

文章编号:1000-8055(2020)08-1762-06

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2020.08.021

带热障涂层钛合金的蠕变性能

赵彬¹, 张婷婷², 夏甜², 王纯³, 白宇¹

- (1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049;
2. 中国航空工业集团有限公司 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035;
3. 中国航空工业集团有限公司 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘 要: 以提高钛合金的抗蠕变性能为目的,在 TA32 钛合金基体上制备由 NiCrAlY 黏接层(BC)与氧化钇稳定二氧化锆陶瓷层(TC)组成的热障涂层(TBCs),对带 TBCs 钛合金抗蠕变性能进行实验与数值模拟研究。结果表明:TA32 与 TBCs 的蠕变速率相差较大,在高温拉伸时 TC 会对 BC 和基体的蠕变变形产生明显的约束效应,且 TBCs 中 BC 承受的轴向拉伸应力较大。在 400 °C 和 600 °C 实验温度下,TBCs 可将 TA32 的抗蠕变性能分别提升 5.6% 与 17.5%,但当实验温度达到 600 °C、拉伸应力达到 200 MPa 时,TC 发生了严重的开裂与剥落。

关 键 词: 钛合金; 飞机壁板; 热障涂层; 抗蠕变性能; 有限元分析

中图分类号: V261.93

文献标志码: A

Creep behavior of titanium alloy with thermal barrier coatings

ZHAO Bin¹, ZHANG Tingting², XIA Tian²,
WANG Chun³, BAI Yu¹

- (1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Shenyang 110035, China;
3. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: With the aim of improving the creep resistance of titanium alloy, NiCrAlY (bond coat, BC)/yttria stabilized zirconia (top coat, TC) thermal barrier coatings (TBCs) were deposited on TA32 substrate, and the creep resistance of titanium alloy with TBCs was studied by test and numerical simulation. The results showed that there was a large difference between the creep rate of TA32 and that of TBCs. TC had an obvious constraint effect on the creep deformation of TA32 during tensile process at high temperatures, and the axial tensile stress of NiCrAlY BC in TBCs was larger than other parts. At 400 °C and 600 °C, TBCs improved the creep resistance of TA32 by 5.6% and 17.5%, respectively. However, when the test temperature reached 600 °C and the tensile stress reached 200 MPa, severe cracking or peeling occurred in TC.

收稿日期: 2020-01-30

作者简介: 赵彬(1993—),男,硕士生,主要从事热障涂层方面研究。

引用格式: 赵彬,张婷婷,夏甜,等.带热障涂层钛合金的蠕变性能[J].航空动力学报,2020,35(8):1762-1767. ZHAO Bin, ZHANG Tingting, XIA Tian, et al. Creep behavior of titanium alloy with thermal barrier coatings[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(8): 1762-1767.

Key words: titanium alloy; aircraft panel; thermal barrier coatings; creep resistance; finite element analysis

钛及钛合金因具有比强度高、比模量高、耐腐蚀性好等特点,在飞机设计与制造领域扮演着越来越重要的角色^[1]。作为飞机上最为重要的一类承力构件——钛合金壁板不仅是构成飞机气动外形的重要组成部分,更是保证机身舱室密闭性的关键部件^[2]。靠近飞机发动机处的钛合金壁板由于受到发动机的影响,服役温度为 400~600℃,同时承受着复杂的机械载荷与高频振动,服役条件十分苛刻。在高温与机械载荷的耦合作用下,壁板易发生蠕变变形。研究表明:在钛合金表面制备一层热障涂层(thermal barrier coatings, TBCs),可以起到降低钛合金基体温度并减少蠕变变形的作用^[3-4],但对其机制缺少有效的实验与模拟研究。

TBCs 作为航空领域一类重要的功能化涂层,常采用等离子喷涂方法制备。同时为提高涂层与基体之间的机械铆合力,在喷涂涂层前常对基体表面进行喷砂处理,导致基体材料的表面组织结构发生变化,而这些变化是否会对钛合金的抗蠕变性能产生影响尚不明确。

本研究在 TA32 钛合金表面制备由 NiCrAlY 黏接层(bond coat, BC)与氧化钇稳定二氧化锆(YSZ)陶瓷层(top coat, TC)构成的 TBCs 体系。测试不同温度和拉伸应力下的蠕变曲线,通过等温线法计算带 TBCs 钛合金的蠕变极限,并通过 ABAQUS 软件模拟 TA32 钛合金/TBCs 体系的蠕变行为,揭示不同温度下 TBCs 对 TA32 钛合金抗蠕变性能的影响规律。

1 实验方法

基体材料为 TA32 钛合金,参照 HB5151-1996 加工成圆形标准高温蠕变试样,尺寸为 $\phi 10\text{ mm}\times 185\text{ mm}$ 。试样分为两组:带 TBCs 试样和无 TBCs 参比试样。TBCs 由中国航空工业集团有限公司北京航空制造工程研究所制备,其中 NiCrAlY 黏接层厚度约为 $60\text{ }\mu\text{m}$,YSZ 陶瓷层厚度约为 $200\text{ }\mu\text{m}$,无 TBCs 参比试样加工后表面无损伤及弯扭,表面粗糙度 R_a 小于 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

采用 RD-100 型微机控制电子式蠕变持久试验机(长春科新实验仪器有限公司)进行高温蠕变实验。通过实验机上的高温电阻炉加热到测试温度并保温一段时间后施加拉伸应力^[5]。实验在大

气环境中进行,记录每根试样的蠕变曲线。实验方案如表 1 所示,实验温度为 400℃和 600℃。每组温度下选取四种拉伸应力,每组温度中选取较为稳定的三种拉伸应力水平进行对比实验。

表 1 高温蠕变实验方案
Table 1 Scheme for high-temperature creep test

温度/℃	试样类型	拉伸应力/MPa
400	带 TBCs	500、600、700、800
	无 TBCs	600、700、800
600	带 TBCs	50、100、150、200
	无 TBCs	50、100、150

蠕变极限分为两种:规定蠕变伸长率下的蠕变极限 $\sigma_{\epsilon_t}^{\theta}$ (θ 为实验温度,℃; t 为实验时间,h; ϵ_t 为蠕变总伸长率)和规定稳态蠕变速率下的蠕变极限(为稳态蠕变速率)。因为钛合金的蠕变第二阶段较为明显且易于测量,所以选择规定稳态蠕变速率下的蠕变极限表示方法。实验结束后通过蠕变曲线计算各拉伸应力的稳态蠕变速率并整理。目前,国内外测定蠕变极限的方法主要有两种:等温线法和时间-温度参数法。等温线法建立在恒定温度、不同拉伸应力水平下获得不同蠕变速率基础上。在稳态蠕变阶段,稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 与拉伸应力 σ 的关系可用下式表达:

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n \tag{1}$$

式中 K 为材料常数, n 为表观应力指数,对式(1)两边取对数可得

$$\lg \dot{\epsilon}_s = \lg K + n \lg \sigma \tag{2}$$

式(2)表明,在温度 θ 下,稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 与拉伸应力 σ 在双对数坐标上呈线性关系。根据最小二乘法原理,可求得对应温度下的蠕变极限^[6-7]。

2 实验结果与讨论

将棒状的蠕变试样沿径向切割制备金相样品,在扫描电镜下观察得到如图 1 所示的 TBCs 截面图像。从图 1 来看,TC 与 BC、BC 与基体间结合良好。TC 中弥散分布有大量孔隙,采用图像法测量其孔隙率约为 10%。

比较喷涂态与高温蠕变实验后试样的表面形貌,如图 2 所示。可以看出, $\theta=600\text{ }\text{℃}$ 、 $\sigma=200\text{ MPa}$ 下试样表面 TC 环状断裂剥落严重,而底部

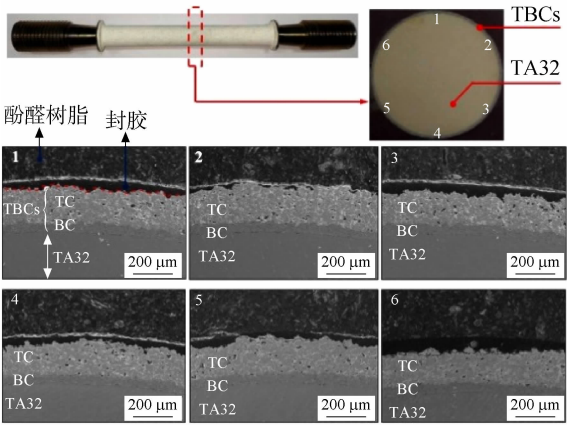


图 1 带 TBCs 钛合金样品截面形貌

Fig. 1 Cross-sectional morphology of titanium alloy sample with TBCs

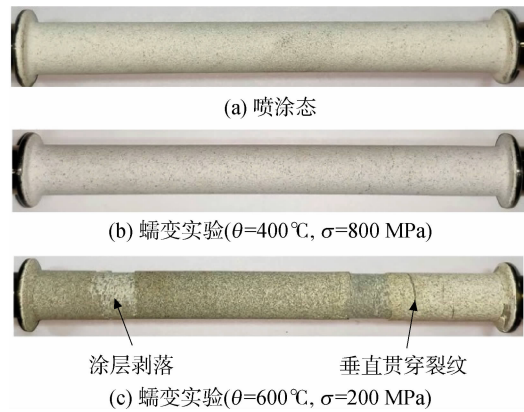


图 2 试样表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of samples

的 BC 没有脱落但存在明显的环状裂纹,这说明在蠕变过程中 TC/BC 界面容易失效。600 ℃、其他拉伸应力下涂层保持了结构的完整性,未发生剥落失效。而在 400 ℃测试温度下,所有拉伸应力下的试样涂层均保持了良好的结构完整性,表面无明显裂纹且未发生剥落失效。

400 ℃与 600 ℃下的蠕变曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,在初始蠕变阶段,试样的应变量增加较快,应变速率逐渐减小并进入时间较长的稳态蠕变阶段。蠕变实验的温度和拉伸应力是影响材料蠕变行为的两大因素:同一温度下,随着拉伸应力的提高,蠕变速率增大,蠕变变形量亦随之增大。对比同一温度、同一拉伸应力水平下带 TBCs 试样和无 TBCs 参比试样的蠕变曲线可以发现:无 TBCs 参比试样的稳态蠕变速率和蠕变变形量均高于带 TBCs 试样。这是由于 TBCs 中 TC 的蠕变速率和应变容限远低于 BC 和 TA32 基体,在蠕变伸长的过程中 TC 会对 BC 和 TA32

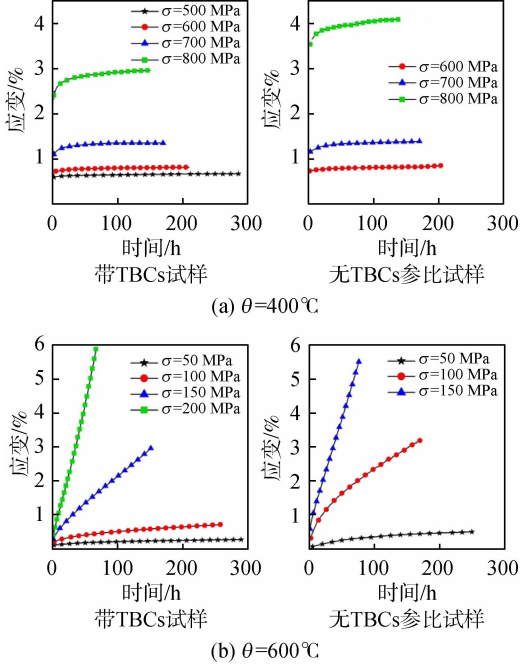


图 3 蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves

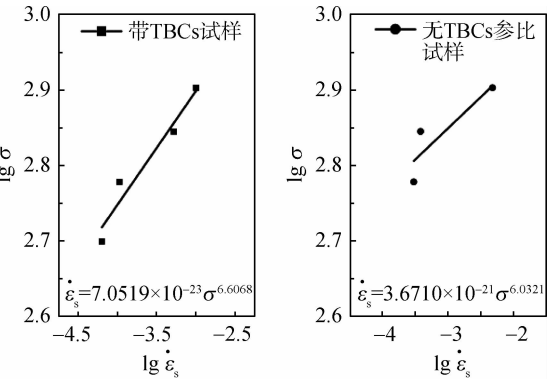
基体产生轴向和径向约束,阻碍其进一步变形,导致整体蠕变速率降低、蠕变性能提升。当 BC 和 TA32 基体蠕变变形量超过 TC 所能承受的应变极限时,TC/BC 界面处的微裂纹便会沿着轴向和径向扩展进而贯穿 TBCs^[3],最终导致 TC 开裂脱落,BC 出现明显的裂纹(如图 2(c)所示)。

不同温度和拉伸应力水平下的稳态蠕变速率如表 2 所示。从表 2 可以发现,当温度一定时,试样的稳态蠕变速率随着拉伸应力的增加而提高。并且实验温度越高,拉伸应力的变化对 TA32 稳态蠕变速率的影响越显著。以无 TBCs 参比试样为例,400 ℃、800 MPa 下的稳态蠕变速率是 700 MPa 的 3.6 倍,700 MPa 的稳态蠕变速率是 600 MPa 的 4.9 倍。温度升至 600 ℃后,150 MPa 的稳态蠕变速率是 100 MPa 的 7.0 倍,100 MPa 的稳态蠕变速率是 50 MPa 的 12.2 倍。可见,温度越高,TA32 的高温蠕变性能对拉伸应力的变化越敏感。

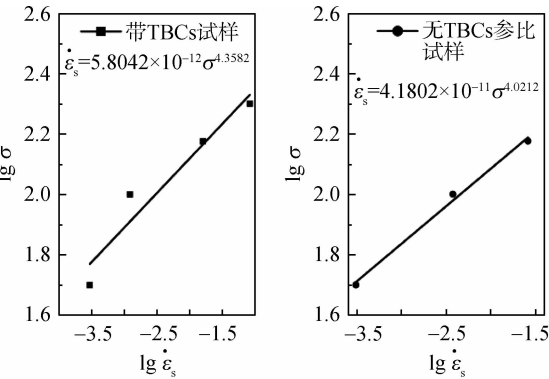
对稳态蠕变速率进行求对数和拟合处理,结果如图 4 所示。规定蠕变极限中的稳态蠕变速率为 1×10^{-4} /h,通过经验公式可以求出相应的蠕变极限。通过图 4(c)可以明显发现,带 TBCs 试样的蠕变极限都要高于无 TBCs 参比试样。400 ℃下蠕变极限提升了 5.6%,600 ℃下提升了 17.5%,这说明温度越高,TBCs 对 TA32 钛合金的蠕变极限提升效果越明显。

表 2 稳态蠕变速率
Table 2 Steady state creep rate

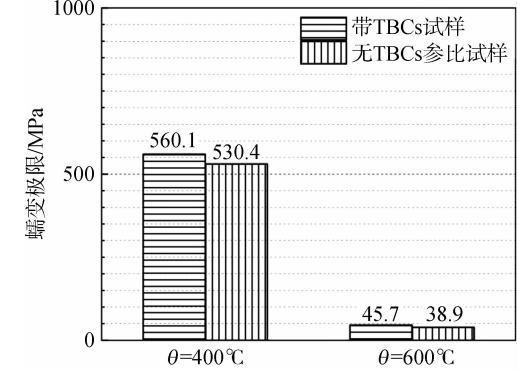
温度/℃	试样	稳态蠕变速率/(10 ⁻⁴ /h)			
		σ=500 MPa	σ=600 MPa	σ=700 MPa	σ=800 MPa
400	带 TBCs	0.638	1.07	5.25	10.1
	无 TBCs		3.09	3.49	12.4
600		σ=50 MPa	σ=100 MPa	σ=150 MPa	σ=200 MPa
		2.98	12.2	161	832
	无 TBCs	3.09	37.8	263	



(a) θ=400℃经验公式拟合



(b) θ=600℃经验公式拟合



实验工况
(c) 蠕变极限

图 4 实验结果
Fig. 4 Test result

3 有限元模拟

以标准蠕变试样的有效尺寸段为建模对象,建立包含 TC、BC 和 TA32 钛合金基体在内的圆柱形三维计算模型,如图 5 所示。由于实验温度较低,模型不考虑热生长氧化物(TGOs)层,也不考虑 TC 的蠕变变形^[8-13]。TC 厚度为 0.2 mm,BC 厚度为 0.06 mm,TA 32 钛合金基体的直径为 10 mm。

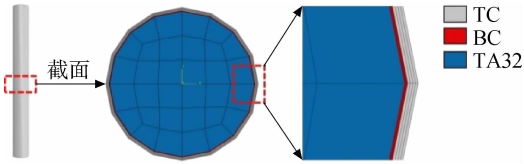


图 5 蠕变模型
Fig. 5 Creep model

有限元模拟分析采用时间硬化模型(time-hardening model)。此模型结合了用应力描述材料蠕变行为的 Norton 方程和用时间描述材料蠕变行为的 Bailey 方程(Norton-Bailey 蠕变模型),非常适用于单轴定载荷蠕变过程的计算。其经验公式如下:

$$\dot{\epsilon}_c = A \sigma^n t^m \tag{3}$$

式中 $\dot{\epsilon}_c$ 为蠕变速率; t 为实验时间; m 为时间指数。对不同温度 and 不同拉伸应力水平下无 TBCs 参比试样的蠕变曲线取对数并进行拟合处理得到 TA 32 钛合金时间硬化本构方程和蠕变参数^[14-17]。TC 和 BC 的弹性模量通过努氏压痕弹性恢复法测量^[18]。表 3 给出了模拟计算所需要的参数。

图 6 是温度为 600℃,拉伸应力为 100 MPa,实验时间为 290h 时试样的 Mises 应力分布云图,可以看出处在 TC 和 TA32 钛合金基体之间的 BC 应力最大,约为 800 MPa。表明 TC 和基体蠕变速率不同会导致 BC 承受很大的界面应力,易发生开裂失效。

表 3 模型参数
Table 3 Model parameters

温度/℃	σ /MPa	E/GPa		A	n	m
		TC	BC			
400	600	45	133	4.15×10^{-16}	4.7	-0.51
	700	45	133	2.84×10^{-14}	4.7	-0.80
	800	45	133	3.14×10^{-15}	4.7	-0.10
600	50	42	125	2.89×10^{-9}	4.0	-0.78
	100	42	125	3.50×10^{-10}	4.0	-0.46
	150	42	125	6.49×10^{-11}	4.0	-0.50

注:A、n、m 均为 TA32 钛合金基体相关参数。

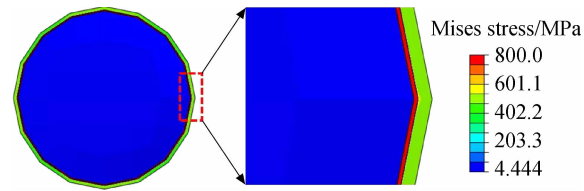


图 6 应力云图
Fig. 6 Mises stress cloud diagram

对模型蠕变曲线进行稳态蠕变速率计算与蠕变极限的拟合计算,并与实验结果进行对比分析,结果如图 7 所示,可以发现 400℃时模拟与实验相对误差为 5.0%,600℃时相对误差为 4.6%,表明 Norton-Bailey 蠕变模型可以较为准确地描述带 TBCs 钛合金试样的高温蠕变过程。

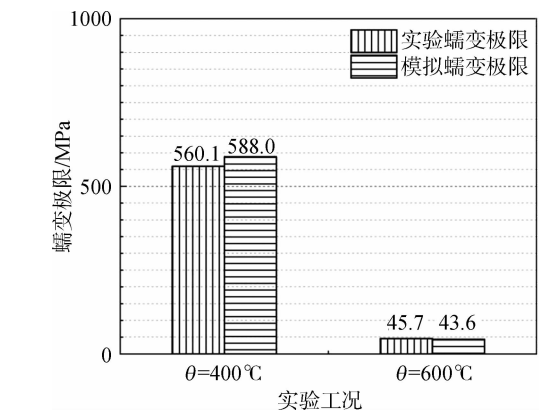


图 7 有限元模拟结果
Fig. 7 Results of finite element simulation

4 结 论

1) 在 TA32 钛合金/TBCs 体系中,当实验温度达到 600℃、拉伸应力达到 200 MPa 时,TBCs 发生了严重的开裂与剥落,在 400℃与 600℃其他实验条件下 TBCs 保持了结构完整性。

2) 在蠕变伸长的过程中 TC 会对 BC 和 TA32 基体产生轴向和径向约束,阻碍其进一步变形,导致整体蠕变速率降低、蠕变性能提升。而介于两者之间的 BC 承受着较大的界面应力,当蠕变变形达到一定量时,TC/BC 界面处的微裂纹会沿轴向和径向扩展进而贯穿 TBCs,最终导致 TC 失效脱落。

3) 由于 TC 的应变容限和蠕变速率远小于 BC 和 TA32 基体,所以在 TA32 钛合金表面制备 TBCs 有助于提升钛合金的蠕变极限,且温度越高提升效果越明显。

4) 结合 Norton-Bailey 蠕变模型和有限元仿真可以建立一个准确描述钛合金/TBCs 体系单轴拉伸蠕变行为的三维分析模型,与实验获得的蠕变极限相对误差较低。

参考文献:

[1] 张震. 飞机钛合金整体壁板的设计与制造[J]. 新技术新工艺, 2014(8): 28-31.
ZHANG Zhen. Design and manufacturing technology of aircraft titanium alloy integral wall board[J]. New Technology and New Process, 2014(8): 28-31. (in Chinese)
[2] 曾元松, 黄遐. 大型整体壁板成形技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 721-727.
ZENG Yuansong, HUANG Xia. Forming technology of large integral panel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 721-727. (in Chinese)
[3] 高永栓, 陈立强, 宫声凯, 等. 在高温蠕变环境中的热障涂层失效行为[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 121-124.
GAO Yongshuan, CHEN Liqiang, GONG Shengkai, et al. Failure behavior of thermal barrier coatings in creep environment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(1): 121-124. (in Chinese)
[4] BRIGUENTE F P, da SILVA BRIGUENTE L A N, REIS D A P. Comparative study of creep resistance of a Ti-6Al-

4V alloy with metallic and ceramic coatings[J]. Materials Science Forum,2014,802:472-476.

[5] 闫守海. 钢材高温蠕变性能试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.

YAN Shouhai. Experimental study on creep behavior in steel at elevated temperature[D]. Chongqing: Chongqing University,2015. (in Chinese)

[6] 机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会. 力学性能试验[M]. 上海:上海科学普及出版社,2003.

[7] 郑相锋,李文彬,范辉,等. SA-210C 钢高温单轴蠕变 Norton 方程参数研究[J]. 河北电力技术,2014,33(1):5-6.

ZHENG Xiangfeng,LI Wenbin,FAN Hui,et al. Research on high temperature single axes creep Norton equation parameters of SA-210C steel [J]. Hebei Electric Power, 2014,33(1):5-6. (in Chinese)

[8] ZHU J,CHEN W,XIE H. Simulation of residual stresses and their effects on thermal barrier coating systems using finite element method[J]. Science China:Physics, Mechanics and Astronomy,2014,58(3):1-10.

[9] ASGHARI S,SALIMI M. Finite element simulation of thermal barrier coating performance under thermal cycling [J]. Surface and Coatings Technology,2010,205(7):2042-2050.

[10] 温世峰. 薄膜/基体系统的力学性能测试方法及其应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2011.

WEN Shifeng. Investigation and application of the methods to obtaining the mechanical properties of thin film/substrate system[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2011. (in Chinese)

[11] BIALAS M. Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology,2008,202(24):6002-6010.

[12] 牛海涛. 沥青混凝土路面结构蠕变损伤研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.

NIU Haitao. Creep damage of asphalt concrete pavement structure research[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2015. (in Chinese)

[13] 徐颖强,张一弛,孙戡,等. 热障涂层界面微区域热蠕变应力演化分析[J]. 固体力学学报,2014,35(4):392-399.

XU Yingqiang,ZHANG Yichi,SUN Jian,et al. Analysis of thermal creep stress evolution in micro-area of thermal barrier coating interface[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics,2014,35(4):392-399. (in Chinese)

[14] 陈纪银. 原位自生 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3(\text{P})/\text{Al}$ 基复合材料高温蠕变行为的研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.

CHEN Jiyin. Study on high temperature creep behaviors of in-situ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3(\text{p})/\text{Al}$ composite[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016. (in Chinese)

[15] 刘勇俊,赵彬,许宝星,等. 平头压痕试验结合有限元法确定材料蠕变参数[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(12):2115-2117.

LIU Yongjun,ZHAO Bin,XU Baoxing,et al. Flat head indentation test combined with finite element method to determine material creep parameters[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36 (12): 2115-2117. (in Chinese)

[16] 龚宗辉. TA32 钛合金高温变形及动态力学行为的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.

GONG Zonghui. Investigation on the hot deformation and the dynamic mechanical behavior of TA32 titanium alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2018. (in Chinese)

[17] 汪军. 钛合金的蠕变行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

WANG Jun. A study on creep behavior of titanium alloy[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2008. (in Chinese)

[18] 刘琨. 铈酸钡/氧化锆覆合热障涂层体系的结构设计、可控制备[D]. 西安:西安交通大学,2016.

LIU Kun. Structure design, controllable preparation and performance evaluation of $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ composite thermal barrier coating system[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2016. (in Chinese)

(编辑:陈 越)