

引文格式: 赵茹娟, 程子义, 于庆民. 界面形貌对热障涂层残余应力影响的三维有限元分析[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 84–93.
ZHAO Rujuan, CHENG Ziyi, YU Qingmin. Study on effect of interfacial morphology on residual stress in thermal barrier coating system by 3D finite element analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 84–93.

界面形貌对热障涂层残余应力影响的三维有限元分析

赵茹娟, 程子义, 于庆民

(西北工业大学, 西安 710129)

[摘要] 采用有限元方法, 建立了考虑界面形貌的热障涂层系统三维有限元模型, 通过计算从高温冷却到室温时界面处的残余应力的变化, 研究了界面形貌对热障涂层系统残余应力的影响。结果表明, 氧化层(TGO)厚度不仅会影响残余应力大小, 还会影响其应力状态, 氧化层越厚, 其残余应力水平越高; 界面幅值增大会使黏结层(BC)–TGO界面残余应力增大, 但其对陶瓷层(TC)–TGO界面处残余应力的影响较为复杂; 增大界面波长会在一定程度上减小残余应力水平; 三维混合粗糙度对残余应力的影响较小。因此, 氧化层厚度、界面幅值和波长会较大程度上影响热障涂层的残余应力, 进而影响热障涂层系统的稳定性, 且氧化层厚度对涂层失效位置具有决定性意义。

关键词: 热障涂层(TBC); 残余应力; 形貌变化; 有限元方法; 三维建模

Study on Effect of Interfacial Morphology on Residual Stress in Thermal Barrier Coating System by 3D Finite Element Analysis

ZHAO Rujuan, CHENG Ziyi, YU Qingmin

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

[ABSTRACT] A 3D finite element model of thermal barrier coating (TBC) system considering the interface morphology is established by using the finite element method. By calculating the change of residual stress at the interface when cooling from high temperature to room temperature, the influence of interface geometry on the residual stress of the TBC system is studied. The results show that the thickness of the TGO layer not only affects the magnitude of the residual stress, but also affects the stress state, and the thicker the TGO layer, the higher the residual stress level in the same model. The increase of the interface amplitude will increase the residual stress at the interface of the bond layer (BC) –TGO, but its influence on the residual stress at the interface of the ceramic layer (TC) –TGO is more complicated. The effect of increasing the interface wavelength will reduce the residual stress level to some extent; The 3D hybrid roughness parameter has less effect on the residual stress. Therefore, the thickness of the oxide layer, the interface amplitude and the wavelength will greatly affect the residual stress of the TBC, which in turn affects the stability of the TBC system, and the thickness of the oxide layer has a decisive significance on the failure location of the coating.

Keywords: Thermal barrier coating; Residual stress; Morphology changes; Finite element method; 3D modeling

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.084

随着航空发动机性能的不不断提高, 涡轮进口温度越来越高。为了延长涡轮叶片的使用寿命, 热障涂层(Thermal barrier coating, TBC)被广泛应用于航空发动机涡轮叶片中提高涡轮叶片的工作温度、降低基材的温

度。TBC是一种典型的多层结构, 主要由陶瓷层(Top coating, TC)和黏结层(Bond coating, BC)组成, 最外层为TC, 起隔热作用; BC位于TC和基体材料之间用来平衡其中的热不匹配。在高温状态下, 在BC和TC之间会

形成热生长氧化(Thermally grown oxide, TGO)层。

当 TBC 从制备温度或工作环境逐步冷却至室温时,由于界面几何结构、材料参数不匹配,系统内会产生复杂的残余应力^[1-2]。在残余应力的作用下涂层内部或涂层与基材结合面易萌生微裂纹,造成涂层剥落,这是引起涂层过早开裂失效的重要原因之一^[3-4]。同时,涂层失效与 TGO 层的残余应力及其与涂层-基底界面缺陷的相互作用也有关^[5]。当涂层界面为理想平面时,法向残余应力的值为 0,但实际界面是存在粗糙度值的,其残余应力的分布引起了很多研究者的关注。为了研究界面残余应力的分布规律,研究者长期以来主要是采用二维有限元模型进行模拟。Yu 等^[6]采用了分段三角函数曲线来模拟涂层界面的几何形态,分析了界面幅值和波长对残余应力的影响,但其结果是基于二维模型仿真得到的,与三维的实际情况相比具有一定的局限性。杨晓光等^[7]对导向器叶片进行了二维温度场及热应力分析,但受二维空间的限制其边界条件并不充足,且不能考虑沿叶高方向的应力,这些都会影响其结果的准确性。Busso 等^[8]提出了通过一种新的机械方法来预测 TBC 系统的寿命,但其二维模型的设计并不能考虑到 TGO 层波纹的影响。因而研究者开始尝试对 TBC 进行三维建模仿真,王志平等^[9]建立了界面三维椭球形貌的模型,研究了界面热应力的分布规律,但此模型较为简单,与真实结构差距较大。王琳琳^[10]利用 Micro-CT 三维断层扫描技术建立了基于真实几何结构的 TBC 模型,对裂纹的萌生和扩展进行了分析,但是该模型的建立成本较高,也不能灵活地改变各项几何参数来探究其对残余应力的影响。戴建伟等^[11]通过电子显微镜扫描分析了热循环损伤后的热障涂层试样的层间损伤和元素扩散行为,但其试验过程中诸多不可控因素会在很大程度上影响其试验结果。因此,本文引入了一种通过三角函数曲线扫描得到的三维 TBC 界面有限元模型,来探究三维混合粗糙度、界面幅值、波长和 TGO 层厚度对涂层残余应力的影响,以此来对 TBC 的危险位置和失效形式进行初步的分析。

本文通过构建三维的大气等离子喷涂 TBC 模型,研究了从高温逐步冷却至室温时界面几何形貌对 TBC 残余应力的影响规律。

1 试验及方法

图 1 给出了通过有限元软件建立的基于三维模型的大气等离子喷涂 TBC 模型^[4,12-13],主要包括 TC、TGO、BC 和基底层(SUB)4 个部分,其中 TC、BC、SUB 层厚度分别为 0.25 mm、0.12 mm、2.5 mm, TGO 层的厚度分别取 0、0.001 mm、0.004 mm、0.007 mm、0.01 mm。其中

TGO 层纵截面是由一条单个波长长度的余弦曲线沿相同曲线路径扫描得到,其三维表达式为

$$z = A \cos \frac{2\pi}{\lambda} x + A \cos \frac{2\pi}{\lambda} y - 2A \quad (1)$$

式中, A 为界面幅值; λ 为界面波长。三维坐标轴零点位于 TGO 层波峰处, z 轴竖直向上, x 、 y 轴构成水平平面。该余弦曲线幅值 A 分别取 0.01 mm、0.02 mm、0.03 mm、0.04 mm, 波长 λ 分别取 0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm。

1.1 材料参数

本文将 BC 层看作完全弹塑性材料,将其余 3 层考虑为线弹性材料,材料属性均与温度相关。由于涂层通常难以从基体上有效剥离下来,即便剥离下来,其厚度也无法加工为标准试样进行各种物理性能测量,导致其材料参数较难实测,故采用已证实的较符合实际的材料参数进行模拟计算。其中所需杨氏模量、泊松比、热膨胀系数和屈服应力均通过试验和模拟分析得到,如表 1^[14-19]和 2^[18-19]所示。

1.2 边界条件

考虑到热障涂层中 TGO 层的形状是按正弦(余弦)曲线呈对称性和周期性排布,只选取单个波长长度的 TBC 模型作为研究对象。由于大气等离子喷涂时获得的涂层致密、黏结强度高,喷涂后基体组织不发生变化,工件几乎不变形。为了表征周围材料对模型的作用,在图 1 所示模型中,对其 $x=A$ 、 $y=A$ 两个侧面施加多点约束以形成周期性边界条件,使模型在这两个侧面的所有节点拥有相同的水平位移,但不影响其竖向自由移动,即使其变形时始终保持平面。为了提升计算效率,在 $x=0$ 、 $y=0$ 两个侧面和底面采用位移边界条件,分别限制各平面内所有节点在 x 轴、 y 轴和 z 轴方向上的位移。假设该模型处于均匀温度场作用下,不考虑初始应力的影响,系统由 1000 °C 线性下降至室温 25 °C。

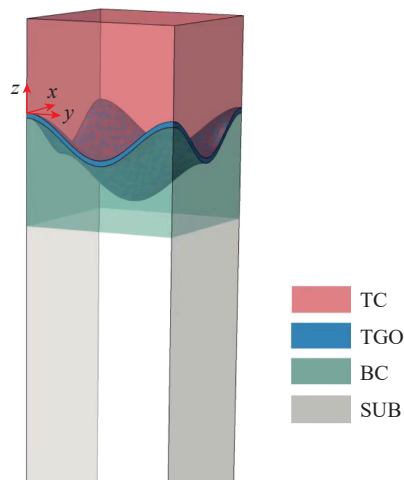


图 1 三维 TBC 模型

Fig.1 3D model of TBC

表 1 通过试验和模拟分析得到的各参数^[14-19]

Table 1 Parameters obtained through experimental and simulation analysis^[14-19]

温度/°C	杨氏模量/GPa ^[14-16]				泊松比 ^[15-17]				热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹) ^[18-19]			
	SUB	BC	TGO	TC	SUB	BC	TGO	TC	SUB	BC	TGO	TC
20	220	200	400	48	0.31	0.3	0.23	0.1	14.8	13.6	8	9
200	210	190	390	47	0.32	0.3	0.23	0.1	15.2	14.2	8.2	9.2
400	190	175	380	44	0.33	0.31	0.24	0.1	15.6	14.6	8.4	9.6
600	170	160	370	40	0.33	0.31	0.24	0.11	16.2	15.2	8.7	10.1
800	155	145	355	34	0.34	0.32	0.25	0.11	16.9	16.1	9	10.8
1000	130	120	325	26	0.35	0.33	0.25	0.12	17.5	17.2	9.3	11.7
1100	120	110	320	22	0.35	0.33	0.25	0.12	18	17.6	9.6	12.2

表 2 BC 层屈服应力^[18-19]

Table 2 Yield stress of BC layer^[18-19]

温度/°C	屈服应力/MPa
25	1000
295	1000
850	79
1200	79

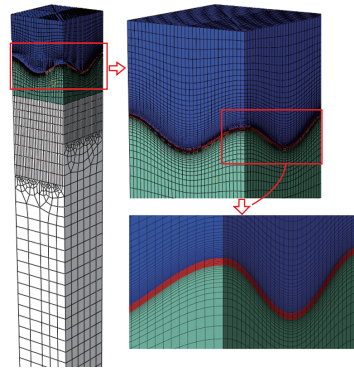


图 2 有限元网格

Fig.2 Finite element mesh

1.3 有限元网格

该模型采用八节点线性六面体单元,带减缩积分和沙漏控制,使用六面体结构网格划分,在 TGO 层附近进行加密处理。通过网格无关性分析确定网格单元数量为 7~30 万。网格剖分如图 2 所示。

1.4 三维混合粗糙度

为了表征热障涂层界面的几何形态,根据式(1),计算其截面的三维混合粗糙度 S_{dq}/rad (取样区域内的均方根梯度),即

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{D} \iint_D \left\{ \left[\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right]^2 \right\} dx dy} \quad (2)$$

式中, D 为取样区域面积; $z(x,y)$ 为高度参数。可以计算出热障涂层界面粗糙度为

$$S_{dq} = 2\pi \frac{D}{\lambda} \quad (3)$$

为了研究相同 TGO 厚度条件下不同扫略曲线构成的相同粗糙度界面对残余应力的影响,本文额外建立 TGO 层厚度为 0.007 mm 的 9 组模型,根据 S_{dq} 分为 3 组,如表 3 所示。

2 结果与讨论

为了研究热障涂层系统中界面形貌对残余应力分

表 3 额外建立的模型几何数据

Table 3 Additional model geometry data

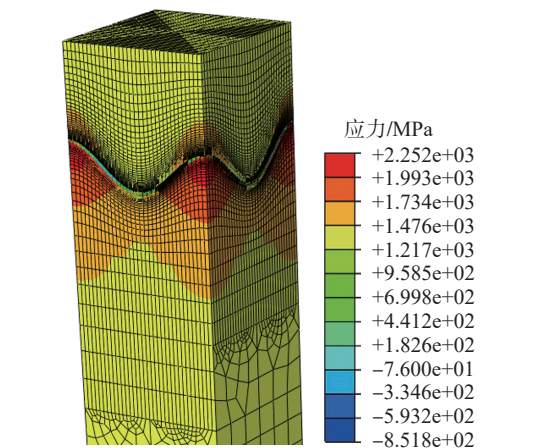
混合粗糙度 S_{dq}/rad	波长/mm	幅值/mm
0.1π	0.3	0.015
	0.4	0.02
	0.5	0.025
0.15π	0.3	0.0225
	0.4	0.03
	0.5	0.0375
0.2π	0.3	0.03
	0.4	0.04
	0.5	0.05

布的影响,本文提取 BC、TGO 层界面(位于 BC 层内)和 TC、TGO 层界面(位于 TC 层内)竖直方向的残余应力 S_{22} ,应力云图如图 3(a)所示。分别在 BC-TGO 和 TC-TGO 界面选取输出路径,均由波谷延伸至波峰,如图 3(b)和(c)所示。采用无量纲化处理的方法,横轴

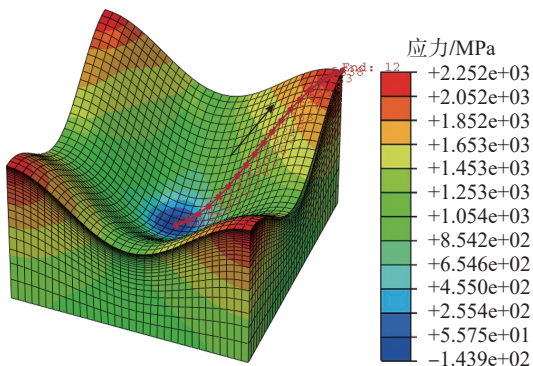
赋予归一化距离 \bar{s} (Normalized distance), 采集残余应力 S_{22} 的数据。为了简化计算, 本文假设该模型没有微小缺陷, 层与层之间不会相对滑动, 且不考虑氧化层生长和高温蠕变。

2.1 氧化层厚度对残余应力分布的影响

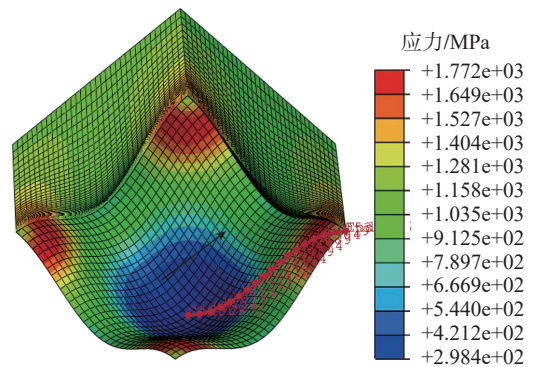
当界面波长为 0.3 mm 时, 氧化层厚度 h_{TGO} 对 BC-TGO、TC-TGO 界面波峰和波谷处残余应力影响曲线如图 4 和 5 所示。由图 4 (a) 可看出, 这种情况下 BC-



(a) 模型整体应力云图



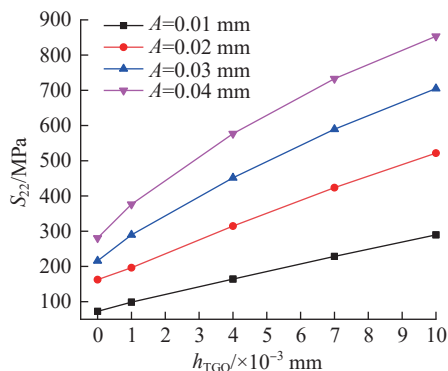
(b) BC层应力云图及输出路径



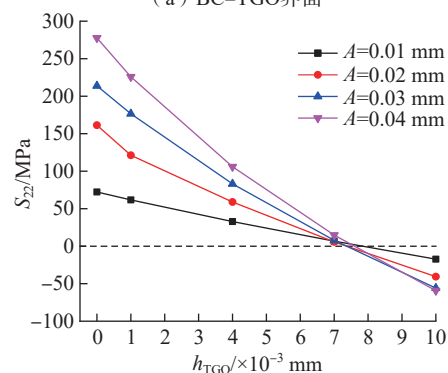
(c) TC层应力云图及输出路径

图3 TBC 应力云图

Fig.3 Stress distribution of TBC



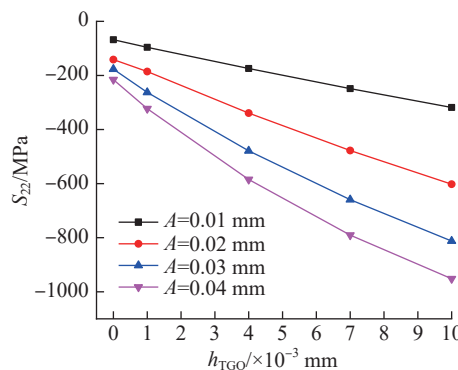
(a) BC-TGO界面



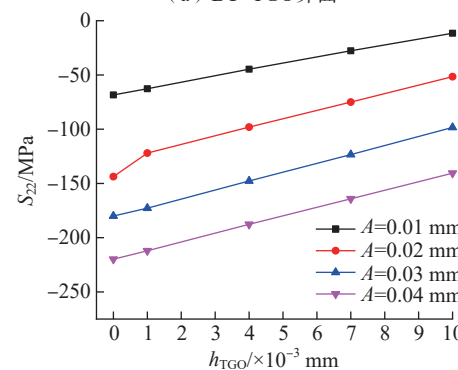
(b) TC-TGO界面

图4 $\lambda=0.3$ mm 时, h_{TGO} 对波峰处残余应力影响

Fig.4 Influence of h_{TGO} on residual stress at crest of wave when $\lambda=0.3$ mm



(a) BC-TGO界面



(b) TC-TGO界面

图5 $\lambda=0.3$ mm 时, h_{TGO} 对波谷处残余应力影响

Fig.5 Influence of h_{TGO} on residual stress at valley when $\lambda=0.3$ mm

TGO 界面波峰处的残余应力 S_{22} 均为拉应力,且随着 TGO 厚度增加而变大;图 4 (b) 显示随着氧化层厚度的增加,当 $h_{TGO}=0.007$ mm 时 TC-TGO 界面波峰处的残余应力从拉应力转变为压应力,且其拉应力随氧化层厚度的增大而减小,压应力的绝对值随氧化层厚度的增加而增大。因此,对于界面波峰处,氧化层厚度的变化不但对其残余应力的大小有影响,甚至还会改变其应力状态^[18-19]。由图 5 (a) 可知,该情况下 BC-TGO 界面波谷处的残余应力 S_{22} 均为压应力,其绝对值随 h_{TGO} 增加而增大;从图 5 (b) 可知,此情况下 TC-TGO 界面波谷处的 S_{22} 同为压应力,但其绝对值随氧化层厚度增加而减少。结合图 4 (a) 和图 5 (a) 可看出,氧化层厚度越小,BC-TGO 界面波谷和波峰处残余应力的绝对值越小,即减小氧化层厚度对 BC-TGO 界面波谷和波峰处结构稳定有益。但结合图 4 (b) 和图 5 (b) 可以看出氧化层厚度对 TC-TGO 界面波峰处残余应力影响较为复杂,需要更为深入地研究。此结果与孙戩等^[20] 所做的热循环下 TGO 生长对残余应力的影响结果相一致,也验证了此仿真模型计算结果的有效性。

图 6 和 7 分别给出了当 $\lambda=0.3$ mm 时,不同界面幅

值下氧化层厚度 h_{TGO} 对 BC-TGO、TC-TGO 界面残余应力分布的影响。从图 6 中可以看出,沿波谷到波峰输出的应力路径曲线均为平滑的曲线,无论 h_{TGO} 取何值,压应力到拉应力的转变点基本在同一个位置,且在同一应力幅值下,氧化层厚度 h_{TGO} 越大,残余应力的绝对值越大。由此可知,减小氧化层厚度对 BC-TGO 整个界面的结构稳定都非常有益。对比图 6 (a)~(c) 可以看出,随着界面幅值的增大,BC-TGO 界面残余应力随氧化层厚度增大而变化的规律较为稳定,不同之处在于残余应力零点的位置随着界面幅值的增加不断向波谷移动,因此界面形貌对于残余应力零点(应力状态的过渡点)有一定的影响,此影响有待进一步研究。从图 7 中可以看出,TC-TGO 界面残余应力受氧化层厚度变化的影响较大,在其波峰和波谷附近影响与图 4 和 5 所示一样。与 BC-TGO 界面不同的是,TC-TGO 界面残余应力状态的过渡点随氧化层厚度增加而向波谷移动,且界面幅值 A 越大,同幅值模型的过渡点越接近。另外,由图 7 (a) 可知, $A=0.02$ mm、 $h_{TGO}=0$ 时,在波峰取到拉应力极大值 161 MPa,是 $h_{TGO}=10$ μ m (40 MPa) 的 4.025 倍;而当 $A=0.03$ mm、0.04 mm 时,拉应力极大值分别为

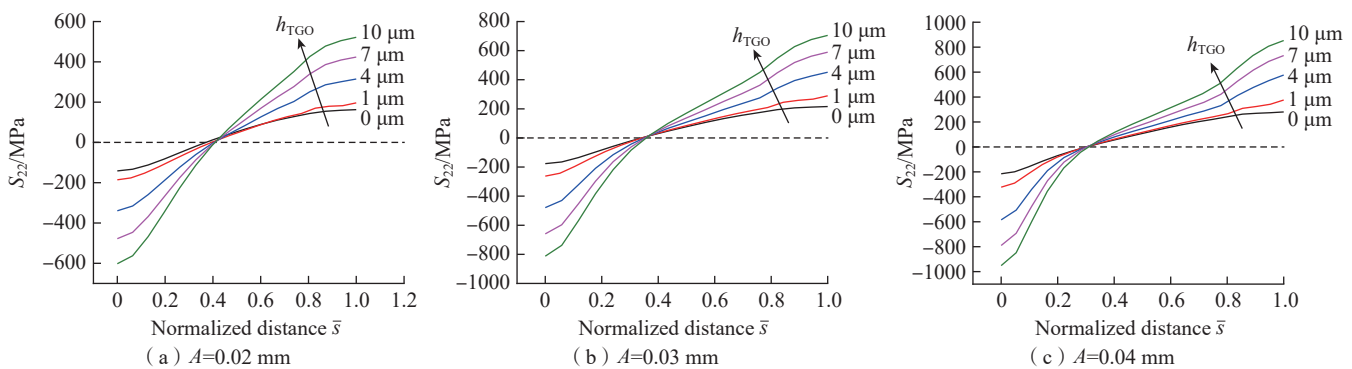


图 6 $\lambda=0.3$ mm 时, h_{TGO} 对 BC-TGO 界面残余应力影响

Fig.6 Effect of h_{TGO} on residual stress at BC-TGO interface when $\lambda=0.3$ mm

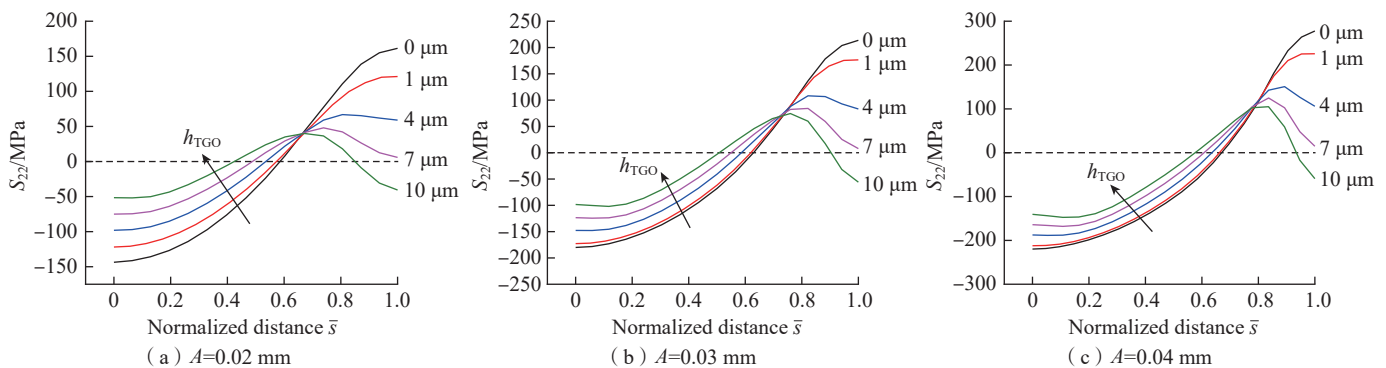


图 7 $\lambda=0.3$ mm 时, h_{TGO} 对 TC-TGO 界面残余应力影响

Fig.7 Effect of h_{TGO} on residual stress at TC-TGO interface when $\lambda=0.3$ mm

214 MPa、278 MPa,是 $h_{TGO}=10 \mu\text{m}$ (74 MPa、105 MPa) 的 2.892 倍、2.648 倍。由此可得,适当增加 h_{TGO} 可以减少 TC-TGO 界面的残余拉应力,且界面幅值越小效果越明显。从应力的角度分析,热障涂层系统开裂和剥落失效取决于各层应力和屈服强度,以材料屈服强度为判断标准,热障涂层失效会率先在 BC-TGO 的波峰和波谷处出现;而在 TC-TGO 界面上,小厚度条件下热障涂层失效同 BC-TGO 界面相同,会率先在波峰和波谷处出现,而大厚度条件下,热障涂层失效首先在 TC-TGO 界面波谷和靠近波峰中间过渡区出现。该结论与 Bäker 等^[21]得到的第 1 和第 2 涂层失效位置是一致的。

2.2 S_{dq} 对残余应力的影响

图 8 为 $h_{TGO}=0.007 \text{ mm}$ 时, S_{dq} 对界面残余应力的影响。可以看出,不同粗糙度下, TC-TGO 和 BC-TGO 界面残余应力 S_{22} 分布基本一致,且随着粗糙度的增加,其拉应力的极大值和压应力绝对值的极大值都增加。这是由于粗糙度低的模型在高温氧化过程中形成的 TGO 均匀致密,具有良好的抗氧化性,进而减小残余应力的产生^[22]。同时可以看到, TC-TGO 界面残余应力绝对值之差最大值均在波峰处取到,当 $S_{dq}=0.1\pi$ 时应力

S_{22} 在波峰处最大值相差 32 MPa,而当 S_{dq} 为 0.15π 和 0.2π 时,最大值相差 44 MPa 和 46 MPa,均不足系统自身应力极值的 10%。BC-TGO 界面残余应力绝对值之差最大值均在波谷处取到,由图 8 可知,不同粗糙度下其最大绝对值之差分别为 99 MPa、135 MPa 和 163 MPa,该值占系统自身应力绝对值之极值的比例为 27%、26%、25%。其占比同情况下 TC-TGO 要大。显而易见地,在同样的粗糙度条件下, BC-TGO 界面残余应力 S_{22} 的分布并不重合,越接近波峰和波谷处,同粗糙度各模型界面应力差距越大。因此,仅通过 S_{dq} 并不能准确地反映界面几何形貌对残余应力的影响,还需要进一步探究 S_{dq} 表达式中因子界面幅值 A 和界面波长 λ 的影响。

2.3 界面幅值对残余应力分布的影响

图 9 为 $\lambda=0.3 \text{ mm}$ 时,界面幅值 A 对 BC-TGO 界面、TC-TGO 界面波峰处残余应力的影响。从图 9 (a) 可以看出, BC-TGO 界面波峰处残余应力 S_{22} 均为拉应力,且无论氧化层厚度取何值,该残余应力均随界面幅值增大而增加。并且残余应力随幅值并非线性变化,而是大致呈现凸函数状,界面幅值越大,残余应力增长得越慢。另外当 h_{TGO} 从 $1 \mu\text{m}$ 变为 $4 \mu\text{m}$,无论 A 为 0.01 mm 还是

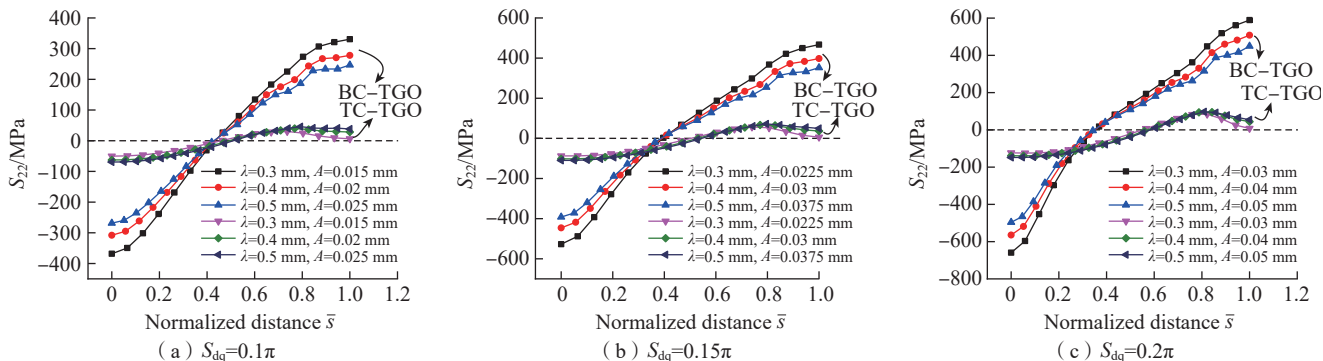


图 8 当 $h_{TGO}=0.007 \text{ mm}$ 时, S_{dq} 对界面残余应力的影响

Fig.8 Effect of S_{dq} on residual stress at interface when $h_{TGO}=0.007 \text{ mm}$

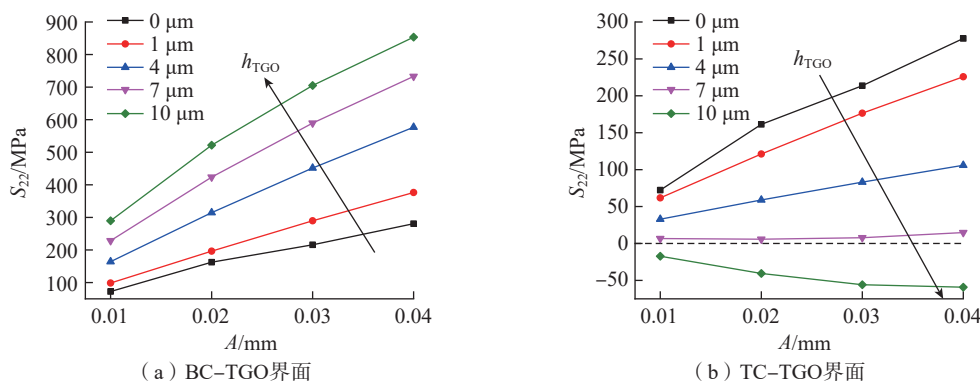


图 9 $\lambda=0.3 \text{ mm}$ 时,界面幅值 A 对波峰处残余应力影响

Fig.9 Effect of interface amplitude A on residual stress at crest of wave when $\lambda=0.3 \text{ mm}$

0.04 mm, BC-TGO 界面波峰处的残余应力 S_{22} 均未能增加 1 倍 (99 MPa→164 MPa, 376 MPa→577 MPa), 而当界面幅值 A 由 0.01 mm 变为 0.04 mm, 无论 h_{TGO} 取何值, 残余应力 S_{22} 均扩大为原来的 2.9 倍以上 (如 $h_{TGO}=1 \mu\text{m}$ 时, 增加了 3.8 倍; $h_{TGO}=4 \mu\text{m}$ 时, 增加了 3.5 倍)。由此可以推断, 在界面波长一定的条件下, 界面幅值对于 BC-TGO 界面波峰处残余应力的影响远大于氧化层厚度。从图 9 (b) 可以看出, 当 h_{TGO} 为 $0 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 、 $7 \mu\text{m}$ 时, TC-TGO 界面波峰处的残余应力 S_{22} 均为拉应力, 且随界面幅值 A 增加而增大; 当 $h_{TGO}=7 \mu\text{m}$ 时, 残余应力受幅值影响较小; 当 $h_{TGO}=10 \mu\text{m}$ 时, TC-TGO 界面波峰处的残余应力 S_{22} 均为压应力, 其绝对值随幅值 A 增加而增大, 且增速随幅值增大而减慢。因此, 控制氧化层界面幅值在较小值范围内可以在很大程度上保障 BC-TGO 界面的稳定性。

图 10 为 $\lambda=0.3 \text{ mm}$ 时界面幅值 A 对 BC-TGO 界面、TC-TGO 界面波谷处残余应力 S_{22} 的影响。可以看出, 波谷处的 S_{22} 均为压应力, 且其绝对值均随着界面幅值 A 增大而增加。由图 10 (a) 可见, BC-TGO 界面波谷处残余应力并非随幅值线性变化, 而是大致呈现凹函数

状, 界面幅值越大, 残余应力绝对值增长得越慢。由图 10 (b) 可见, TC-TGO 界面波谷处的残余应力基本为线性变化。同样验证了界面幅值越小越容易保障 BC-TGO 界面稳定性的结论。

图 11 为 $\lambda=0.3 \text{ mm}$, 界面幅值 A 对 BC-TGO 界面残余应力 S_{22} 的影响。可以看出, BC-TGO 界面波谷附近均为压应力而波峰附近均为拉应力, 并且在波峰处取到拉应力的极大值, 在波谷处取到压应力绝对值的极大值, 且其应力绝对值均随幅值 A 增加而增大。由图 11(c) 可知, 当氧化层较厚且幅值较大时, 拉应力 S_{22} 受幅值 A 变化影响较小。综合图 11 (a)~(c) 可以看出, 界面幅值越大, 氧化层越厚, 压应力 S_{22} 绝对值下降越快。

图 12 为 $\lambda=0.3 \text{ mm}$ 时界面幅值 A 对 TC-TGO 界面残余应力 S_{22} 的影响。可以看出, 当氧化层厚度取 $0\sim 7 \mu\text{m}$ 时, TC-TGO 界面波谷附近残余应力 S_{22} 均为压应力, 波峰附近均为拉应力。而当氧化层厚度为 $10 \mu\text{m}$ 时, 如图 12 (e) 所示, 最接近波峰的区域为压应力, 且其绝对值随幅值增大而增加, 界面残余应力 S_{22} 的应力状态由波谷到波峰依次为压应力→拉应力→压应力; 由图 12 (a) 和 (b) 可知, 当氧化层厚度较小时, 残余应力

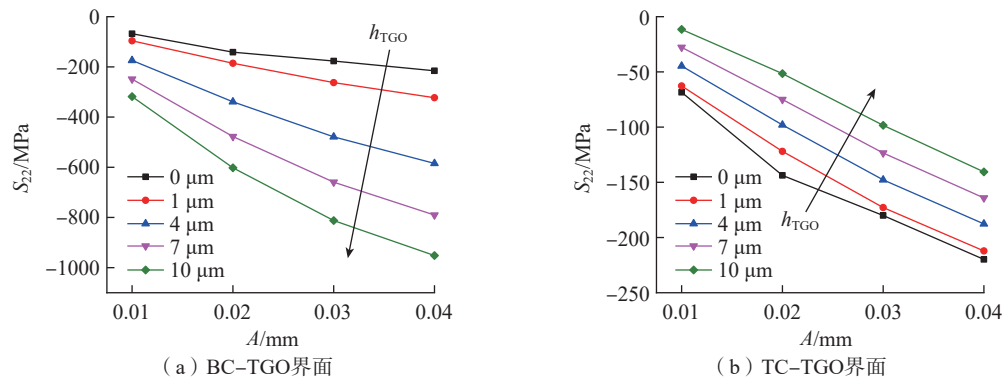


图 10 $\lambda=0.3 \text{ mm}$ 时, 界面幅值 A 对波谷处残余应力的影响
Fig.10 Effect of interface amplitude A on residual stress at valley when $\lambda=0.3 \text{ mm}$

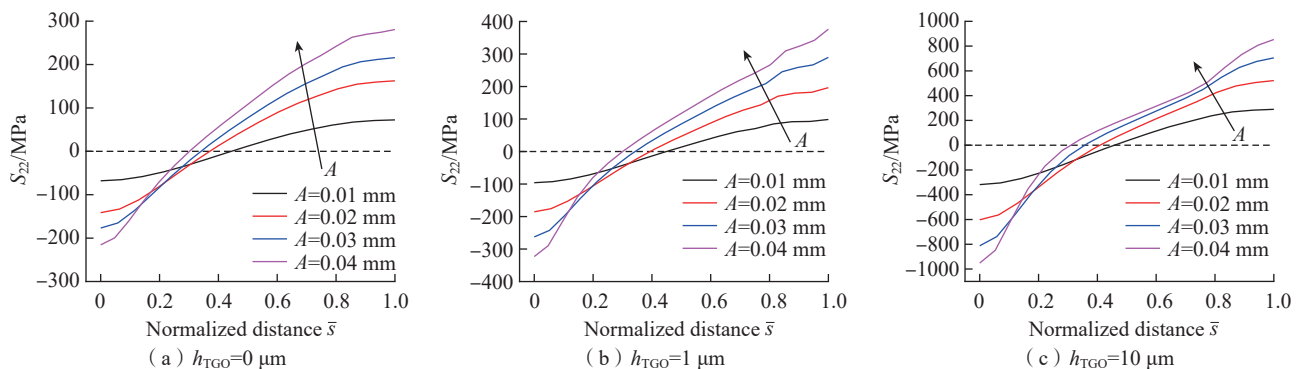


图 11 $\lambda=0.3 \text{ mm}$ 时, 界面幅值 A 对 BC-TGO 界面残余应力影响
Fig.11 Effect of interface amplitude A on residual stress at BC-TGO interface when $\lambda=0.3 \text{ mm}$

增长在中间区域逐渐变快,而到了波峰附近增长逐渐停滞,图 12 (c)和(d)可知,当氧化层厚度较大时,拉应力极大值在波峰附近区域取得,在极大值点右端,拉应力依然随界面幅值增大而增大,且幅值越大拉应力极大值点越靠近波峰;综合图 12 (a)~(d)可见, S_{22} 取值为 0 的点随界面幅值的增加逐渐远离波谷,且氧化层越厚,残余应力的零点越接近波谷;由图 12 (e)可知,波峰附近残余应力取值为 0 的点随着界面幅值的增加逐渐接近波峰。

因此,界面幅值越大在 BC-TGO 界面上的波峰和波谷位置越容易失效;在小厚度的 TC-TGO 界面上,界

面幅值越大,在波峰和波谷位置上失效越容易;在大厚度 TG-TGO 界面上的波谷和靠近波峰的中间过渡位置,界面幅值越大,越容易失效。此结果与氧化层厚度对热障涂层残余应力的影响结果一致,更加证明了此模型的可信度。同时,热障涂层幅值越大,对涂层的破坏力越大,该研究结果与黄孝庆^[23]研究热障涂层失效因素的结果相吻合。

2.4 界面波长对残余应力分布的影响

图 13 和 14 展示了 $A=0.04$ mm 时,界面波长 λ 对 BC-TGO、TC-TGO 界面残余应力 S_{22} 的影响。从图 13 可以看出, BC-TGO 界面波谷附近均为压应力而波峰

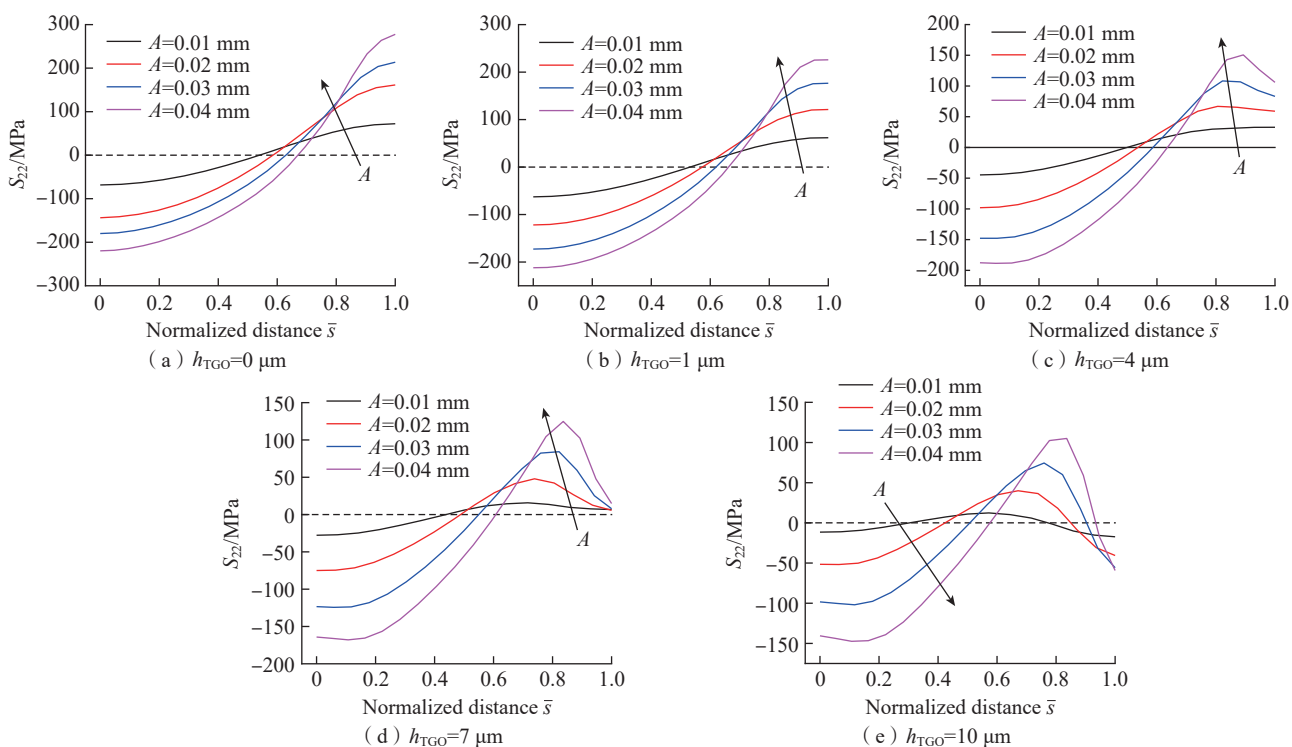


图 12 $\lambda=0.3$ mm 时,界面幅值 A 对 TC-TGO 界面残余应力的影响

Fig.12 Effect of interface amplitude A on residual stress at TC-TGO interface when $\lambda=0.3$ mm

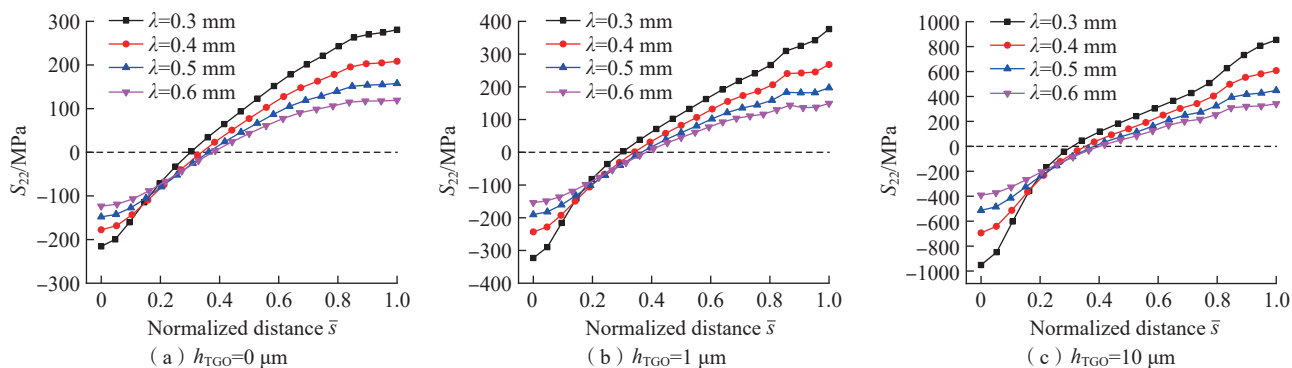


图 13 $A=0.04$ mm 时,界面波长 λ 对 BC-TGO 界面残余应力影响

Fig.13 Effect of interface wavelength λ on residual stress at BC-TGO interface when $A=0.04$ mm

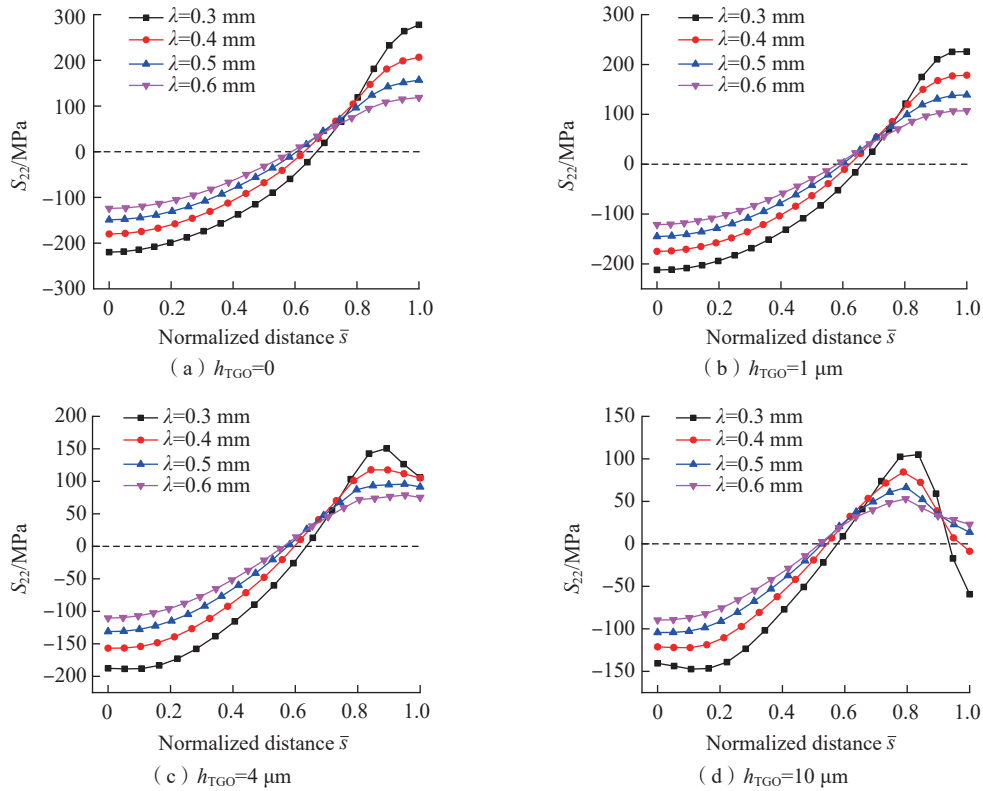


图 14 $A=0.04\text{ mm}$ 时, 界面波长 λ 对 TC-TGO 界面残余应力影响
 Fig.14 Effect of interface wavelength λ on residual stress at TC-TGO interface when $A=0.04\text{ mm}$

附近均为拉应力,并且在波峰处取到拉应力的极大值,在波谷处取到压应力绝对值的极大值,且其应力绝对值均随波长 λ 的增大而减小。综合图 13 (a)~(c) 可以看出,不论氧化层厚度如何改变,界面波长越大,其残余应力的绝对值越小。从图 13 (b) 和 (c) 可以看到,当 $\lambda=0.3\text{ mm}$ 时,在波峰和波谷处出现了明显的残余应力绝对值突增现象,这表示了小波长对热障涂层稳定性的极大破坏。

如图 14 所示,在小厚度条件下 (h_{TGO} 为 $0\sim 4\ \mu\text{m}$), TC-TGO 界面上残余应力在波谷处均为压应力而在波峰处均为拉应力,其残余应力的绝对值均在波峰和波谷处取到;在大厚度条件下 ($h_{\text{TGO}}=10\ \mu\text{m}$),界面残余应力 S_{22} 的应力状态由波谷到波峰依次为压应力→拉应力→压应力,且应力变化在这两个阶段都是先缓慢后加快,最后逐渐停滞,其残余应力的绝对值在波谷和靠近波峰的中间过渡区处。在同一厚度下界面波长越大,其残余应力的绝对值越小,该系统越稳定。同时还可以观察到,残余应力零点位置也会受到界面波长的影响,综合图 14 (a)~(c) 可知, S_{22} 取值为 0 的点随着界面波长的增加逐渐接近波谷,且氧化层越厚,残余应力的零点越接近波谷;由图 14 (d) 可知,波峰附近残余应力取值为 0 的点随着界面波长的增加逐渐接近波峰。

3 结论

(1) 氧化层的厚度变化既可以改变界面残余应力的大小,还会改变 TC-TGO 界面波峰处的应力状态。对于 BC-TGO 界面,界面失效主要发生在波谷和波峰上。氧化层越厚,涂层应力水平越高,且界面应力的零点氧化层厚度变化而改变。对于 TC-TGO 界面,界面失效主要发生在波谷和靠近波峰的中间过渡区。氧化层厚度对波峰及波峰附近区域影响十分复杂,波谷处的压应力绝对值随氧化层厚度的增加而减小。

(2) 在同一模型下,拉应力极值和压应力绝对值极值都随 S_{dq} 增大而增大。相同的 S_{dq} 下, TC-TGO 界面在不同模型下残余应力分布基本一致,但 BC-TGO 界面对于不同模型其残余应力分布有所不同,需进一步探究其界面几何形貌对残余应力的影响。

(3) BC-TGO 界面的残余拉应力随界面幅值增大而增大,残余压应力的绝对值同样随界面幅值增大而增加。而界面幅值对 TC-TGO 界面特别是波峰及波峰附近区域残余应力影响较为复杂,还需结合氧化层厚度一并讨论。另外,界面幅值也会影响界面残余应力零点的取值区域。

(4) 界面波长越大,残余应力的绝对值越小,越有

益于 BC-TGO 界面和 TC-TGO 界面的稳定。TC-TGO 界面残余应力受界面波长的影响较为复杂,且波长还会影响该界面拉应力极值点、残余应力零点的取值区域。

参考文献

- [1] TEIXEIRA V, ANDRITSCHKY M, FISCHER W, et al. Analysis of residual stresses in thermal barrier coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92-93: 209-216.
- [2] VABEN R, JARLIGO M O, STEINKE T, et al. Overview on advanced thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(4): 938-942.
- [3] 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.
- [4] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [5] EVANS A G, MUMM D R, HUTCHINSON J W, et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(5): 505-553.
- [6] 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.
- [7] 杨晓光, 耿瑞, 熊昌炳. 一种简便的隔热涂层残余应力分析方法及结果讨论[J]. 航空动力学报, 1997, 12(3): 239-242.
- YANG Xiaoguang, GENG Rui, XIONG Changbing. A simple method for calculation of residual stress in thermal barrier coating[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(3): 239-242.
- [8] BUSSO E P, WRIGHT L, EVANS H E, et al. A physics-based life prediction methodology for thermal barrier coating systems[J]. Acta Materialia, 2007, 55(5): 1491-1503.
- [9] 王志平, 韩志勇, 陈亚军, 等. 热障涂层的三维界面形貌与热应力关系[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 21-24, 114.
- WANG Zhiping, HAN Zhiyong, CHEN Yajun, et al. Relations between 3 dimension interface topography with thermal stress of thermal barrier coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 21-24, 114.
- [10] 王琳琳. 基于三维微观结构模型的热障涂层性能预测及失效机理分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- WANG Linlin. Performance prediction and failure mechanism analysis of thermal barrier coatings based on a 3D micro-structural model[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [11] 戴建伟, 牟仁德, 何利民, 等. 热循环条件下 NiCrAlYSi/YSZ 热障涂层层间损伤及元素扩散行为研究[J]. 真空, 2021, 58(3): 23-29.
- DAI Jianwei, MU Rende, HE Limin, et al. Behavior of interlayer damage and elements diffusion of NiCrAlYSi/YSZ thermal barrier coatings under thermal cyclic[J]. Vacuum, 2021, 58(3): 23-29.
- [12] 曹学强. 新型热障涂层材料研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1622-1635.
- CAO Xueqiang. Development on new thermal barrier coating materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(10): 1622-1635.
- [13] VASILE B S, BIRCA A C, SURDU V A, et al. Ceramic composite materials obtained by electron-beam physical vapor deposition used as thermal barriers in the aerospace industry[J]. Nanomaterials, 2020, 10(2): 370.
- [14] ZHU D M, MILLER R A. Thermal conductivity and elastic modulus evolution of thermal barrier coatings under high heat flux conditions[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2000, 9(2): 175-180.
- [15] 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.
- [16] SFAR K, AKTAA J, MUNZ D. Analysing the failure behaviour of thermal barrier coatings using the finite element method[M]//24th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: A: Ceramic Engineering and Science Proceedings. Hoboken, 2008: 203-211.
- [17] KERKHOFF G, VABEN R, STÖVER D. Numerically calculated thermal stresses in thermal barrier coatings on cylindrical substrates[J]. European Federation of Corrosion Publications, 1999, 27(25-26): 373-382.
- [18] WIDJAJA S, LIMARGA A M, YIP T H. Modeling of residual stresses in a plasma-sprayed zirconia/alumina functionally graded-thermal barrier coating[J]. Thin Solid Films, 2003, 434(1-2): 216-227.
- [19] KURODA S, CLYNE T W. The quenching stress in thermally sprayed coatings[J]. Thin Solid Films, 1991, 200(1): 49-66.
- [20] 孙骞, 徐颖强, 李万钟, 等. 热生长下热障涂层残余应力及失效分析[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 25-31.
- SUN Jian, XU Yingqiang, LI Wanzhong, et al. Residual stress and failure analysis of thermal barrier coatings with thermal growth[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 25-31.
- [21] BÄKER M, RÖSLER J, HEINZE G. A parametric study of the stress state of thermal barrier coatings Part II: Cooling stresses[J]. Acta Materialia, 2005, 53(2): 469-476.
- [22] 杨文慧, 牟仁德. 表面处理对热障涂层界面微结构的影响[J]. 航空制造技术, 2017, 60(8): 44-49.
- YANG Wenhui, MU Rende. Effect of surface treatment on interface morphology of thermal barrier coating[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(8): 44-49.
- [23] 黄孝庆. 热障涂层失效因素的数值模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- HUANG Xiaoqing. The numerical simulation research on failure factors of thermal barrier coatings[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

通讯作者: 于庆民, 教授, 研究方向为先进热防护的力学性能及失效机理、柔性电子器件的结构设计及转印制备方法和发动机热端结构强度与寿命等。

(责编 七七)