

TGO 形貌和厚度对热障涂层热循环应力的影响

王敏^{1*}, 刘星宇², 程道来¹, 袁建辉²

(1.上海电子信息职业技术学院, 上海 201400; 2.上海工程技术大学, 上海 201620)

摘要: **目的** 对热循环工况下双陶瓷 (LaMgAl₁₁O₁₉/YSZ) 热障涂层 TGO 界面形貌和厚度变化导致的涂层界面残余应力进行仿真分析, 为涂层的失效研究提供依据。**方法** 用 Abaqus 有限元软件模拟热障涂层不同热循环次数和位置的残余应力分布, 通过改变 TGO/黏结层交界处相应厚度的材料参数模拟 TGO 厚度的增长。分析 YSZ/TGO 不同热循环次数的残余应力与界面形貌的关系。研究 TGO/BC 界面上位置点随 TGO 厚度增长而变化的残余应力情况, 以及同一位置点在热循环过程中的残余应力变化规律。**结果** YSZ/TGO 界面在幅值 15 μm、波长 30 μm 的曲线段, 波峰经过 10 次热循环产生最大轴向、径向压应力, 分别为 87.2 MPa 和 358.5 MPa, 波谷在 110 次热循环后产生最大径向拉应力 201.4 MPa。TGO/BC 界面在幅值 15 μm、波长 30 μm 的曲线段, 波峰经过 10 次热循环出现最大轴向、径向压应力, 分别为 89.5 MPa 和 336.7 MPa, 经过 90 次热循环出现最大轴向残余拉应力 104.7 MPa。TGO/BC 界面最左侧点在 1 100 °C 保温阶段, 轴向和径向残余应力接近 0 MPa, 第 90 次热循环后轴向最大拉应力、压应力分别为 32.2 MPa 和 28.7 MPa。**结论** TGO 界面上振幅大波长短的曲线段, 在波峰和波谷位置易产生最大残余应力。径向残余压应力最大值随 TGO 厚度增加有变小趋势。通过控制 TGO 的形貌和厚度变化, 可以降低热障涂层的失效风险。

关键词: 热障涂层; TGO; 界面形貌; 厚度; 残余应力; 热循环

中图分类号: TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)06-0125-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.06.011

Effect of TGO Morphology and Thickness on Residual Stress of Thermal Barrier Coatings during Thermal Cycling

WANG Min^{1*}, LIU Xingyu², CHENG Daolai¹, YUAN Jianhui²

(1. Shanghai Technical Institute of Electronics & Information, Shanghai 201400, China;

2. Shanghai University of Engineering Sciences, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: The axial and radial residual stresses on the TGO/bonding coating interface and the TGO/YSZ interface of YSZ/LaMgAl₁₁O₁₉ dual-ceramic layers, caused by changes of the interface morphology and thickness of the TGO during thermal cycling, are simulated with Abaqus finite element software, so as to provide a basis for the failure study of the coatings.

Firstly, four spline curves with two wavelengths (30, 60 μm) and two amplitudes (7.5, 15 μm) are established to simulate the interface morphology between YSZ/TGO and TGO/BC layers. Then, the growth of TGO thickness is simulated by changing the material parameters of the corresponding thickness at the interface between the bonding layer and TGO under different

收稿日期: 2024-04-07; 修订日期: 2024-07-31

Received: 2024-04-07; Revised: 2024-07-31

基金项目: 中国博士后科学基金 (2021M691341)

Fund: The China Postdoctoral Science Foundation (2021M691341)

引文格式: 王敏, 刘星宇, 程道来, 等. TGO 形貌和厚度对热障涂层热循环应力的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(6): 125-133.

WANG Min, LIU Xingyu, CHENG Daolai, et al. Effect of TGO Morphology and Thickness on Residual Stress of Thermal Barrier Coatings during Thermal Cycling[J]. Surface Technology, 2025, 54(6): 125-133.

*通信作者 (Corresponding author)

cycles. The thickness of TGO is 1 μm at the beginning of thermal cycling, and it changes to 2.4 μm , 3.7, 4.5, 5.1, and 5.6 μm after 10, 30, 50, 70, and 90 thermal cycling, respectively. The temperature changes of points on the top surface of $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}/\text{YSZ}$, and YSZ/TGO interfaces under different cycles are tested. The relationship between axial/radial residual stresses and interface morphology of YSZ/TGO under different thermal cycles is analyzed. The axial/radial residual stress changes of points on the TGO/BC interface, which continuously change with the thickness of TGO, under different cycles, as well as the stress changes of the same position during the thermal cycling process, are also studied.

After 10 thermal cycles, the peak position of the curve segment with amplitude of 15 μm and a wavelength of 30 μm on the YSZ/TGO interface generates the maximum axial compressive stress of 87.2 MPa and the maximum radial compressive stress of 358.5 MPa. The trough position has the maximum radial tensile stress of 201.4 MPa after 110 thermal cycles. On the left side of the peak of the curve with amplitude of 7.5 μm and a wavelength of 30 μm , the maximum axial tensile stress of 90.3 MPa appears after 10 thermal cycles. At the peak position of the second curve segment on the TGO/BC interface, the maximum axial compressive stress of 89.5 MPa and the maximum radial compressive stress of 336.7 MPa appear after 10 thermal cycles. After 90 thermal cycles, the 5.6 μm -thick TGO has the maximum axial residual tensile stress of 104.7 MPa. The maximum radial tensile stress of 156.2 MPa occurs at the trough position of the first curve segment after 10 thermal cycles. The axial and radial residual stresses of the left-most point on the TGO/BC interface are close to 0 MPa during the holding stage at 1 100 $^{\circ}\text{C}$ temperature. Under the 90th thermal cycle, the maximum axial tensile stress is 32.2 MPa, and the compressive stress is 28.7 MPa.

The interface morphology and thickness changes of TGO have a significant effect on the residual stress of dual-ceramic coatings during thermal cycling. The peak and trough positions of curves with large amplitudes and short wavelengths are prone to generate the maximum tensile and compressive residual stresses. The maximum radial compressive stress tends to decrease with the increase of thermal cycles and TGO thickness. By controlling the interface morphology and thickness changes of TGO, the failure risk of thermal barrier coatings can be reduced.

KEY WORDS: thermal barrier coatings; TGO; interface morphology; thickness; residual stress; thermal cycling

目前航空发动机涡轮叶片工作时需要承受超过 1 600 $^{\circ}\text{C}$ 的高温^[1], 而单晶镍基高温合金已经不能满足此温度要求, 即使通过叶片冷却气膜技术使叶片的耐热温度得到一定的提高, 叶片距离工作温度要求仍有一定差距。通过在合金基底表面喷涂低热导率耐高温的陶瓷热障涂层 (Thermal Barrier Coatings, TCs), 可以将镍基合金的工作温度提高 100~300 $^{\circ}\text{C}$ ^[2-4]。YSZ 是常用的陶瓷涂层材料, 但 YSZ 的高温稳定性和隔热性相对较差, 为此稀土锆酸盐 $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (Re 为 La-Gd)、稀土铝酸盐 $\text{ReMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (Re 为 La、Sm、Nd 和 Gd) 等隔热和高温稳定性良好的陶瓷材料受到了关注, 但是这些新型材料的热膨胀系数与基底金属和黏结层差别较大, 容易导致热失配应力产生, 为此采用双陶瓷热障陶瓷涂层是一个可行的方案。 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 等锆酸盐的断裂韧性低, 高温热循环寿命短, Zhang 等^[5]研究发现镧系六铝酸盐 $\text{ReMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (Re=La、Nd、Sm 和 Gd) 的抗热震性能均高于 YSZ, $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ 热导率低于 YSZ, 因此 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ 和 YSZ 双陶瓷涂层体系具有重要的研究意义。为减小陶瓷层和基底材料之间的热膨胀系数较大差异所导致的热失配应力影响, 在陶瓷层和基底材料之间会先喷涂热膨胀系数介于基底材料和陶瓷层之间的黏结层 (Bonding Coating, BC)。黏结层中的铝离子等高温

氧化会产生热生长氧化物 (Thermally Grown Oxide, TGO), 由于 TGO 与陶瓷层和黏结层之间存在热失配应力, 研究发现当 TGO 的厚度达到 5~7 μm 时, 就会造成涂层脱落失效^[6-8]。为此, 众多学者对 TGO 导致的涂层体系内部应力进行了研究。

现有研究发现 TGO 的形貌和厚度对不同工况下热障涂层的内部应力具有极大影响^[9], 韩志勇等^[10]研究了 TGO 层在恒定高温下导致的涂层失效模式, 黄迪等^[11]通过试验方法研究了热障涂层在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 热循环下 TGO 增厚导致的热失配失效行为, 王力彬等^[12]采用波长不变幅值增大的正弦曲线来模拟界面粗糙度, 研究等离子喷涂热障涂层界面粗糙度对残余应力的影响, 但没有考虑 TGO 层的影响。Wei 等^[13]通过建立具有规则余弦 TC/BC 界面的有限元模型, 研究了蠕变、塑性变形和热生长氧化物 (TGO) 生长等材料参数对温度循环下应力状态的联合影响。Du 等^[14]研究了随机界面形貌的环境障涂层内部残余应力情况, Lim 等^[15]研究了材料具有不同的特性参数时 TGO 不均匀增长导致的热障涂层内部应力情况, 钟建兰等^[16]通过对热障涂层试样进行 CT 扫描, 构建了 TGO 的 3D 模型, 研究了材料在高温蠕变和多次热循环加载情况下, 涂层内的应力变化趋势。刘扬等^[17]采用理想的均匀正弦曲线模拟研究了 TGO 界面非均

匀增长时热障涂层应力的演化情况。热循环作为涡轮叶片的常用工况, 考虑到 TGO 界面真实形貌获取复杂, 理想的正余弦又不能全面描述 TGO 形貌特性对内应力的影响, 本文综合考虑材料的塑性、蠕变等特性, 提出采用连续不规则样条曲线的方法来模拟 TGO 层的界面形貌, 在降低模拟复杂度的情况下更接近涂层的真实形貌。同时考虑了 TGO 厚度随热循环次数的不均匀增长情况, 对热循环次数和界面不同形貌造成的残余热应力变化进行了分析。全面考虑了材料特性、TGO 厚度、界面形貌和热循环次数对残余应力数值和极值位置的影响, 有利于减少试验探索的时间和成本, 为热障涂层的失效研究提供方向。

1 仿真模型

1.1 仿真几何模型

利用商业有限元软件 Abaqus 建立热障涂层体系的仿真模型。TGO 形貌和厚度变化导致的应力变化主要的影响区域是黏结层和陶瓷层, 所以为简化模型, 仿真过程不考虑基体材料。热障涂层有限元模型从上到下依次为 LaMgAl₁₁O₁₉、YSZ (8% (质量分数) Y₂O₃-ZrO₂) 陶瓷层、TGO 层和 NiCoCrAlY 黏结层。假设涂层制备过程产生的 TGO 层厚度为 1 μm, 黏结层的厚度是 135 μm, YSZ 和 LaMgAl₁₁O₁₉ 双陶瓷层厚度均是 150 μm。

假设 YSZ 和 LaMgAl₁₁O₁₉ 双陶瓷层的界面光滑, BC 层与 TGO 层、TGO 层与 YSZ 陶瓷层的界面均采用幅值和波长变化的样条曲线来表示, 在一个变化周期内存在 4 段波长和幅值不同的样条曲线, 每个变化周期内的最大幅值和波长分别取 15 μm 和 60 μm, 各段曲线的幅值波长情况如表 1 所示。界面曲线在一个周期内的总波长为 180 μm, 为简化计算, 将模型简化为二维轴对称平面模型, 且只模拟一个曲线变化周

期, 如图 1a 所示。模型采用 CPE4T 网格, 对 TGO 及界面位置网格细化以保证足够的计算精度, 而远离界面的区域网格逐渐增大以降低计算量, 网格划分如图 1b 所示。

表 1 BC/TGO 以及 TGO/YSZ 界面曲线幅值波长
Tab.1 Amplitude and wavelength of BC/TGO and TGO/YSZ interfaces

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4
Amplitude/μm	15	15	7.5	7.5
Wavelength/μm	60	30	30	60

1.2 模型材料参数

在仿真模型中, 双陶瓷层、黏结层和 TGO 层的材料热物理性能参数如表 2 所示, TGO 在低温下的屈服强度会比高温下大得多, 仿真过程假设 TGO 和黏结层的蠕变只在恒定的高温下才发生, 遵循公式 (1) 所示的幂次法则^[18]。黏结层的塑性和蠕变参数及 TGO 层蠕变参数如表 3 所示。

$$\varepsilon_{cr} = A\sigma^n \quad (1)$$

式中: ε_{cr} 为蠕变应变; A 和 n 是与材料相关的系数; σ 为应力。

1.3 模型载荷与边界条件

由于模型的轴对称特性, 将模型的左侧边界设置为 X 轴对称, 同时约束住底面的轴向位移。环境温度为 20 °C, 对流换热系数为 100 W/(m²·K), 假设样件在初始状态不存在内应力, 对涂层上表面加载周期性的热循环温度边界条件, 在 1 个热循环周期内, 上表面温度首先在 5 min 内由 20 °C 升温到 1 100 °C, 保温 50 min, 再在 5 min 内由 1 100 °C 降到 20 °C, 即每小时完成 1 次热循环。将包含指定热循环周期期的温度载荷曲线作为温度边界条件的幅值, 并施加到陶

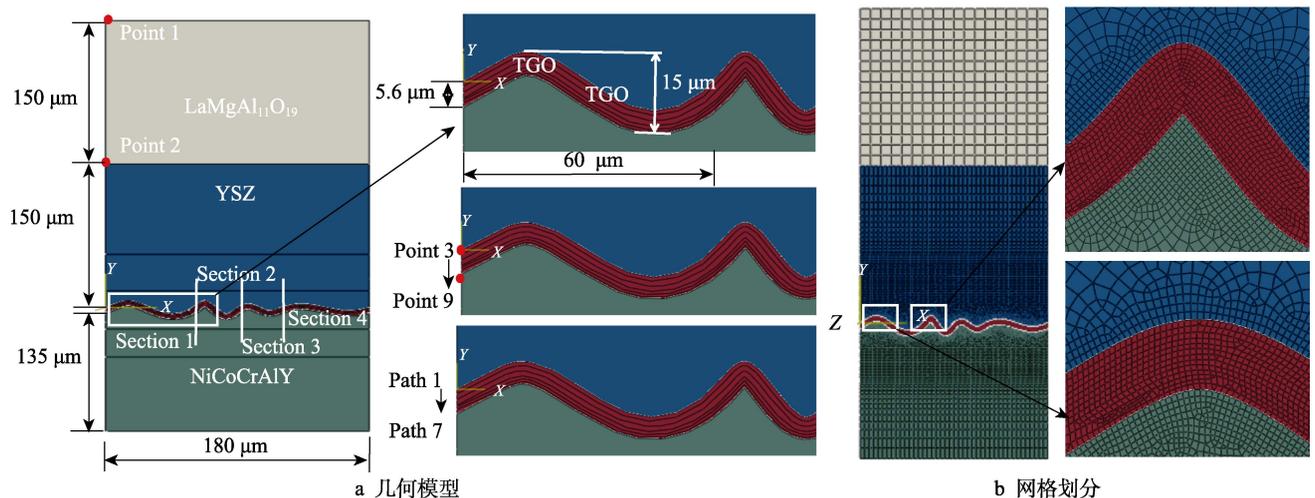


图 1 有限元模型

Fig.1 Model of finite element analysis: a) geometric model; b) mesh of model

表 2 陶瓷层、TGO 和黏结层的热物理性能参数^[19]
Tab.2 Thermal physical properties of TGO, BC and TCs^[19]

Material	Temperature/°C	Elastic Modulus/GPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion/ (10 ⁻⁵ °C ⁻¹)	Density/ (kg·m ⁻³)	Specific heat/ (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
LaMgAl ₁₁ O ₁₉	20	28.83	0.23	0.83	3 321	578.4	1.53
	200	25.47	—	0.95	—	805.4	1.18
	400	22.11	—	1.05	—	913.2	0.82
	600	18.75	—	1.10	—	1 007.9	0.65
	800	15.37	—	1.15	—	1 055.3	0.52
	1 000	12.01	—	1.20	—	1 089.6	0.41
	1 200	8.65	—	1.30	—	1 094.5	0.32
YSZ	20	48	0.1	1.04	5 280	450	1.80
	200	47	—	1.05	—	491	1.76
	500	43	—	1.07	—	532	1.75
	700	39	—	1.08	—	573	1.72
	1 100	25	—	1.09	—	615	1.69
	1 200	22	—	1.10	—	656	1.67
TGO	20	400	0.27	0.8	3 978	1 000	10
	200	390	—	0.82	—	—	7.8
	400	380	—	0.84	—	—	6.0
	1 000	325	—	0.93	—	—	4.4
NiCoCrAlY	25	225	0.30	1.20	7 320	501	4.30
	400	186	—	1.39	—	592	6.40
	600	166	—	1.48	—	670	8.00
	800	147	—	1.55	—	781	10.20

表 3 塑性和蠕变参数^[20-23]
Tab.3 Plastic and creep parameters^[20-23]

Material	Temperature/ °C	Stress/ MPa	Plastic strain	A/(10 ⁻¹¹ MPa ⁻ⁿ ·s ⁻¹)	n
NiCoCrAlY	25	1 000	0	—	—
	400	2 500	0.23	—	—
	600	2 200	0.3	—	—
	800	375	0.022	—	—
	900	60	0.02	—	—
	1 000	19	0.01	—	—
	1 100	—	—	1.35	4
TGO	1 100	—	—	5.029 9	2

瓷层的上表面,通过修改不同分析步中的温度曲线实现分析步热循环数的变化,设置多个分析步使热循环累计重复 110 次,采用同样的方法对黏结层下表面施加热循环载荷,最高温度为 850 °C,温度载荷曲线如图 2 所示。

1.4 TGO 层厚度变化的模拟

研究发现 TGO 层的厚度增长满足公式 (2) 所示的抛物线增长规律^[10,24-25],随着热循环次数的增加,TGO 的厚度增长。

$$\delta = k_p t^n \tag{2}$$

式中: δ 为 TGO 厚度; k_p 为氧化速度常数; t 为氧化循环数; n 为常数。

依据公式 (2) 可知,循环次数为 10、30、50、70、90 时的 TGO 厚度分别近似增长到 2.4、3.7、4.5、5.1、5.6 μm 。路径 1~2 分别定义为热障涂层制备过程形成的 1 μm 厚度的 TGO 与陶瓷层、TGO 与 BC 的界面,路径 3~7 分别是经过 10、30、50、70、90 次热循环后形成的 TGO 与 BC 的界面(见图 1a)。本研究通过定义 Abaqus 的场变量,随着热循环次数的增加,将黏结层中相应厚度的 BC 层材料特性逐渐转变为 TGO 的材料特性,以此来模拟 TGO 的厚度增长。

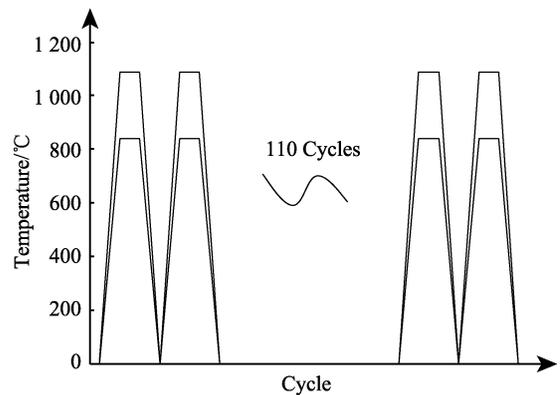


图 2 温度载荷曲线
Fig.2 Temperature and load curve

2 结果分析

2.1 界面不同位置处的温度分析

界面上各节点在不同次数的重复热循环下温度曲线类似, 1~10 次热循环过程的节点温度变化曲线如图 3a 所示。LaMgAl₁₁O₁₉ 陶瓷层顶部最左侧的点为点 1 (见图 1a), 最高温度为 1 100 °C, YSZ 陶瓷层与 LaMgAl₁₁O₁₉ 界面最左侧点 2 的最高温度为 900.7 °C, 表明 LaMgAl₁₁O₁₉ 达到 200 °C 左右的隔热效果, 而 TGO 与 YSZ 界面最左侧点 3 的最高温度为 855.9 °C, YSZ 达到 40~50 °C 的降温效果, 这与以往的研究结果相符^[26-27], 也验证了仿真模型的正确性。

在 YSZ/TGO 界面处, 经历了不同热循环次数后

的温度在 20.043~20.047 °C 波动。界面处的温度随界面形状变化而变化, 具有与界面形貌相同的变化趋势 (见图 3b)。随着热循环次数增加, 温度略有下降, 这主要是由于 TGO 的热导率随温度升高而降低, 且在高温下 TGO 的热导率低于黏结层, 随着循环次数增加 TGO 的厚度增大, TGO 和黏结层的导热性变差, 黏结层底部 850 °C 的温度更难传导到 YSZ 和 TGO 的界面处。

2.2 YSZ 与 TGO 界面处的应力分析

经历 10、30、50、70、90、110 次热循环后, YSZ 和 TGO 的界面上, 沿路径 1 轴向残余应力 S22 的变化情况如图 4a 所示。对比 TGO/YSZ 界面的形貌与 S22 的变化趋势, 可以发现 S22 与界面形貌具有极

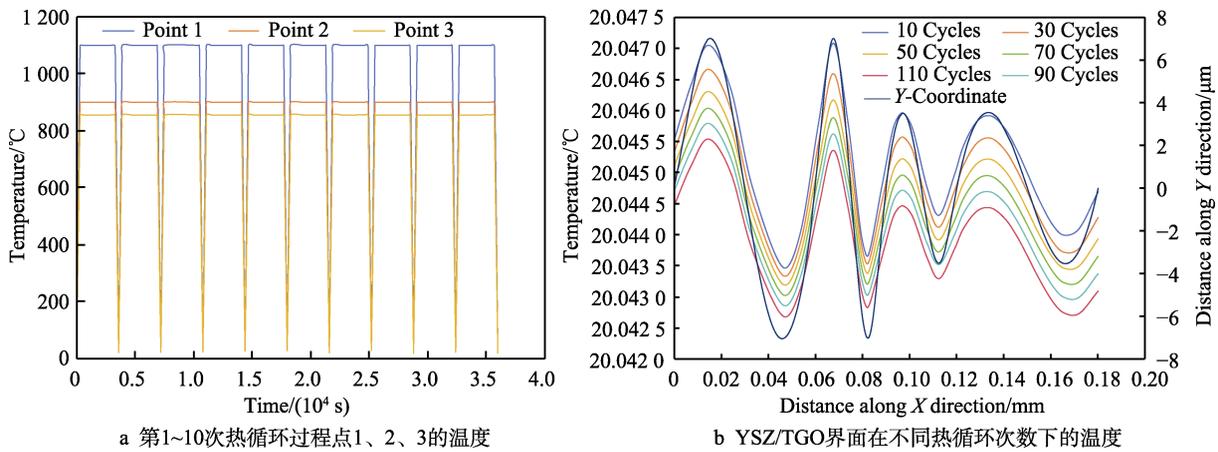


图 3 界面温度

Fig.3 Temperature of interface: a) temperature of point 1, 2, 3 under 1-10 thermal cycles; b) temperature of YSZ/TGO interface under different thermal cycles

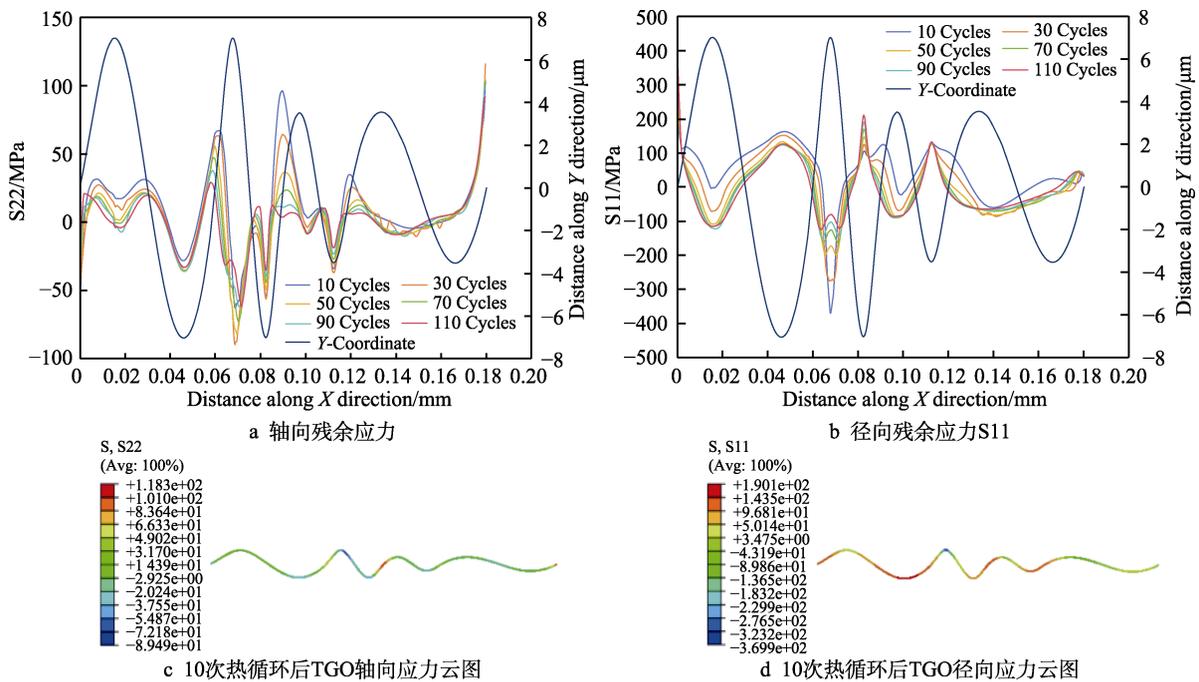


图 4 YSZ 与 TGO 界面的残余应力

Fig.4 Residual stress of YSZ/TGO interface: a) axial residual stress S22; b) radial residual stress S11; c) contour of TGO axial residual stress after 10 cycles; d) contour of TGO radial residual stress after 10 cycles

大的相关性，在 TGO 界面处于波谷位置时，S22 为压应力，且压应力出现极值的位置与波谷的位置相同，波形幅值越大，波长越短，压应力越大，界面的第二段曲线幅值为 15 μm ，波长为 30 μm ，在界面 4 段曲线的波谷中，具有最大压应力 48.6 MPa。在 TGO 界面的波峰位置，轴向应力曲线 S22 处在应力曲线的波谷位置，应力值的大小同样受到界面形貌的影响，波长越短幅值越大则应力越大，波长越长幅值越小则应力越小，最大应力出现在界面第二段曲线的波峰位置，热循环过程的压应力最大值为 87.2 MPa，为压应力。但是在界面波峰两侧靠近波峰的位置，会出现应力曲线的极点，该极点的数值同样受界面幅值和波长的影响，波长越小，数值越大，振幅越大，数值越小，且界面波峰左侧的极值要比波峰右侧的极值更大，不考虑有限元软件设定导致的模型右侧边界大应力值点，在第三段界面曲线波峰左侧出现了最大应力极值点 90.3 MPa，为拉应力（见图 4c）。这主要是由于 YSZ 是线弹性材料，而 TGO 具有塑性特性，在热循环作用下受热膨胀，产生塑性变形受到挤压，越靠近界面的波峰或波谷位置，波峰越大，波长越短，挤压越强烈，因此受到的压应力也越大。而在波峰的两侧，材料由于受到向波峰处挤压的力，内部反而呈现出受拉的趋势。同时，随着热循环次数的增加，TGO 界面上出现拉应力减小，压应力增大的趋势，这主要是由于 TGO 层随热循环次数增多，蠕变量增大，界面

上受到 YSZ 的挤压所致。

在 YSZ 和 TGO 的界面上，沿路径 1 的径向残余应力 S11 的变化情况如图 4b 所示，当界面曲线处于波峰位置时，S11 出现压应力极值，当界面曲线处于波谷位置时，S11 出现拉应力极值。界面曲线的波长越短，幅值越大，则残余拉压应力的数值越大。最大压应力 358.5 MPa 出现在 10 次热循环后界面曲线第二段的波峰位置，而最大拉应力 201.4 MPa 则出现在 110 次热循环后界面曲线第二段的波谷位置。经过 10 次热循环后的 TGO 径向应力云图如图 4d 所示。TGO 材料的蠕变变形导致了不同热循环次数下应力值的差异。

2.3 TGO 与 BC 界面的应力分析

随着热循环次数的增加，TGO 的厚度增加，经过 10、30、50、70、90、110 次热循环后，TGO 与 BC 界面处于不同的位置。经过 10 次热循环后，TGO 与 BC 层的界面是路径 3，经过 30 次后，界面是路径 4，依次类推，经过 90 次热循环后的界面为路径 7，各个路径的位置如图 1a 所示。界面上的轴向残余应力值如图 5a 所示，经过 10 次热循环后第二段和第三段界面曲线的过渡处产生最大轴向残余拉应力为 93.6 MPa，最大轴向残余压应力为 89.5 MPa，位于第二段界面曲线的波峰处。第二段界面曲线具有最大的幅值和最小的波长，第三段的波长与第二段相同，随

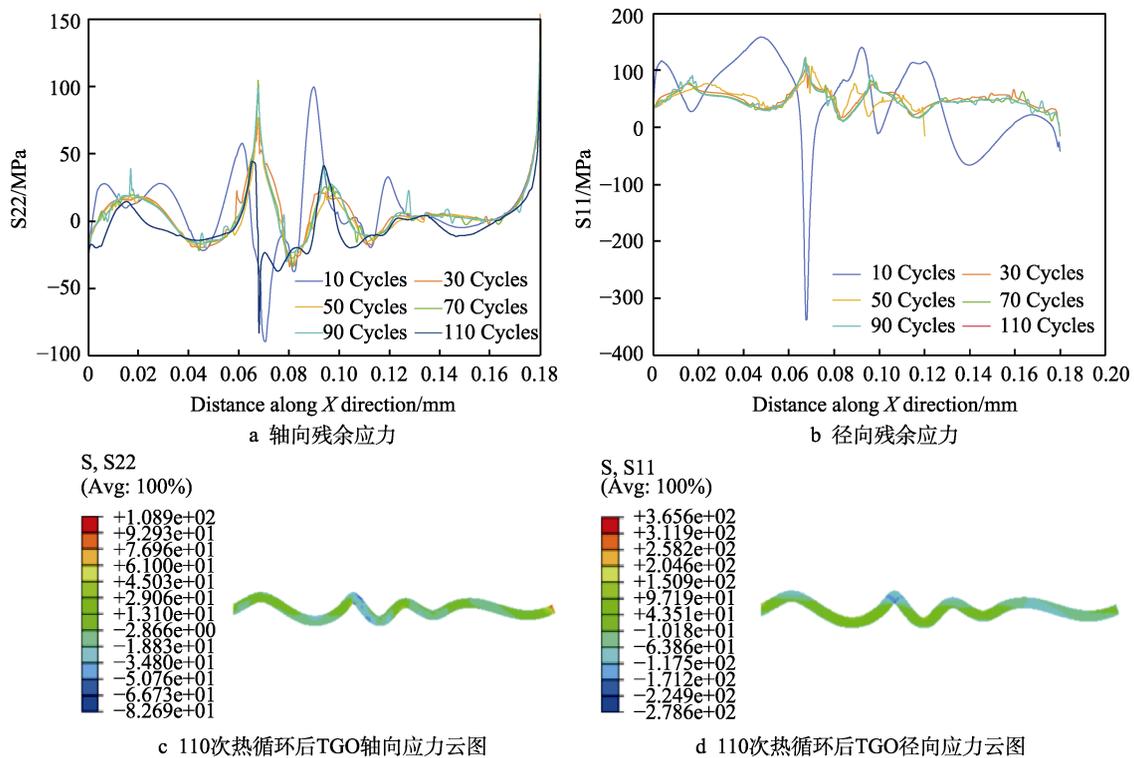


图 5 TGO/BC 界面上的残余应力

Fig.5 Residual stress of TGO/BC interface: a) axial residual stress; b) radial residual stress; c) contour of TGO axial residual stress after 110 cycles; d) contour of TGO radial residual stress after 110 cycles

着波长和幅值的变化, TGO 和黏结层界面的 S22 不断变化, 当热循环次数在 30~90 次时, S22 曲线与界面形貌曲线具有相似的形状, 形貌波峰处具有最大的拉应力, 波谷处具有最大的压应力。但随着热循环次数的增加, TGO 的厚度增长速度变慢, 因此循环次数大于 30 次后, S22 的数值变化相对较小, 最大拉应力为 104.7 MPa, 出现在第二段界面曲线的波峰处, 而最大压应力为 82.7 MPa (见图 5c), 出现在 110 次循环后第二段界面的波谷处, 此时该位置界面已经有明显的尖角, 这也是此处出现大压应力的原因。

不同热循环次数下, TGO/BC 界面上 TGO 的径向残余应力曲线如图 5b 所示, 当热循环次数大于 30 次后, S11 的变化幅度较小, 残余应力均为拉应力。当界面形貌处于波峰时, 残余应力具有最大值, 当界面形貌处于波谷时, 残余应力具有最小值。形貌曲线的幅值越大, 波长越短, 应力值越大, 且波长的影响要大于幅值的影响。循环次数为 10 次时, 界面形貌的波峰处出现应力的极值, 但界面形貌为波峰时, 应力处于波谷位置, 最大压应力 336.7 MPa 出现在 10 次热循环后第二段曲线的波峰处, 最大拉应力 156.2 MPa 出现在第一段曲线的波谷处。这主要是由于随着循环次数的增加, 材料发生蠕变和塑性变形后内部残余应力变低。

2.4 TGO 上与 BC 交界处的点在热循环过程中的应力分析

经过 10 次热循环后, TGO 与 BC 的界面路径 3 上最左侧点是点 5, 经过 30 次热循环后, TGO 与 BC 的界面路径 4 上最左侧点为点 6, 依次类推, 经过 90 次热循环后, TGO 与 BC 界面最左侧点为点 9, 各点位置如图 1a 所示。点 1 到点 9 的轴向应力随时间变化的曲线如图 6a 所示, 高温时各点处的应力随循环

次数的增加均呈现增加趋势。随着循环次数的增加, TGO 的厚度增大, TGO 与 BC 交界的位置从点 5 向下转移, 直至点 9, 在位置转化过程中, 界面最左侧点的轴向残余拉应力最大值变化较小, 在 32~36 MPa 波动。90 次热循环后, TGO 界面完全形成, 89~91 次热循环下的轴向残余应力见图 6b, 在第 90 个热循环过程的升温阶段, TGO/BC 界面上的点 9 轴向拉应力数值先增大到最大值 32.2 MPa, 随后减小直至 0 MPa 左右。热循环温度升高到 1 100 °C 之后的高温保持阶段, 轴向应力值保持在 0 MPa 附近。降温开始后, 应力迅速变为压应力, 当一个热循环结束后, 此时残余的压应力达到极大值 28.7 MPa。而由于 TGO 厚度增加, 此时的点 4 至点 8 位置, 由于已经转变为 TGO 层, 内部残余轴向应力随与 BC 层的距离变大而变大, 但是在热循环下的变化趋势与点 9 类似。

TGO 与 BC 界面上的径向残余应力随热循环时间的变化曲线如图 7a 所示。随着热循环次数的增大, 点 4 和点 5 在每个热循环下的最大拉压应力均增大, 从点 6 开始, 随着热循环次数的增大, 最大压应力变大, 拉应力变化较小。每次热循环过程中点 4 均会出现最大的拉压应力值, 而点 9 的拉压应力值则最小, 这主要是由于随着热循环次数的增加, TGO 的厚度增大, 点 4 位于 TGO 的内部且是所选取的点 4 到点 9 中, 最靠近 YSZ 涂层和远离 BC 层的点, TGO 的内部应力大于 BC 层的内部应力, 所以会具有较大的残余应力。同样选取 89~91 次热循环时的各点应力值进行分析 (见图 7b), 发现当温度保持在高温 1 100 °C 时, 径向残余应力较小, 而在升温 and 降温阶段, 径向残余应力有较大波动, 升温阶段径向拉应力先升后降, 快速转变到 0 MPa 左右, 降温阶段残余应力也快速变化。越靠近 BC 层位置的点, 这种应力的变化越小。

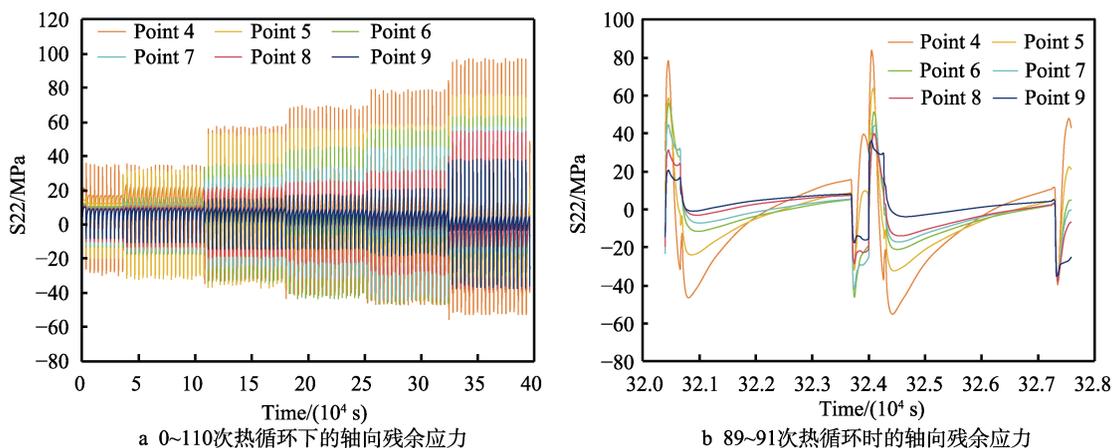


图 6 TGO/BC 交界处点的轴向残余应力 S22

Fig.6 Axial residual stress S22 of points on TGO/BC interface: a) S22 of 0-110 cycles; b) S22 of 89-91 cycles

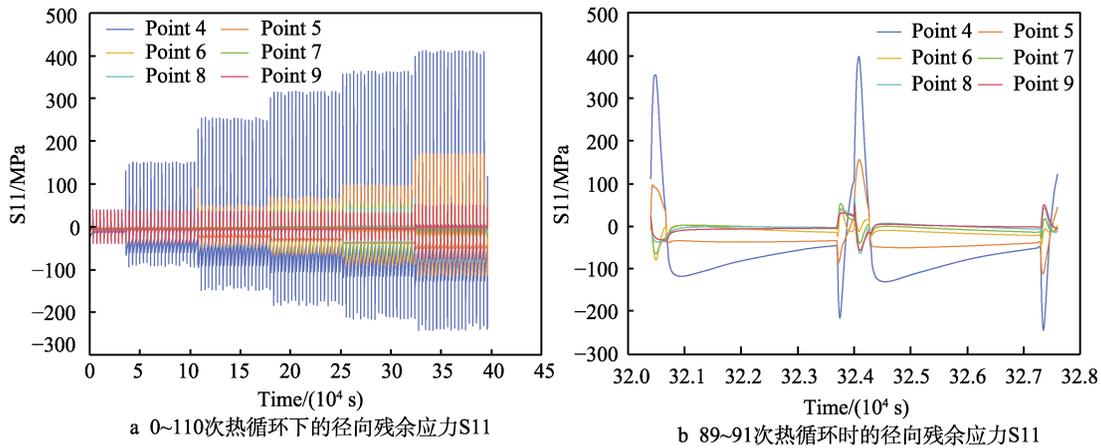


图7 TGO/BC 交界处点的径向残余应力
Fig.7 Radial residual stress S11 of TGO/BC interface: a) S11 of 0-110 cycles; b) S11 of 89-91 cycles

3 结论

1) YSZ/TGO 界面上 TGO 的波峰和波谷位置均会出现轴向和径向残余应力的极小值点, 界面形貌波形的幅值越大波长越短, 拉压应力的数值越大。靠近界面形貌波峰的左右两侧会出现轴向应力的极大值点, 而波谷处则会出现径向应力的极大值点。

2) TGO/BC 界面形貌曲线的幅值越大波长越短, 轴向和径向的残余应力数值越大, 且波长的影响要大于幅值的影响。TGO 增长到一定厚度后, 热循环下轴向和径向残余应力变化较小。

3) TGO 与 BC 界面上点的轴向应力最大值, 随厚度变化不大。在每个热循环冲击下, 升温阶段出现最大拉应力, 降温阶段出现最大压应力。径向压应力随厚度增加, 有变小的趋势。

参考文献:

- [1] HU D Y, LV Z Z, LIU H Y, et al. Analysis of Interfacial Crack Initiation Mechanism of Thermal Barrier Coatings in Isothermal Oxidation Process Based on Interfacial Stress State[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(7): 10287-10297.
- [2] PAN Y Y, HAN D J, HUANG S S, et al. Thermal Insulation Performance and Thermal Shock Resistance of Plasma-Sprayed $\text{TiAlCrY/Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ Thermal Barrier Coating on Γ -TiAl Alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 468: 129715.
- [3] CHEN H F, LIU Y, GAO Y F, et al. Design, Preparation, and Characterization of Graded YSZ/La₂Zr₂O₇ Thermal Barrier Coatings[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 93: 1732-1740.
- [4] 贾宜委, 王鹤峰, 王宇迪, 等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究现状[J]. *表面技术*, 2023, 52(11): 139-154.
JIA Y W, WANG H F, WANG Y D, et al. Research Status

on Thermal Barrier Coating of Aircraft Engine Turbine Blade[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(11): 139-154.

- [5] ZHANG J F, ZHONG X H, CHENG Y L, et al. Thermal-Shock Resistance of $\text{LnMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (Ln=La, Nd, Sm, Gd) with Magnetoplumbite Structure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 482(1/2): 376-381.
- [6] 安国升, 周兰, 钟云, 等. 氧化铝封孔对大气等离子喷涂热障涂层抗高温氧化性能的影响[J]. *有色金属工程*, 2023, 13(12): 10-17.
AN G S, ZHOU L, ZHONG Y, et al. Effect of Al_2O_3 Sealing on High Temperature Oxidation Resistance of Thermal Barrier Coating by Atmospheric Plasma Spraying [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2023, 13(12): 10-17.
- [7] 申强, 赵志勇, 王芳, 等. 基于真实界面形貌的热障涂层氧化的数值模拟[J/OL]. *热加工工艺*(2024-04-01) [2024-04-07]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20222307>.
SHEN Q, ZHAO Z Y, WANG F, et al. Numerical Simulation on Oxidation of Thermal Barrier Coatings Based on Real Interface Morphology[J]. *Hot Working Technology*(2024-04-01) [2024-04-07]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20222307>.
- [8] LIM L Y, MEGUID S A. Temperature Dependent Dynamic Growth of Thermally Grown Oxide in Thermal Barrier Coatings[J]. *Materials & Design*, 2019, 164: 107543.
- [9] DENG C, ZHENG R G, WANG L, et al. Construction of Three-Dimensional Dynamic Growth TGO (Thermally Grown Oxide) Model and Stress Simulation of 8YSZ Thermal Barrier Coating[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(4): 5327-5337.
- [10] 韩志勇, 张涛, 郭万森, 等. 服役环境对涡轮导向叶片热障涂层失效模式的影响[J]. *表面技术*, 2023, 52(4): 261-271.
HAN Z Y, ZHANG T, GUO W S, et al. Effects of Service Environment on Failure Modes of Thermal Barrier Coatings on Turbine Guide Blades[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(4): 261-271.
- [11] 黄迪, 牛云松, 李帅, 等. 四方相氧化钇稳定氧化锆热

- 障涂层的热循环和热冲击性能及其失效机理[J/OL]. 材料研究学报(2023-12-15) [2024-04-07]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1328.TG.20231215.1020.002>.
- HUANG D, NIU Y S, LI S, et al. Thermal Cycling and Flame Thermal Shocking Failure Mechanism of Tetragonal Yttria-Stabilized Zirconia TBCs Prepared on High Temperature Alloys by Suspension Plasma Spraying[J]. Chinese Journal of Materials Research(2023-12-15) [2024-04-07]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1328.TG.20231215.1020.002>.
- [12] 王力彬, 于庆民. 界面粗糙度对热障涂层残余应力及裂纹演化的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3095-3099.
- WANG L B, YU Q M. Effects of Interface Roughness on Residual Stress Distribution and Crack Nucleation and Propagation in Thermal Barrier Coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3095-3099.
- [13] WEI Z Y, CAI H N, 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.
- [14] DU J K, YU G Q, JIA Y F, et al. Numerical Study of Residual Stresses in Environmental Barrier Coatings with Random Rough Geometry Interfaces[J]. Ceramics International, 2023, 49(4): 5748-5759.
- [15] LIM L Y, MEGUID S A. Thermomechanical Simulations of the Transient Coupled Effect of Thermal Cycling and Oxidation on Residual Stresses in Thermal Barrier Coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(3): 3133-3147.
- [16] 钟建兰, 敖波, 古玉祺. 基于真实 TGO 三维结构的热障涂层热应力分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2100-2106.
- ZHONG J L, AO B, GU Y Q. Thermal Stress Analysis on Thermal Barrier Coatings Based on Real Three-Dimensional Structure of Thermally Grown Oxide[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(7): 2100-2106.
- [17] 刘扬, 全昌彪, 杨晓光, 等. TGO 非均匀增长对热障涂层应力演化和破坏机理的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(6): 1140-1148.
- LIU Y, QUAN C B, YANG X G, et al. Effect of Non-Uniform Growth of TGO on Stress Development and Failure Mechanism of Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6): 1140-1148.
- [18] 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.
- [19] 胡帅, 冯永军, 李伟汉, 等. LaMgAl₁₁O₁₉ 热障涂层退火过程残余热应力分布及涂层热稳定性的数值模拟[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 275-282.
- HU S, FENG Y J, LI W H, et al. Numerical Simulation of Residual Thermal Stress Distribution and Thermal Stability of La Mg Al₁₁O₁₉ Thermal Barrier Coating during Annealing[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 275-282.
- [20] 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.
- [21] 李佐君. 热障涂层应力分布及裂纹行为分析[D]. 福州: 福州大学, 2021: 17.
- LI Z J. Stress Distribution and Crack Behavior Analysis of Thermal Barrier Coating[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021: 17.
- [22] 谢晓东. 热机械疲劳条件下热障涂层中 TGO 皱褶的三维模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- XIE X D. Three-dimensional Simulation of TGO wrinkles in Thermal Barrier Coatings under Thermomechanical Fatigue Condition[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [23] RAJABI M, ABOUTALEBI M R, SEYEDEIN S H, et al. Simulation of Residual Stress in Thick Thermal Barrier Coating (TTBC) during Thermal Shock: A Response Surface-Finite Element Modeling[J]. Ceramics International, 2022, 48(4): 5299-5311.
- [24] 薛文利, 陆涛, 黄佳华, 等. NiCrAlY+YSZ 热障涂层循环氧化过程中的 TGO 增厚及失效行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7): 2667-2672.
- XUE W L, LU T, HUANG J H, et al. Behavior of TGO Growth and Failure of NiCrAlY+YSZ TBC during Cyclic Oxidation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(7): 2667-2672.
- [25] SHEN Q, YANG L, ZHOU Y C, et al. Models for Predicting TGO Growth to Rough Interface in TBCs[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 325: 219-228.
- [26] TRAEGER F, VABEN R, -H RAUWALD K, et al. Thermal Cycling Setup for Testing Thermal Barrier Coatings[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(6): 429-432.
- [27] 郝义意, 梁立红, 邱天. 热障涂层涡轮叶片残余应力及高温行为模拟[J]. 力学学报, 2023, 55(6): 1319-1328.
- HAO Y Y, LIANG L H, QIU T. Residual Stress and high-Temperature Mechanical Behavior of Thermal Barrier Coated Turbine Blades[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(6): 1319-1328.