

# 飞机发动机用梯度封严涂层的研究

The Study of the Gradient Abradable Seal

Coatings Used in Aeroengine

朱立群, 刘孟兰, 李雪源, 王建华 (北京航空航天大学材料系, 北京 100083)

ZHU Li-qun, LIU Meng-lan, LI Xue-yuan, WANG Jian-hua

(Department of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要:** 为了进一步提高封严涂层与基体材料之间的附着性能, 对梯度封严涂层与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢之间的附着性能进行了探讨。采用拉开法测试梯度封严涂层与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢之间的附着强度, 并用冷热循环法测试梯度封严涂层的耐冷热循环性能, 与普通封严涂层的附着强度及耐冷热循环性能进行比较, 结果发现: 梯度封严涂层的附着强度比普通封严涂层的附着强度有提高, 而且梯度封严涂层的耐冷热循环性能明显优于普通封严涂层。

**关键词:** 飞机发动机; 梯度封严涂层; 剥离

**中图分类号:** V261.93<sup>-3</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 02-0034-02

**Abstract:** In order to improve the adherence of the abradable seal coatings farther, the gradient abradable seal coating was investigated. Adherence of the gradient abradable seal coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel substrate and cool-hot cyclic test resistance of it were examined. The results show that, compared to usual abradable seal coating, the adherence of the gradient abradable seal coating is better, and the cool-hot cyclic test resistance of the gradient abradable seal coating is greatly improved. The gradient abradable seal coating spalls from 1Cr18Ni9Ti stainless steel substrate at least after 58 cool-hot cycles, and usual abradable seal coating spalls from 1Cr18Ni9Ti stainless steel substrate after 38 cool-hot cycles.

**Key words:** aeroengine; gradient abradable seal coating; spall

随着航空技术的日益发展及能源的日渐短缺, 要求飞机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性能。理想的封严涂层应既有足够的强度抵抗外部颗粒及气流的冲蚀, 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, 同时缩小气路间隙, 减少气体泄漏, 以提高飞机发动机的工作效率<sup>[1-4]</sup>。目前, 国外先进的飞机发动机所用封严涂层基本解决了气路封严的问题, 但是国内不少厂家所用封严涂层在使用过程中存在易脱落的问题。本研究试图通过使封严涂层中填料成分呈梯度变化来改善封严涂层与基体材料之间的附着性能。

## 1 实验

本试验所用的试样材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 使用的涂料基料为 W61-55 聚酯有机硅树脂, 填料为

填料 A、鳞片状石墨 (200 目)、针状石棉 (100 目)、铝粉浆 (300 目) 等。

梯度封严涂层共分 5 层, 从第一层到第五层, 涂层中 W61-55 聚酯有机硅的加入量不变, 填料的加入量逐渐增加, 第一层为界面粘结层, 第五层为具有一定机械性能与普通封严涂层。所采用的梯度封严涂层的成分变化如图 1 所示。

在封严涂层中引入成分梯度变化的思想就是借助粘结层与金属基体间较大的附着强度, 同时在粘结层的基础上再涂覆组分呈梯度变化的封严涂层, 从而使涂层与基体间有足够的附着强度, 又使涂层内部在冷热交替变化中产生的热应力尽可能小, 提高梯度封严涂层与基体的附着强度和耐冷热循环性能。

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,  $F=G/S$ , 式中  $F$  为涂层的附着强度 ( $N/m^2$ ),  $G$  为试样被拉开破坏时的负荷值 ( $N$ ),  $S$  为涂覆被测涂层试柱的横截面积 ( $m^2$ )。

根据飞机发动机涂覆封严涂层的零件实际使用

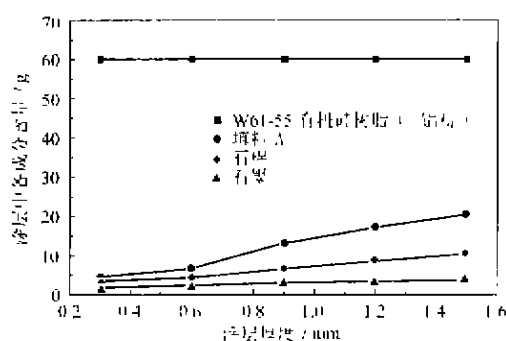


图1 梯度封严涂层的厚度与涂层成分之间的关系

Fig. 1 Relationship between thickness of coating and composition of coating

情况(发动机工作时涂覆封严涂层的零件所处的温度约为 300℃左右,停止工作时的温度为室温),采用冷热循环法测定封严涂层的附着性能,即将试样放于热处理炉中加热到 300℃,保温 30min 后,迅速取出淬入室温下的自来水中,然后取出检查涂层是否出现裂纹、翘起及剥落现象。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 梯度封严涂层的附着强度及耐冷热循环性能

梯度封严涂层的耐冷热循环性能及涂层与基体之间的附着强度的试验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 梯度封严涂层的耐冷热循环性能

Table 1 The cool-hot cycle resistance of gradient coating

试样号	耐冷热循环次数	最大次数	最小次数	涂层的剥离形式
79	58	~65	58	梯度封严涂层与金属基体剥离
12	~65	~65	58	
5	~65	~65	58	

表 2 梯度封严涂层与基体的附着强度试验结果

Table 2 Adhesive strength of coating on stainless steel substrate

试样号	试样破坏时载荷 /kN	试样的破坏形式	试样的面积 /mm <sup>2</sup>	附着强度 /MPa
1	1.1	涂层之间拉开	2.4 × 10 <sup>3</sup>	>1.50
2	1.04	涂层之间拉开	2.4 × 10 <sup>3</sup>	>4.3
3	1.1	涂层之间拉开	2.4 × 10 <sup>3</sup>	>4.5

普通封严涂层的附着强度为 3.80MPa,耐冷热循环次数只有 38 次。从表 1 和表 2 中的试验结果可以看出,梯度封严涂层与基体材料之间除了具有较大的附着强度之外,关键是可以使耐冷热循环次数提高到

58 次以上,基本达到了通过封严涂层中组分的梯度变化而提高梯度封严涂层附着性能的目的。

### 2.2 梯度封严涂层附着性能机制的讨论

在冷热循环试验中,构成封严涂层与基体材料剥离的根本原因,是在冷热交替过程中,由于两者热膨胀系数不同,使得涂层中产生的张应力不断积聚最终导致了封严涂层与基体材料的剥离。

由图 1 可知,梯度封严涂层的成分在涂层厚度的方向上是逐渐变化的。第一层中 W61-55 聚酯有机硅树脂的含量较大(90wt%),填料的含量较小(10wt%);随着涂层厚度的增加,涂层中 W61-55 聚酯有机硅树脂的含量逐渐减少,填料的含量逐渐增加。第二层中 W61-55 聚酯有机硅树脂的含量为 80wt%,填料的含量为 20wt%;第三层中 W61-55 聚酯有机硅树脂的含量为 73wt%,填料的含量为 27wt%;第四层中 W61-55 聚酯有机硅树脂的含量为 67wt%,填料的含量为 33wt%;第五层中 W61-55 聚酯有机硅树脂的含量为 62wt%,填料的含量为 38wt%。可见随着涂层厚度的增加,W61-55 聚酯有机硅树脂的含量降低,填料的含量增加。第五层即为普通封严涂层。表 3 示出了涂层中各成分的热膨胀系数。结合表 3 中的数据,不难确定,从第一层到第五层涂层的热膨胀系数是逐渐减小的。

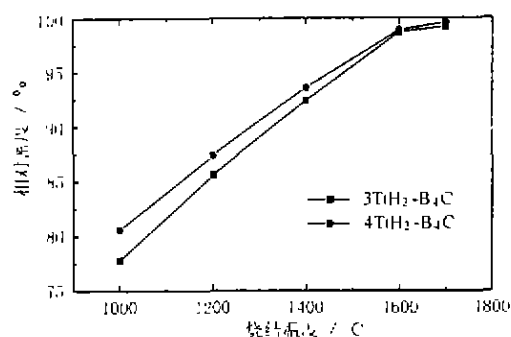
表 3 封严涂层各组分的含量及热膨胀系数[3,6,7]

Table 3 Composition of the seal coating and their thermal expansion coefficient

	铝粉	玻璃纤维	石墨	石棉	有机硅树脂	醇酸树脂
原封严涂层/%	35		24.5	10.5	15	15
BH 封严涂层/%	8.9	8.1	35.5	21.5	26	
热膨胀系数 (× 10 <sup>-6</sup> /℃)	23.1	5.0	0.5~4.0	很小	>25	>25

通过梯度封严涂层在冷却时的热应力变化,可以探讨其耐冷热循环性能优良的原因。在梯度封严涂层系统中,由于其热膨胀系数在厚度方向上由大到小逐渐变化,第一层粘接层主要成分是 W61-55 聚酯有机硅树脂,含少量的填料,涂层与基体之间具有较大的附着强度。但在冷热交替变化时,由于较大的热膨胀系数差会引起较大的张应力积聚,而紧贴着第一层的第二层由于热膨胀系数小的填料的含量增加,从两层涂层的体积膨胀量来看,第二层的体积膨胀变化也少于第一层,相当于第二层要抑制第一层的体积变化而起到压应力的作用。对后面的三层来说,也是填料含

(下转第 21 页)

图4  $\text{TiH}_2$ - $\text{B}_4\text{C}$  系统烧结温度与密度的关系Fig. 4 Plot of densities vs sintering temperature of  $\text{TiH}_2$ - $\text{B}_4\text{C}$  systems表1  $\text{TiH}_2$ - $\text{B}_4\text{C}$  系统的力学性能Table 1 Mechanical properties of sintered body for the  $\text{TiH}_2$ - $\text{B}_4\text{C}$  system

原料配比	抗弯强度/MPa	断裂韧性/ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	硬度/HRC
3TiH <sub>2</sub> -B <sub>4</sub> C	781.6±51.3	7.8±1.1	93.3
4TiH <sub>2</sub> -B <sub>4</sub> C	680.4±23.4	7.0±1.5	92.1

### 3 结论

(1) 可以利用普通的热压设备, 以  $\text{TiH}_2$  和  $\text{B}_4\text{C}$  为原料实现原位合成的  $\text{TiB}_2$ - $\text{TiC}$  陶瓷基复合材料。

(2) 原位合成的烧结体中没有出现  $\text{TiB}$  相, 多余的  $\text{Ti}$  固溶于  $\text{TiC}$  中。

(3) 原位合成的  $\text{TiB}_2$ - $\text{TiC}$  陶瓷基复合材料中出现了长柱状的  $\text{TiB}_2$ , 导致材料的断裂韧性的提高。

#### 参考文献

- [1] J Ramberg, C Wolfe, and W. Williams. Resistance of  $\text{TiB}_2$  to High Temperature Yielding [J]. J Am Ceram. Soc., 1985, 68: C-78-C-79
- [2] M W Barscum, et al. The Transient Plastic Phase Processing of Ceramic-Ceramic Composites [J]. JOM, 1995, (11): 52-55.
- [3] I I Spivak, R A Andrievskii, V V Klimentko, V D Lazarenko. Creep in the Binary System  $\text{TiB}_2$ - $\text{TiC}$ ,  $\text{ZrB}_2$ - $\text{ZrN}$  [J]. Sov Powder Metall Met Ceram. (Engl Transl), 1974, 137: 617-620.
- [4] 唐建新, 左开芬, 胡晓清等. 过渡塑性相工艺制造  $\text{Ti-B-C}$  复合陶瓷材料 [J]. 清华大学学报, 1998, 38 (12): 73-75.
- [5] 唐建新. 过渡塑性相工艺制备  $\text{Ti-B-C}$  陶瓷基复合材料的机理研究 [D]. 清华大学博士学位论文, 1999.

收稿日期: 1999-10-11

作者简介: 唐建新 (19-), 男, 博士, 联系地址: 北京市 81 信箱 15 分箱 (100095)

本文编辑: 全宏声

(上接第 18 页)

#### 参考文献

- [1] K Hirao, et al. Trans Mat Res Jpn, vol. 14A: 867-870.
- [2] K Hirao, et al. J Am. Ceram Soc. 1994, 77 (7): 1857-1862.
- [3] K Hirao, et al. J Ceram Soc Jpn. 1993, 101 (9): 1071-1073.
- [4] J Dusza, P Sajgalik. J Europ Ceram Soc. 1992, (9): 9-17.

基金项目: 九五国家 863 高新技术计划资助项目 (863-715-006-0100)

收稿日期: 1999-11-01

作者简介: 许兴利 (1965-), 男, 博士后, 参与国防科工委重点科研项目、国家 863 项目以及多个横向课题的研究工作。联系地址: 清华大学新型陶瓷学精细工艺国家重点实验室 (100084)

本文编辑: 杨 雪

(上接第 35 页)

量逐渐增多, 热膨胀系数逐渐降低, 后面的一层对前面的一层的体积膨胀总有压制作用。因此, 使得整个梯度封严涂层所受张应力的影响要小于非梯度封严涂层, 所以耐冷热循环次数得到很大提高 (由 38~43 次提高到 58 次以上)。而且在冷热循环中梯度封严涂层各层之间也没有发生剥离现象。

### 3 结论

在封严涂层中通过引入成分梯度变化的涂层, 提高了封严涂层与基体的界面结合性能和在冷热循环下的抗剥落性能。这说明使填料的含量比例呈梯度变化, 减少了涂层与基体界面产生的热应力积聚, 从而使梯度封严涂层的抗冷热循环剥落性能得到提高。

#### 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, 2: 89
- [2] EDWARD R. NOVINSKI. THSP Coatings Save Aircraft Engines [J]. Welding Design and Fabrication, 1991, (4): 26
- [3] P E Hamilton, E L Bolin. Compressor Clearance Control Coatings in Gas Turbine Engine [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 68/69: 1
- [4] 王薇等. 发动机封严涂层的研究进展 [J]. 航空制造工程, 1996, 11: 3
- [5] 赵世臣 编. 常用金属材料手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987
- [6] 罗何胜 编. 塑料材料手册 [M]. 广州: 广东科学出版社, 1987
- [7] 植树 益次 著. 增强纤维 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987

基金项目: 本课题得到航空科学基金资助 (99H51044)

收稿日期: 1999-12-13

作者简介: 朱立群 (1955-), 男, 山东菏泽市人, 教授, 工学博士。联系地址: 北京航空航天大学材料系 (100083)

本文编辑: 全宏声