

腐蚀与防护

脱粘裂纹扩展诱发热障涂层陶瓷层
温度场演变与烧结行为研究董会¹, 周攀虎¹, 周勇¹, 韩燕², 杜永祺¹, 麻宁绪³

(1.西安石油大学 材料科学与工程学院 西安市高性能油气田材料重点实验室, 西安 710065;

2.中国石油集团石油管工程技术研究院国家重点实验室, 西安 710077;

3.大阪大学, 日本 大阪 565-0871)

摘要: **目的** 研究等离子喷涂热障涂层 (APS-TBCs) 内部脱粘裂纹尺寸对陶瓷层温度场与烧结行为的影响。**方法** 采用有限元模型研究不同尺寸脱粘裂纹对其上方陶瓷层温度场变化规律的影响, 并通过梯度热循环试验对裂纹上方陶瓷层烧结行为进行研究, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 分析陶瓷层表面和断面的组织形貌, 并使用图片法对裂纹上方陶瓷层不同区域的孔隙率进行分析。**结果** 裂纹上方陶瓷层温度变化区域的面积取决于裂纹尺寸, 且最高温度始终位于裂纹中心的上方陶瓷层表面, 随着裂纹宽度向两端依次递减, 其对应的上方温度依次递减。在本试验条件下, 随着脱粘裂纹尺寸的增加, 涂层厚度方向的最高温度以线性形式增加, 裂纹尺寸每增加 0.5 mm, 其上方陶瓷层同一位置处的温度增加约 30 °C, 且最高温度区域随之增大。裂纹长度超过 3 mm 时, 在脱粘裂纹热阻效应下, 裂纹上方陶瓷层区域的温度升高。裂纹越长, 上方陶瓷层整体温度提升越高, 不仅导致陶瓷层发生相变和烧结的区域增大, 还使得相变和烧结速率升高。不同梯度热循环次数下, 陶瓷层表面和内部均出现了数量和长度不等的脱粘、垂直裂纹, 烧结面积逐渐增大。脱粘裂纹长度为 4 mm 时, 其最大宽度约 40 μm。**结论** 脱粘裂纹上方陶瓷层温度变化以表面最高温度处为中心向四周呈放射性递减。越靠近陶瓷层表面, 层状组织信息越少, 相应区域的孔隙率越小, 烧结和相变程度逐渐增加, 使涂层发生脱落失效的可能性进一步增加。

关键词: 热障涂层; 脱粘裂纹扩展; 温度分布; 烧结**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0340-08**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.033The Evolution Behavior of Temperature Distribution and Sintering
of Ceramic Top-coat Induced via Delamination Crack Propagation
in Thermal Barrier CoatingsDONG Hui¹, ZHOU Pan-hu¹, ZHOU Yong¹, HAN Yan², DU Yong-qi¹, MA Ning-xu³

收稿日期: 2020-12-30; 修订日期: 2021-05-17

Received: 2020-12-30; Revised: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51904331); 陕西省自然科学基金 (2020JM540); 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室开放基金 (20202210); 西安石油大学“材料科学与工程”省级优势学科 (YS37020203)**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51904331), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JM540), Open-end Fund of State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University (20202210), Foundation of Materials Science and Engineering of Provincial Advantage Disciplines in Xi'an Shiyou University (YS37020203)**作者简介:** 董会 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料表面涂层 (隔热、耐蚀、耐磨涂层) 技术。**Biography:** DONG Hui (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: coating (thermal barrier, anti-corrosion and anti-wear) technology on material.**引文格式:** 董会, 周攀虎, 周勇, 等. 脱粘裂纹扩展诱发热障涂层陶瓷层温度场演变与烧结行为研究[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 340-347.
DONG Hui, ZHOU Pan-hu, ZHOU Yong, et al. The evolution behavior of temperature distribution and sintering of ceramic top-coat induced via delamination crack propagation in thermal barrier coatings[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 340-347.

(1.Xi'an Key Laboratory of High Performance Oil and Gas Field Materials, School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2.State Key Laboratory for CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China; 3.Osaka University, Osaka 565-0871, Japan)

ABSTRACT: The work aims to research the influence of temperature distribution and sintering behavior of yttria-stabilized zirconia (YSZ) coating over the delamination crack propagation in atmospheric plasma spraying thermal barrier coatings (APS-TBCs). The finite element model (FEM) was used to analyse the temperature distributions of YSZ coating above the delamination crack with different sizes, and the sintering behavior of YSZ coating was examined via gradient thermal cycling test. scanning electron microscopy (SEM) was employed to analyse the microstructure of the surface and the cross section of YSZ coating. The image method was used to analyse the porosity of YSZ coating. The results show that the high-temperature area of the YSZ coating depends on the crack size, and the highest temperature is always on the surface of the YSZ coating above the crack center. The temperature decreases from the crack center to its tip. In this case, the maximum temperature across the thickness of the coating increases linearly with increasing of the delamination crack size. The temperature at the same position above the YSZ coating increases by about 30 °C when the crack size increases 0.5 mm. The maximum temperature region increases. When the crack length exceeds 3 mm, the temperature in the YSZ coating region above the crack increases due to the thermal barrier effect of the delamination crack. The temperature of the whole YSZ coating above the crack increases with the length of the crack, which not only leads to the increase of the area where the YSZ coating undergoes phase transformation and sintering, but also increases the phase transformation and sintering rate. The number and length of delamination and vertical cracks on the surface and inside of YSZ coating are different under different thermal cycles, and the sintering area increases gradually. The maximum width of the delamination crack is about 40 μm, corresponding to the 4 mm crack. The temperature of YSZ coating above the delamination crack decreases radially from the center to the tip. The layered structure and the porosity of YSZ coating disappears gradually from the interface to the free surface of the YSZ coatings. Thus, the sintering and phase transformation degree of the corresponding area is gradually increased, furthermore, the possibility of coating failure is further increased.

KEY WORDS: thermal barrier coatings (TBCs); delamination crack propagation; temperature distribution; sintering

热障涂层 (TBCs) 因其拥有优异的耐热性能, 广泛应用于多种高温合金部件 (燃气轮机、航空航天发动机) [1-6]。传统的 TBCs 主要由基体、粘结层、热生长氧化物 (TGO) 及陶瓷层 (通常为 (7~8)%Y₂O₃-ZrO₂, 简称 YSZ) 组成, 其中, 陶瓷层内部组织及结构对涂层整体的耐热性能具有重要影响 [7-8]。

研究表明, TBCs 在高温服役过程中, YSZ 内部会产生脱粘裂纹, 且随着服役时间的延长, 脱粘裂纹两端在驱动力 (残余应力、热膨胀失配应力等) 和扩展抗力的相互作用下发生扩展, 当裂纹扩展到一定程度时, 会发生裂纹合并, 形成尺寸更大的脱粘裂纹, 最终导致涂层脱落失效 [9-11]。此外, 脱粘裂纹的产生使其上方涂层的热传导发生显著变化, 导致温度沿厚度方向发生突变且温度升高。随着脱粘裂纹尺寸增加, 其上方 YSZ 温度也相应增加, 当 YSZ 温度超过 1200 °C 时, 会导致相应区域发生不同程度的相变和烧结, 使其驱动力大大增加, 当驱动力大于 YSZ 自身的扩展抗力时, 脱粘裂纹会发生进一步扩展。而裂纹的扩展又进一步反向促进温度升高, 二者相互作用的结果对 YSZ 内部发生相变和烧结的程度具有重要的影响 [12-15]。对此, 目前部分学者 [13, 16-19] 通过有限元模拟, 研究了当 YSZ 内部脱粘裂纹长度和位置变化

时, 热障涂层温度场的变化。但由于脱粘裂纹性质、厚度等参数设置的限制, 目前对特定条件下裂纹上方温度场演变的研究较少。因此, 本文以梯度热循环试样裂纹的形貌特征为基础, 进一步分析脱粘裂纹扩展对涂层温度场的影响, 进而明确裂纹上方 YSZ 不同区域发生烧结的规律。

1 试验

1.1 有限元模拟

采用二维模型对热障涂层温度场进行计算, 模型构成与实际相同, 分为 YSZ 层、TGO 层、粘结层和基体四个部分, 如图 1a 所示。涂层直径为 25.4 mm, 各层厚度分别为 250、3.9、150 μm 和 3.0 mm, 其中 TGO 厚度由热循环试验所测得。根据实际裂纹形貌与扩展位置 [17], 本模型脱粘裂纹设定为扁菱形, 位于 TGO 上方 10 μm 的 YSZ 层内部, 试验所得涂层的脱粘裂纹形状如图 2 所示。YSZ 层表面温度异常升高, 开始的脱粘裂纹长度约为 0.5 mm, 当脱粘裂纹长度达 4 mm 时, 陶瓷层开始脱落 [20]。因此, 本文选取 0.5、1.0、1.5、2、3、4 mm 等 6 种脱粘裂纹长度进行研究。此外, 为明确矩形脱粘裂纹与扁菱形脱粘裂纹的差

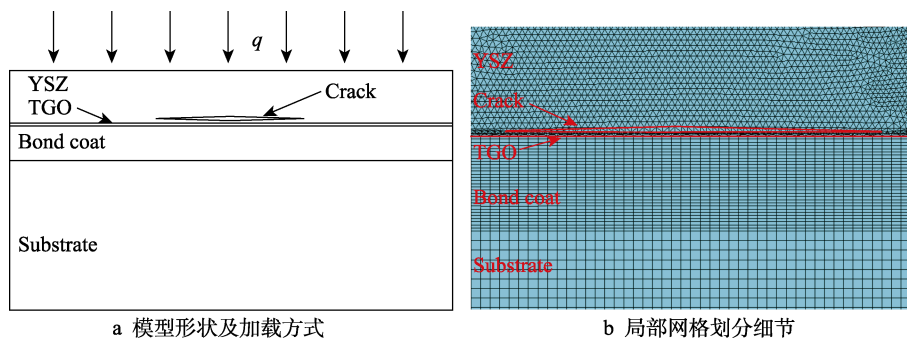


图 1 有限元模型示意图

Fig.1 Schematic for finite element model: a) model shape and loading mode; b) detail of local grid division

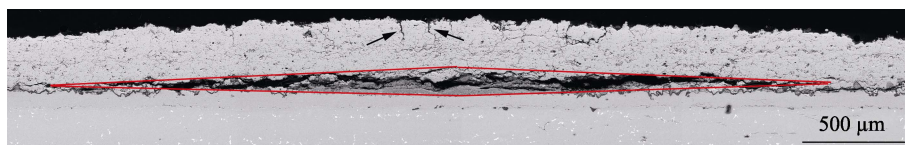


图 2 YSZ 层脱粘裂纹形状

Fig.2 Delamination crack shape of YSZ coating

异, 选取长度为 4 mm 的矩形脱粘裂纹进行对比。基于文献[21]的研究, 脱粘裂纹中心宽度设定为其长度的 1%。

设置单次循环加载时间为 4 min (加热 2 min 后再冷却 2 min), 模拟整个裂纹扩展过程中涂层的温度场变化。加热过程是对 YSZ 层表面进行加热的同时, 对基体底部进行冷却; 冷却过程是对 YSZ 层表面和基体底部同时进行冷却, 热流加载方式如图 1a 所示。涂层 YSZ 层表面加载的热流密度由复合一维稳态热传导方程计算所得, 见式(1):

$$q = \frac{(t_1 - t_5)}{\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3 + \delta_4 / \lambda_4} \quad (1)$$

式中: δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 分别为 YSZ 层、TGO 层、粘结层和基体的厚度, 单位为 m; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 分别为其相应的热传导率, 单位为 W/(m·K); t_1 、 t_5 分别为 YSZ 上表面、基体下表面的温度, 单位为 °C。当 YSZ 内部无裂纹时, 其上表面温度 $t_1=1150$ °C, 基体背面的温度 $t_5=935$ °C, 由此可以计算出热流密度 $q=0.66 \times 10^6$ W/m²。

在热循环模型中, 为保证涂层在加热阶段对基体表面进行冷却, 同时确保冷却阶段能将涂层上、下表面冷却至室温, 采用强制对流及辐射的方式进行冷却。根据相关公式进行推导并整合后的冷却对流系数如式(2)^[22-23], 施加的降温对流换热系数计算结果如表 1 所示。其中, 对流换热系数指当基体和 YSZ 达到对应温度后所施加的对流换热系数。

$$\alpha = \alpha_r + h = \varepsilon C_0 [(\theta + 273) + (\theta_0 + 273)] [(\theta_0 + 273)^2 + (\theta_0 + 273)^2] + [0.68(ul/\nu)^{0.5} Pr^{0.33} \lambda] / l \quad (2)$$

式中: α 为冷却对流系数, 单位为 J/(m²·s·K); h 为强制对流换热系数, 单位为 J/(m²·s·K); α_r 为辐射表面传热系数, 单位为 J/(m²·s·K); θ_0 为 YSZ 的温度, 单

位为 °C; θ 为热源温度, 单位为 °C; ε 为黑度系数 (吸收率); C_0 为玻尔兹曼常数, 取 5.67×10^{-8} J/(m²·s·K); u 为热源流速, 单位为 m/s; λ 、 ν 分别代表热源的热导系数 (W/(m·K)) 和动力黏度 (N·s/m²); l 为换热表面的特征长度, 单位为 m; Pr 为普朗特数。

表 1 不同 YSZ 表面/基体温度时涂层的冷却对流系数
Tab.1 Cooling convection coefficient of coatings at different YSZ surface/substrate temperatures

Temperature/°C	25	200	500	1000
Cooling convection coefficient/ (J·m ⁻² ·s ⁻¹ ·K ⁻¹)	457	507	730	1343

为保证模拟结果的准确性同时兼顾效率性, 各层网格划分疏密度有所差别, 其中 YSZ 层、裂纹、TGO 采用较密的网格, 选择自由网格划分; 基体、粘结层的网格划分相对稀疏, 选择映射网格划分, 如图 1b 所示。热障涂层热分析过程中, 只考虑热传导的作用, 其各部分的参数如表 2 所示。

1.2 热循环试验

试验基体选用 $\phi 25.4$ mm×3 mm 的 Inconel 738 (IN738) 镍基高温合金, 陶瓷层选用质量分数为 8% 的氧化钇稳定的氧化锆 (YSZ) 粉末, 粘结层采用 NiCoCrAlTaY 镍基高温合金粉末。粘结层采用冷喷涂方法进行沉积, 陶瓷层采用大气等离子喷涂的方法进行沉积。热循环试验前, 为控制 TGO 厚度, 对涂层进行 1080 °C、50 h 的恒温氧化预处理。采用氧气-丙烷火焰对 YSZ 表面进行加热, 加热时, 采用压缩空气冷却基体, 通过控制冷却条件得到设定的温度梯度。冷却时, 采用压缩空气同时对基体及 YSZ 表面进行冷却。热循环试验完成后, 对涂层表面胶封 (E7 胶) 并采用线切割机进行切割, 采用冷镶法

表 2 热障涂层各部分材料的热力学参数^[24-28]
Tab.2 Thermodynamics of materials parameters of thermal barrier coatings^[24-28]

	Temperature /°C	λ / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	c / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	ρ / (kg·m ⁻³)
YSZ	20	1.20	450	5650
	200	1.19	450	5650
	400	1.18	450	5650
	1000	1.14	450	5650
TGO	20	10.00	1000	3978
	200	7.80	1000	3978
	400	6.00	1000	3978
	1000	4.40	1000	3978
BC	20	5.80	501	8110
	200	7.50	—	8110
	400	9.50	592	8110
	1000	16.50	764	8110
SUB	20	11.50	431	8110
	200	11.85	465	8110
	400	15.91	494	8110
	1000	33.08	833	8110
Air in crack	20	0.03	1005	1.17
	200	0.04	1025	0.74
	400	0.05	1064	0.52
	1000	0.08	1190	0.28

(m (亚克力粉): m (固化剂)=5:4)制样后,使用粒度为 600~2000 目的砂纸分别对试样断面进行打磨,并使用粒度为 0.5 μm 的金刚石抛光液进行抛光,最后用酒精清洗,吹干备用。

梯度热循环试验中,采用 VEGA3 XMU 型扫描电镜 (SEM) 对不同循环次数下热障涂层的表面和断面形貌进行观察,在进行 SEM 观察前,需要对试样进行喷金处理。采用图片法 (涂层断面图片) 并利用

Nano Measurer 和 Image J 测量软件对 YSZ 层厚度和孔隙率进行测量。

2 结果与分析

2.1 温度场模拟结果分析

图 3 为不同脱粘裂纹长度下热障涂层断面局部温度分布。其中温度分布视场为 (YSZ 层表面中心向两端和基体方向延伸) 5.0 mm×1.2 mm 的区域。无裂纹时,涂层温度从 YSZ 层表面向下依次均匀递减,没有发生温度突变,YSZ 层表面的最高温度约为 1150 $^{\circ}\text{C}$,基体底部最高温度约为 935 $^{\circ}\text{C}$ ^[18]。随着脱粘裂纹的出现与扩展,脱粘裂纹上方 YSZ 层的温度发生下凹式过渡变化,且最高温度较无裂纹时均显著升高,当涂层内部产生脱粘裂纹时,其内部热阻效应较其他无裂纹处显著升高,隔热效果更明显,即裂纹上方涂层温度更高。热循环温度的升高又会促使裂纹两侧尖端处受到拉应力向两端持续增加,形成两侧窄中间宽的形貌,当裂纹扩展至一定长度时,会使得涂层发生脱落。随着脱粘裂纹尺寸增加,其上方 YSZ 层温度逐渐增大且高温范围相应增加。脱粘裂纹扩展至 3 mm 时,YSZ 层表面最高温度达到 1325 $^{\circ}\text{C}$ 。当温度低于 1300 $^{\circ}\text{C}$ 时,涂层经过长时间的工作,YSZ 层表层已经基本发生了烧结,涂层的断裂韧性得到了相应提升。而温度超过 1320 $^{\circ}\text{C}$ ^[29]时,YSZ 层烧结严重,使得侧向拉伸应力增加,造成垂直裂纹向纵深扩展,同时,严重烧结区域的相变程度也同样增加。此外,无论脱粘裂纹如何扩展,其温度最高值均位于裂纹中心上方 YSZ 表面处,即此处优先发生相变和烧结,YSZ 层整体温度以最高温度处为中心向四周呈放射性递减,无裂纹区域的 YSZ 温度分布未发生变化,且最高温度仍为 1150 $^{\circ}\text{C}$ 。

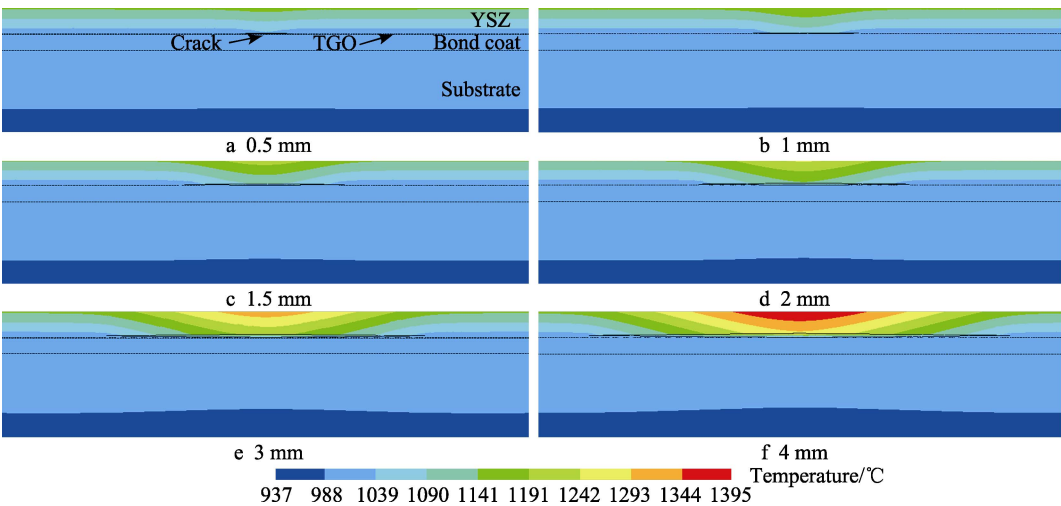


图 3 不同脱粘裂纹长度时 YSZ 层温度变化
Fig.3 Temperature variation of YSZ with different delamination crack lengths

另外,可以观察到,脱粘裂纹上方水平方向 YSZ 层温度变化区域范围与内部脱粘裂纹长度一致,且脱粘裂纹中心最宽处温度最高。随着脱粘裂纹宽度向两端依次递减,其对应的上方温度依次递减,表明脱粘裂纹上方 YSZ 层温度升高的区域范围取决于脱粘裂纹的形状与尺寸。图 4 为脱粘裂纹长度分别为 0.5 mm 和 1 mm 时 YSZ 局部温度分布。脱粘裂纹长度为 1 mm 时,其最高温度升高至 1191 °C,不会发生相变,而

当裂纹长度大于 1 mm 后,其上方最高温度开始高于 1200 °C,相应区域开始具备发生相变的条件^[18],从而诱发相变应力,促进脱粘裂纹扩展。脱粘裂纹尺寸为 0.5 mm 时,上方 YSZ 最高温度为 1163 °C,较无裂纹时,温度升高较小,其上方温度变化区域变化不明显,因此当脱粘裂纹长度小于 0.5 mm 时,对涂层温度分布影响较小。

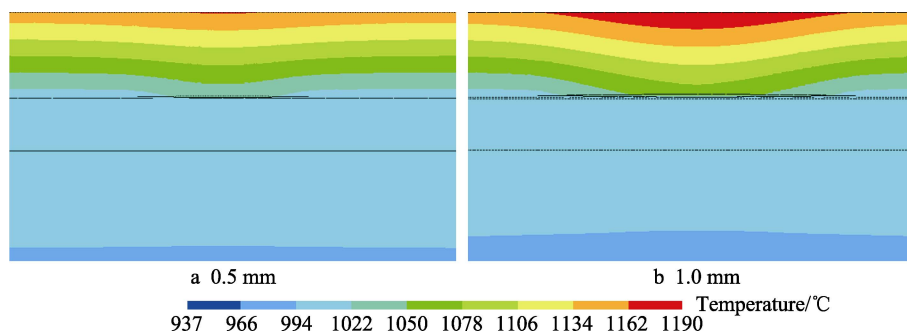


图 4 不同脱粘裂纹长度 YSZ 层温度变化细节 (视场 1.4 mm×0.7 mm)

Fig.4 Temperature variation details of YSZ with different delamination crack lengths (field of view 1.4 mm×0.7 mm)

此外,为明确矩形脱粘裂纹与实际扁菱形脱粘裂纹对 YSZ 层温度场分布的影响差异,选取脱粘裂纹长度为 4 mm 的 YSZ 层温度分布进行对比,如图 5 所示。对比可知,矩形脱粘裂纹上方 YSZ 层最高温度已达到 1450 °C,比扁菱形脱粘裂纹最高温度高约 55 °C,且同一温度下,矩形脱粘裂纹比扁菱形脱粘裂纹上方 YSZ 层高温区域范围更大。因此,与矩形脱粘裂纹相比,扁菱形脱粘裂纹能更准确地反映其上方 YSZ 层的实际温度分布规律。

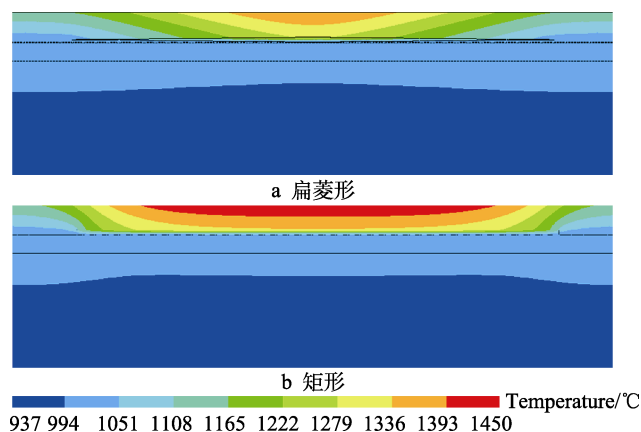


图 5 不同脱粘裂纹形状 YSZ 层温度变化 (视场 5.0 mm×1.2 mm)

Fig.5 Temperature variation details of YSZ with different delamination crack shapes (field of view 5.0 mm×1.2 mm): a) rhomboid, b) rectangle

为进一步研究不同脱粘裂纹尺寸对 YSZ 层不同区域温度变化的影响,进而揭示各个区域发生相变的规律,本文提取了沿裂纹中心上方厚度方向 YSZ 层

的温度,如图 6 所示。结果表明,脱粘裂纹尺寸一定时,脱粘裂纹中心上方 YSZ 层温度与距脱粘裂纹中心的距离呈正比。越靠近表面,温度越呈线性增加,涂层温度超过 1200 °C 的 YSZ 层区域开始具有从非平衡四方相 (T') 向单斜相发生转变的趋势,而相变的过程往往伴随着烧结现象并与相变程度成正比,即厚度方向越靠近 YSZ 表面越易发生相变和烧结。结合图 3 中温度的变化趋势可知,距裂纹上方 YSZ 表面温度最高,优先发生相变和烧结。当相变和烧结严重时会发生应力变化 (相变应力和侧向拉应力)^[14],进而反向促进裂纹进一步发生扩展。结合图 3 至图 6 的 YSZ 层温度分布可知,YSZ 整体温度以裂纹中心上方最高温度处为中心向四周呈放射性递减趋势,即裂纹两端温度最低,发生相变和烧结的可能性最小。

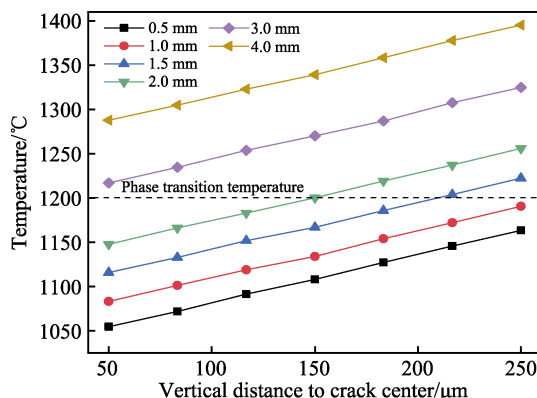


图 6 不同脱粘裂纹长度时裂纹中心上方 YSZ 厚度方向温度分布

Fig.6 Temperature distribution in the YSZ thickness direction above the delamination crack center at different delamination crack lengths

此外,随着裂纹尺寸增加,同一位置处温度均匀增加,增量约为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当裂纹长度大于 3 mm 时,裂纹中心上方 YSZ 层温度均超过 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明此时裂纹中心上方 YSZ 层区域已全部开始具有发生相变的趋势,裂纹长度在 1 mm 以内时,YSZ 层内部基本不发生相变。同样,结合图 3 推测可知,裂纹尺寸在 2.5 mm 以内时,YSZ 层内部最高温度低于 $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$,短时间内发生烧结的程度较低,涂层的开裂失效模式不受 YSZ 层烧结的控制,裂纹尺寸超过 3 mm 时,其阻热效应增加,裂纹中心上方 YSZ 层区域最高温度超过 $1320\text{ }^{\circ}\text{C}$,涂层开始发生严重烧结,当垂直裂纹与 YSZ 层内部未结合界面相连时,发生脱落失效的可能性增大^[12]。因此,综合以上分析可知,脱粘裂纹越长,热阻效应越明显,其上方 YSZ 温度升高范围越大,发生相变和烧结的趋势越大。

2.2 梯度热循环试验结果分析

通过对不同梯度热循环次数下 YSZ 层表面和断面微观形貌(图 7、图 8)进行观察可知,喷涂态涂层的 YSZ 层表面较为光滑平整,结构致密,存在少量未熔的球形粉末颗粒,没有明显的裂纹等缺陷。与喷涂态涂层相比,不同热循环次数后,YSZ 层表面凹凸不平、粗糙度增大,主要以粉末状和颗粒状形式存在。此外,表面均出现了数量、长度不等的裂纹(图 7 中箭头所指),裂纹产生位置基本位于涂层表面的“低谷”即凹陷处,主要由于此处热循环试验的冷

热交替下易形成应力集中区,优先产生裂纹并扩展。随着循环次数的增加,凹陷处裂纹数量和宽度均增加,并不断沿表面延伸,致使部分不同方向的裂纹连接在一起,加之等离子喷涂制备的陶瓷层为典型的层状结构,内部存在未结合的界面和孔隙,易导致 YSZ 层发生局部逐片脱落现象^[30-32],造成涂层厚度的减小,最终导致涂层失效(图 7c 中圆圈所指)。

由 YSZ 层断面形貌可知,制备所得 YSZ 层厚度为 $(250\pm 3)\text{ }\mu\text{m}$ 。喷涂态涂层内部的陶瓷层与粘结层、粘结层与基体之间为波浪状的机械嵌合。YSZ 层内部为典型的层状结构,分布均匀,同时存在不同程度的孔隙、微裂纹等缺陷。相较于喷涂态涂层,随着循环次数增加,YSZ 层内部出现数量和大小不等的脱粘、垂直裂纹。其中,垂直裂纹主要发生在 YSZ 层表面并向内部扩展,与其表面形貌相对应。而脱粘裂纹是涂层发生脱落失效的主要原因,经测量,当循环次数为 1800 次时,脱粘裂纹最宽处的宽度和长度分别约为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 和 2.2 mm ;循环次数为 2450 次时,脱粘裂纹最宽处的宽度约为 $40\text{ }\mu\text{m}$,其长度约为 4 mm ,即将发生脱落失效。此外,在 YSZ 层内部还出现了小型的脱粘裂纹,部分脱粘裂纹与垂直裂纹已连成一体,甚至发生了部分脱落,垂直裂纹沿脱落位置继续向 YSZ 层内部扩展(图 8 方框和箭头所指)。同时,不同循环次数下,YSZ 层内部的层状组织较原始涂层显著减少,且越靠近 YSZ 层表面,层状组织信息越少,表面部分区域已经形成了严重的块状组织,即烧结现象。

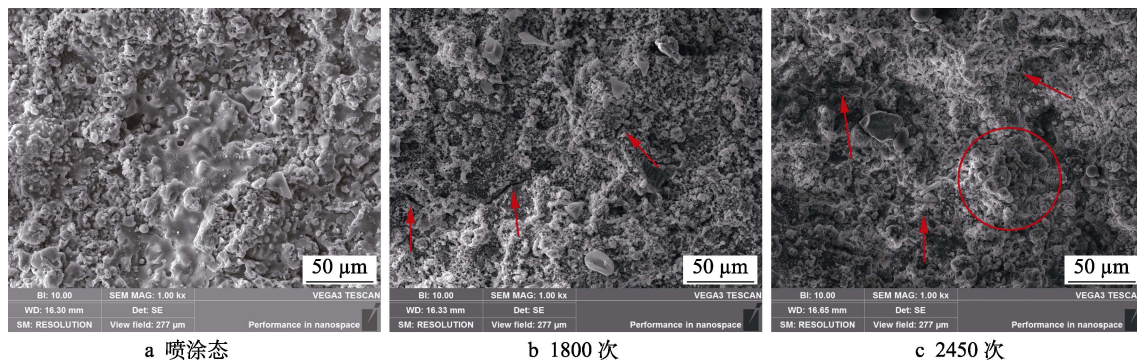


图 7 不同循环次数 YSZ 表面形貌

Fig.7 The surface morphology of YSZ with different cycles: a) as sprayed; b) 1800 times; c) 2450 times

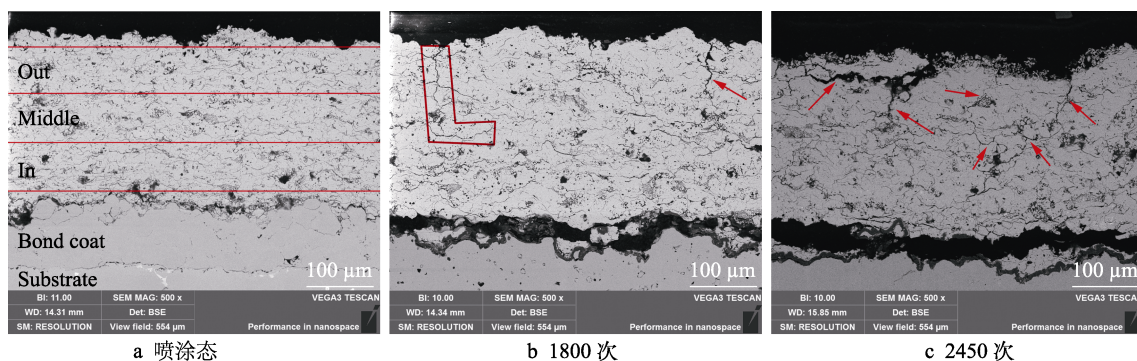


图 8 不同循环次数 YSZ 断面形貌

Fig.8 The section morphology of YSZ with different cycle: a) as sprayed; b) 1800 times; c) 2450 times

随着梯度热循环次数的增加,YSZ 层的相变和烧结程度逐渐增大,脱粘裂纹长度增加,而直观的表现就是相应区域的孔隙率降低。一般孔隙率越小,其对应区域的烧结越严重,相变的发生趋势也越大,即孔隙率大小与烧结、相变程度成反比。利用 Image J 软件对不同循环次数下脱粘裂纹上方 YSZ 层内部不同区域平均孔隙率分布规律进行分析,如图 9 所示。其中,YSZ 层内部孔隙率测量分为 3 个区域,每个区域宽度为 70 μm ,如图 8a 所示。可知,喷涂态涂层 YSZ 层内部各区域层状组织分布较均匀,孔隙率约为 13.7%。经不同循环次数后,各区域的平均孔隙率较喷涂态涂层均有所降低,且 YSZ 层的平均孔隙率由自由表面到 YSZ/TGO 界面呈增加趋势,即相对应区域的烧结和相变程度逐渐降低,YSZ 层表面发生烧结和相变的趋势最显著。此试验结果与模拟温度场区域的变化规律基本一致。

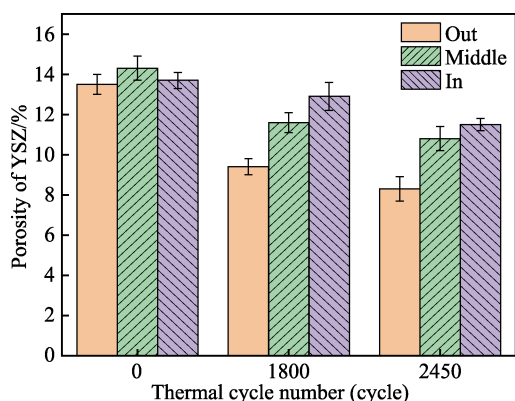


图9 不同循环次数下 YSZ 层内部孔隙率变化

Fig.9 Internal porosity of YSZ coating under different cycling times

3 结论

1) 涂层中温度发生变化的区域范围与内部脱粘裂纹长度一致,且最高温度始终位于裂纹中心最宽处上方 YSZ 层表面,随着裂纹宽度向两端依次递减,对应的上方温度也依次递减。

2) 在本试验条件下,脱粘裂纹尺寸增加时,涂层厚度方向的最高温度分别以线性形式增加,脱粘裂纹尺寸每增加 0.5 mm,其上方 YSZ 层同一位置处温度增加约 30 $^{\circ}\text{C}$,且最高温度区域随之增大,YSZ 层整体温度以脱粘裂纹中心上方表面最高温度处为中心向四周呈放射性递减趋势,且裂纹越长,其上方 YSZ 层整体温度提升越大;脱粘裂纹长度超过 3 mm 时,越靠近 YSZ 层表面,发生相变和烧结的区域越大。

3) 不同梯度热循环次数下,YSZ 层表面和内部均出现了数量和长度不等的脱粘、垂直裂纹,循环次数为 2450 次时,脱粘裂纹最宽处的宽度约为 40 μm ,长度约为 4 mm,即将发生脱落失效;越靠近 YSZ 层

表面,层状组织信息越少,相应区域的孔隙率越小,相应区域的烧结和相变程度逐渐增加。

参考文献:

- [1] 朱剑琴,赵超凡,邱璐,等.热障涂层在涡轮叶片应用中的热防护有效性[J].航空动力学报,2019,34(11): 2503-2508.
ZHU Jian-qin, ZHAO Chao-fan, QIU Lu, et al. Thermal protection effectiveness of thermal barrier coatings in turbine blade applications[J]. Journal of aerospace power, 2019, 34(11): 2503-2508.
- [2] 李荣久,邓畅光,胡永俊,等.等离子喷涂-物理气相沉积热障涂层的表征技术研究进展[J].表面技术,2020,49(11): 124-140.
LI Rong-jiu, DENG Chang-guang, HU Yong-jun, et al. Research progress on characterization methods of thermal barrier coatings prepared by plasma spraying-physical vapor deposition[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 124-140.
- [3] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [4] 周雳,邢志国,王海斗,等.等离子喷涂金属/陶瓷梯度热障涂层研究进展[J].表面技术,2020,49(1): 122-131.
ZHOU Li, XING Zhi-guo, WANG Hai-dou, et al. Research progress of metal/ceramic gradient thermal barrier coatings by plasma spraying[J]. Surface technology, 2020, 49(1): 122-131.
- [5] 许磊,杜彦斌,张磊.表面损伤叶轮激光增材再制造研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(1): 1-6.
XU Lei, DU Yan-bin, ZHANG Lei. Laser cladding remanufacture on damaged impeller surface[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (natural science edition), 2021, 38(1): 1-6.
- [6] 周志杰,许磊,杜彦斌,等.20Cr13 钢表面激光熔覆铁/镍基合金熔覆层的组织与性能研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(2): 69-74.
ZHOU Zhi-jie, XU Lei, DU Yan-bin, et al. Microstructure and properties of laser cladding Fe/Ni base alloy coating on 20Cr13 surface steel[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (natural science edition), 2021, 38(2): 69-74.
- [7] 胡旋烨,黄国胜,李相波,等.热障涂层制备工艺的综述[J].热加工工艺,2017,46(24): 6-9.
HU Xuan-ye, HUANG Guo-sheng, LI Xiang-bo, et al. Review on preparation process of thermal barrier coating[J]. Hot working technology, 2017, 46(24): 6-9.
- [8] 郭洪波,宫声凯,徐惠彬.先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J].中国材料进展,2009,28(Z2): 18-26.
GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai, XU Hui-bin. Progress in thermal barrier coatings for advanced aeroengines[J]. Materials China, 2009, 28(Z2): 18-26.
- [9] BARGRASER C, MOHAN P, LEE K, et al. Life approximation of thermal barrier coatings via quantitative microstructural analysis[J]. Materials science and engineering:

- A, 2012, 549: 76-81.
- [10] LI Chang-jiu, DONG Hui, DING Hang, et al. The correlation of the TBC lifetimes in burner cycling test with thermal gradient and furnace isothermal cycling test by TGO effects[J]. Journal of thermal spray technology, 2017, 26(3): 378-387.
- [11] 华丹, 范群波, 沈伟, 等. 等离子喷涂热障涂层微裂纹模拟研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(22): 87-89.
HUA Dan, FAN Qun-bo, SHEN Wei, et al. Simulation on micro-crack in plasma sprayed thermal barrier coating[J]. Hot working technology, 2010, 39(22): 87-89.
- [12] LIU Hua-nan, SAKAMOTO M, KISHI K, et al. Detection of defects in thermal barrier coatings by thermography analyses[J]. Materials transactions, 2003, 44(9): 1845-1850.
- [13] DONG Hui, YANG Guan-jun, CAI Hong-neng, et al. Propagation feature of cracks in plasma-sprayed YSZ coatings under gradient thermal cycling[J]. Ceramics international, 2015, 41(3): 3481-3489.
- [14] 董会, 姚建洮, 李霄, 等. 传统等离子喷涂热障涂层的裂纹扩展行为[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(1): 158-162.
DONG Hui, YAO Jian-tao, LI Xiao, et al. State-of-art research on crack propagation behavior in traditional atmospheric plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Journal of materials science and engineering, 2018, 36(1): 158-162.
- [15] LOGHMAN-ESTARKI M R, SHOJA RAZAVI R, JAMALI H. Thermal stability and sintering behavior of plasma sprayed nanostructured 7YSZ, 15YSZ and 5.5SYSZ coatings at elevated temperatures[J]. Ceramics international, 2016, 42(13): 14374-14383.
- [16] 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.
- [17] DONG Hui, YAO Jian-tao, LI Xiao, et al. The sintering behavior of plasma-sprayed YSZ coating over the delamination crack in low temperature environment[J]. Ceramics international, 2018, 44(3): 3326-3332.
- [18] 董会, 李霄, 周勇, 等. 不同裂纹扩展位置时热障涂层温度场分布特征研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(24): 175-177.
DONG Hui, LI Xiao, ZHOU Yong, et al. Research on temperature distribution characteristics of thermal barrier coatings under different crack propagation position[J]. Hot working technology, 2017, 46(24): 175-177.
- [19] DONG Hui, HAN Yan, ZHOU Yong, et al. The temperature distribution in plasma-sprayed thermal-barrier coatings during crack propagation and coalescence[J]. Coatings, 2018, 8(9): 311.
- [20] DONG Hui, YANG Guan-jun, LI Cheng-xin, et al. Effect of TGO thickness on thermal cyclic lifetime and failure mode of plasma-sprayed TBCs[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(4): 1226-1232.
- [21] AHMADIAN S, JORDAN E H. Explanation of the effect of rapid cycling on oxidation, rumpling, microcracking and lifetime of air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface and coatings technology, 2014, 244: 109-116.
- [22] 赵振南. 传热学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 177-178.
ZHAO Zhen-nan. Heat transfer[M]. Second edition. Beijing: Higher Education Press, 2008: 177-178.
- [23] 陈宇慧, 杨晓翔, 钟舜聪. 对流换热对 ZrO_2 -8% Y_2O_3 涂层系统力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2014, 34(5): 63-68.
CHEN Yu-hui, YANG Xiao-xiang, ZHONG Shun-cong. Effect of convection heating on mechanical behavior of ZrO_2 -8% Y_2O_3 coat the system[J]. Journal of aeronautical materials, 2014, 34(5): 63-68.
- [24] ZHOU Chun-gen, WANG Na, XU Hui-bin. Comparison of thermal cycling behavior of plasma-sprayed nanostructured and traditional thermal barrier coatings[J]. Materials science and engineering: A, 2007, 452-453: 569-574.
- [25] 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.
- [26] RANJBAR-FAR M, ABSI J, SHAHIDI S, et al. Impact of the non-homogenous temperature distribution and the coatings process modeling on the thermal barrier coatings system[J]. Materials & design, 2011, 32(2): 728-735.
- [27] KYAW S, JONES A, HYDE T. Predicting failure within TBC system: Finite element simulation of stress within TBC system as affected by sintering of APS TBC, geometry of substrate and creep of TGO[J]. Engineering failure analysis, 2013, 27: 150-164.
- [28] RANJBAR-FAR M, ABSI J, MARIAUX G, et al. Crack propagation modeling on the interfaces of thermal barrier coating system with different thickness of the oxide layer and different interface morphologies[J]. Materials & design, 2011, 32(10): 4961-4969.
- [29] VABEN R, TRAEGER F, STÖVER D. New thermal barrier coatings based on pyrochlore/YSZ double-layer systems[J]. International journal of applied ceramic technology, 2005, 1(4): 351-361.
- [30] LI Guang-rong, YANG Guan-jun, LI Cheng-xin, et al. A comprehensive sintering mechanism for thermal barrier coatings—Part III: Substrate constraint effect on healing of 2D pores[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2018, 101(8): 3636-3648.
- [31] 王铁军, 范学领, 孙永乐, 等. 重型燃气轮机高温透平叶片热障涂层系统中的应力和裂纹问题研究进展[J]. 固体力学学报, 2016, 37(6): 477-517.
WANG Tie-jun, FAN Xue-ling, SUN G, et al. The stresses and cracks in thermal barrier coating system: A review[J]. Chinese journal of solid mechanics, 2016, 37(6): 477-517.
- [32] 唐春华, 李广荣, 刘梅军, 等. 等离子喷涂 $La_2Zr_2O_7$ 热障涂层高温烧结的硬化行为[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 119-126.
TANG Chun-hua, LI Guang-rong, LIU Mei-jun, et al. Sintering-stiffening behavior of plasma sprayed $La_2Zr_2O_7$ thermal barrier coatings during high temperature exposure [J]. China surface engineering, 2020, 33(2): 119-126.