

CMAS 渗透下热障涂层界面失效分析

张子凡¹, 韩彦冬², 王伟哲¹, 蔡振威¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 中国石油天然气管道工程有限公司 上海分公司, 上海 200127)

摘 要: 基于钙镁铝硅等氧化物(CMAS)渗透对热障涂层陶瓷层(TC)热/力性能的改变, 考虑温度梯度作用下不同 CMAS 渗透深度及 CMAS 渗透下界面表面粗糙度对界面温度分布, 热生长氧化物(TGO)厚度及界面应力行为的影响。结果表明: CMAS 的渗透使陶瓷层的热导率增加, 进一步导致界面温度升高、TGO 的厚度增大、界面的应力状态更为严重。界面表面粗糙度的增长则导致界面波峰波谷处的温度差异增大, 界面 TGO 不均匀生长, 最终引起界面的应力分布发生变化。

关 键 词: 热障涂层; 钙镁铝硅等氧化物; 涂层改性; 热生长氧化物; 界面强度

中图分类号: V232.4; TG174.4

文献标志码: A

Interface failure analysis of thermal barrier coatings under CMAS penetration

ZHANG Zifan¹, HAN Yandong², WANG Weizhe¹, CAI Zhenwei¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Branch China Petroleum Pipeline Engineering Corporation,
Shanghai 200127, China)

Abstract: Influences of different calcium, magnesium, aluminum, silicon and other oxides (CMAS) penetration depths under the influences of temperature gradients and the influences of the interface roughness on the interface temperature distribution under CMAS penetration were considered based on the influences of penetration on the properties of the ceramic layer of the thermal barrier coating (TC). The influences of thermally growth oxide (TGO) thickness and interfacial stress behavior were also studied. The results showed that the penetration of CMAS increased the thermal conductivity of the ceramic layer, which further increased the interface temperature, the thickness of TGO, and also made the stress state of the interface more serious. The increase of the interface roughness led to an increase in the temperature difference between the peaks and valleys of the interface, the uneven growth of the interface TGO, and finally caused the change of the stress distribution of the interface.

收稿日期: 2020-09-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875341)

作者简介: 张子凡(1996—), 男, 硕士生, 主要研究方向为热障涂层强度评估。

通信作者: 蔡振威(1992—), 男, 博士后, 主要研究方向为高温结构部件的强度评估及先进热障涂层的智能制造。

E-mail: xiaoyezhu1992@sjtu.edu.cn

引用格式: 张子凡, 韩彦冬, 王伟哲, 等. CMAS 渗透下热障涂层界面失效分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1702-1711. ZHANG Zifan, HAN Yandong, WANG Weizhe, et al. Interface failure analysis of thermal barrier coatings under CMAS penetration[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1702-1711.

Key words: thermal barrier coating; calcium, magnesium, aluminum, silicon and other oxides; coating modification; thermally growth oxide; interface strength

热障涂层(TBC)是一种导热系数低、稳定性好的多层复合材料,常被用作高温部件表面的热防护层。热障涂层主要由陶瓷表层(TC)、黏结层(BC)、基体(Sub)和陶瓷层/黏结层间的热生长氧化物(TGO)层组成。作为一种常用的热障涂层,大气等离子喷涂热障涂层(APS-TBC)因为其成本低、工艺相对简单,在航空发动机上得到了广泛的应用^[1-2]。在航空发动机运转过程中,空气中的钙镁铝硅等氧化物(CMAS)会附着在TBC表面。当涂层表面的工作温度达到CMAS的熔点时(1 523 K),CMAS沉积物会发生熔融,由于其低黏度和涂层间隙的毛细效应,CMAS会逐渐渗入陶瓷层中^[3-6]。CMAS渗透进入陶瓷层中的孔隙后会导致TC层整体的力学性能和热性能改变,这可能会加剧界面开裂失效^[6-8]。如图1所示,Wu等^[9]展示了经过8 h热处理后,有无CMAS渗透时热障涂层横截面的扫描电镜(SEM)图像,Krämer等^[10]也发现了在CMAS渗透下,界面处产生了横向长裂纹。对比图1(a)与图1(b)可以看出,经过8 h的热处理后无CMAS渗透的热障涂层界面未出现明显裂纹;而CMAS渗透的热障涂层界面已经在多处出现裂纹,且TGO层的平均厚度更厚。

在不考虑CMAS渗透的情况下,已有许多研究分析了界面表面粗糙度和TGO生长对热障涂层界面强度的影响。结果表明,界面表面粗糙度会造成界面波峰和波谷处产生应力集中,且界面表面粗糙度越大界面上的应力数值更大^[11-13]。TGO的生长不仅会增大界面应力,还会改变应力集中区域的分布^[11-12,14]。考虑CMAS渗透时的实验表明,CMAS渗透进入陶瓷层中的孔隙后将极大地提升陶瓷层整体的热导率,导致界面温度更高,TGO生长更快,进一步使得考虑界面表面粗糙度下的界面应力状态更为危险^[6]。此外,CMAS的渗透会改变TC层的弹性模量和热膨胀系数,这将进一步加剧粗糙界面的热失配应力^[15-17]。已有一些研究分析CMAS渗透对界面强度的影响,Zhang等^[18]研究了CMAS渗透深度对TC内部以及界面的影响,忽略了界面表面粗糙度。Su等^[19]分析了CMAS渗透后涂层弹性模量的改变对粗糙界面应力行为的影响,而忽略了热性能改变对界面的影响。

本文基于CMAS渗透对涂层力学性能和热性能的改变,使用有限元方法计算分析了CMAS渗透下热障涂层的界面强度。其中主要考虑了表面粗糙度涂层内有温度梯度时CMAS渗透深度和界面表面粗糙度对界面温度分布、TGO不均匀生长和界面应力行为的影响。

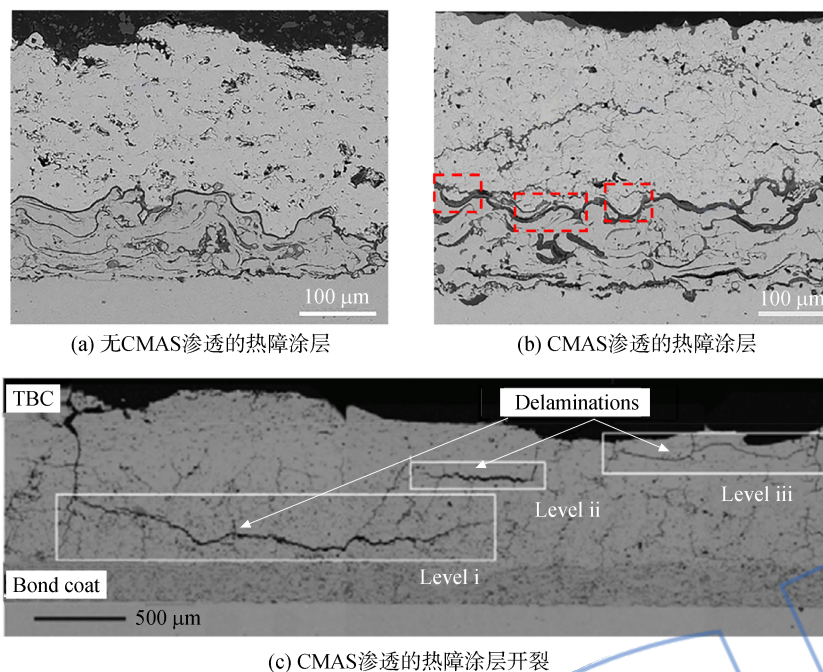
1 CMAS渗透下热障涂层有限元建模

1.1 几何模型和边界条件

本文在有限元软件Abaqus中建立了热障涂层的二维模型,模型的几何参数如图2所示。模型由厚度为0.3 mm的TC层、0.001 mm的TGO层、0.18 mm的BC层以及3 mm的Sub层构成^[1],设置界面TGO的形貌为符合 $A \cdot \cos[(2\pi/l)/x]$ 的余弦曲线,其中波长 l 设为定值0.08 mm,通过改变幅值 A 来控制界面的表面粗糙度。图中 t_t 为陶瓷层厚度, t_b 为黏结层厚度, t_s 为基体层厚度, t_{TGO} 为TGO层厚度。考虑不同CMAS渗透深度的影响时,以TGO界面表面粗糙度的幅值 $A=5 \mu\text{m}$ 为基准,将TC层拆分为渗透、未渗透两部分,并通过改变渗透区域的厚度(p)来表征CMAS的渗透深度。本文中CMAS渗透深度分别为0 mm($p=0$),0.1 mm($p=1/3t_t$),0.2 mm($p=2/3t_t$),0.3 mm($p=3/3t_t$)。考虑界面粗糙的影响时,以CMAS完全渗透陶瓷层(渗透深度为0.3 mm)为基准,设置幅值为5、10、15 μm 三种情况进行分析。界面波长和幅值的设置与实验观察到的尺寸相近^[9]。

热障涂层在实际服役中,上表面温度达到了CMAS的熔点(1 523 K左右),同时内部存在较大的温度梯度。本文主要参考了Jiang、Wang等^[20-21]在涂层实验及数值模拟中使用的温度边界条件。如图2(a)、图2(d)所示,在升温阶段表面温度设置为1 561 K(超过CMAS熔点),下表面设置为800 K,升温时间为0.15 h;稳态运行时间为5 h,此阶段里需考虑热障涂层各层的蠕变及界面TGO的生长。冷却时上下表面均设置为室温298 K,冷却时间为0.3 h。为表征周期性边界条件,对模型的两侧面施加多点约束(MPC)来保证其节点在位移方向上的一致性。同时约束基体下表面,令其竖直方向上的位移为零。

如图2(c)所示,为保证热障涂层界面处的计

图1 热障涂层横截面SEM形态图像^[9-10]Fig.1 Cross-sectional SEM morphological images of thermal barrier coatings^[9-10]

算精度,对TGO层附近区域的网格进行加密,使TGO层有5层扫描网格。模型的单元总数根据不同的界面表面粗糙度在70 000~80 000之间。

模型采取四节点热位移耦合平面应变(CPE4T)网格进行计算。

1.2 热障涂层改性及材料参数

CMAS的渗透改变了TC层的热力学性能。其中CMAS渗透后TC层的等效弹性模量可以根据式(1)的Reuss model^[22]进行计算

$$E_f = \left(\frac{\varphi_y}{E_y} + \frac{\varphi_c}{E_c} \right)^{-1} \quad (1)$$

其中 E 为弹性模量参数^[6], φ 为体积分数,下标 y 代表材料YSZ(钇稳定氧化锆),下标 c 代表CMAS,下标 f 代表等效的含义, E_f 为通过Reuss model计算得到的等效弹性模量。以10%孔隙率为体积比计算,得到表1中CMAS渗透下室温298 K时TC的弹性模量,较CMAS无渗透时提升约8%,与实验测得的结果相近^[16]。CMAS渗透后陶瓷层的等效热膨胀系数通过式(2)^[17]进行计算

$$\alpha_f = \frac{\alpha_y E_y \varphi_y + \alpha_c E_c \varphi_c}{E_y \varphi_y + E_c \varphi_c} \quad (2)$$

其中 α 为热膨胀系数,计算得到表1中CMAS渗透室温为298 K时TC层的热膨胀系数。

对于CMAS渗透后陶瓷层的热性能参数如热导率、比热容等,本文直接采用文献中实验测得的数据,CMAS渗透下陶瓷层的热导率约为未渗透时的2倍,比热容提升了约8%^[6]。表1列出了CMAS渗透前后热障涂层陶瓷层及其他各层的材料参数,其中CMAS的渗透仅改变了陶瓷层的

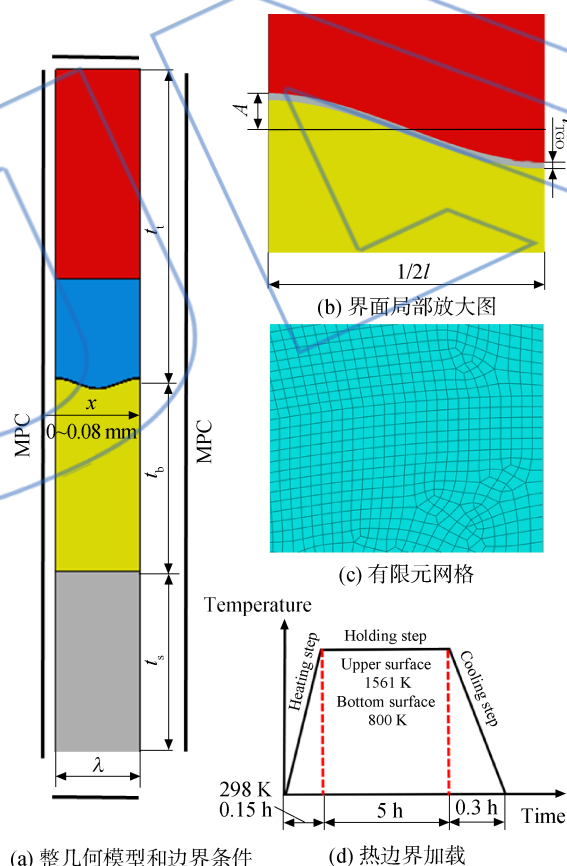


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

表 1 热障涂层各层材料参数

Table 1 Material parameters of each layer of thermal barrier coating

热障涂层各层参数	<i>T</i> /K	<i>E</i> /GPa	<i>ν</i>	$\alpha/(10^{-6}/\text{K})$	$\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	<i>c</i> /(J/(kg·K))	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	σ_s/MPa
无 CMAS 渗透 TC	298.15	17.5	0.2	9.68	0.88	475	4 084	
	1 073.15			9.88				
	1 273.15	12.4		10.34				
CMAS 渗透 TC	298.15	18.9	0.2	9.06	2.09	513	4 800	
	1 073.15			9.88				
	1 273.15	12.4		10.34				
TGO 层	298.15	380	0.27	5.1	25.2	857	3 978	1 200
	1 073.15	338						
	1 273.15	312		9.8				
BC 层	298.15	220	0.3	10.3	4.3	501	7 320	1 100
	673.15	200		12.7	6.4	592		1 100
	1 073.15	164		14.1	10.2	781		299
	1 273.15	120		20.4	11.1	764		10.4
基体	373.15	209	0.38	11.1	11.4	544	8 110	765
	573.15	199	0.38	13.3	14.9			
	773.15	185	0.39	14.0	18.3			
	973.15	167	0.39	14.6	21.8			538
	1 173.15	145	0.40	15.4	25.2			
	1 373.15	123	0.40	17.3	28.7			

热力学性能^[20]。表中*ν*为泊松比,λ为热导率,*c*为比热容,ρ为密度,σ_s为屈服强度。

由于热障涂层运行在高温下,需考虑各层材料蠕变行为的影响。采用 Norton 方程来反映蠕变的影响,对应的参数在表 2 中列出,*B*和*n*为拟合系数^[20]

表 2 各层材料蠕变参数

Table 2 Material creep parameters of each layer

各层名称	<i>T</i> /K	<i>B</i> /(s ⁻¹ MPa ^{-<i>n</i>})	<i>n</i>
TC 层	1 000	1.8×10 ⁻¹¹ ~1.8×10 ⁻⁵	1
TGO 层	1 000	7.3×10 ⁻¹² ~7.3×10 ⁻⁴	1
BC 层	≤600	6.54×10 ⁻¹⁹	4.57
	700	2.2×10 ⁻¹²	2.99
	800	1.84×10 ⁻⁷	1.55
	≥850	2.15×10 ⁻⁸	2.45
基体	700	3.18×10 ⁻⁵⁶	6
	950	7.45×10 ⁻²⁸	4.78

$$\epsilon_{cr} = B\sigma^n$$

(3)

1.3 TGO 生长

TGO 层在高温时会氧化生长,其厚度与时间表达式为^[23]

$$t_{\text{TGO}} = C \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \cdot \tau^m$$

(4)

式中 *t*_{TGO} 是 TGO 层的厚度, *C* = 748 m/s^{0.25}、*Q* = 87,575 J/mol 是拟合参数,τ 是时间, *m* = 0.25 是氧化指数, *R* 是气体常数, *T* 是温度。在 Abaqus 中通过定义材料 Swelling 膨胀实现 TGO 生长,为简化计算将厚度生长按生长时间进行平均,得到式(5)。

$$\dot{\epsilon}_{\text{TGO}}^{\text{Sw}} = \frac{\Delta \epsilon_{\text{TGO}}^{\text{Sw}}}{\Delta \tau} = \frac{\Delta \ln(h_{\text{TGO}})}{\Delta \tau}$$

(5)

本文中初始 TGO 厚度为 0.001 mm。同时在模型中的 TGO 层区域建立局部坐标系,使 TGO 层的主要沿厚度(法向)方向生长。由于热梯度的边界条件,在界面波峰波谷处产生了温度差,而 TGO 生长对温度敏感,所以 TGO 在界面各处呈不均匀生长。

2 结果分析

2.1 CMAS渗透深度对界面强度的影响

2.1.1 界面温度的分布

本节以界面幅值 $A=5\text{ }\mu\text{m}$ 为基准,考察无CMAS渗透($p=0$),CMAS渗透1/3TC层($p=1/3t_i$),2/3TC层($p=2/3t_i$)及CMAS完全渗透($p=3/3t_i$)时的界面情况,界面温度分布结果如图3所示,其中横坐标表示模型 x 方向的宽度,数值范围为 $0\sim 0.08\text{ mm}$,后文表达相同。可见CMAS渗透深度对TGO界面温度分布的影响十分明显,CMAS渗透深度越深,TGO界面平均温度越高。全渗透情况下,界面平均温度达到约 1195 K ,较无CMAS渗透时界面的平均温度提高了约 150 K 。且随着CMAS渗透深度增大,界面平均温度升高的幅度增大,从无渗透开始CMAS每往下渗透 0.1 mm 界面平均温度提升分别 35 、 47 K 和 67 K 。此外CMAS渗透越深,界面波峰波谷间的温差越大,CMAS全渗透时波峰波谷温差为 3.5 K ,较无渗透时提升了 2 K 。这说明当CMAS渗透深度越深时界面上的温度不均匀性越大,将进一步影响到界面TGO的生长。

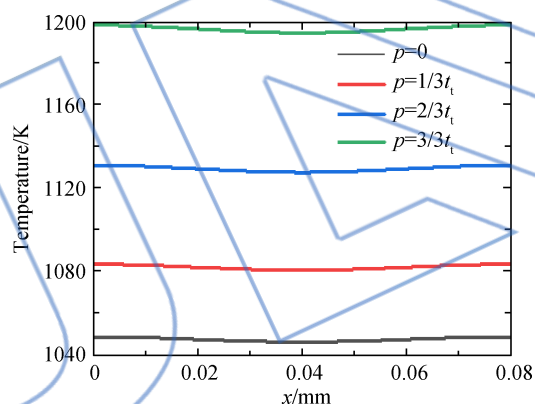
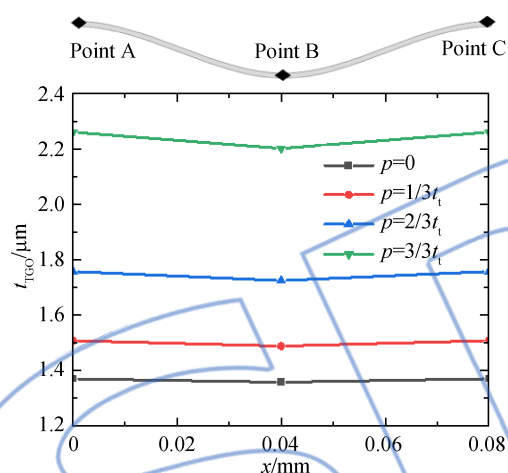


图3 不同CMAS渗透深度时界面TGO的温度分布
Fig.3 Temperature distribution of interface TGO at different CMAS penetration depths

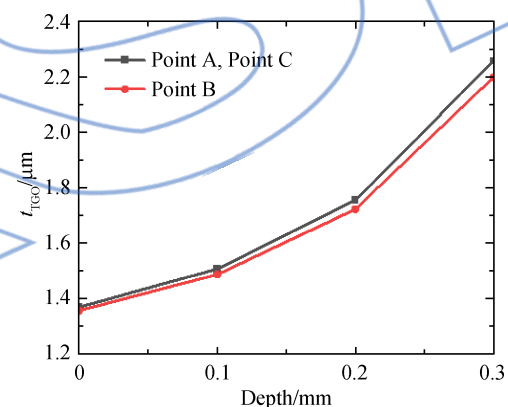
2.1.2 界面TGO厚度分布

在分析界面TGO的厚度分布时,将波峰波谷作为关键点进行了数据提取,这是由于波峰处的TGO生长是最厚的,而波谷处是最薄的,因此这两处的界面状态比较危险。如图4(a)所示,与图3中温度分布的规律类似,CMAS的渗透导致界面TGO的平均厚度也有显著增高。CMAS完全渗透对比无CMAS渗透时TGO平均厚度提高了 $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 。已知初始TGO厚度 $1\text{ }\mu\text{m}$,无CMAS

渗透时TGO经过5h的生长,平均厚度达到了 $1.35\text{ }\mu\text{m}$,提升了约 35% 。CMAS全渗透时,TGO平均厚度达到 $2.2\text{ }\mu\text{m}$,提升了约 120% 。从图4(b)可知,CMAS渗透的越深,TGO的生长越快,且波峰处的TGO生长速度会明显高于波谷。这种TGO生长的不均匀性可能会影响到TC/TGO界面以及TGO/BC界面处的应力分布。



(a) 厚度沿界面的分布



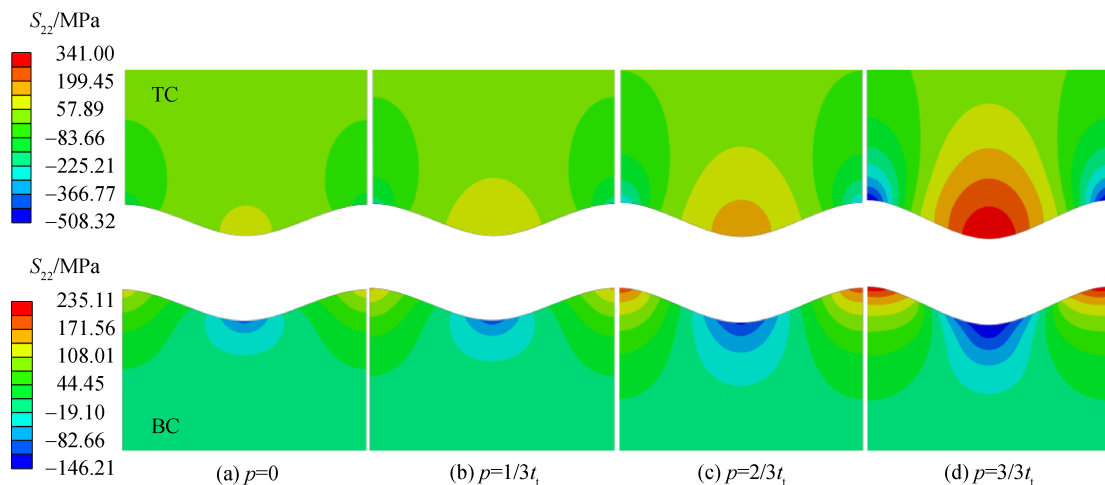
(b) 随CMAS渗透深度波峰波谷厚度发展趋势

图4 不同CMAS渗透深度时TGO波峰波谷处的不均匀生长

Fig.4 Non-homogeneous growth of TGO peaks and valleys at different CMAS penetration depths

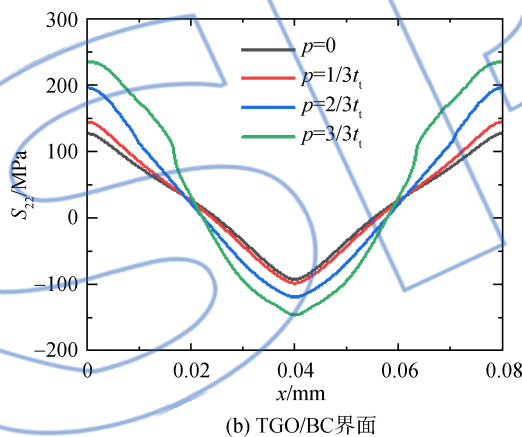
2.1.3 残余应力状态分析

S_{22} 应力即 y 方向竖直方向上的应力分布,Chen等^[24]和Wei等^[25-26]在其研究中都主要分析了 S_{22} 方向的应力, y 方向上的应力可能引起水平裂纹的萌生和扩展,这与TGO界面附近的分层破坏密切相关,所以本文主要分析了该方向的应力。从图5可以看出,对于TC层,界面波谷处出现了拉应力,而波峰处呈压应力状态;对于BC层,应力分布情况与TC层正好相反,即在波峰处出现了拉应

图 5 不同 CMAS 渗透深度时 TC 层及 BC 层内部的 S_{22} 应力分布Fig.5 S_{22} stress distribution in TC layer and BC layer at different CMAS penetration depths

力,而波谷处出现了压应力。随着 CMAS 渗透深度增大,TC 层和 BC 层的应力显著增加。同时可以观察到应力的最大值均出现在界面上,因此需要对界面上的 S_{22} 分布作进一步分析。

图 6 展示了不同 CMAS 渗透深度下沿 TC/TGO 界面及 TGO/BC 界面上剥离应力 S_{22} 的分布。从图中可以看出,随着 CMAS 渗透深度的增加,TC/TGO 界面波谷处的拉应力及波峰的压应力数值显著增大。CMAS 完全渗透时波谷处的拉应力达到 341 MPa,相较无渗透时提升了约 290 MPa。而完全渗透时波峰处的压应力也达到了 508 MPa,相较无渗透时提升了约 400 MPa。对于 TGO/BC 界面而言,波峰的拉应力与波谷的压应力随着渗透深度的增加而增大。在 CMAS 完全渗透时,TGO/BC 界面波峰拉应力约 235 MPa,相较无渗透时提升了约 100 MPa;全渗透时 TGO/BC 界面波谷处压应力约 146 MPa,相较无



(b) TGO/BC 界面

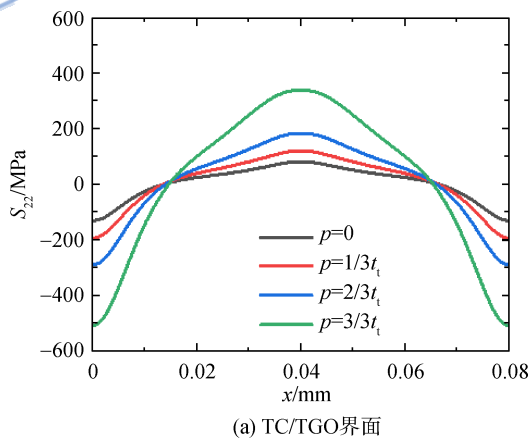
图 6 不同 CMAS 渗透深度时界面 S_{22} 应力分布曲线Fig.6 Interface S_{22} stress distribution curve at different CMAS penetration depths

渗透时提升了约 100 MPa。从以上数据可以看出,CMAS 渗透对于 TC/TGO 界面的应力影响比 TGO/BC 界面更大,对于界面波峰处的影响相较波谷处的影响更大。

2.2 CMAS 渗透下界面表面粗糙度的影响

2.2.1 界面温度的分布

热障涂层的界面表面粗糙度会影响界面上的温度分布及应力分布,而 CMAS 的渗透可能会加剧这种影响。图 7 展示了 CMAS 全渗透下界面幅值分别为 5、10、15 μm 时的界面的温度分布。从图中可以看出随着界面幅值的增大,波峰处的温度提升明显,这是由于幅值增大使波峰距离 TC 层上表面更近。同理,波谷处的温度随着界面幅值的有所减小,但温度的下降较小,这是由于波峰处较高的温度,通过 TGO 层及 BC 层向下传递,



(a) TC/TGO 界面

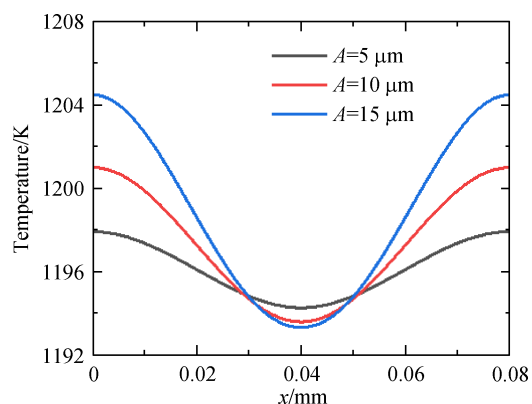
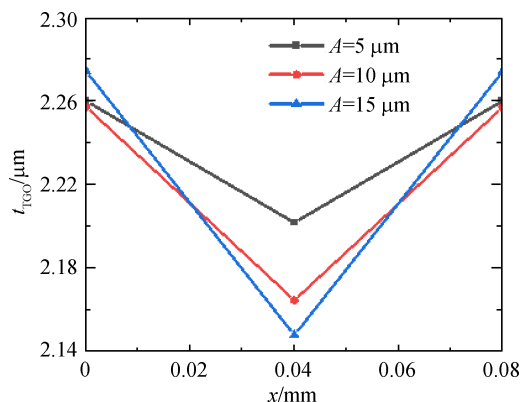


图7 不同界面表面粗糙度时界面TGO的温度分布
Fig.7 Temperature distribution of interface TGO with different interface roughness

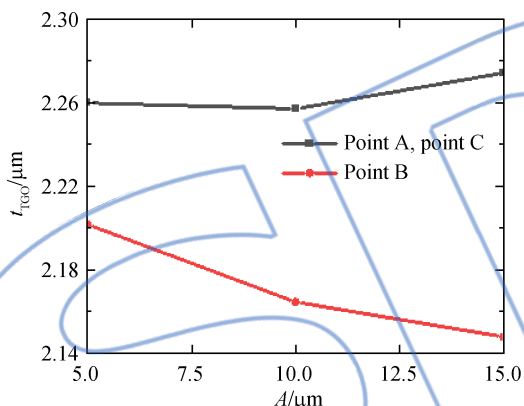
抑制了波谷处温度的降低。在幅值为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下,波峰处的温度约为 1204.5 K ,波谷处为 1193 K ,波峰波谷的差值达到 10 K 多,相较界面 $5\text{ }\mu\text{m}$ 幅值时波峰波谷的温差提升了约 6 K 。随着粗糙度提升后,界面温度的提升及波峰波谷温差的加大,会加剧TGO生长的不均匀性,同时界面幅值的增大带来的几何结构的改变也会影响TGO的生长。

2.2.2 TGO厚度分析

图8(a)展示了CMAS全渗透下不同界面表面粗糙度对应的TGO厚度。可以看出随着界面幅值增大,波谷处的TGO的厚度也减小,界面幅值为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 时TGO厚度约为 $2.15\text{ }\mu\text{m}$,相比幅值为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 幅值时减小了约 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 。相比于波谷,波峰处TGO厚度随界面幅值的变化规律较为复杂。图8(b)进一步展示了波峰波谷位置TGO厚度随界面幅值的变化曲线。随着界面幅值的增大,波峰位置TGO的厚度先减小后增大。本文不仅考虑了TGO生长应力,还纳入了TGO蠕变行为的影响,而蠕变行为与温度以及当地应力状态密切相关^[27]。随着界面表面粗糙度的增加,界面上的温度和应力分布也更为复杂,从而造成TGO生长的不均匀性。所以一方面是由于幅值增大导致波峰处的温度升高,会促进TGO的生长;另一方面是由于幅值增大导致界面几何形状发生变化,在一定程度上会制约TGO的生长。当幅值从 $5\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时,温度对TGO生长的影响略小于界面表面粗糙度的影响,因此波峰处的TGO厚度有所减小。当幅值从 $10\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 时,温度对于TGO的影响逐渐占据上风,导致波峰处TGO的厚度增大。同时随着界



(a) 厚度沿界面的分布



(b) 随界面表面粗糙度改变的波峰波谷厚度发展趋势

图8 不同界面表面粗糙度时TGO波峰波谷处的不均匀生长

Fig.8 Non-homogeneous growth of TGO peaks and valleys with different interface roughness

面幅值的增大,波峰波谷的TGO厚度差异不断增大,这可能会引起TC/TGO界面以及TGO/BC界面应力分布的改变。

2.2.3 残余应力状态分析

图9展示了不同界面表面粗糙度下TC层及BC层内的剥离应力 S_{22} 的分布。从图中可以看出,对于TC层,随着幅值的增大,波谷处的拉应力集中向离谷处转移,同时在离峰区域出现了一定量级的拉应力,这与一些文献[3]中实验的结果相吻合。对于BC层,随着界面幅值的增大,波峰处的拉应力以及波谷处的压应力都有明显的增大。同时可以观察到应力的最大值均出现在界面上,因此需要对界面上的 S_{22} 分布作进一步分析。

图10展示了不同界面表面粗糙度下沿TC/TGO界面及TGO/BC界面上剥离应力 S_{22} 的分布。从图10(a)可以看出,随着幅值的增大,波谷处的拉应力呈现一个下降的过程,在幅值为 $5\text{ }\mu\text{m}$

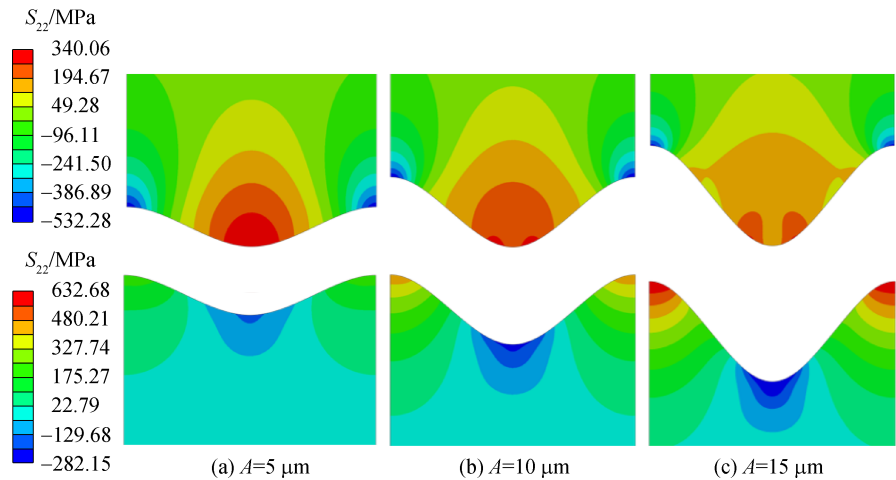


图 9 不同界面表面粗糙度时 TC 层及 BC 层内部的 S_{22} 应力分布

Fig.9 S_{22} stress distribution in TC layer and BC layer with different interface roughnesses

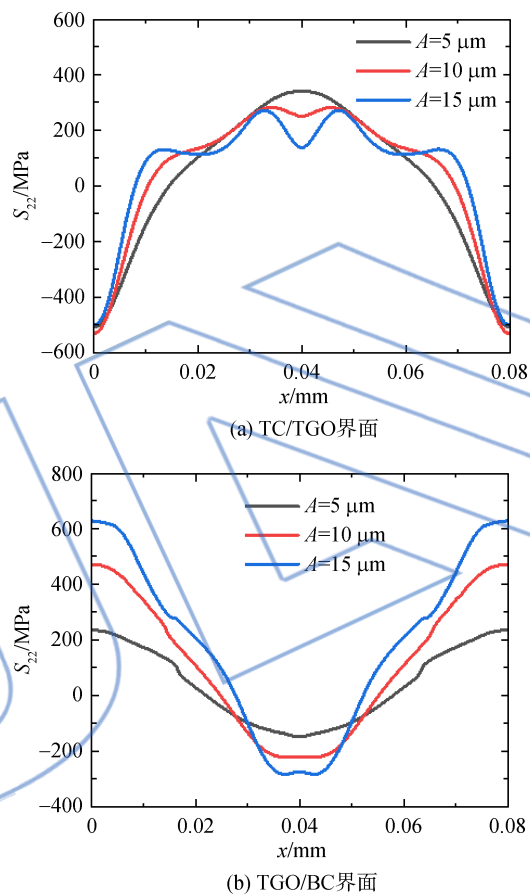


图 10 不同界面表面粗糙度时界面 S_{22} 应力分布曲线

Fig.10 Interface S_{22} stress distribution curve with different interface roughnesses

时波谷处的拉应力约为 340 MPa,当幅值增大到 15 μm 时,波谷拉应力下降至 100 MPa 左右,这可能是由于幅值大时 TGO 生长受到几何形貌的制约,在蠕变和 TGO 生长的动态过程的博弈下造成波谷处的拉应力下降,拉应力的集中位置转移

至离谷处。TC/TGO 界面 S_{22} 应力呈现多峰分布。从图 10(b)中可以看出,BC 波峰处的拉应力随着幅值增大而增大,但增速减小,当幅值从 5 μm 提升至 10 μm 时,拉应力从约 220 MPa 升高至约 480 MPa,提升约 260 MPa,而幅值 15 μm 时拉应力约 620 MPa,仅提升了约 140 MPa,这是由于波峰处 TGO 的厚度较大在一定程度上限制了 BC 层波峰处拉应力的发展。而波谷处的压应力随幅值的增大而增大,且也呈现出离谷的现象与 TC 层相对应。可以看出,界面表面粗糙度会影响 TC/TGO 界面以及 TGO/BC 界面的应力分布,对于 TC/TGO 界面应力数值影响较小,对于 TGO/BC 界面应力数值影响较大。

图 11 给出了界面开裂情况的机理图,在界面离峰区域,可能产生横向裂纹。在 TC/TGO 界面的波谷处,在界面幅值较小时可能发生剥离,而幅值较大时可能产生离谷的横向裂纹。在 BC/TGO 界面可能由于 S_{22} 的拉应力使得界面剥离。随着时间进一步发展,这些裂纹将连接组成长裂纹,这与图 1(b)观察到的裂纹现象相似^[9]。

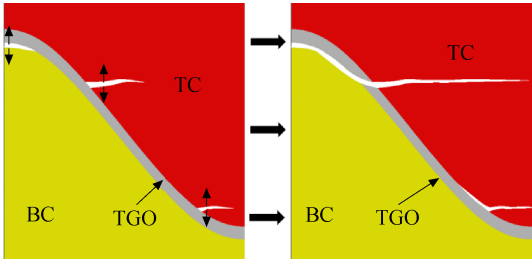


图 11 热障涂层开裂机理图

Fig.11 Thermal barrier coating cracking mechanism diagram

3 结 论

本文采用有限元仿真计算的方法,基于CMAS渗透对于TC层的改性,考虑温度梯度作用下不同CMAS渗透深度及CMAS渗透下界面表面粗糙度对界面温度分布,TGO厚度及界面应力行为的影响,得到以下结论:

1) 对于界面温度分布,CMAS渗透深度的增加会显著提升界面平均温度并提升界面波峰波谷处的温差。界面表面粗糙度的增加会显著增大界面的不均匀温度分布。

2) 对于TGO不均匀生长,CMAS渗透深度的增加会显著提升TGO的平均厚度,并增大界面波峰波谷处的厚度差异。界面表面粗糙度的增加会显著提升TGO生长的不均匀性。

3) 对于界面应力而言,CMAS渗透深度的增加会显著提升界面应力的数值,且对于TC/TGO界面的应力影响更大。界面表面粗糙度的增加会改变TC/TGO界面的应力集中区域,对于TGO/BC界面的应力数值影响更大。

参考文献:

- [1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566):280-284.
- [2] CLARKE D R, OECHSNER M, PADTURE N P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines[J]. MRS (Materials Research Society) Bulletin, 2012, 37(10): 891-898.
- [3] 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.
- [4] CHEN W R, ZHAO L R. Review-volcanic ash and its influence on aircraft engine components[J]. Procedia Engineering, 2015, 99:795-803.
- [5] DREXLER J M, GLEDHILL A D, SHINODA K, et al. Jet engine coatings for resisting volcanic ash damage[J]. Advanced Materials, 2011, 23(21):2419-2424.
- [6] KAKUDA T R, LEVI C G, BENNETT T D. The thermal behavior of CMAS-infiltrated thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 272:350-356.
- [7] KRÄMER S, YANG J, LEVI C G. Infiltration-inhibiting reaction of gadolinium zirconate thermal barrier coatings with CMAS melts[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(2):576-583.
- [8] WIESNER V L, BANSAL N P. Mechanical and thermal properties of calcium-magnesium aluminosilicate (CMAS) glass[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(10): 2907-2914.
- [9] WU Yiyou, LUO Hua, CAI Canying, et al. Comparison of CMAS corrosion and sintering induced microstructural characteristics of APS thermal barrier coatings[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(3):440-447.
- [10] KRÄMER S, FAULHABER S, CHAMBERS M, et al. Mechanisms of cracking and delamination within thick thermal barrier systems in aero-engines subject to calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) penetration[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490(1/2):26-35.
- [11] 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 and Design, 2010, 31(2): 772-781.
- [12] YU Q M, ZHOU H L, WANG L B. Influences of interface morphology and thermally grown oxide thickness on residual stress distribution in thermal barrier coating system[J]. Ceramics International, 2016, 42(7):8338-8350.
- [13] HAN M, HUANG J, CHEN S. The influence of interface morphology on the stress distribution in double-ceramic-layer thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2015, 41(3):4312-4325.
- [14] KYAW S, JONES A, JEPSON M A E, et al. Effects of three-dimensional coating interfaces on thermo-mechanical stresses within plasma spray thermal barrier coatings[J]. Materials and Design, 2017, 125:189-204.
- [15] 楼思余, 单萧, 赵晓峰. 大气等离子喷涂热障涂层CMAS防护层成分及厚度优化[J]. 表面技术, 2018, 47(2):208-217.
LOU Siyu, SHAN Xiao, ZHAO Xiaofeng. Composition and thickness optimization of anti-CMAS layer on air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface Technology, 2018, 47(2):208-217. (in Chinese)
- [16] 孙友贝, 李定俊, 范华, 等. CMAS沉积物对等离子喷涂纳米热障涂层组织结构及力学性能影响[J]. 东方汽轮机, 2019(1):58-63.
SUN Youbei, LI Dingjun, FAN Hua, et al. Effect of CMAS deposits on microstructure and mechanical properties of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia coatings[J]. Dongfang Turbine, 2019(1):58-63. (in Chinese)
- [17] SCHAPERY R A. Thermal expansion coefficients of composite materials based on energy principles[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 2(3):380-404.
- [18] ZHANG Guanghui, FAN Xueling, XU Rong, et al. Transient thermal stress due to the penetration of calcium-magnesium-alumino-silicate in EB-PVD thermal barrier coating system[J]. Ceramics International, 2018, 44(11): 12655-12663.
- [19] SU Luochuan, YI Chenhong. Effects of CMAS penetration on the delamination cracks in EB-PVD thermal barrier coatings with curved interface[J]. Ceramics International, 2017, 43(12):8893-8897.
- [20] JIANG Jishen, JIANG Lingxin, CAI Zhenwei, et al. Numerical

- cal stress analysis of the TBC-film cooling system under operating conditions considering the effects of thermal gradient and TGO growth[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 357(10):433-444.
- [21] WANG Ting, LI Xianchang. Mist film cooling simulation at gas turbine operating conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(21/22):5305-5317.
- [22] NAKAMURA T, WANG T, SAMPATH S. Determination of properties of graded materials by inverse analysis and instrumented indentation[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48 (17): 4293-4306.
- [23] BECK T, HERZOG R, TRUNOVA O, et al. Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma-sprayed thermal barrier coating systems for gas turbines: Part II modeling[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202 (24): 5901-5908.
- [24] CHEN Zhi, JIA Wenbin, ZHAO Kai, et al. Comparison of stress evolution under TGO growth simulated by two different methods in thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(3):2915-2922.
- [25] WEI Zhiyuan, CAI Hongneng, TAHIR A, et al. Stress states in plasma-sprayed thermal barrier coatings upon temperature cycling: combined effects of creep, plastic deformation, and TGO growth[J]. *Ceramics International*, 2019, 45 (16): 19829-19844.
- [26] WEI Zhiyuan, CAI Hongneng, MENG Guohui, et al. An innovative model coupling TGO growth and crack propagation for the failure assessment of lamellar structured thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(2):1532-1544.
- [27] MCLEAN M. Creep deformation of metal-matrix composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1985, 23(1):37-52.

(编辑:张 雪)