

文章编号: 1000-8055(2003) 06-0050-04

热障涂层结合强度及失效模式研究

耿 瑞¹, 周柏卓¹, 齐红宇², 杨晓光²

(1. 沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015;

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用实验方法研究了热障涂层的结合强度, 并探讨了温度、氧化时间、涂层厚度以及基体等因素对结合强度的影响。涂层采用了等离子和 EB-PVD 两种喷涂工艺, 采用双向测试法, 分析了粘结层氧化对涂层法向和切向结合强度的影响, 研究结果表明同一种喷涂工艺方法, 尽管涂层厚度不同, 但其结合强度是非常接近的, 为带涂层航空发动机部件的强度设计和分析以及涂层失效模型的建立提供的参考。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 结合强度; 等离子; EB-PVD; 热障涂层

中图分类号: V 231. 91

文献标识码: A

The Bonding Strength and Failure Modes of Thermal Barrier Coatings

GENG Rui¹, ZHOU Bai-zhuo¹, QI Hong-yu², YANG Xiao-guang²

(1. Shenyang Aero engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

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

Abstract: The bonding strength of the thermal barrier coating including ASP and EB-PVD is studied under different high temperature experiments. The effects of different temperatures, thicknesses of coating and substrate are analyzed. Using the two-direction testing, the normal and tangent bonding strengths under high temperature oxidation are investigated. Tests show that the bonding strength of the same TBCs with different thicknesses is very close. The experiments provided many data and reference for failure modelling and aero-engine parts designing with TBC.

Key words: aerospace propulsion system; bonding strength; ASP; EB-PVD; thermal barrier coatings

在热障涂层应力分析中, 正确建立静强度与涂层氧化的关系是它与传统方法的主要区别所在。氧化的影响在寿命预测模型中已经得到体现^[1, 2], 并且相关的热循环实验也证明了剩余寿命与氧化的关系。为此, 借鉴损伤力学的基本原理^[3], 可以假设涂层的氧化损伤反映在剩余寿命及剩余强度两个变量上, 本文将选取结合强度来替代后者, 并研究该变量与涂层氧化的关系。

热障涂层的界面结合强度不仅是衡量其质量

的重要参数, 同时也是复合材料中考核界面强度的重要标准之一, 从现有条件来看, 使用它作为反映剩余强度的参数在理论和工程两方面都具有一定的根据。过去测量结合强度通常只考虑垂直于涂层的法向载荷(拉伸方向), 但实际寿命模型及相应的热循环实验^[4, 5]都表明平面内方向(剪切方向)的强度对涂层的影响同样非常重要, 在 P&W 公司的涂层寿命模型^[4]中轴向应变就被选为体现热不匹配的主要变量, 所以后面对结合强度研究

表 1 涂层系统的结构及厚度

Table 1 Thickness and processes of TBC systems

加工方法	粘结层 M crAlY/mm	陶瓷层 8% Y ₂ O ₃ - ZrO ₂ /mm	喷涂工艺
等离子	0.12	0.10~0.15 ; 0.25~0.35	空气等离子
EB-PVD	0.08~0.10	0.1~0.12	真空 EB-PVD

表 2 EB-PVD 涂层结合强度实验结果

Table 2 The experiment data of bond strength for EB-PVD

氧化温度 1050℃					
氧化时间/h	0	10	20	50	100
拉伸/MPa	胶失效	34.95, 28, 26	28.47, 25.6, 25	20, 23	21.8, 27.86, 25.7
剪切/MPa	胶失效	27.5, 32.7	30.0, 28.9	21.1, 34.6	29.5, 24.3, 23.2
氧化温度 700℃					
氧化时间/h	0	100			
拉伸/MPa	胶失效	胶失效			
剪切/MPa	胶失效	胶失效			

有必要同时考虑涂层切向和法向两个方向的变化。

1 试样制备及实验方法

涂层类型包括等离子及 EB-PVD 两种, 系统组成及厚度见表 1。考虑到工艺的稳定性, EB-PVD 涂层各部分厚度比等离子涂层要薄。对于等离子陶瓷层厚度选择了两种范围, 前一种是国内某型号发动机导向器叶片热障涂层的厚度, 后一种为国外发动机涡轮叶片上涂层的通常厚度(一般为 0.25 mm)。

金属基体均为 2 mm 厚的平板, 材料为 K403, 具体尺寸如下:

拉伸实验: 23 mm×23 mm×2 mm

剪切实验: 40 mm×20 mm×2 mm

涂层高温氧化设备为电炉, 选取了 700℃, 1050℃两种氧化温度, 实验结果表明, 粘结层在 700℃时氧化增重非常小, 因此可认为该温度下没有发生氧化。后面将从结合强度角度分析该温度下是否存在氧化损伤。1050℃下的氧化时间选取 0, 10, 20, 60, 100 小时 5 个点, 每个点使用 3 个试样。试样加载在 CSS-280 电液伺服试验机上进行, 采用图 1 所示的两种加载方式, 为保证结果可

靠, 加载时要尽量确保两个夹具的同心。实验使用的粘结剂为 J-47 A 薄膜胶, 其最大拉伸/剪切强度在 45 MPa 左右, 使用时需要将粘结件加热固化, 固化条件为 120℃, 保持 2.5 h。

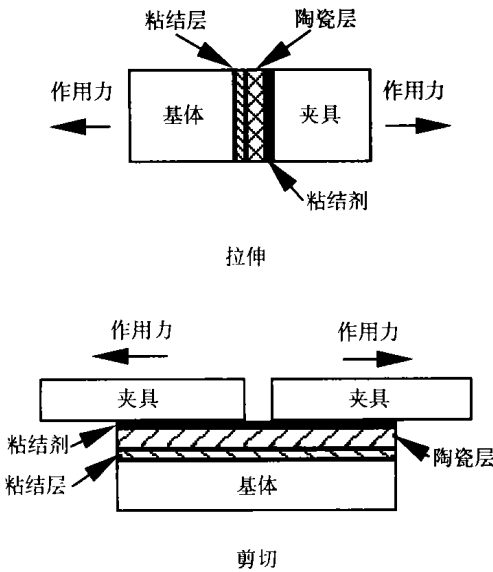


图 1 结合强度测试方法示意图

Fig. 1 Schematic of the samples used for bonding strength test

表 3 等离子涂层结合强度实验结果
Table 3 The experiment data of bond strengthe for ASP

氧化温度 1050℃ 陶瓷层厚度 0.25 mm					
氧化时间/h	0	10	20	50	100
拉伸/MPa	34.4, 38.	31.98, 27	30.09, 2463, 22.2	(24), 27	28.79, 22.23
剪切/MPa	37.4, 30.4, 32.52	30.0, 26	29.0, 30.2	(23), (28)	31.4, 26.5, 27.1

氧化温度 1050℃ 陶瓷层厚度 0.1 mm		
氧化时间/h	0	300
拉伸/MPa	胶失效	胶失效
剪切/MPa	胶失效	胶失效

氧化温度 700℃ 陶瓷层厚度 0.25 mm		
氧化时间/h	50	100
拉伸/MPa	31, 35	29.4
剪切/MPa	34	36.4, 29.4

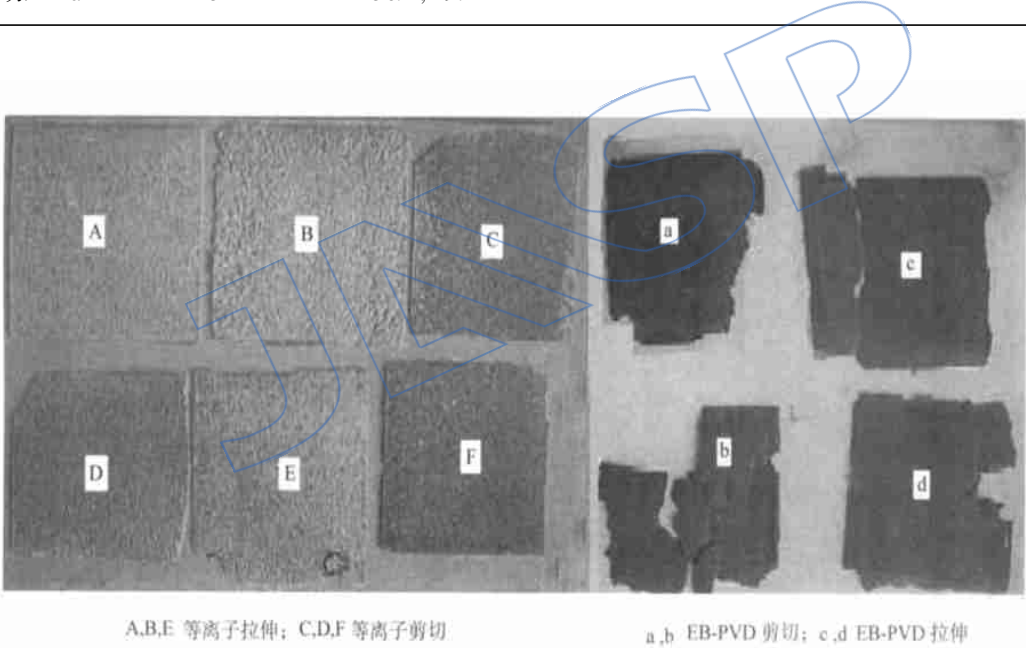


图 2 结合强度实验中失效涂层试样对应的陶瓷层断面形貌
Fig. 2 The photography of the failure samples

2 实验结果分析

剥落的陶瓷层断面形貌(图 2)表明,对于等离子及 EB-PVD 涂层来说,两种加载方向涂层的断裂部位均位于陶瓷层/粘结层界面附近,随后的 SEM 电镜观察及成分扫描结果也证明了这一点。相关的寿命实验^[4,5]表明,此处也是热循环载荷下涂层的失效部位。显然无论是静载荷还是循环载荷,涂层的危险部位均在其界面附近。

表 2 和表 3 的实验结果说明,同一种涂层尽

管厚度不同,但是其切向和法向方向上的结合强度没有明显差异,具体情况见表。

对于 EB-PVD,结合强度受氧化影响比较明显:如表 2 显示在不发生氧化时(包括 700℃工况),两个方向的结合强度均大于胶的粘结强度(40~45 MPa);相比 1050℃温度时,经过 10 h 氧化后涂层的结合强度明显降低,这一特性在两个加载方向上均是如此。图 3 显示结合强度随氧化时间的增加有减小的趋势,但不明显,所以结合强度与涂层的氧化时间是否存在定量的关系需进一

步研究。

对于等离子涂层, 当陶瓷层较厚时, 其结合强度与氧化的定量关系并不明显(图 3)。表 3 显示陶瓷层厚度对等离子涂层的结合强度的影响很大: 厚度较薄时(0.1 mm 左右), 从原始态到 1050℃下氧化 300 h 的试样, 两个方向的结合强度大多高于胶的粘结强度; 而厚度为 0.25~0.35 mm 时, 相应的粘结强度在 22~37 MPa 之间(氧化温度 1050℃, 时间 0~100 h)。由此似乎可以初

步认为等离子涂层中存在一个“临界厚度”, 当陶瓷层小于这个厚度时结合强度将变得很大, 其原因可能是由涂层各部分之间的结合方式引起的, 因为与 EB-PVD 的化学结合不同, 等离子涂层的粘结层与陶瓷层二者是机械结合模式, 于是界面的粗糙程度不仅影响了结合强度, 而且这种影响在陶瓷层内还可能存在一个有效范围, 该范围的极限值就应该是陶瓷层的“临界厚度”; 超过极限值结合强度将有明显的减小。当然, 这一结论还有待于进一步验证。

3 结 论

相对涂层界面来说, 拉伸、剪切两个方向的结合强度差别不大; 而且其失效位置与寿命实验中涂层的剥落位置基本相同。

对于 EB-PVD, 涂层氧化与否对结合强度的影响很大, 由于结果离散度较大, 氧化程度(通过给定温度下的氧化时间来表示)与结合强度之间的定量关系尚不明显。

对于等离子涂层, 陶瓷层厚度对结合强度的影响比较明显, 基本特征是当厚度小于某个极限值时, 涂层的结合强度将有较大提高。当陶瓷层较厚时, 结合强度与氧化程度的定量关系并不明显。

参考文献:

[1] Cruse T A. Thermal Barrier Coatings Life Prediction Model Development[J]. ASME Journal of Engine for Gas Turbine and Power, 1988, 110: 610- 616.

[2] Meier S M, Sheffler K D, Cruse T A. Thermal Barrier Coatings Life Prediction Model Development[J]. ASME Journal of Engine for Gas Turbine and Power, 1992, 114: 258- 262.

[3] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

[4] Meier S M, Sheffler K D. Thermal Barrier Coating Life Prediction Model Development, Phase 2. (P&W) [R]. NASA- CR- 189111, 1991.

[5] Hillery R V, Pilsner B H. Thermal Barrier Coatings Life Prediction Model Development Final Report (GE) [R]. NASA- CR- 180807, 1988.

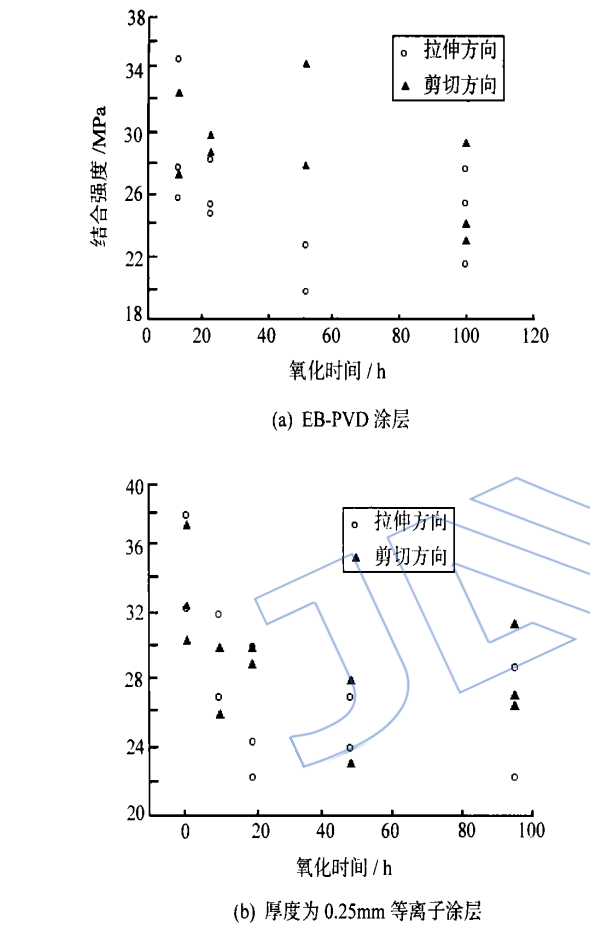


图 3 在氧化温度为 1050℃时的 EB-PVD 涂层及等离子涂层结合强度实验结果

Fig.3 The bond strength of ASP and EB-PVD under 1050℃