

# 陶瓷层厚度比对 $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ 热障涂层抗热震性能的影响

任晓雪, 江 鹏, 范学领, 王铁军

(西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 采用实验和数值方法研究了陶瓷层厚度比对  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$  (LC/YSZ) 热障涂层热震性能的影响。实验结果表明, 随着 LC 与 YSZ 厚度比的降低, 涂层热震寿命显著提高, 涂层失效区域逐渐向试样中心转移, 剥离位置逐渐从两陶瓷层界面附近转移到 LC 内靠近上表面处。数值结果表明, 界面边缘处较大的轴向应力与剪切应力易导致较大厚度比涂层边缘处剥落; LC 表面中心区域较大的径向拉应力会导致垂直裂纹萌生, 并伴随界面偏折, 这是较小厚度比涂层自 LC 内部剥离的原因。

**关键词:** 热障涂层; 双陶瓷层; 热震寿命; 失效模式; 热应力

**中图分类号:** TG174.45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)12-3703-07

热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 技术是航空发动机、重型燃气轮机高温热防护的关键技术之一, 被认为是目前大幅度提高燃气温度最切实可行的手段<sup>[1-4]</sup>。TBCs 由陶瓷层、粘结层、高温合金基底, 以及在服役过程中形成于粘结层和陶瓷层之间的热生长氧化物 (TGO) 组成。其中, 氧化钇部分稳定氧化锆 (YSZ) 由于其低热导率、高热膨胀系数和高应变韧性等优点而成为陶瓷层材料的首选, 受到了广泛的关注<sup>[5-11]</sup>。然而, 随着燃气进口温度的不断提升, 传统的 YSZ TBCs 已无法满足先进航空发动机和重型燃气轮机更高性能的发展需求。当燃气温度接近或超过 1200 °C 时, YSZ 材料长期高温服役时存在诸多不足:

(1) YSZ 中的非平衡四方相稳定性较差, 易分解生成四方相和立方相。此晶型转变过程所伴随的体积变化将随着热循环次数的增加而不断累积, 在陶瓷层内积聚相当高的应变能密度, 最终导致涂层开裂; (2) 易发生烧结, 并伴随着孔隙率降低、热导率增加、杨氏模量增大及 TGO 加速生长等现象, 显著降低涂层的应变韧性和热震性能, 导致涂层过早失效<sup>[12]</sup>; (3) 氧化加速, 氧阻碍能力明显降低, 易于将金属基底暴露于氧化及腐蚀环境下; (4) 极易受到服役环境中的沉积物 (CMAS) 腐蚀和外来物颗粒撞击而剥离失效。

如何设计强隔热、长寿命的新型高效 TBCs 结构成为了高温热防护领域的挑战, 可替代常规 YSZ 在更

高温下使用、导热系数更低、具有更强抗烧结和热变形能力的新型材料或结构成为近年来的研究热点。其中, 烧绿石结构稀土锆酸盐  $\text{R}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 、钙钛矿结构  $\text{SrZrO}_3$  以及镧系等均是可供选择的材料体系<sup>[13-15]</sup>。然而, 尽管这些材料具有热稳定性更高等显著优点, 但其热膨胀系数和断裂韧性通常低于传统 YSZ 材料, 导致热循环过程中各层之间会产生较大热失配应力, 严重影响系统热力学性能。试验数据表明, 单一新型材料制备的涂层热循环寿命通常较短, 即便通过改性可提高其热震寿命, 但仍然要比传统 YSZ 涂层寿命短很多<sup>[16,17]</sup>。将新型陶瓷材料 (TC1) 或其改性系列涂层涂覆在 YSZ 层 (TC2) 之上形成双陶瓷层 TBCs (图 1)。通常 TC1 层热稳定性好、无相变、热导率低、抗烧结, 可为 TC2 层和基底提供高温保护, 而 TC2 通常具有热膨胀系数大、断裂韧性高等优点, 可缓解各组元间的热失配应力, 成为兼顾高温稳定性、抗烧结、高效热障和长寿命要求的重要发展方向<sup>[16,18]</sup>。

实验结果表明, 双陶瓷层 TBCs 在高于 1200 °C 温度下具有较长的热震寿命<sup>[19-26]</sup>。然而, 双陶瓷层 TBCs 存在多个弱界面, 微缺陷在各组元间弱界面处形核、扩展、聚合, 贯通形成宏观裂纹, 容易引起涂层的剥落失效<sup>[27,28]</sup>。在此过程中, 层级陶瓷组元几何、材料参数对双陶瓷层 TBCs 的热循环性能及失效模式有着显著影响<sup>[27-29]</sup>。目前, 对双陶瓷层 TBCs 失效机理的

收稿日期: 2017-12-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2013CB035700); 国家自然科学基金 (11472204)

作者简介: 任晓雪, 女, 1991 年生, 硕士生, 西安交通大学航天航空学院机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049, 电话: 029-82667864, E-mail: mailrxx@163.com

实验研究，多局限于单一陶瓷层厚度比情况下涂层的热震寿命，针对陶瓷层厚度比对涂层热震性能及失效机理的实验研究较少。本研究采用实验和数值相结合的方法，考察双陶瓷层厚度比对 LC/YSZ TBCs 热震寿命和失效模式的影响规律，并从热应力角度解释导致这种差异的原因。

## 1 实验

实验中基底材料采用高温合金 Hastelloy X，试样尺寸为  $\Phi 25.4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ，为了降低边缘处的应力集中效应，试样边缘倒角 1 mm。粘结层喷涂材料为 NiCoCrAlY 合金粉末，采用超音速火焰喷涂法制备，厚度为 150  $\mu\text{m}$ 。双陶瓷层中 TC1 选用  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  (LC) 粉末，TC2 选用传统 YSZ 粉末。采用大气等离子喷涂制备厚度比为 100  $\mu\text{m}/200 \mu\text{m}$ 、150  $\mu\text{m}/150 \mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}/100 \mu\text{m}$  的 3 种 LC/YSZ 双陶瓷层 TBCs 试样，总厚度为 300  $\mu\text{m}$ 。

喷涂过程中，通过调节喷涂参数控制喷枪每扫描 1 次的喷涂厚度，将厚度控制在 25  $\mu\text{m}$  左右。喷枪的扫描次数分别为 4、6、8 次时可达到所需的涂层厚度 100、150、200  $\mu\text{m}$ ，具体喷涂参数如表 1 所示。

采用水淬热循环法研究双陶瓷层 TBCs 的热震寿命及失效模式。将 3 种厚度比 LC/YSZ 试样放在 1000  $^\circ\text{C}$  的高温炉中高温保温 5 min，然后移至 25  $^\circ\text{C}$  水槽中

迅速冷却至室温，即完成 1 次热循环，如图 2 所示。如此反复，并随时观察、记录试样表面涂层的剥落情况，直至顶层 LC 表面剥落面积达到 20% 时实验结束，记录此时的热循环次数作为双陶瓷层 TBCs 的热震寿命。考虑到高温合金耐温极限，这里选择 1000  $^\circ\text{C}$  为热循环温度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 双陶瓷层热障涂层的热震寿命

双陶瓷层 TBCs 热震实验结果列于表 2。从表 2 可以看出，厚度比为 200  $\mu\text{m}/100 \mu\text{m}$  的双陶瓷层 TBCs

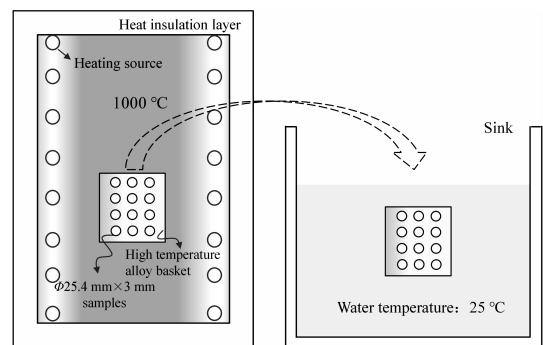


图 2 热震实验过程示意图

Fig.2 Schematic of process of thermal shock

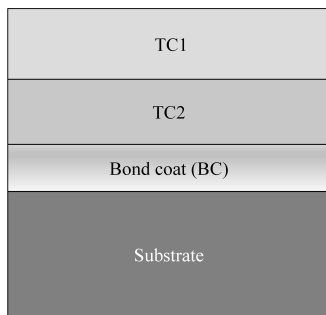


图 1 双陶瓷层 TBCs 结构示意图

Fig.1 Schematic of the structure of double-ceramic-layer TBCs

表 1 粘结层与陶瓷层喷涂参数

Parameter	BC	YSZ	LC
Power/kW	-	33.8	31.5
Distance/mm	380	120	100
Ar/H <sub>2</sub> flow/L·min <sup>-1</sup>	-	35/6.5	40/6.5
Feed rate/g·min <sup>-1</sup>	60	40	35
Gun velocity/mm·s <sup>-1</sup>	700	500	400
Fuel flow/L·h <sup>-1</sup>	24.6	-	-
Oxygen flow/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	2100	-	-
Carrier gas flow/L·min <sup>-1</sup>	23	-	-

表 2 1000  $^\circ\text{C}$  下双陶瓷层热障涂层热震实验结果

Table 2 Results of thermal shock of double-ceramic-layer thermal barrier coatings at 1000  $^\circ\text{C}$

Thermal cycle	LC/YSZ= 200 $\mu\text{m}/100 \mu\text{m}$	LC/YSZ= 150 $\mu\text{m}/150 \mu\text{m}$	LC/YSZ= 100 $\mu\text{m}/200 \mu\text{m}$
2	Large area spallation at the edge circle	No significant changes	No significant changes
3	All the coating peels off at the edge circle	No significant changes	No significant changes
22		A few spallation at the edge area	No significant changes
24		Edge spallation increases	No significant changes
26		Large area spallation at the edge	Few spallation at the central area
27		Edge spallation increases with serious central spallation	Central area spallation is obvious
36			Central area spallation is serious

试样在 2 次热循环后, 边缘就出现较大面积剥落, 而其它 2 种厚度比的试样无明显变化。3 次热循环后, 厚度比为  $200\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$  的试样边缘一圈全部剥落, 其它 2 种厚度比的涂层均无明显变化。经过 22 次热循环后, 厚度比为  $150\ \mu\text{m}/150\ \mu\text{m}$  的试样边缘出现少许点状剥落, 厚度比为  $100\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$  的试样陶瓷层无明显变化。随着热循环次数的增加, 厚度比为  $150\ \mu\text{m}/150\ \mu\text{m}$  试样的边缘部分剥落面积逐渐扩大, 经过 24 次热循环后在涂层中间区域开始出现剥落, 厚度比为  $100\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$  的试样无明显变化。经过 26 次热循环后, 厚度比为  $100\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$  试样中间区域出现少许剥落; 厚度比为  $150\ \mu\text{m}/150\ \mu\text{m}$  的试样边缘一圈涂层大部分已剥落, 中间区域剥落明显。27 次热循环后, 厚度比为  $100\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$  的试样中间区域剥落明显, 厚度比为  $150\ \mu\text{m}/150\ \mu\text{m}$  的试样边缘部分涂层剥落继续扩大, 中间区域涂层剥落严重。经过 36 次热循环后, 厚度比为  $100\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$  的试样中间区域剥落严重, 并且涂层边缘有部分剥落。

3 种厚度比 LC/YSZ 双陶瓷层 TBCs 剥离演化结果如图 3 所示。从图中可以看出, 随着 LC/YSZ 厚度比增大, 剥离速度加快, 热震寿命降低。这是由于 LC 陶瓷顶层尽管具有更低的导热系数和更强的高温稳定性, 但是其热膨胀系数和断裂韧性通常较低, 这些因素导致在水淬热冲击这种极端情况下, 厚的 LC 层会加快涂层剥离, 导致涂层系统热震寿命降低。

## 2.2 双陶瓷层热障涂层的失效模式

为了确定涂层的脱粘位置, 分别对水淬热循环实验后的试样进行镶样、切割、抛光处理, 然后在扫描电镜下观察其截面形貌, 如图 4 所示, 其中, 图 4a、4b、4c 及 4d、4e、4f 分别为厚度比  $100\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$ 、 $150\ \mu\text{m}/150\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$  的 LC/YSZ 双陶瓷层 TBCs

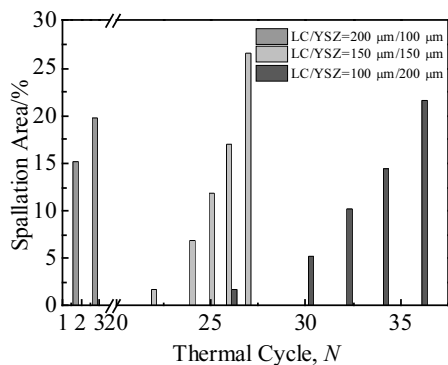


图 3 3 种厚度比 LC/YSZ 双陶瓷层 TBCs 剥离面积演化  
Fig.3 Spallation area evolution of LC/YSZ thermal barrier coatings with three different thickness ratios

失效后的表面剥落图及微观结构图; 图 4g、4h、4i 分别是 3 种厚度比的双陶瓷层 TBCs 失效模式示意图。

从图 4 可以看出, 当 LC/YSZ 厚度比为  $100\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$  时, 在 LC 层中心区域出现呈层状分布的水平裂纹, 涂层自 LC 层内部逐层剥离失效, 此过程中 LC 与 YSZ 界面则保持粘结完好。这主要由于 LC 热膨胀系数与基底相差较大, 在冷却过程中涂层内部产生较大的面内应力, 而 LC 相对于 YSZ 其断裂韧性又较低所导致的。此现象与 Vaßen 等人<sup>[24]</sup>针对 LZ/YSZ 双陶瓷层 TBCs 燃气热冲击实验中 LZ 层逐层剥离失效的现象类似。

LC/YSZ 厚度比为  $150\ \mu\text{m}/150\ \mu\text{m}$  时, 试样边缘的双陶瓷层界面附近首先发生界面脱粘, 随着热循环次数增加, 剥离区域逐渐转移到 LC 层中心区域, 并出现层状水平裂纹, 而 LC 与 YSZ 界面粘结完好。LC/YSZ 厚度比为  $200\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$  时, 失效发生在边缘处靠近双陶瓷层界面的 LC 层内。

根据上述现象, 可以发现当 LC/YSZ 厚度比增加后, LC/YSZ 双陶瓷层 TBCs 容易在试样边缘发生剥落, 且剥落位置靠近 LC 与 YSZ 的界面。LC/YSZ 厚度比减小, TBCs 易于出现 LC 层内部逐层剥落现象, 且此热震过程中 LC 与 YSZ 界面粘结完好。

需要指出的是, YSZ 的相变温度在  $1200\ ^\circ\text{C}$  左右, LC 的相稳定性由于 YSZ, 其相变温度在  $1400\ ^\circ\text{C}$ <sup>[30,31]</sup>, 在  $1000\ ^\circ\text{C}$  高温下 LC 与 YSZ 均不发生相变, 因此相变不是导致涂层发生剥离的原因。

## 3 数值分析

### 3.1 有限元模型

陶瓷层 TBCs 简化为图 5 所示的二维问题, 其中 LC 层、YSZ 层、粘结层及基底的厚度均与热震实验中试样的尺寸相同。

为了计算方便, 现作如下假设: (1) 系统各层材料均匀且各向同性; (2) 整个涂层系统处于线弹性变化范围; (3) 各层界面光滑且粘结良好。有限元计算中系统初始温度为  $1000\ ^\circ\text{C}$ , 水淬热冲击过程中试样上、下表面及右侧面与水发生对流换热, 左侧面绝热, 对流换热系数为  $3000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ , 系统最终温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ 。TBCs 各层材料参数如表 3 所示<sup>[32]</sup>。

### 3.2 有限元结果及分析

图 6a 为 3 种厚度比双陶瓷层热障涂层 LC 表面的径向应力分布曲线, 6d 为 A 点和 B 点处 LC 层径向应力分布云图。由图 6a 可以看出, 随着径向距离的增加, 径向应力先基本保持不变, 然后急剧下降, 且径向应力随双陶瓷层厚度比增加而增大。较大的径向应力是导致涂层表面产生垂直裂纹的主要原因。由于较大的

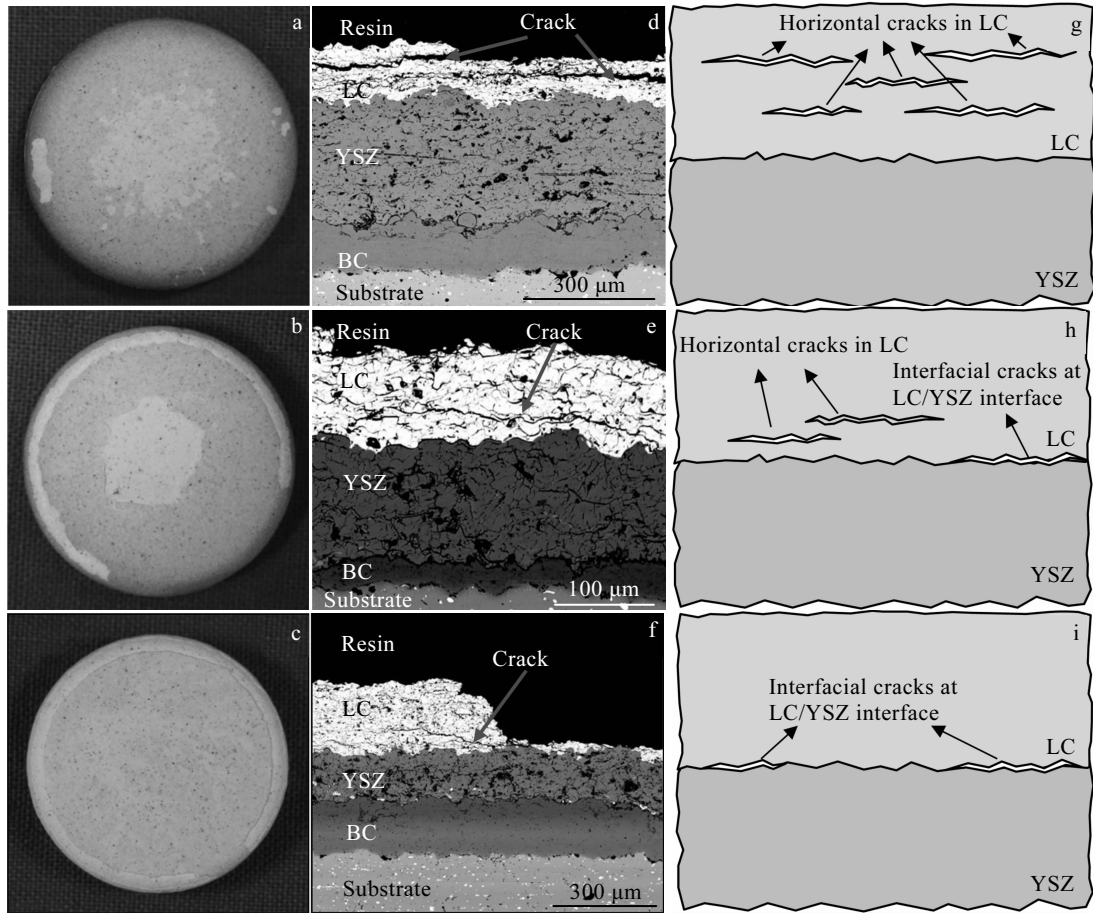


图 4 双陶瓷层 TBCs 经 1000 °C 热震实验后表面剥落图、微观结构图以及失效模式示意图

Fig.4 Surface images (a-c), microstructures (d-f) and schematic of failure modes (g-i) of LC/YSZ thermal barrier coatings after thermal shock at 1000 °C: (a, d, g) LC/YSZ=100 μm/200 μm, (b, e, h) LC/YSZ=150 μm/150 μm, and (c, f, i) LC/YSZ=200 μm/100 μm

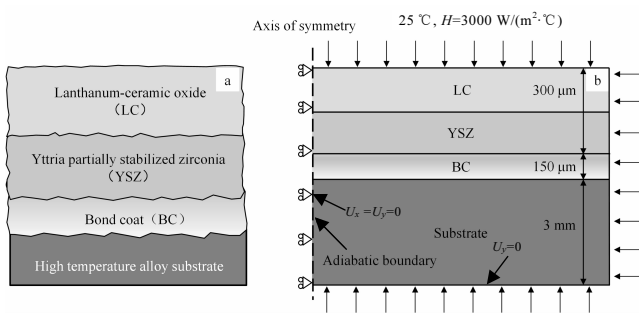


图 5 LC/YSZ 双陶瓷层 TBCs 结构示意图及物理模型

Fig.5 Schematic of structure (a) and physical model (b) of LC/YSZ thermal barrier coatings

径向应力主要集中在径向距离 0~11 mm 以内，因此垂直裂纹的产生主要发生于圆柱体试样涂层表面的中间部分区域。垂直裂纹产生后，LC 层不会立即剥落，由于裂尖奇异性会使得裂尖轴向应力很大而导致水平裂

纹萌生，并伴随着界面偏折。随着热循环次数的增加，相邻垂直裂纹间的水平裂纹不断扩展、汇聚，最终导致涂层自 LC 内部发生剥离。这可能是厚度比为 100 μm/200 μm 和 150 μm/150 μm 的双陶瓷层 TBCs 中心区域发生层状剥离的原因。由于中心区域 LC 层发生剥离需要一定的循环次数，因此虽然厚度比为 200 μm/100 μm 的双陶瓷层涂层表面径向热应力较大，但是它的循环次数很少，垂直裂纹的产生不足以导致涂层发生剥落。从实验结果可以发现厚度比为 150 μm/150 μm 的涂层中心区域发生剥落的时间早于厚度比为 100 μm/200 μm 的双陶瓷层涂层。

图 6b、6c 分别为 3 种厚度比 LC/YSZ 涂层双陶瓷层界面处的轴向应力与剪切应力沿径向距离的分布，图 6e、6f 分别为 A 点和 B 点轴向应力及剪切应力分布云图。由图 6b 和图 6c 可知，随着径向距离的增加，双陶瓷层界面处的轴向应力与剪切应力先是基本保持不变，然后出现突变，且突变应力的绝对值随着 LC

表 3 热障涂层系统各层材料参数  
Table 3 Property parameters of TBCs<sup>[32]</sup>

Material	Temperature/ °C	Elastic modulus/GPa	Density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Thermal expansion coefficient/ $\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Poisson ratio	Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	Specific heat/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
LC	25	49	7100	6.7	0.24	1.12	494
	400	44	7100	8.9	0.24	0.93	565
	800	38	7100	13.7	0.24	0.9	607
YSZ	25	53	4400	7.2	0.25	1.5	500
	400	52	4400	9.4	0.25	1.2	576
	800	46	4400	16	0.25	1.2	637
BC	25	225	7320	14	0.3	4.3	501
	400	186	7320	24	0.3	6.4	592
	800	147	7320	47	0.3	10.2	781
Substrate	25	200	8220	14.4	0.3	11.5	431
	400	179	8220	14.4	0.3	17.5	524
	800	149	8220	14.4	0.3	23.8	627

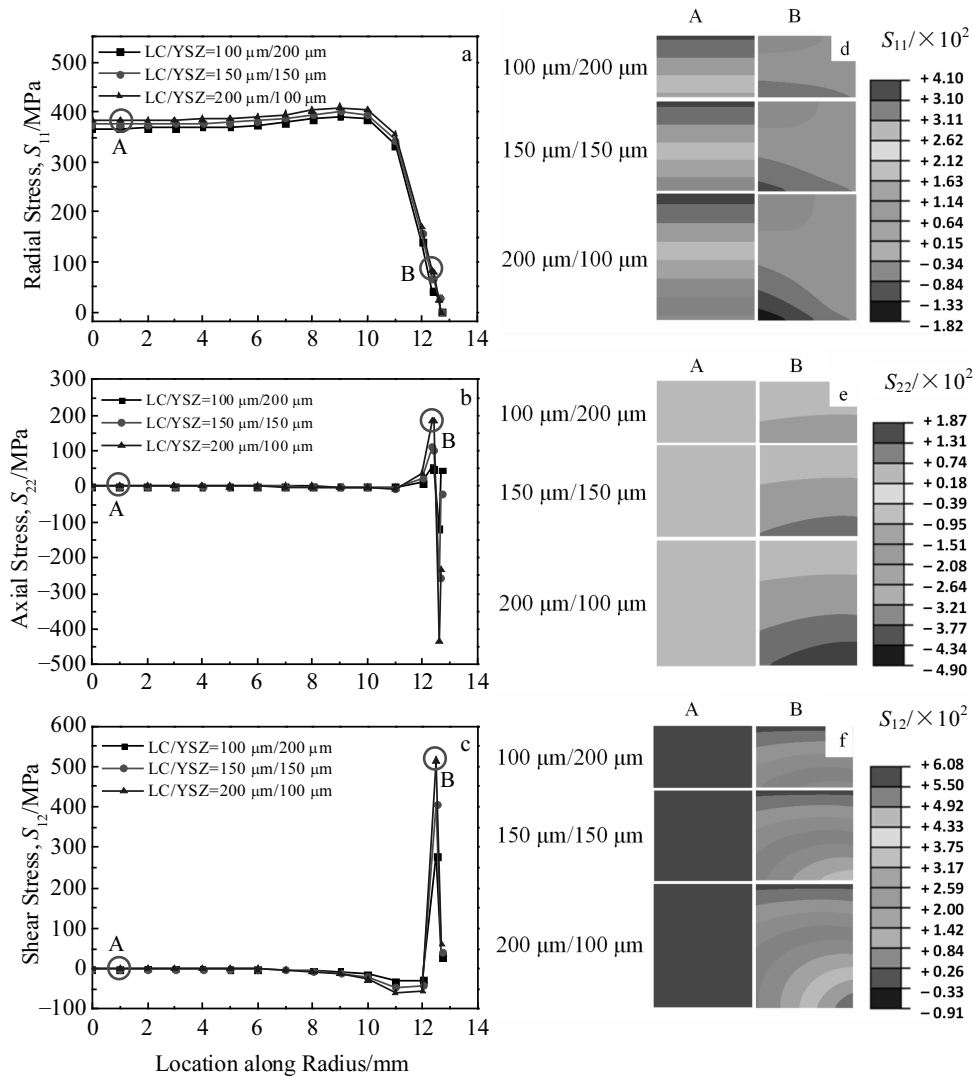


图 6 3 种厚度比 LC/YSZ 热障涂层应力分布曲线以及 A, B 两点处 LC 层应力云图

Fig.6 Stress distribution (a-c) and stress contour in LC of point A and point B (d-f) in LC/YSZ TBCs with three different thickness ratios: (a, d) radial stress on LC surface, (b, e) axial stress in the interface of LC and YSZ, and (c, f) shear stress in the interface of LC and YSZ

厚度的增加而增大。较大的轴向拉应力与剪切应力是热冲击过程中界面附近产生横向裂纹及涂层在界面附近剥落的主要原因。并且由于 LC/YSZ 界面附近处较大的轴向拉应力及剪切应力主要集中于靠近涂层侧边缘处,因此涂层剥离发生在圆柱体试样的边缘部分。这是 LC 与 YSZ 厚度比为 200  $\mu\text{m}$ /100  $\mu\text{m}$  和 150  $\mu\text{m}$ /150  $\mu\text{m}$  的双陶瓷层 TBCs 在两陶瓷层界面附近失效的原因。

## 4 结 论

1)  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$  双陶瓷层热障涂层热震寿命、剥离速率及失效模式均与两层陶瓷层的厚度比密切相关。随着  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$  厚度比增加,即 YSZ 层厚度减小,失效位置自中间区域逐渐转移到试样边缘,失效模式逐渐从表面陶瓷层的层状剥落转变成双陶瓷层界面附近处的剥离,且剥离速度变快,热震寿命降低。

2) 较大的径向拉应力是导致 LC 层表面产生垂直裂纹的主要原因。随着热循环次数增加,裂尖奇异性使得轴向应力增大而诱发水平裂纹萌生,相邻垂直裂纹间的水平裂纹不断扩展、汇聚,最终导致涂层剥落。这是  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  与 YSZ 厚度比为 100  $\mu\text{m}$ /200  $\mu\text{m}$  和 150  $\mu\text{m}$ /150  $\mu\text{m}$  的试样自 LC 中心区域发生层状剥离的主要原因。

3) 双陶瓷层界面边缘处较大的轴向拉应力与剪切应力诱发了双陶瓷层界面边缘横向裂纹的萌生,最终导致涂层在界面附近剥离。这是  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  与 YSZ 厚度比为 200  $\mu\text{m}$ /100  $\mu\text{m}$  和 150  $\mu\text{m}$ /150  $\mu\text{m}$  的涂层试样自两陶瓷层界面附近剥落失效的主要原因。

## 参考文献 References

- [1] Padture N P, Gell M, Jordan E H. *Science*[J], 2002, 296(5566): 280
- [2] Wang Tiejun(王铁军), Fan Xueling(范学领), Sun Yongle(孙永乐) et al. *Chinese Journal of Solid Mechanics*(固体力学学报)[J], 2016, 37(6): 477
- [3] Kumar V, Balasubramanian K. *Progress in Organic Coatings* [J], 2016, 90: 54
- [4] Wang L, Li D C, Yang J S et al. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2016, 36(6): 1313
- [5] Fan X L, Xu R, Zhang W X et al. *Applied Surface Science*[J], 2012, 258(24): 9816
- [6] Lv B W, Fan X L, Xie H et al. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2017, 37(2): 811
- [7] Vassen R, Cao X Q, Tietz F et al. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2000, 83(8): 2023
- [8] Levi C G. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*[J], 2004, 8(1): 77
- [9] Evans A G, Clarke D R, Levi C G. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2008, 28(7): 1405
- [10] Wu J, Guo H B, Zhou L et al. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2010, 19(6): 1186
- [11] Fan X L, Zhang W X, Wang T J et al. *Applied Surface Science*[J], 2011, 257(15): 6718
- [12] Basu D, Funke C, Steinbrech R W. *Journal of Materials Research*[J], 1999, 14(12): 4643
- [13] Clarke D R, Levi C G. *Annual Review of Materials Research*[J], 2003, 33(1): 383
- [14] Cao X Q, Vassen R, Stoeber D. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2004, 24(1): 1
- [15] Cao X Q, Vassen R, Tietz F et al. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2006, 26(3): 247
- [16] Cao Xueqiang(曹学强). *New Materials and New Structure of the Thermal Barrier Coatings*(热障涂层新材料和新结构)[M]. Beijing: Science Press, 2016: 412
- [17] Fox D S, Miller R A, Zhu D M et al. *Mach 0.3 Burner Rig Facility at the NASA Glenn Materials Research Laboratory* [R]. Cleveland, Ohio: NASA Glenn Research Center, 2011
- [18] Tamura M, Takahashi M, Ishii J et al. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 1999, 8(1): 68
- [19] Guo H B, Wang Y, Wang L et al. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2009, 18(4): 665
- [20] Wang L, Wang Y, Sun X G et al. *Computational Materials Science*[J], 2012, 53(1): 117
- [21] Bakan E, Mack D E, Mauer G et al. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2014, 97(12): 4045
- [22] He L M, Zhou X, Zhong B T et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 624: 137
- [23] Schmitt M P, Rai A K, Bhattacharya R et al. *Surface and Coatings Technology*[J], 2014, 251: 56
- [24] Vaßen R, Traeger F, Stöver D. *International Journal of Applied Ceramic Technology*[J], 2004, 1(4): 351
- [25] Ma W, Dong H Y, Guo H B et al. *Surface and Coatings Technology*[J], 2010, 204(21-22): 3366
- [26] Chen X L, Gu L J, Zou B L et al. *Surface and Coatings Technology*[J], 2012, 206(8-9): 2265
- [27] Fan X L, Xu R, Wang T J. *Ceramics International*[J], 2014, 40(9): 13 793
- [28] Xu R, Fan X L and Wang T J. *Applied Surface Science*[J], 2016, 370: 394
- [29] Dai H, Zhong X H, Li J Y et al. *Materials Science and*

*Engineering A*[J], 2006, 433(1-2): 1

54(8): 1505

[30] Cao X Q, Vassen R, Fischer W *et al. Advanced Materials*[J], 2003, 15(17): 1438

[32] Wang L, Zhong X H, Zhao Y X *et al. Journal of Asian Ceramic Societies*[J], 2014, 2(2): 102

[31] Ma W, Gong S K, Xu H B *et al. Scripta Materialia*[J], 2006,

## Effect of Ceramic Layer Thickness Ratio on Thermal Shock Resistance of $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ Thermal Barrier Coatings

Ren Xiaoxue, Jiang Peng, Fan Xueling, Wang Tiejun

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structure, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The effect of the thickness ratio between  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  (LC) layer and YSZ layer on the thermal shock performance of  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$  double-ceramic-layer thermal barrier coatings was studied by experimental and numerical method. The thermal cycling test indicates that with the decrease of the thickness ratio, the lifetime of double-ceramic-layer thermal barrier coatings is improved obviously and the failure region gradually transfers to the sample center. Meanwhile the separation position transfers from the LC/YSZ interface to the inner LC near the upper surface. The numerical results show that the larger axial tensile stress and shear stress of the interface of LC layer and YSZ layer at the edge leads to the spallation failure at the coating edge. The larger radial tensile stress at the central area of the LC surface leads to the initiation of vertical cracks accompanied by the interface deflection, which is the reason why the coating is peeled off from the inside of the LC layer.

**Key words:** thermal barrier coatings; double-ceramic-layer; thermal shock lifetime; failure mode; thermal stress

---

Corresponding author: Fan Xueling, Ph. D., Professor, State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structure, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82667864, E-mail: fanxueling@xjtu.edu.cn