10.5	24.5	/	15	15
BH 封严涂层/%	8.9	21.5	35.5	8.1	26	/
各组分热膨胀系数 $10^{-6}/(^{\circ}\text{C})$	23.1	0.8~1.1	0.5~4.0	5.0	>25	>25

## 3 结 论

(1) 优选出的 BH 封严涂层的最佳组成为:W61-55 聚酯有机硅树脂(十铝粉)质量百分数为 60%;复合填料(石墨、石棉、ZL 等)质量百分数为 40%。BH 封严涂层的热稳定性、涂层的外观质量、硬度以及涂层的耐冷热循环性能优良,涂层的耐冷热循环性能等明显优于工厂原封严涂层。

(2) BH 封严涂层固化工艺简便。

(3) 在冷热交替变化的条件下,封严涂层与基体材料的结合性能主要取决于涂层与基体材料的热膨胀系数的差异,由于 BH 封严涂层中加入的复合材料具有低的热膨胀系数和较大的体积百分数而提高了涂层的耐冷热循环性能。

## 参 考 文 献

- [1] 支树平,等. 热喷涂新型航空燃气涡轮发动机高温封严涂层[J]. 热喷涂技术, 1992(1):89.
- [2] Novinski E R. THSP coatings save aircraft engines[J].

Welding Design and Fabrication, 1991(4):26.

- [3] 战凤昌,李悦良. 专用涂料[M]. 北京:化学工业出版社, 1996. 57.
- [4] 晓阳. 改性有机硅系列涂料[J]. 化工新型材料, 1987, 15: 13.
- [5] 唐大先. 耐高温有机无机涂料的研制[J]. 兰化科技, 1986, 4(3):169.
- [6] 李士贤, 魏建. 石墨[M]. 北京:化学工业出版社, 1991. 10.
- [7] 金格瑞 W D, 等. 陶瓷导论[M]. 清华大学无机非金属材料教研组译. 北京:中国建筑工业出版社, 1982. 830.
- [8] 于芝兰. 金属防护原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1990. 95.

### 作者简介:



朱立群 男, 1955 年生, 山东菏泽市人. 1998 年获得北京航空航天大学材料学博士学位, 现为北京航空航天大学材料系教授, 一直从事材料腐蚀与防护方面的研究, 合作出版《防腐蚀工程与设计》《电镀工艺学》等著作, 并在国内外有关杂志发表文章 40 多篇。

刘孟兰、李雪源简介见本期第 61 页