

电子束物理气相沉积热障涂层寿命预测模型

项民 张琦 骆军华

(北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100083)

文 摘 为了准确预测热障涂层(TBCs)的剥落寿命,把涂层使用过程中所存在的潜在危险减到最低,建立精确的热障涂层寿命预测模型具有十分重要意义。本文介绍了一种电子束物理气相沉积(EB-PVD)技术制备的热障涂层的寿命预测模型。该模型是通过EB-PVD热障涂层陶瓷的物理和力学性能、结合强度的测定,热生长氧化层(TGO)生长动力学的研究以及热循环剥落寿命数据的定量研究而建立的一个TBCs系统的非线性寿命预测模型。从涂层实际寿命与模型预测寿命对比发现,该模型预测的涂层寿命与涂层的实际寿命相吻合。

关键词 电子束物理气相沉积,热障涂层,寿命预测模型

Life Prediction Model of Electron Beam-Physical Vapor Deposited Thermal Barrier Coatings

Xiang Min Zhang Qi Luo Junhua

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract It is important that spallation life of thermal barrier coatings(TBCs) is predicted accurately, decreased the potential danger to the minimum in operate, and builded life prediction model of TBCs. The life prediction model for electron beam-physical vapor deposited(EB-PVD) thermal barrier coatings(TBCs) is introduced. The spallation life prediction model is developed based on measurement of EB-PVD ceramic physical and mechanical properties and adherence strength, measurement of TGO growth kinetics, generation of quantitative cyclic thermal spallation life data. The predicting result is fairly coincident with the actual lifetime of the coatings.

Key words Electron beam-physical vapor deposition, Thermal barrier coatings(TBCs), Life prediction model

1 前言

热障涂层(TBCs)是为满足航空发动机发展的需要而于20世纪60年代开发出来的一种表面热防护技术,它是利用陶瓷材料优越的耐高温、抗腐蚀和低导热等性能,以涂层的方式将陶瓷与金属基体相复合,在提高金属热端部件抗高温腐蚀能力的同时使其能承受更高的使用温度^[1-2]。热障涂层根据结构可以分为双层结构、多层结构和梯度结构三种体

系。这三种涂层体系各有特点,根据不同的环境要求,可以采用不同的结构体系。

双层结构的热障涂层采用陶瓷作为隔热顶层,在陶瓷层与金属基体之间引入一层改善基体与陶瓷层物理相容性并具有抗高温氧化和腐蚀作用的MCrAlY(M为Ni,Co)黏结层,在长时间的高温氧化条件下,MCrAlY层中的Al将向外扩散,在MCrAlY的表层发生选择性氧化,形成一层致密的 Al_2O_3 保

收稿日期:2005-01-12

作者简介:项民,1967年出生,讲师,主要从事材料的腐蚀与防护方面的研究工作

宇航材料工艺 2005年 第5期

— 57 —

护膜,称为热生长氧化层(TGO),它能阻止底层的进一步氧化,从而达到保护基体的目的。但随着氧化时间的延长,TGO层厚度不断增加,在氧化层内会形成高的应力集中,可能引起裂纹的萌生和扩展,导致涂层抗蚀性能下降^[3]。隔热的顶层陶瓷层可以降低基体结构金属所耐受的温度,提高零件的耐久力。但是涂覆有陶瓷层的构件也存在由于陶瓷层失效引起的构件失效的问题,而对于涂层何时发生失效是在工程实践中必须面对的一个问题。如果能比较准确地预测热障涂层的剥落寿命,则可以把涂层使用过程中所存在的潜在危险减到最低。因而,建立一个精确的热障涂层寿命预测模型对于减少潜在的危险,充分发挥涂层的防护作用有着积极的意义。

美国航天局(NASA)和Pratt & Whitney公司在80年代就开始了等离子喷涂(PS)和电子束物理气相沉积(EB-PVD)热障涂层的寿命进行预测研究^[4-9]。本文介绍了极具发展潜力的电子束物理气相沉积热障涂层的一种寿命预测模型。

2 寿命预测模型

EB-PVD热障涂层的寿命预测模型需考虑的因素有:EB-PVD陶瓷的物理和力学性能、结合强度、TGO生长动力学、热循环剥落寿命的定量数据等。

EB-PVD热障涂层的失效与黏结层表面高温氧化过程中生成的氧化物的体积效应有关,因而作为EB-PVD热障涂层寿命模型的一部分,需要对其氧化情况进行计算。

传统氧化模型的一般表达式为^[5]:

$$= A [C \exp(-H/RT) t]^n \quad (1)$$

式中: δ 为氧化层厚度, H 为表观活化能, R 为气体常数, T 为温度, t 为时间, n 为0.332, A 、 C 为腐蚀常数。

利用非线性的衰减分析技术,上面方程可以表示为下面一种简单的形式^[5]:

$$\left\{ \exp \left[Q \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}^n \quad (2)$$

式中:

$$Q = H/R = 27\,777.4$$

$$T_0 = Q / \ln[A \exp(1/n) C] = 2\,423.7$$

等离子喷涂热障涂层的试验表明陶瓷的非弹性

变形是临界寿命参数。对于EB-PVD陶瓷行为的非线性分析表明在循环氧化过程中,EB-PVD陶瓷总是保持着弹性。Miller^[8]等人认为热障涂层的失效主要是由于陶瓷和金属基体之间的线膨胀系数不匹配诱发的应力引起的。后来Meier等人对EB-PVD热障涂层在燃烧室热循环条件下的非线性行为进行分析时发现:热障涂层的剥落是因TGO与金属基体之间的界面破坏造成的,而TGO的弹性变形则是由于其与金属基体之间热膨胀不匹配引起的^[9]。所以寿命预测模型可以用TGO的弹性应变代替EB-PVD陶瓷的应变,同时由于TGO和基体之间的线膨胀系数不匹配而导致了TGO的弹性变形,使TGO层产生应变。根据氧化铝的相关文献,可以假设TGO层的线膨胀系数与温度的关系是线性的。

TGO层在一定温度下的自由伸长率为^[5]:

$$\begin{aligned} L/L &= \int_{T_{sf}}^T (T) dT \\ &= \alpha_0 (T - T_{sf}) + \frac{1}{2} \alpha_1 [(T - T_0)^2 - (T_{sf} - T_0)^2] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: T_0 为室温21℃, T 为金属EB-PVD陶瓷层界面温度, T_{sf} 为氧化膜无应变温度(可认为是金属/EB-PVD陶瓷层界面温度的最大值)98℃, L/L 为TGO层自由伸长率, $\alpha_0 = 0.65 \times 10^{-5}$, $\alpha_1 = 1.64 \times 10^{-9}$ 。

氧化物的平均应变对于 T_{sf} 的变化非常的敏感,因而在寿命模型中也把 T_{sf} 作为一个参数来考虑。

对于一个特定的循环来说,计算TGO层所产生的应变是从基体总的应变中减去式(3)所得到的结果:

$$\epsilon(T) = \epsilon_{ss}(T) - (L(T)/L) \quad (4)$$

式中: $\epsilon(T)$ 为TGO层所产生的应变, ϵ_{ss} 为基体总应变。通过把几个TGO的循环破坏模型应用到寿命数据中,发现每个模型都是一种幂律关系,这与基本的疲劳模型以及等离子喷涂热障涂层的破坏模型是一致的^[4]。

通常的幂律寿命模型形式为^[5]:

$$N = A \epsilon^b \quad (5)$$

式中: N 为循环寿命, A 为经验常数, b 为幂级数,为式(4)得到的TGO层最大应变。

在较早的试验中就发现参数 A 依赖于生长的

氧化物数量,这之间的合理依赖关系尚待确定。等离子喷涂陶瓷的失效位置发生在与 TGO 相邻的陶瓷内部,并不在 TGO 内。而 EB - PVD 热障涂层的失效位置在黏结层 /TGO 的界面上,所以在考虑 EB - PVD 热障涂层试样的循环寿命时必须将氧化物考虑进去。因此热障涂层的疲劳寿命模型是^[5]:

$$N = [(\frac{t_{ox}}{t_c}) (1 - \frac{t_{ox}}{t_c})^c + (\frac{t_{ox}}{t_c})^c]^b \quad (6)$$

式中: t_c 为未循环时导致 EB - PVD 陶瓷产生裂纹的氧化物临界厚度 $1.4 \mu\text{m}$, b 为 7.64 , $\frac{t_{ox}}{t_c}$ 为常数 0.016 , $c = 1.0$, t_{ox} 为某一特定循环次数下氧化物厚度。

通过对式 (6) 每个循环取倒数可以得到每个热循环的破坏值,循环破坏的值可以通过一个程序计算出来。当前的破坏被加到先前所有破坏的总和中去,当在一个循环结束时总的破坏值之和等于或者大于 1 时,该试样就失效了。

实际寿命与预测寿命的比较见图 1。基线的数据包括氧化型、应力型和混合型循环,这些都与疲劳模型的结果有着较好的吻合,其中的误差在 $\pm 2\%$ 左右^[5]。

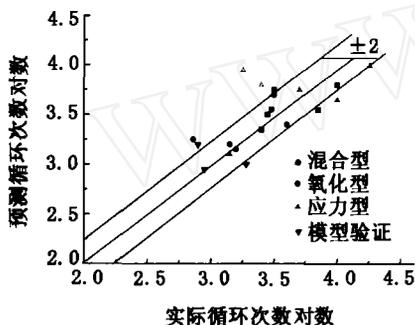


图 1 模型预测寿命与涂层实际寿命相关性

Fig 1 Correlation results for the fatigue model

3 结论

(1) 对 EB - PVD TBCs 的非线性分析时发现: TBCs 的剥落是因为 TGO 与金属基体之间的界面破坏造成的,而 TGO 的弹性变形则是由于其与金属基体之间热膨胀不匹配引起的。

(2) 在充分理解 EB - PVD TBCs 失效机理的基础上,通过对各种性能的测定,获得相关的寿命数据,建立了一个 EB - PVD TBCs 系统的非线性寿命预测模型。该预测模型与实际体系的寿命有着较好的吻合。

参考文献

- 1 Siegmund S D, Brown C A. Scale-sensitive fractal analysis for understanding the influence of substrate roughness in the thermal spraying. In: Bemdt C C ed Proceedings of the first united thermal spray conference, Materials Park, OH - USA: ASM International, 1998: 149 ~ 158
- 2 Dayanda M A, Sohn Y H. Interdiffusion between MCrAlY coatings and selected Ni-base alloys. In: Narendra BD, Janet MH, Jacob J eds Proceedings of the symposium on high temperature coatings-I, Warrendale, Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 1995: 107 ~ 120
- 3 Padture N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine application. Science, 2002; 296: 280 ~ 284
- 4 Demasi J T, Sheffler K D, Ortiz M. Thermal barrier coating life prediction model development Phase I Final Report, Contract NAS3-23944, NASA CR - 182230
- 5 Meier SM, Nissley D M, Sheffler K D. Thermal barrier coating life prediction model development Phase II Final Report, Contract NAS3 - 23944, NASA CR - 189111
- 6 Cruse T A, Stewart S E, Ortiz M. Thermal barrier coating life prediction model development. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1988; 110: 610 ~ 616
- 7 Meier SM, Nissley D M, Sheffler K D et al. Thermal barrier coating life prediction model development. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992; 114: 258 ~ 263
- 8 Miller R A. Life modeling of thermal barrier coatings for aircraft gas turbine engines. J. Eng Gas Turb & Power, 1989; 111: 301 ~ 305
- 9 Meier SM, Gupta D K. The evolution of thermal barrier coatings in gas turbine engine application. Journal of Engineering of Gas Turbines and Power, 1994; 116: 250 ~ 257

(编辑 任涛)