

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.01.003

热喷涂纳米结构 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ)/8YSZ 双陶瓷热障涂层 *

王 铀¹, 王 亮², 刘赛月¹, 刘 勇¹, 王超会^{1,3}, 邹志伟^{1,4}

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所 特种无机涂层重点实验室, 上海 201899; 3. 齐齐哈尔大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 4. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了满足发动机以及涡轮机越来越高的性能要求, 双陶瓷热障涂层逐渐取代单陶瓷层的 8YSZ 涂层, 成为可以长期使用温度高于 1 200 °C 的新型陶瓷涂层。采用等离子喷涂方法制备了 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ)/8YSZ 双陶瓷热障涂层, 并同时制备了微米结构和纳米结构的单层 8YSZ 陶瓷涂层作为对比。通过 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜研究了粉体喂料和涂层的组织结构。采用对偶拉伸试验法、水淬方法和日本工业标准等研究了涂层的结合强度、隔热效果、热震行为以及高温抗氧化行为。结果表明, 与单层的 8YSZ 陶瓷层相比, 双陶瓷型 n-LZ/8YSZ 涂层的隔热效果提高了 35%, 热震次数增加了一倍, 热氧化失效时间延长了 100 多小时, 具有较佳的隔热效果、抗热震性能以及抗高温氧化性能。

关键词: 热喷涂; 纳米结构; LZ/8YSZ 双陶瓷层; 热障涂层

中图分类号: TG 174.442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2016)01-0016-09

Nanostructured $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ)/8YSZ Double Ceramic Layer Thermal Barrier Coatings Fabricated by Thermal Spraying

WANG You¹, WANG Liang², LIU Sai-yue¹, LIU Yong¹, WANG Chao-hui^{1,3}, ZOU Zhi-wei^{1,4}

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001; 2. Key Laboratory of Inorganic Coating Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899; 3. College of Materials Science and Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, Heilongjiang; 4. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: The required performance of the engine and turbine becomes increasingly high. As the substitute for 8YSZ coatings, the double ceramic layer thermal barrier coatings are expected to work above 1 200 °C for a long time. In this paper, nanostructured LZ/8YSZ double ceramic layer thermal barrier coatings were prepared by plasma spraying. The feedstock, microstructure and phase compositions were studied by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Thermal insulation effect, thermal shock and high temperature oxidation behavior of coatings were investigated using dual tensile test, water quenching method and Japanese industry standard. Compared with 8YSZ coating, the double ceramic layer coating shows better heat-shielding (increased by 35%), better anti-thermal shock (twice) performance and the failure time induced by thermal oxidation is elongated to more than 100 h.

Keywords: thermal spraying; nanostructure; LZ/8YSZ double ceramic layer; thermal barrier coatings

收稿日期: 2015-08-22; **修回日期:** 2015-12-27; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51202277); 黑龙江省自然科学基金(E2015044)

通讯作者: 王铀(1954-), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 热喷涂, 纳米改性及摩擦磨损; **Tel:** (0451) 8640 2752; **E-mail:** wangyou@hit.edu.cn

网络出版日期: 2016-01-30 17:24; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160130.1724.006.html>

引文格式: 王铀, 王亮, 刘赛月, 等. 热喷涂纳米结构 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ)/8YSZ 双陶瓷热障涂层[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 16-24.
WANG Y, WANG L, LIU S Y, et al. Nanostructured $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ)/8YSZ double ceramic layer thermal barrier coatings fabricated by thermal spraying[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 16-24.

0 引言

而今,航空发动机的推重比以及涡轮前进口温度越来越高。比如,国外新型军用航空发动机的涡轮进口温度已达 $1\,538\sim 1\,871\text{ }^\circ\text{C}$,而设计推重比 $15\sim 20$ 发动机的涡轮前进口温度将达到 $2\,077\text{ }^\circ\text{C}$ 以上^[1-3]。

热障涂层(TBC)被广泛用于飞机发动机、涡轮机和汽轮机叶片上,保护高温合金基体免受高温氧化和腐蚀,起到隔热、提高发动机进口温度与提高发动机推重比的作用。目前最为常见的热障涂层结构体系是由打底合金结合层和陶瓷工作层组成。打底层材料通常为 MCoCrAlY ($\text{M}=\text{Ni}$ and/or Co),工作层主要是采用 $8\%\text{ Y}_2\text{O}_3$ (质量分数)稳定的 ZrO_2 (8YSZ)为主的陶瓷层^[4-6]。

然而,大量文献^[7-9]表明,单陶瓷层的 8YSZ 涂层根本不能长期应用在 $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上高温条件下。于是,为满足未来先进航空发动机对 TBC 更苛刻的性能要求,各种关于 TBC 的新材料和新工艺得到了快速发展。

长春应用化学所的 Cao 等人用电子束物理气相沉积技术制备了双陶瓷型热障涂层。研究表明:这种双陶瓷型热障涂层能够极大地提高热循环寿命^[10-12]。Ma 等也用电子束物理气相

沉积技术制备了 $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ 双陶瓷层结构热障涂层,有效克服了涂层界面反应的问题,大幅度提高了涂层的热循环寿命^[13]。Guo 等设计了 GYbZ/YSZ 双陶瓷层热障涂层,采用电子束物理气相沉积制备了成分近似化学计量比的 GYbZ/YSZ 涂层,该种涂层具有很好的高温燃气热冲击抗力^[14]。

有文献曾经报道过锆酸盐陶瓷块体的热物性能,很少提及锆酸盐热障涂层的热震性能和抗高温氧化性能。文中首次利用纳米粉体的造粒调控技术成功制备出了纳米结构锆酸镧($\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$)和 8YSZ 粉体喂料。并利用等离子喷涂技术制备出双陶瓷型热障涂层,与单陶瓷层的涂层相比,表现出更好的热震性能和抗高温氧化性能。

1 材料与方法

1.1 喷涂喂料与喷涂层的制备

涂层基体采用 GH4169 镍基高温合金(各元素的质量分数为: $0.08\%\text{ C}$, $17\%\text{ Cr}$, $50\%\text{ Ni}$, $1\%\text{ Co}$, $2.8\%\text{ Mo}$, $0.3\%\text{ Al}$, $0.75\%\text{ Ti}$, 余量 Fe),加工尺寸为 $\Phi 20\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。喷涂陶瓷层之前先采用 NiCoCrAlY 合金喷涂过渡结合层。喷涂采用的参数如表 1 所示。

表 1 热喷涂工艺参数

Table 1 Parameters of the thermal spraying

Parameters	NiCoCrAlY	$\text{ZrO}_2-8\%\text{ Y}_2\text{O}_3$	$\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$
Current/A	530	570	650
Voltage/V	53	55	60
Flow rate of primary gas/(SCFH [*])	120	100	100
Feedstock giving rate/($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)	5.0	6.8	6.3
Spray distance/mm	110	80	100
Spray angle/ $^\circ$	90	90	90
Spray velocity/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	30	30	30

(SCFH^{*}: Standard cubic foot per hour, $1\text{ SCFH}=0.472\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

喷涂用粉体喂料组织结构对热喷涂涂层的质量起着决定性的作用^[15]。文中首次利用纳米粉体的造粒调控技术成功制备出了纳米结构锆酸镧($\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$)粉体喂料(简称 n-LZ)和纳米结构 8YSZ 粉体喂料。作为对比,购买了传统结构 8YSZ 粉体喂料。

1.2 试验方法与设备

利用对偶拉伸试验法测量涂层的结合强度。参照中国航空工业标准 HB5258-2000 对涂层在 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 进行等温氧化试验,以各组涂层试样氧化增重表征涂层抗高温氧化性能。涂层的热震试验是参照日本工业标准

JIS8666-1990 进行试验。利用日本 Hitachi 公司生产的 S-570 型扫描电子显微镜观察粉体及涂层的微观组织形貌。选用日本理学 D/max 2400 型 X 射线衍射仪对涂层的物相组成进行分析。扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$, 扫描范围为 $10^\circ \sim 90^\circ$, 加速电压为 40 kV, 电流 30 mA。

2 涂层的组织结构及残余应力

2.1 喂料的组织结构

图 1 为 3 种喂料的表面形貌, 由图可见, 传统

的 8YSZ 喂料呈现不规则的多角状和菱状形貌, 而纳米结构 8YSZ 喂料和 LZ 喂料主要呈现球形形貌, 可以看到纳米结构 LZ 喂料颗粒表面具有多孔疏松结构, 这种结构对后续制备的涂层的隔热效果是较为有利的。

将 n-LZ 粉体喂料与 8YSZ 粉体喂料采用等离子喷涂制备纳米结构的双陶瓷型 n-LZ/8YSZ 热障涂层。为进行对比研究, 也制备了传统微米结构单陶瓷型 8YSZ 热障涂层和纳米结构单陶瓷型 8YSZ 热障涂层 (简称 n-8YSZ 涂层)。

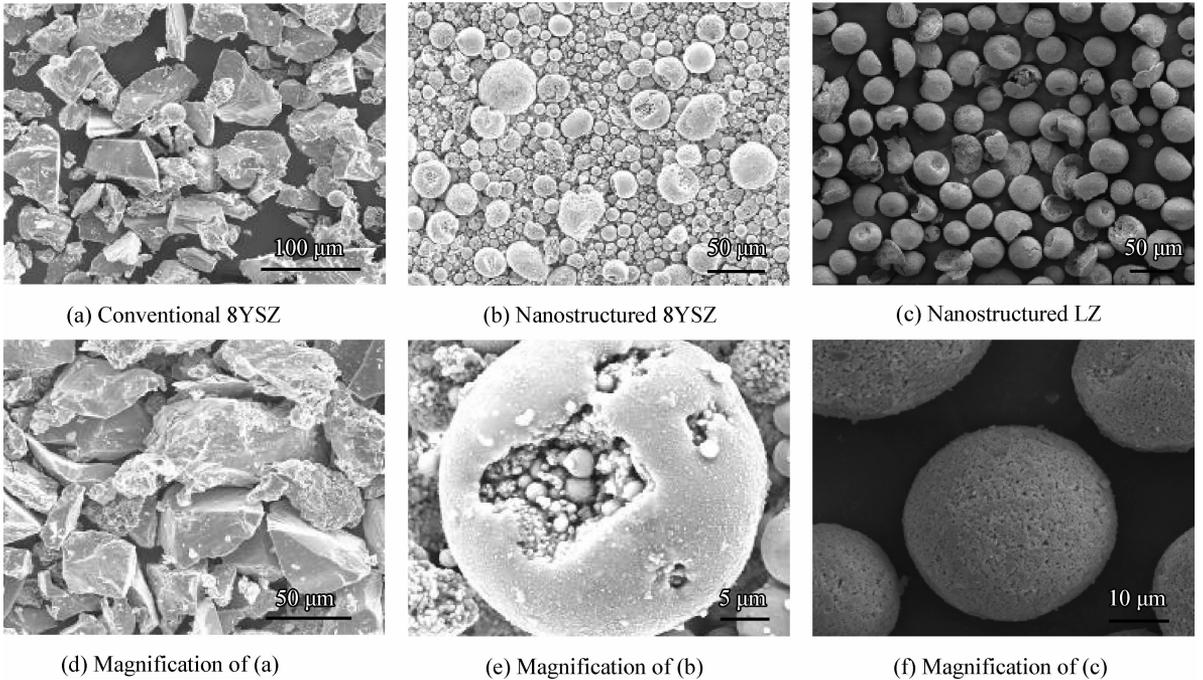


图 1 热喷涂喂料的表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies of the thermal sprayed feedstock

2.2 涂层的残余应力与组织结构

图 2 为单陶瓷层纳米 8YSZ 涂层和双陶瓷层 LZ/8YSZ 涂层的残余应力对比, 可以看出, 单陶瓷层 8YSZ 涂层的径向残余应力, 轴向残余应力和剪切应力均高于双陶瓷层 LZ/8YSZ 涂层。因此, 选择双陶瓷层 LZ/8YSZ 涂层是非常合适的。所制备的 3 种涂层, 即传统结构 8YSZ 涂层、纳米结构的 n-8YSZ 涂层和纳米结构的双陶瓷型 n-LZ/8YSZ 涂层与基体的结合强度分别为 22.3、28.2 和 27.5 MPa。

图 3 示出了 3 种喂料及相应涂层的 XRD 分析。对于传统结构 8YSZ 涂层来说, 喷涂喂料的主要成分为 $Y_{0.15}Zr_{0.85}O_{1.93}$, m-ZrO₂, c-ZrO₂。喷

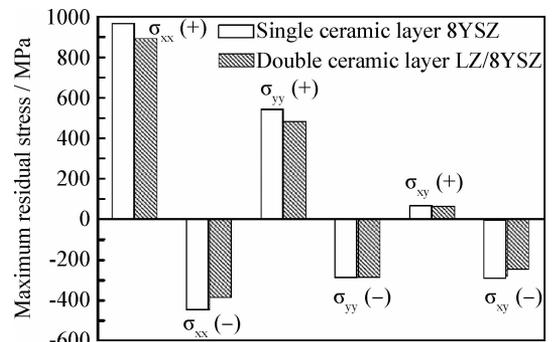


图 2 单陶瓷层 8YSZ 涂层和双陶瓷层 LZ/8YSZ 涂层的残余应力对比

Fig. 2 Comparison of maximum residual stress of the single ceramic layer 8YSZ and double ceramic layer LZ/8YSZ TBCs

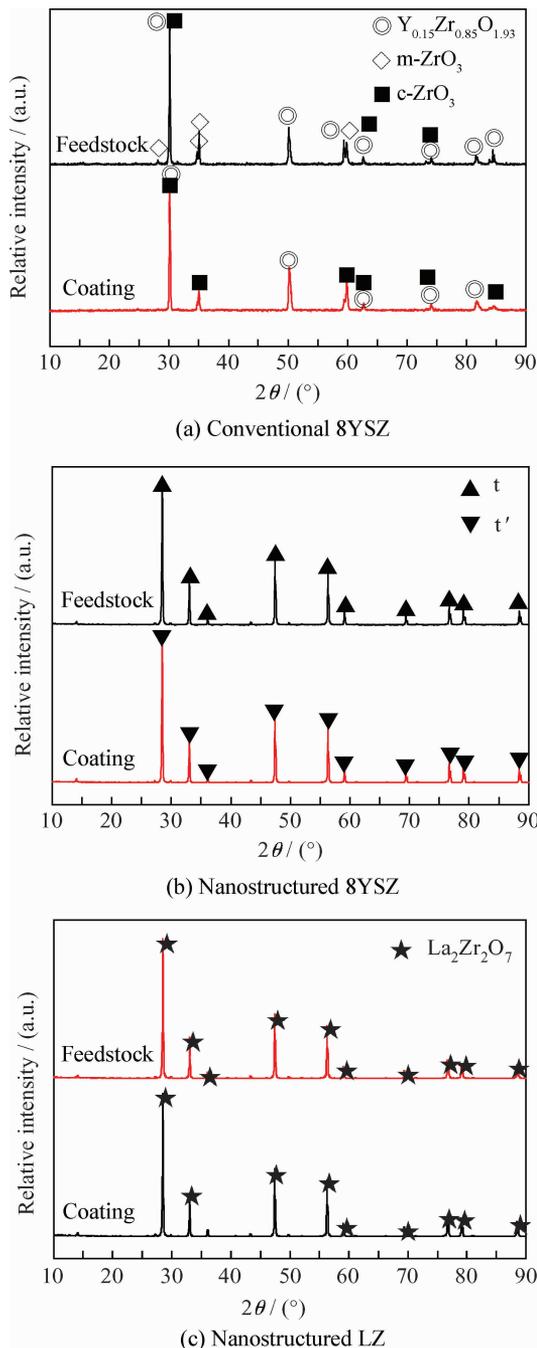


图 3 热喷涂喂料及相应涂层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of the thermal sprayed feedstocks and corresponding coatings

涂后涂层的主要相成分为 $\text{Y}_{0.15}\text{Zr}_{0.85}\text{O}_{1.93}$, c-ZrO_2 。而对于纳米结构的 n-8YSZ 涂层来讲,喷涂喂料的主要成分为 t 相,而喷涂后涂层中的主要相为 t' 相,它具有更低的 c 值和 c/a 值(a, c 为晶格常数)。对 $\text{n-LZ}/8\text{YSZ}$ 涂层来讲,喷涂前 n-LZ 喂料主要有单一的 LZ 相组成,而喷涂后,表面层 n-LZ 层的相结构仍为 LZ 层。

图 4 所示为 3 种热障涂层的截面形貌,由图可以看出,3 种涂层具有分层结构特征,但传统结构的 8YSZ 涂层相对更明显。比较 4(a)(b) 可以发现纳米结构 n-8YSZ 涂层相对于传统结构 8YSZ 涂层致密度更高。图 4(c) 是双陶瓷型 $\text{n-LZ}/8\text{YSZ}$ 热障涂层的二次电子像,图 4(d) 是双陶瓷型 $\text{n-LZ}/8\text{YSZ}$ 热障涂层的背散射电子像,由元素的线扫描可以看出 $\text{n-LZ}/8\text{YSZ}$ 热障涂层具有三层结构,即基体之上的结合层 + n-8YSZ 层 + n-LZ 顶层。3 层涂层总厚度在 $300\ \mu\text{m}$ 左右,与另两种单陶瓷型热障涂层相当。

3 涂层的高温性能

3.1 隔热效果

测试得到的隔热温度数值如图 5 所示,结果表明,纳米结构的双陶瓷型涂层的隔热效果明显好于其它涂层,与相同厚度的纳米结构单陶瓷型 n-8YSZ 热障涂层相比,隔热效果大约提高了 35%,与相同厚度的传统微米结构单陶瓷型 8YSZ 热障涂层相比,隔热效果提高了 70% 以上。并且隔热温度高,相应的有效热导率也低。图 6 表示 3 种涂层在不同温度下的有效热导率,可以发现, $\text{LZ}/8\text{YSZ}$ 涂层具有最低的有效热导率,传统结构 8YSZ 涂层的有效热导率最高。

3.2 热震抗力

热震试验在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 和 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 两个温度下进行。涂层从水中取出时用放大镜观察其表面的宏观裂纹。如果涂层表面出现较为粗大的宏观裂纹或者出现占总面积 20% 的掉皮,剥落,龟裂等现象,则视为涂层已经发生失效,即可终止试验^[16-18]。图 7 为 3 种涂层在不同温度下的热循环寿命。可以看出无论在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 和 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 下,双陶瓷型 $\text{n-LZ}/8\text{YSZ}$ 都表现出优于单陶瓷层 8YSZ 涂层的抗热震性能,特别在 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$,双陶瓷型 $\text{n-LZ}/8\text{YSZ}$ 的抗热震次数是纳米结构 n-8YSZ 涂层的两倍多,而与此同时,在同种温度下,纳米结构单陶瓷层的热循环寿命都高于传统结构单陶瓷层的热循环寿命。

图 8 为 3 种涂层不同温度下热震失效的 XRD 图谱,由图 8(a) 可以看出,传统结构 8YSZ 热障涂层在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 热震条件下,表面相的组成主要是 $\text{Zr}_{0.92}\text{Y}_{0.08}\text{O}_{1.96}$ 和 $t\text{-ZrO}_2$ 相,而在 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 热震条件下,生成相除 $\text{Y}_{0.15}\text{Zr}_{0.85}\text{O}_{1.93}$,

c-ZrO₂ 外, 还含有 Cr₂Ni₃, AlNi₃, Al_{0.9}Ni_{4.22}, Al₄CrNi₁₅。由图 8(b)可见, 纳米结构 n-8YSZ 热障涂层在 1 000 °C 热震条件下, 表面相的组成主要是 Y_{0.15}Zr_{0.85}O_{1.93} 和 c-ZrO₂ 相, 而在 1 200 °C 热震条件下, 生成相仍为 Y_{0.15}Zr_{0.85}O_{1.96} 和

c-ZrO₂。由图 8(c)可知, 双陶瓷型 n-LZ/8YSZ 热障涂层在 1 000 °C 热震条件下, 表面相的组成几乎全部为 La₂Zr₂O₇ 相, 而在 1 200 °C 热震条件下, 生成相除含有 La₂Zr₂O₇ 相, 还有 Zr_{0.92}Y_{0.08}O_{1.96} 和 c-ZrO₂。

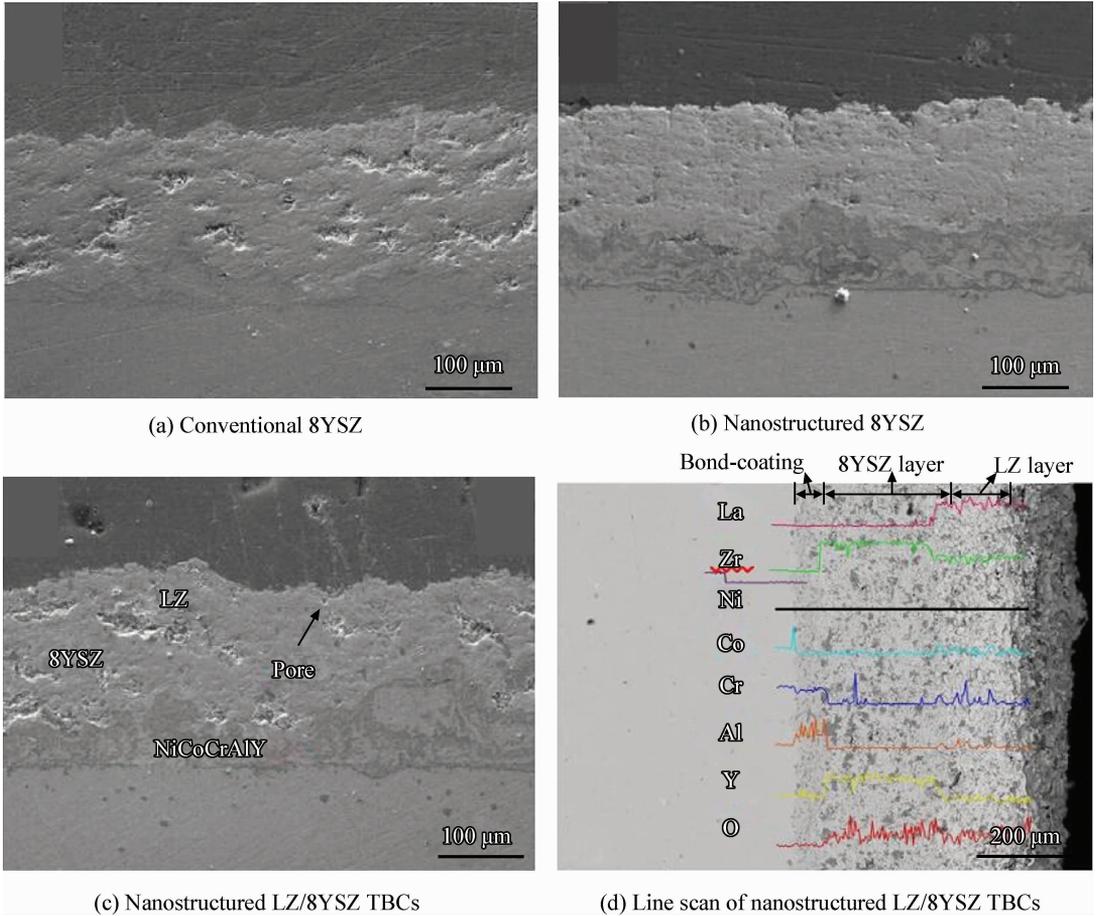


图 4 不同热障涂层的截面形貌

Fig. 4 Cross section morphologies of the thermal barrier coatings

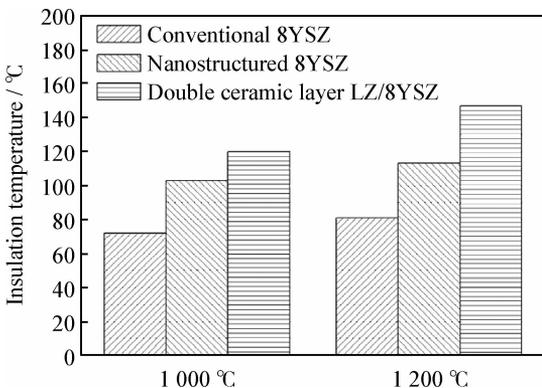


图 5 涂层在不同温度下的隔热温度

Fig. 5 Insulation temperature of the coatings at different temperature

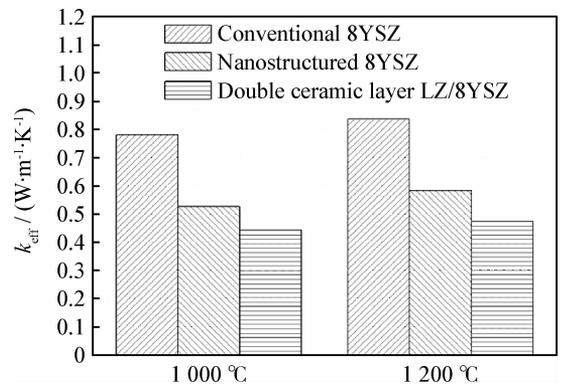


图 6 涂层在不同温度下的有效热导率

Fig. 6 Effective thermal conductivity of the as-sprayed coatings at different temperature

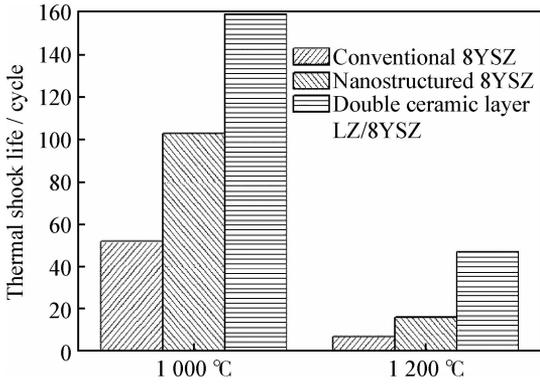


图 7 涂层在不同热震温度下的热循环寿命

Fig. 7 Thermal cycling life of the coatings at different thermal shock temperature

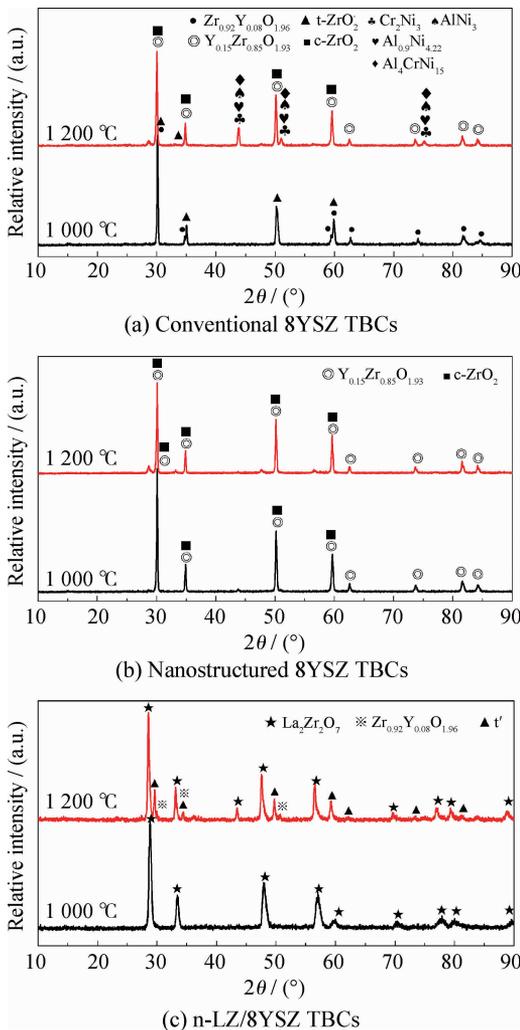


图 8 涂层在不同温度失效后的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns of the coatings failed at different temperature

构 8YSZ 涂层具有明显的层状结构,其在 1 000 °C 失效主要是片层内部发生断裂剥离失效,而在 1 200 °C 热震条件下主要是发生了片层之间的界面处的分离失效,并且还伴随有较大的融滴片层的拔出效应。由图 9(b)(e)可以看出,纳米结构 n-8YSZ 涂层在 1 000 °C 热震条件下主要是由于涂层内部应力的作用产生了纵向裂纹,而在 1 200 °C 条件下,主要是由于纵向裂纹沿着喷涂方向快速扩展达到横向界面而发生涂层的失效。

对 n-LZ/8YSZ 双陶瓷涂层来说,在 1 000 °C 条件下的热震失效主要是大量融滴片层粒子之间的分离剥离,而在 1 200 °C 热震条件下,LZ 层内部产生了微裂纹,微裂纹沿着扩展阻力比较小的地方,如片层的界面快速扩展至 LZ 层与 8YSZ 层的界面从而发生失效(图 9(c)(f))。

3.3 抗高温氧化行为

图 10 表示的是 3 种涂层在不同氧化温度下氧化增重与时间的函数关系,由图可以看出,氧化过程可分为 3 个阶段,即快速氧化阶段,稳定氧化阶段及失效阶段。在快速氧化阶段,氧化增重比较明显,可以看出,在 1 000 °C 时,3 种涂层的快速氧化阶段在 25~50 h 之间,而在 1 200 °C 时,3 种涂层的快速氧化阶段在 20~25 h 之间。无论在那种温度条件下,n-LZ/8YSZ 涂层均具有最小的氧化增重和最低的氧化速率。1 000 °C 氧化时,传统结构的 8YSZ 涂层在经历 225 h 后发生了大面积的剥落失效,纳米结构 n-8YSZ 涂层在 300 h 后才发生失效,而 n-LZ/8YSZ 在经历 400 h 氧化后仍未见明显的重量变化。而在 1 200 °C 氧化时,传统结构 8YSZ 涂层在经历 175 h 后发生了大面积的剥落失效,纳米结构 n-8YSZ 涂层在 225 h 后才发生失效,而 n-LZ/8YSZ 在经历 400 h 氧化后仍然还未见明显的重量变化。因此可以看出,n-LZ/8YSZ 具有非常优异的抗高温氧化性能,1 200 °C 氧化时,其静态高温氧化寿命至少在 400 h 以上。

n-LZ/8YSZ 涂层具有优异的抗高温氧化性能,主要由于 LZ 在高温下对氧是不透过的,空气中的氧无法透过 8YSZ,理论上仅能通过孔隙和平行于涂层喷涂方向的裂纹通过,但是孔隙和裂纹必须贯穿于整个 LZ 层的厚度方向,氧才较容易通过。而实际上涂层内部是很

图 9 表示的是 3 种涂层不同热震温度失效后的断口形貌,由图 9(a)(d)可以看出,传统结

难存在着这样的缺陷,因此 LZ/8YSZ 涂层的氧化速率要远远低于单陶瓷层 8YSZ 涂层的氧化速率。

纳米结构 n-8YSZ 涂层比微米结构 8YSZ 涂层具有更高的抗高温氧化性能,主要原因在于纳

米结构 n-8YSZ 涂层具有更微小的孔隙,氧更不容易通过。即使进入稳定氧化阶段也会由于涂层在快速氧化阶段形成了连续而致密的热生长氧化层(TGO),从而阻止了氧的进一步通过,使得氧化过程处于稳定氧化阶段^[19-21]。

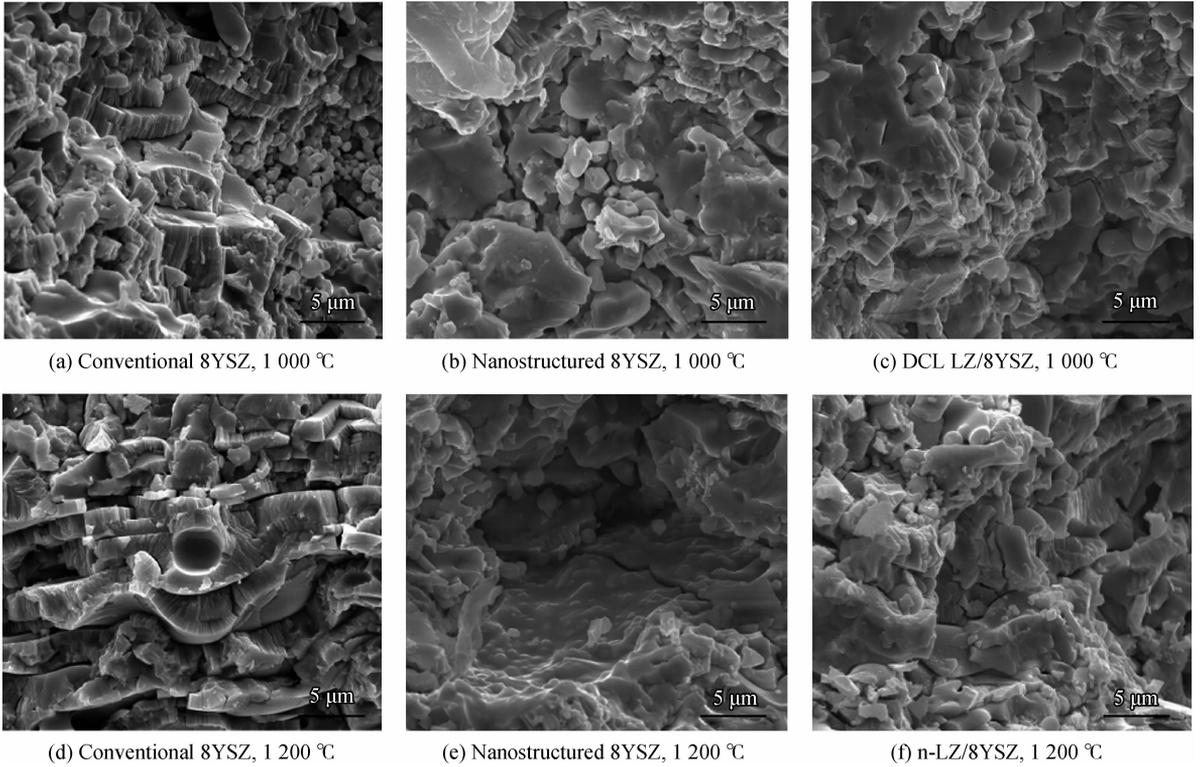


图9 涂层在不同温度热震后的断面形貌

Fig. 9 Fracture morphologies of the coatings after thermal shock at different temperature

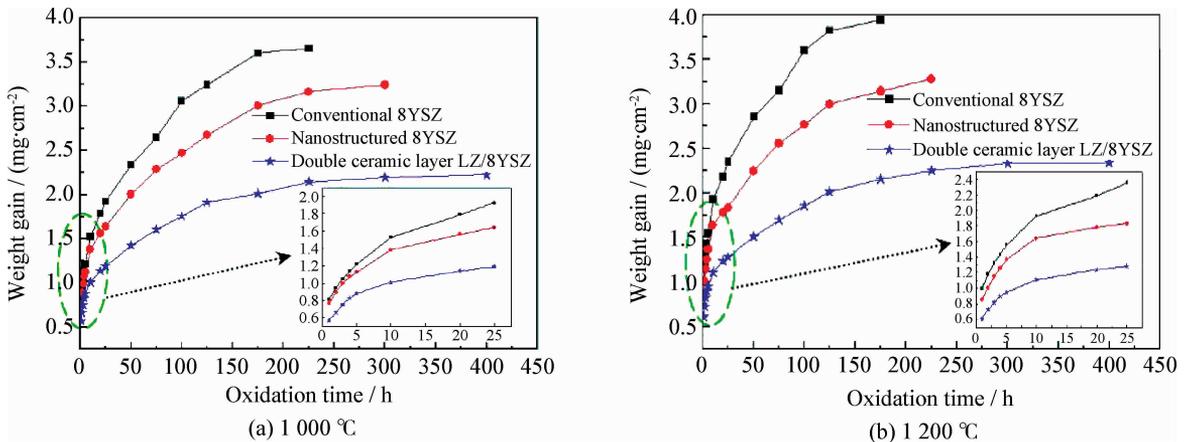


图10 不同温度下氧化增重与时间变化的函数关系

Fig. 10 Weight gain as the function of time at different temperature

3.4 LZ层对8YSZ层的热保护作用

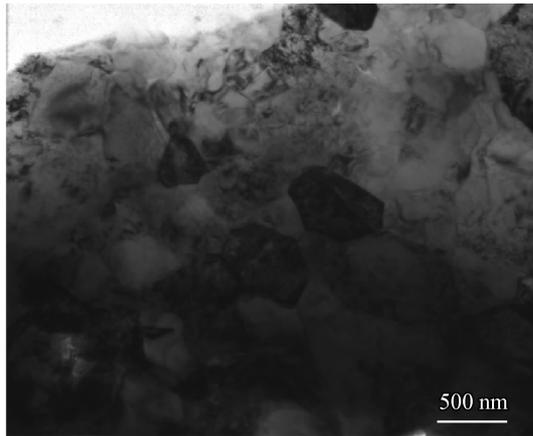
双陶瓷涂层的优势在于顶层 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 对底

层纳米晶 8YSZ 的热保护作用。由于 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 具有较低的热导率,则具有一定厚度的顶层能对下面一层的 8YSZ 纳米晶层起到一定的热保护作

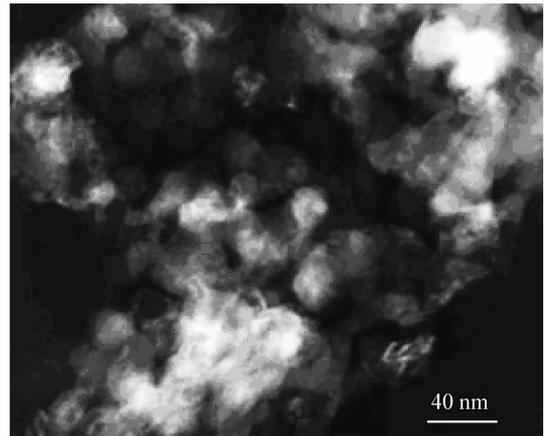
用,从而在一定程度上抑制下面一层纳米晶 8YSZ 层晶粒的长大。

图 11(a)(b)是纳米结构 n-8YSZ 及 n-LZ/8YSZ 涂层在 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 煅烧 25 h 后的 TEM 形貌,由图可以看出,纳米结构 n-8YSZ 涂层在经历 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 煅烧 25 h 后,其晶粒已经发生了长大,而有 LZ 保护的 n-LZ/8YSZ 涂层的 8YSZ 晶粒没有发生明显的长大。图 11(c)(d)是纳米结构 n-8YSZ 及 n-LZ/8YSZ 涂层在 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 煅烧

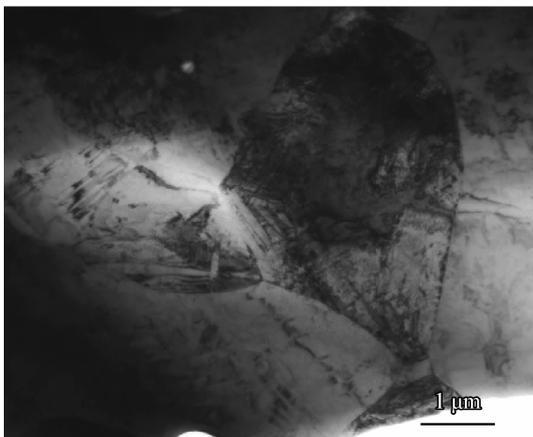
45 h 后的 TEM 形貌,由图可以看出,提高煅烧温度和延长保温时间后,单陶瓷层的 n-8YSZ 涂层晶粒长大比较明显,而有 LZ 保护的 n-LZ/8YSZ 涂层的中间层 8YSZ 涂层的晶粒也有长大,但是长大的趋势没有单陶瓷层的 n-8YSZ 涂层的晶粒长大得明显。影响晶粒长大的因素有很多,起始晶粒度,加热速度,冷却速度,过热度等都会影响晶粒度的大小^[22-24]。



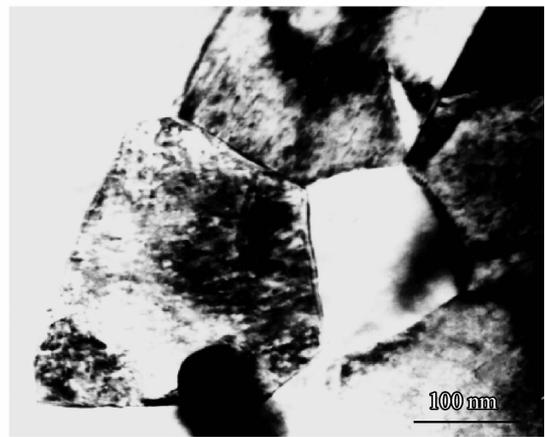
(a) Nanostructured YSZ



(b) n-LZ/8YSZ, $1\ 050\ ^\circ\text{C}$, 25 h



(c) n-LZ, $1\ 200\ ^\circ\text{C}$, 45 h



(d) n-LZ/8YSZ, $1\ 200\ ^\circ\text{C}$, 45 h

图 11 煅烧处理后涂层的 TEM 形貌

Fig. 11 TEM morphologies of the coatings after heat-treatment at different temperature

事实上,实际用在发动机、涡轮机、汽轮机叶片上的涂层通常是全包覆型的,那么在外面涂覆一层 LZ 涂层,就会对里面或其底下的纳米结构 n-8YSZ 涂层起到热保护的作用,控制或抑制其晶粒过度长大,延长热障涂层的使用寿命。此外,如果 LZ 层在实际应用过程中发生了剥落失效,则可以通过再制造的手段对涂层进行修复,达到节约资源延寿的目的。

4 结论

(1) 采用纳米结构调控技术可制备用于等离子喷涂的纳米结构 n-8YSZ 喂料及 n-LZ 喂料,并能制备出一种新型的热喷涂纳米结构双陶瓷型 n-LZ/8YSZ 涂层。

(2) 相同测试温度下,双陶瓷型 n-LZ/8YSZ 涂层具有最佳的隔热效果和抗热震性能,纳米结

构 n-8YSZ 涂层次之,传统结构 8YSZ 涂层最差。

(3) 在 1 000 °C 和 1 200 °C 温度条件下,双陶瓷型 n-LZ/8YSZ 涂层具有最高的抗高温氧化性能,由于 n-LZ 具有较低的热导率,故具有一定厚度的顶层能对其下 n-8YSZ 纳米晶层起到一定的热保护作用。

参考文献

- [1] PADTURE N P, GELL M, Jordan E H. Materials science -thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [2] JOHN H P. The hotter the engine, the better[J]. Science, 2009, 326(5956): 1068-1069.
- [3] KRISTEN A M, BERIT H, EMILY A C. Atomic-scale insight and design principles for turbine engine thermal barrier coatings from theory[J]. PNAS, 2011, 108(14): 5480-5487.
- [4] 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
- [5] RABIEI A, EVANS A G. Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Acta Materialia, 2000, 48(15): 3963-3976.
- [6] WANG L, YANG J S, NI J X, et al. Influence of cracks in APS-TBCs on stress around TGO during thermal cycling: A numerical simulation study[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 285: 98-112.
- [7] CAO X Q, VASSEN R, STÖEVER D. Ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(1): 1-10.
- [8] 曹学强. 热障涂层材料[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 5-9. CAO X Q. Thermal barrier coatings materials[M]. Beijing: Science Press, 2007: 5-9 (in Chinese).
- [9] XU Z H, HE L M, MU R D, et al. Double-ceramic-layer thermal barrier coatings of $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ deposited by electron beam-physical vapor deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473(1/2): 509-515.
- [10] CAO X Q, VASSEN R, TIETZ F, et al. New double-ceramic-layer thermal barrier coatings based on zirconia-rare earth composite oxides[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26(3): 247-251.
- [11] CAO X Q, VASSEN R, FISCHER W, et al. Lanthanum-cerium oxide as a thermal barrier-coatings material for high-temperature applications[J]. Advanced Materials, 2003, 15(46): 1438-1442.
- [12] 曹学强. 热障涂层新材料和新结构[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 418-426.
- CAO X Q. New materials and new structure for thermal barrier coatings[M]. Beijing: Science Press, 2015: 418-426 (in Chinese).
- [13] MA W, GONG S K, XU H B, et al. The thermal cycling behavior of lanthanum-cerium oxide thermal barrier coating prepared by EB-PVD[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(16/17): 5113-5118.
- [14] GUO H B, GONG S K, XU H B. Evaluation of hot-fatigue behaviors of EB-PVD gradient thermal barrier coatings[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 325 (S1/S2): 261-269.
- [15] WANG L, WANG Y, SUN X G, et al. Preparation and characterization of nanostructured $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ feedstock used for plasma spraying[J]. Powder Technology, 2011, 212 (1): 267-277.
- [16] ZHU D M, CHOI S R, MILLER R A. Development and thermal fatigue testing of ceramic thermal barrier coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188: 146-152.
- [17] LI Y, LI C J, ZHANG Q, et al. Influence of TGO composition on the thermal shock lifetime of thermal barrier coatings with cold-sprayed MCrAlY bond coat[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1/2): 168-177.
- [18] GUO H B, WANG Y, WANG L, et al. Thermo-physical properties and thermal shock resistance of segmented $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ thermal barrier coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(4): 665-671.
- [19] MUMM D R, EVANS A G, SPITSBERG I T. Characterization of cyclic displacement instability for a thermally grown oxide in a thermal barrier system[J]. Acta Materialia, 2001, 49(1): 2329-2340.
- [20] HILLE T S, NIJDAM T J, SUIKER A S J, et al. Damage growth triggered by interface irregularities in thermal barrier coatings[J]. Acta Materialia, 2009, 57(9): 2624-2630.
- [21] HILLE T S, TURTELTAUB S, SUIKER A S J. Oxide growth and damage evolution in thermal barrier coatings [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(10): 2139-2152.
- [22] NIGH T G, WADSWORTH J. Superplastic behavior of a fine-grained, yttria-stabilized, tetragonal zirconia polycrystal(Y-TZP)[J]. Acta Metallurgica Materialia, 1990, 38(6): 1121-1133.
- [23] CHEN S G, YIN Y S, WANG D P, et al. Effect of nanocrystallite structure on the lower activation energy for Sm_2O_3 -doped ZrO_2 [J]. Journal of Molecular Structure, 2004, 703(1/2/3): 19-23.
- [24] LEITE E R, GIRALDI T R, PONTERS F M, et al. Crystal growth in colloidal tin oxide nanocrystals induced by coalescence at room temperature[J]. Applied Physical Letter, 2003, 83(8): 1566-1568.