

# 热障涂层热疲劳寿命预测模型研究

姚玉东<sup>1</sup>, 艾延廷<sup>1</sup>, 关鹏<sup>1</sup>, 田晶<sup>1</sup>, 包天南<sup>2</sup>

(1.沈阳航空航天大学, 沈阳 100136; 2.西北工业大学, 西安 710072)

**摘要:** **目的** 建立热障涂层寿命预测模型, 并研究涂层寿命预测与各种应力应变信息的相关性。**方法** 首先利用带热障涂层圆管试验结果, 将涂层界面简化为余弦曲线, 建立了相应的二维轴对称有限元模型; 然后根据热障涂层疲劳试验结果, 结合线性疲劳累积理论和 Manson-Coffin 低周疲劳模型, 建立了热障涂层的寿命预测模型, 并将拟合问题转化为寻优问题, 使用遗传算法确定寿命预测模型中的系数; 最后基于热障涂层试验的微观照片确定出危险点位置, 选取正向、剪切、等效和通过二向应力应变分析方法提取垂直于余弦曲面形貌的 11 种应力应变信息进行寿命预测, 并分析了寿命预测的最大误差和平均误差, 对分析的结果进行了验证。**结果** 采用等效应变范围进行涂层寿命预测的最大误差和平均误差最小, 分别为 50% 和 21%, 涂层寿命与等效应力的相关性最大。采用等效应变进行寿命预测的结果与文献中的结果相比, 最大误差降低了 169.1%, 整体的寿命预测值从  $\pm 2$  倍分散带之内缩小到了  $\pm 1.5$  倍分散带之内。采用等效应变范围进行不同工况下的涂层寿命预测, 预测结果为 130 次循环, 试验结果为 160 次循环, 寿命预测的结果较好。**结论** 证明了所建立模型的正确性与准确性, 为涂层寿命预测提供了一种有效方法。

**关键词:** 热障涂层; Manson-Coffin 低周疲劳模型; 线性疲劳累积理论; 遗传算法; 寿命预测; 二向应力应变分析

中图分类号: TG405 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2022)06-0267-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.024

## Thermal Fatigue Life Prediction Model for Thermal Barrier Coatings

YAO Yu-dong<sup>1</sup>, AI Yan-ting<sup>1</sup>, GUAN Peng<sup>1</sup>, TIAN Jing<sup>1</sup>, BAO Tian-nan<sup>2</sup>

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate correlation of the thermal barrier coating life prediction model with various stress-strain information. The method used in this paper is as follows. Firstly, referring to experimental results of circular tube with thermal barrier coating, coating interface was simplified to a cosine curve and a corresponding two-dimensional axisymmetric finite element model was established. Then, considering the fatigue experimental results of the thermal barrier coating, the life prediction model of the thermal barrier coating was established by combining linear fatigue accumulation theory and

收稿日期: 2021-04-29; 修订日期: 2021-09-08

Received: 2021-04-29; Revised: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (11702177); 辽宁省自然科学基金 (2020-BS-174); 辽宁省教育厅项目 (JYT2020019)

Fund: National Natural Science Foundation of China (11702177); National Natural Science Foundation of Liaoning Province (2020-BS-174); Project of Department of Education of Liaoning Province (JYT2020019)

作者简介: 姚玉东 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为航空发动机强度。

Biography: YAO Yu-dong (1994-), Male, Postgraduate, Research focus: aero-engine strength.

通讯作者: 艾延廷 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为航空发动机结构、强度与振动。

Corresponding author: AI Yan-ting (1963-), Male, Doctor, Professor, Research focus: structure, strength and vibration of aeroengines.

引文格式: 姚玉东, 艾延廷, 关鹏, 等. 热障涂层热疲劳寿命预测模型研究[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 267-274.

YAO Yu-dong, AI Yan-ting, GUAN Peng, et al. Thermal Fatigue Life Prediction Model for Thermal Barrier Coatings[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 267-274.

Manson-Coffin equation. And transform fitting problem into an optimization problem, using GA to determine coefficients in the lifetime prediction model. Finally, the location of the risk point is one quarter of the wave peak from the top coat that determined based on microscopic photos of the thermal barrier coating experiment, and life prediction is performed by selecting 11 types stress-strain information that of normal, shear, equivalent and perpendicular to cosine surface morphology by biaxial stress-strain state analysis methods. The maximum error and average error of life prediction are analyzed, and the analysis results are verified. The results show that the maximum and average errors of coating life prediction using the equivalent variation range are minimum, 50% and 21%, respectively. It is also indicated that the coating life has greatest correlation with equivalent stress. The life prediction results of strain range under the maximum principal strain is also accuracy, the maximum error and average error are 52% and 25%, respectively. Compared with the results in the literature, the maximum error of life prediction based on equivalent strain is reduced by 169.1%, and overall life prediction value decreased from within  $\pm 2$  scattering zone to within  $\pm 1.5$  scattering zone. The equivalent strain range is used to predict the coating life under different working conditions. The prediction result is 130 cycles and the experimental result is 160 cycles. The above results prove the correctness and superiority of the method used in this paper, and also provide an effective method for predicting the coating life.

**KEY WORDS:** thermal barrier coatings; Manson-Coffin low-cycle fatigue model; linear fatigue accumulation theory; genetic algorithm; life prediction; analysis of biaxial stress-strain state

近些年来,随着我国科技的飞速发展,航空发动机的性能有了较大提升。与此同时,燃烧室出口的气体温度也达到了 1 800 K 左右,已经远远超出涡轮叶片材料的耐受温度<sup>[1]</sup>。为了使涡轮叶片能够承受如此高的工作温度,热障涂层(Thermal Barrier Coating, TBC)被大量采用<sup>[2-6]</sup>。热障涂层是一种多层结构,一般由隔热的陶瓷层(Top Coat, TC)、平衡热不匹配的黏结层(Bond Coat, BC)<sup>[7]</sup>和工作时形成的氧化层(Thermally Grown Oxide, TGO)<sup>[8]</sup>组成。热障涂层在使用一段时间后会剥落,基体材料也会因直接暴露于高温燃气下而快速失效<sup>[9]</sup>。

研究热障涂层的失效机理以及建立其合理的寿命预测模型,对航空发动机的设计与运行具有重要的意义,因而受到国内外许多学者的极大关注。Rabiei 等<sup>[10]</sup>通过试验观察,研究了氧化层存在时的热障涂层破坏机制。Ahrens 等<sup>[11]</sup>、Ranjbar-Far 等<sup>[12]</sup>和 Evans 等<sup>[13]</sup>将 TC/BC 界面形貌简化为二维正弦波形进行仿真计算,研究了氧化层和界面构型对涂层应力分布的影响。Miller 等<sup>[14]</sup>和 DeMasi<sup>[15]</sup>分别使用氧化层质量和氧化层厚度作为控制参量,建立了热障涂层的寿命预测模型。魏洪亮等<sup>[16]</sup>又在此基础上,加入了疲劳累积损伤理论,建立了考虑氧化层实时增长的热障涂层寿命预测模型。Guan 等<sup>[17]</sup>把涂层的寿命预测推广到了实际结构,建立了涡轮导向叶片热障涂层寿命预测模型。

在前人的研究中,热障涂层的寿命预测模型已经非常成熟,但是涂层寿命预测时应使用哪种类型的应力应变信息(涂层的寿命与哪种类型的应力应变信息的相关性最大)却无人研究。因此,本文基于带热障涂层圆管试验数据,结合遗传算法和低周疲劳寿命预测公式,建立了热障涂层寿命预测模型,最后对不同应变的涂层寿命预测的最大误差和平均误差进行了分析,确定了与涂层寿命相关性最大的应力应变类型。

## 1 理论研究

### 1.1 线性累积损伤理论

线性累积损伤理论是 Miner<sup>[18]</sup>于 1945 年提出的,其核心思想是每次循环载荷的施加都会对构件造成一定的损伤量  $\theta$ , 其计算公式见式(1)。而在变载荷情况下,线性累积损伤理论的表达式见式(2)。

$$\theta = \frac{1}{N} \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^k \theta_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

式中:  $N$  为该种循环载荷下的寿命;  $k$  为不同载荷种类的数量;  $\theta_i$  为第  $i$  种载荷作用下造成的损伤;  $N_i$  为只有第  $i$  种载荷作用下构件的循环寿命;  $n_i$  为第  $i$  种载荷作用的循环次数;  $D$  为构件的总损伤量。构件发生疲劳损坏的判定标准就是  $D$  大于等于 1。

### 1.2 Manson-Coffin 低周疲劳模型

Manson-Coffin 低周疲劳模型是一种被广泛应用于低周疲劳寿命预测中的模型,于 1965 由 Manson<sup>[19]</sup>和 Coffin 提出,其表达式见式(3)。

$$N = \left( \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta \varepsilon} \right)^\lambda \quad (3)$$

式中:  $N$  为预测的循环寿命;  $\Delta \varepsilon$  为选定的工作应变范围;  $\Delta \varepsilon_0$  和  $\lambda$  为常数,需要通过试验数据测定。

## 2 热障涂有限元模型建立

### 2.1 氧化层增长规律试验数据

魏洪亮等<sup>[16]</sup>进行了氧化层增长规律的试验,试验

试件为带热障涂层的瓦片状试样, 陶瓷层和黏结层材料分别为 6%~8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub> 和 Ni22Cr10Al1.0Y, 厚度分别为 250 μm 和 125 μm。最后得到氧化层厚度随高温保持时间  $t$  的变化规律见式 (4)。

$$\delta = \left\{ \exp \left[ Q \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \cdot t \right\}^n \quad (4)$$

式中:  $T$  为试验温度,  $T=1\,323\text{ K}$ ;  $Q$ 、 $T_0$ 、 $n$  为常数, 通过试验数据拟合得到其数值分别为 12 713、3 382、0.286。

2.2 涂层热疲劳试验数据

魏洪亮等<sup>[16]</sup>和杨晓光等<sup>[20-21]</sup>使用材料为 DZ40M, 外径、内径和长度分别为 15、11、90 mm 的带热障涂层圆管进行了热疲劳试验。试验时的陶瓷层和黏结层材料分别为 6%~8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub> 和 Ni22Cr10Al1.0Y, 厚度分别为 250 μm 和 125 μm。试验时外部采用电加热, 内部通冷却气体, 加热时间和冷却时间分别为 120 s 和 300 s, 试验时的最高温度为 1 323 K, 最低温度为 293 K。试验测得的热障涂层内侧温度曲线如图 1 所示。为了更好地探究热障涂层的疲劳特性, 共进行了 3 种情况的试验, 分别为无预氧化无高温保持的试验、无预氧化有高温保持的试验和有预氧化无高温保持的试验, 试验具体情况和对应的热循环寿命如表 1 所示。

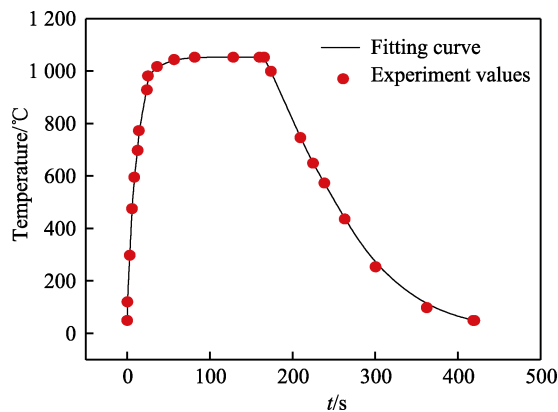


图 1 一个循环周期 TBC 内侧温度曲线  
Fig.1 Inside temperature of TBC in a single cycle<sup>[21]</sup>

2.3 二维轴对称有限元模型

图 2 为等离子热障涂层截面的 SEM 形貌。由图 2 可知, 氧化层界面具有一定的粗糙度, 在仿真时可以采用波长为 0.04 mm、幅值为 0.01 mm 的余弦曲线来近似模拟。试验件是根圆管, 为了简化计算, 在仿真时建立了如图 3 所示的二维轴对称模型。图 3 中,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分别为圆管的径向、轴向与周向, 在进行仿真计算时, 圆管内壁侧进行全约束, 平行于径向一侧的轴向位移为 0。施加的载荷为温度载荷, 与图 1 中的温度曲线保持一致。考虑氧化层增厚的影响, 共建立了氧化层厚度分别为 0、2、4、6、8、10 μm

表 1 试验寿命<sup>[20-21]</sup>  
Tab.1 Experimental cycle life<sup>[20-21]</sup>

Number	Test condition		Cycle life
	Pre-oxidation time/h	High temperature retention time/s	
Case 1	0	0	298
Case 2	0	670	505
Case 3	50	0	480
	100	0	350
Case 4	100	0	430
	100	0	441
	200	0	280
Case 5	200	0	380
	200	0	400
	300	0	210
Case 6	300	0	256

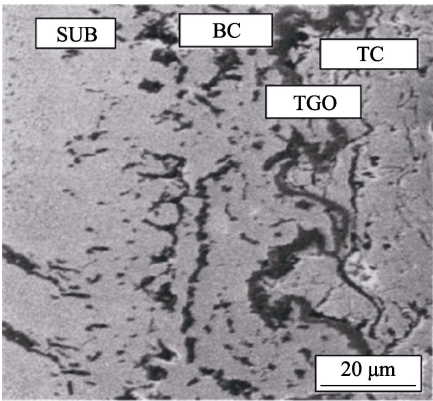


图 2 PS-TBC 的 SEM 微观形貌  
Fig.2 SEM section morphology of PS-TBC<sup>[11]</sup>

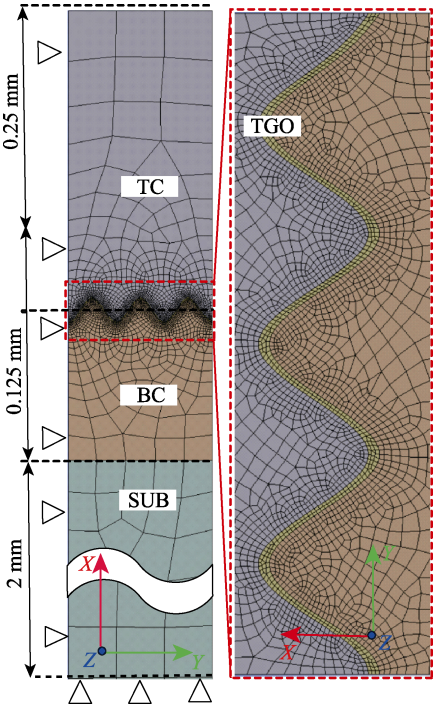


图 3 圆管的二维轴对称模型  
Fig.3 Axisymmetric finite element model of circular tube with

的 6 个模型。模型的网格数为 3 558, 节点数为 11 045, 该网格数量通过了网格无关性验证。

根据各层材料的属性, 有限元计算时把陶瓷层考

虑为弹性材料, 氧化层、黏结层和基体材料都被考虑为弹性-完全塑性材料。各层材料的属性如表 2 和表 3 所示<sup>[22-23]</sup>。

表 2 不同温度下各层材料的参数<sup>[22-23]</sup>  
Tab.2 Temperature dependent material parameters for different layers<sup>[22-23]</sup>

Parameters	SUB	BC	TGO	TC
Temperature/K	200-1 000	20-1 100	20-1 100	20-1 100
Thermal expansion coefficient/( $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ )	1.03-1.35	1.36-1.76	0.80-0.96	0.90-1.22
Young modulus/GPa	207-123	200-110	400-320	48-22
Poisson ratio	0.28-0.36	0.30-0.33	0.23-0.25	0.10-0.12
Shear modulus/( $10^{11} \text{ Pa}$ )	0.81-0.45	0.77-0.41	1.66-1.28	0.21-0.01
Heat transfer coefficient/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	13.9-25.9	5.8-17	10-4.1	2-1.7
Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	8 680	7 380	3 984	3 610
Specific heat/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	493-594	450	755	505

表 3 不同温度下各层材料的屈服应力<sup>[22-23]</sup>

Tab.3 The variations of yield strength with temperature for different layers<sup>[22-23]</sup>

Materials	300 K	473 K	673 K	873 K	1 073 K	1 273 K	1 373 K
SUB	775			495	470	185	
BC	426	412	396	362	284	202	114
TGO	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^3$	$10^3$

MPa

### 3 热障涂层寿命模型建立及基于遗传算法的系数求解

#### 3.1 热障涂层寿命预测模型

考虑氧化层厚度增长对热障涂层造成的损伤再结合 Manson-Coffin 疲劳模型, 得到热障涂层的寿命预测模型见式 (5)。

$$N = \left[ \left( \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta \varepsilon} \right) \left( 1 - \frac{\delta}{\delta_0} \right)^\rho \right]^\lambda \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为氧化层厚度;  $\delta_0$  为氧化层的临界厚度, 即当氧化层厚度达到  $\delta_0$  时, 涂层的氧化已经对涂层造成了完全的破坏;  $\rho$  为大于 1 的相关常数。

在试验过程中氧化层会不断增长, 工作应变范围也会随之改变。因此, 再将公式 (5) 结合线性疲劳理论, 得到考虑氧化层实时增长的热障涂层寿命预测模型见公式 (6)。

$$D = \sum_{i=1}^k \theta_i = \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\left[ \left( \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta \varepsilon_i} \right) \left( 1 - \frac{\delta}{\delta_0} \right)^\rho \right]^\lambda} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_i$  为在第  $i$  种载荷下的工作应变范围。

#### 3.2 基于遗传算法的涂层寿命预测模型系数求解

Holland<sup>[24]</sup>于 1975 年首次提出遗传算法 (Genetic

Algorithm, GA) 的概念, 其核心思想是把寻优过程转化为类似生物进化的过程。遗传算法极大地提高了求解效率, 已被人们广泛地应用于组合优化、机器学习、信号处理、自适应控制和人工生命等领域<sup>[25]</sup>。

公式 (6) 形式复杂且待定系数过多, 而试验数据过少, 难以确定合适的数值。因此, 本文建立了使用遗传算法求解寿命预测模型中系数的方法。具体过程如下: 首先, 给定公式 (6) 中系数的合理范围, 并进行遗传算法的编码、生成种群、交叉和变异等操作; 然后, 编写涂层寿命计算和涂层寿命误差计算组成的适应度函数; 最后, 以寿命预测误差最大或最小为寻优条件, 确定系数值。

## 4 结果与讨论

### 4.1 危险点位置的选择

文献[14]的研究表明, 热障涂层的失效是由于陶瓷层被破坏, 且破坏起始于陶瓷层/黏结层界面。文献[10]的试验表明, 危险点出现在余弦曲线中部靠上的位置。综上, 热障涂层寿命计算的危险点应位于陶瓷层界面余弦曲线中部靠上的区域。而文献[26]的涂层裂纹微观照片表明, 陶瓷层界面上的裂纹出现在沿轴向距陶瓷层波峰 1/4 处 (如图 4 所示), 因此本文选择沿轴向距陶瓷层波峰 1/4 处为涂层寿命计算的危险点。

### 4.2 工作应变范围的选择

为了探究采用不同方向和类型的应力应变信息对寿命预测的影响, 本文选择径向应变范围  $\Delta \varepsilon_x$ 、轴向应变范围  $\Delta \varepsilon_y$ 、剪切应变范围  $\Delta \gamma_{xy}$  和最大主应变的应变范围  $\Delta \varepsilon_m$ , 选择  $\Delta \varepsilon_x$  和  $\Delta \gamma_{xy}$  的等效应变范围  $\Delta \varepsilon_a$ 、 $\Delta \varepsilon_y$  和  $\Delta \gamma_{xy}$  的等效应变范围  $\Delta \varepsilon_b$ 、 $\Delta \varepsilon_x$  和  $\Delta \varepsilon_y$  的等效应变范围  $\Delta \varepsilon_c$  和所有应变的等效应变范围  $\Delta \varepsilon_e$  作为工作应变范围。 $\Delta \varepsilon_a$ 、 $\Delta \varepsilon_b$  和  $\Delta \varepsilon_c$  的计算公式见 (7) — (9)。

$$\Delta \varepsilon_a = \frac{\sqrt{\Delta \varepsilon_x^2 + \Delta \gamma_{xy}^2}}{2} \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_b = \frac{\sqrt{\Delta \varepsilon_y^2 + \Delta \gamma_{xy}^2}}{2} \quad (8)$$

$$\Delta \varepsilon_c = \frac{\sqrt{\Delta \varepsilon_x^2 + \Delta \varepsilon_y^2}}{2} \quad (9)$$

此外, 本文还运用二向应变状态分析公式 (10) — (12) [25], 计算得到了垂直于陶瓷层余弦曲面形貌的应变 (法向应变)  $\varepsilon_v$ 、平行于陶瓷层余弦曲线形貌的应力  $\varepsilon_p$  和与之相对应的剪切应变  $\gamma_{vp}$ 。然后选取  $\Delta \varepsilon_v$  和  $\Delta \gamma_{vp}$  以及  $\Delta \varepsilon_v$  和  $\Delta \gamma_{vp}$  的等效应变范围  $\Delta \varepsilon_d$  作为涂层寿命预测的工作应变范围。

$$\varepsilon_v = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\alpha - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\alpha \quad (10)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\beta - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\beta \quad (11)$$

$$\frac{\gamma_{vp}}{2} = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \sin 2\alpha + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos 2\alpha \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  为两坐标轴之间的夹角 (见图 4);  $\beta = \alpha + \pi/2$ 。  $\Delta \varepsilon_d$  的计算公式见式 (13)。

$$\Delta \varepsilon_d = \frac{\sqrt{\Delta \varepsilon_v^2 + \Delta \gamma_{vp}^2}}{2} \quad (13)$$

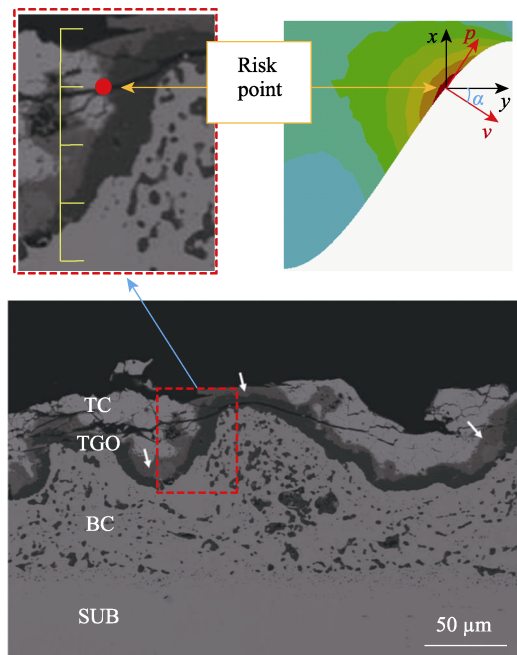


图 4 危险点位置示意图 [26]

Fig.4 Schematic diagram of dangerous point [26]

各类型工作应变范围随氧化层厚度  $\delta$  的变化趋势如图 5—7 所示, 拟合公式见式 (14) — (24)。

$$\Delta \varepsilon_x = -4.1 \times 10^6 \delta^4 + 118\,688.1 \delta^3 - 1\,152.9 \delta^2 - 3.94 \delta + 0.000\,8 \quad (14)$$

$$\Delta \varepsilon_y = -930\,221.4 \delta^4 + 52\,235.6 \delta^3 - 784.5 \delta^2 + 3.35 \delta + 0.004\,7 \quad (15)$$

$$\Delta \gamma_{xy} = -1.5 \times 10^7 \delta^4 + 258\,471.5 \delta^3 - 925.4 \delta^2 - 2.79 \delta + 0.017\,6 \quad (16)$$

$$\Delta \varepsilon_m = 638\,307.2 \delta^4 - 10\,524.8 \delta^3 + 51.7 \delta^2 - 0.46 \delta + 0.008\,1 \quad (17)$$

$$\Delta \varepsilon_a = -7.2 \times 10^6 \delta^4 + 133\,041.5 \delta^3 - 578.5 \delta^2 - 0.75 \delta + 0.008\,3 \quad (18)$$

$$\Delta \varepsilon_b = -4.1 \times 10^6 \delta^4 + 80\,425.8 \delta^3 - 418.0 \delta^2 - 0.24 \delta + 0.008\,5 \quad (19)$$

$$\Delta \varepsilon_c = -1.1 \times 10^6 \delta^4 + 43\,129.5 \delta^3 - 551.4 \delta^2 + 2.21 \delta + 0.002\,1 \quad (20)$$

$$\Delta \varepsilon_e = 433\,829.5 \delta^4 - 6\,843.4 \delta^3 + 36.1 \delta^2 - 0.40 \delta + 0.011\,5 \quad (21)$$

$$\Delta \varepsilon_v = -1.4 \times 10^7 \delta^4 + 299\,293.9 \delta^3 - 1\,914.3 \delta^2 + 2.51 \delta + 0.008\,2 \quad (22)$$

$$\Delta \gamma_{vp} = -2.9 \times 10^6 \delta^4 + 96\,650.8 \delta^3 - 1\,055.0 \delta^2 + 3.65 \delta + 0.002\,7 \quad (23)$$

$$\Delta \varepsilon_d = -4.3 \times 10^6 \delta^4 + 103\,843.7 \delta^3 - 578.5 \delta^2 - 0.75 \delta + 0.008\,3 \quad (24)$$

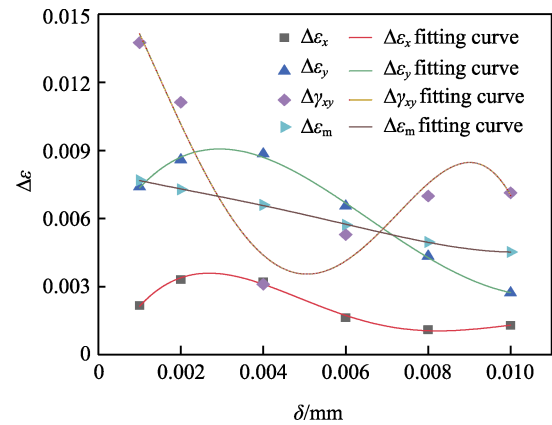


图 5 单量工作应变范围

Fig.5 Single volume operating strain range

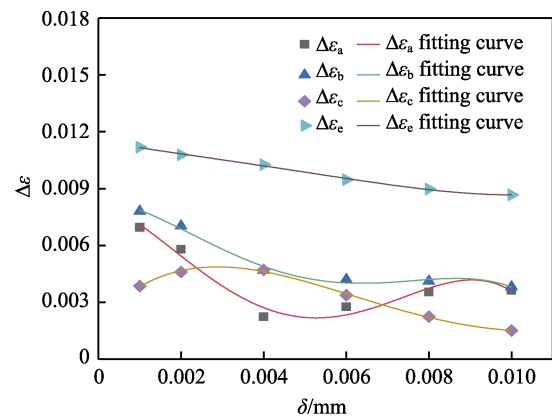


图 6 等效工作应变范围

Fig.6 Equivalent operating strain range



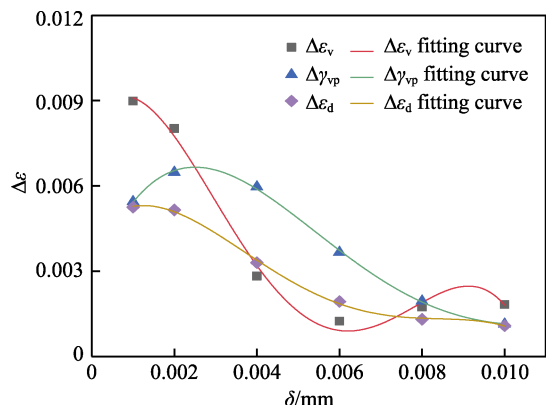


图7 二向应变范围

Fig.7 Biaxial strain state operating strain range

### 4.3 寿命预测结果分析

遗传算法寻优过程中的系数范围和计算得到各工作应变范围下的寿命预测模型系数,如表4所示。将表4中的系数带入到寿命预测模型中,再带入预氧化条件和高温保持条件,得到各工作应变范围下的热障涂层寿命预测值。然后将预测值与试验值进行对比,得到寿命预测误差。本文在计算误差时采用2种算法,一种是以试验值为基准,见式(25);另一种是以预测值为基准,见式(26)。

$$\eta_1 = \frac{|N_{\text{Test}} - N_{\text{Simulation}}|}{N_{\text{Test}}} \times 100\% \quad (25)$$

$$\eta_2 = \frac{|N_{\text{Test}} - N_{\text{Simulation}}|}{N_{\text{Simulation}}} \times 100\% \quad (26)$$

式中:  $\eta_1$  和  $\eta_2$  为寿命预测误差;  $N_{\text{Test}}$  为试验寿命值;  $N_{\text{Simulation}}$  为预测寿命值。

提取各工作应变范围的寿命预测误差最大值和各误差的平均值,得到如图8和图9所示的各工作应

表4 系数范围和最优值  
Tab.4 The range and optimal value of constants

Factors	$\lambda$	$\rho$	$\varepsilon_0$	$\delta_0$
Range	1-10	1-20	0.02-0.2	0.01-0.2
$\Delta\varepsilon_x$	1.98	17.214	0.172	0.078
$\Delta\varepsilon_y$	3.425	8.18	0.145	0.039
$\Delta\gamma_{xy}$	2.9	2.447	0.197	0.019
$\Delta\varepsilon_m$	2.809	16.219	0.091	0.153
$\Delta\varepsilon_a$	2.477	13.306	0.198	0.066
$\Delta\varepsilon_b$	2.147	3.016	0.198	0.024
$\Delta\varepsilon_c$	2.318	14.728	0.197	0.062
$\Delta\varepsilon_e$	5.901	5.541	0.035	0.12
$\Delta\varepsilon_v$	2.364	5.619	0.199	0.026
$\Delta\gamma_{vp}$	3.182	19.427	0.194	0.06
$\Delta\varepsilon_d$	2.01	3.301	0.145	0.02

变范围寿命预测最大误差柱状图和各工作应变范围寿命预测平均误差柱状图。由图8可知,使用等效应变范围  $\Delta\varepsilon_e$  进行涂层寿命预测,得到的最大误差最小,为50%。使用最大主应力应变范围  $\Delta\varepsilon_m$  进行涂层寿命预测,得到的最大误差也比较小,为52%。由图9可知,使用等效应变范围  $\Delta\varepsilon_e$  进行涂层寿命预测,得到的平均误差最小,为21%。使用  $\Delta\varepsilon_v$  和  $\Delta\gamma_{vp}$  的等效应变范围  $\Delta\varepsilon_d$  进行涂层寿命预测,得到的平均误差也比较小,为22%。而使用最大主应力应变范围  $\Delta\varepsilon_m$  进行涂层寿命预测,得到的平均误差相对较大,为25%。综上所述,选择等效应变范围  $\Delta\varepsilon_e$  进行涂层寿命的预测效果最好,涂层寿命与等效应力应变的相关性也最大。

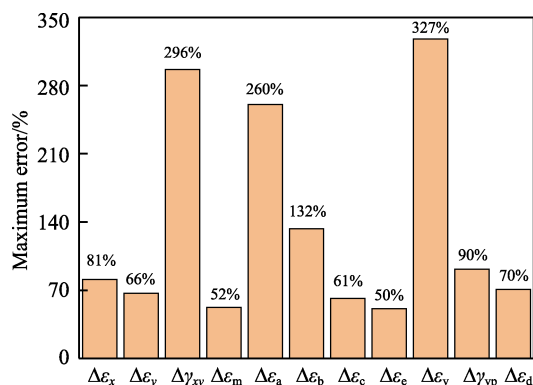


图8 各工作应变范围下寿命预测的最大误差  
Fig.8 Maximum error diagram of life prediction for each operating strain range

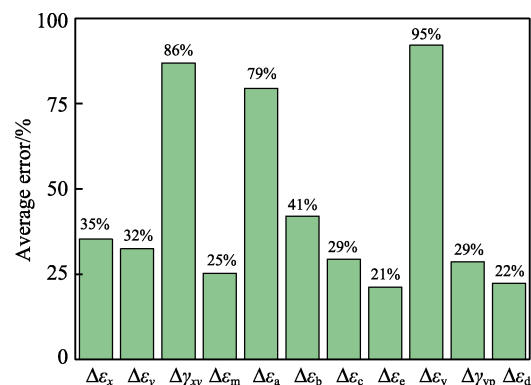


图9 各工作应变范围下寿命预测的平均误差  
Fig.9 Average error diagram of life prediction for each operating strain range

图10为涂层寿命预测值与试验值的对比图。图10中实心符号代表本文采用等效应变范围  $\Delta\varepsilon_e$  进行涂层寿命预测的预测值,均位于 $\pm 1.5$ 倍分散带之内;空心符号代表文献[17]中涂层寿命的预测值,均位于 $\pm 2$ 倍分散带之内。由图10可知,文献[17]的寿命预测值最大误差为219.1%,本文的结果与之相比,最大误差减少了169.1%,并提高了整体的寿命预测精度。

文献[20]给出了陶瓷层厚度为400  $\mu\text{m}$ 、预氧化

50 h、高温保持 35 min 的条件(材料参数和其他条件与 2.2 节保持一致)下, 涂层寿命为 160 次循环。本文又建立了陶瓷层厚度为 400  $\mu\text{m}$  的有限元模型, 有限元模型的其他尺寸、材料参数和载荷与 2.3 节一致。热障涂层的危险点选取与 4.1 节保持一致, 经计算得到危险点处的等效应变范围  $\Delta\epsilon_{e2}$  随氧化层厚度  $\delta$  的变化趋势如图 11 所示, 拟合公式见式 (27)。将式 (27) 代入本文所建立的热障涂层寿命预测模型中, 并使用表 4 中等效应变范围对应的系数进行计算, 得到预测的涂层寿命为 130 次循环, 与试验值 160 次循环接近, 证明了本文所建立的寿命预测模型的适用性和使用等效应变范围进行涂层寿命预测的准确性。

$$\Delta\epsilon_{e2} = 5.1 \times 10^6 \delta^4 - 116\,382.1 \delta^3 + 802.4 \delta^2 - 1.2 \delta + 0.007\,9 \quad (27)$$

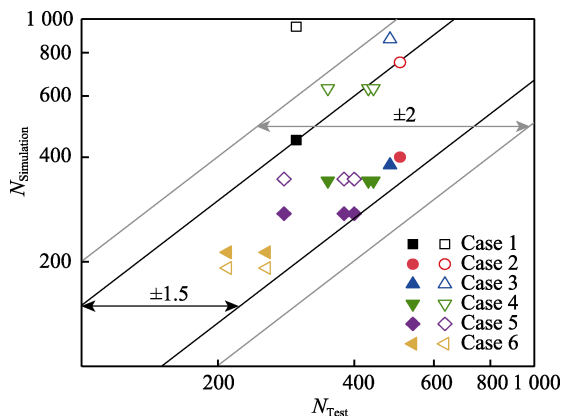


图 10 寿命预测值与试验值的对比图

Fig.10 Comparison of predicted coating life and experimental values

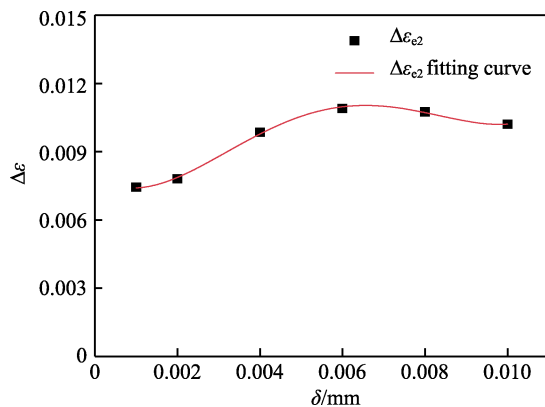


图 11 陶瓷层厚度为 400  $\mu\text{m}$  时等效工作应变范围

Fig.11 Equivalent operating strain range when thickness of ceramic layer is 400  $\mu\text{m}$

## 5 结论

1) 本文建立的涂层寿命预测模型考虑了氧化层的实时增长作用, 与试验规律相符, 并建立了使用遗传算法求解寿命预测模型中系数的方法, 为复杂的寿命预测模型建立提供了新思路。

2) 在 11 种不同的工作应变范围中, 采用等效应变范围进行涂层寿命预测的最大误差和平均误差最小, 分别为 50% 和 21%。这说明涂层的寿命与等效应力应变的相关性最大。采用等效应变进行寿命预测的结果与文献中的结果相比, 最大误差降低了 169.1%, 整体的寿命预测值从  $\pm 2$  倍分散带之内缩小到了  $\pm 1.5$  倍分散带之内。

3) 采用本文建立的涂层寿命预测模型和等效应变范围进行陶瓷层厚度为 400  $\mu\text{m}$ 、预氧化 50 h 和高温保持 35 min 工况下的涂层寿命预测, 预测结果为 130 次循环, 与试验结果 160 次循环接近, 证明了本文所建立的寿命预测模型的适用性和使用等效应变范围进行涂层寿命预测的准确性。

## 参考文献:

- [1] 刘贺, 李帅, 余春堂, 等. 黏结层真空退火处理对热障涂层热循环寿命的影响研究[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 35-40.  
LIU He, LI Shuai, YU Chun-tang, et al. Influence of Bond-Coat Vacuum-Annealing on the Lifetime of EB-PVD TBCS[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 35-40.
- [2] 刘洲庠, 于金鑫, 李强. 热障涂层陶瓷层/TGO 界面开裂行为的有限元模拟[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 70-76.  
LIU Zhou-xiang, YU Jin-xin, LI Qiang. Finite Element Simulation of Ceramic Layer/TGO Interfacial Crack on Thermal Barrier Coating[J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 70-76.
- [3] 赵荻, 安宇龙, 赵晓琴, 等. 不同厚度 8YSZ 热障涂层的结构及性能表征[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 276-284.  
ZHAO Di, AN Yu-long, ZHAO Xiao-qin, et al. Structure and Properties of 8YSZ Thermal Barrier Coatings with Different Thickness[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 276-284.
- [4] 周思博, 吴敬涛, 邓文亮, 等. EB-PVD 热障涂层系统界面应力的理论分析[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 189-198.  
ZHOU Si-bo, WU Jing-tao, DENG Wen-liang, et al. Analytic Research on Interface Stress of EB-PVD Thermal Barrier Coatings[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 189-198.
- [5] MILLER R A. Current Status of Thermal Barrier Coatings—An Overview[J]. Surface and Coatings Technology, 1987, 30(1): 1-11.
- [6] HE M Y, MUMM D R, EVANS A G. Criteria for the Delamination of Thermal Barrier Coatings: With Application to Thermal Gradients[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 185(2-3): 184-193.
- [7] 徐惠彬, 宫声凯, 刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 7-12.  
XU Hui-bin, GONG Sheng-kai, LIU Fu-shun. Recent Development in Materials Design of Thermal Barrier

- Coatings for Gas Turbine[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, 21(1): 7-12.
- [8] SCHLICHTING K W, PADTURE N P, JORDAN E H, et al. Failure Modes in Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 342(1-2): 120-130.
- [9] 肖逸奇. 涡轮叶片热障涂层服役可靠性评价及其应用研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.  
XIAO Yi-qi. Reliability Assessment of Thermal Barrier Coatings for Turbine Blade and Its Applications[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [10] RABIEI A, EVANS A G. Failure Mechanisms Associated with the Thermally Grown Oxide in Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(15): 3963-3976.
- [11] AHRENS M, VAßEN R, STÖVER D. Stress Distributions in Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings as a Function of Interface Roughness and Oxide Scale Thickness[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 161(1): 26-35.
- [12] RANJBAR-FAR M, ABSI J, MARIAUX G, et al. Simulation of the Effect of Material Properties and Interface Roughness on the Stress Distribution in Thermal Barrier Coatings Using Finite Element Method[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(2): 772-781.
- [13] EVANS H E. Oxidation Failure of TBC Systems: An Assessment of Mechanisms[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(7): 1512-1521.
- [14] MEIER S M, SHEFFLER K D, NISSLEY D M. Thermal Barrier Coating Life Prediction Model Development[J]. *International Journal of Fatigue*, 1991, 11: 205.
- [15] NESBITT J A. Coatings for High-Temperature Structural Materials[M]. Washington: National Academies Press, 1996.
- [16] 魏洪亮, 杨晓光, 齐红宇. 等离子涂层涡轮导向叶片热疲劳寿命预测研究[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(1): 1-8.  
WEI Hong-liang, YANG Xiao-guang, QI Hong-yu. Study on Thermal Fatigue Life Prediction for Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings on the Surface of Turbine Vane[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(1): 1-8.
- [17] GUAN Peng, AI Yan-ting, FEI Cheng-wei, et al. Thermal Fatigue Life Prediction of Thermal Barrier Coat on Nozzle Guide Vane via Master-Slave Model[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4357.
- [18] MINER M A. Cumulative Damage in Fatigue[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12(3): A159-A164.
- [19] MANSON S S. Fatigue: A Complex Subject—Some Simple Approximations[J]. *Experimental Mechanics*, 1965, 5(4): 193-226.
- [20] 杨晓光, 耿瑞, 周燕佩. 热障涂层氧化和热疲劳寿命试验研究[J]. *航空动力学报*, 2003, 18(2): 195-200.  
YANG Xiao-guang, GENG Rui, ZHOU Yan-pei. An Experimental Study of Oxidation and Thermal Fatigue of TBC[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(2): 195-200.
- [21] 杨晓光, 耿瑞, 周燕佩. 热障涂层热疲劳寿命预测方法研究[J]. *航空动力学报*, 2003, 18(2): 201-205.  
YANG Xiao-guang, GENG Rui, ZHOU Yan-pei. A Study of Thermal Fatigue Life Prediction of TBC[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(2): 201-205.
- [22] ZHU W, CAI M, YANG L, et al. The Effect of Morphology of Thermally Grown Oxide on the Stress Field in a Turbine Blade with Thermal Barrier Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 276: 160-167.
- [23] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册(第二卷)变形高温合金、铸造高温合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 765-771.  
Editorial Committee of China Aviation Materials Manual. Handbook of Aeronautical Materials of China (Volume II) Wrought and Cast Superalloys[M]. Beijing: China Standard Press, 2001: 765-771.
- [24] HOLLAND J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence[M]. 2nd Edition. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [25] 郑树泉, 王倩, 武智霞. 工业智能技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019: 250-251.  
ZHENG Shu-quan, WANG Qian, WU Zhi-xia. Industrial Intelligence Technology and Application[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019: 250-251.
- [26] JONNALAGADDA K P, ERIKSSON R, LI Xin-hai, et al. Thermal Barrier Coatings: Life Model Development and Validation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 362: 293-301.

责任编辑: 万长清