

ZrO₂基热障涂层陶瓷材料研究进展

张红松^{1,2} 徐强² 王富耻² 朱时珍² 刘玲²

(1 河南纺织高等专科学校, 郑州 450007)

(2 北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081)

文 摘 由于 ZrO₂基陶瓷材料在热障涂层上的广泛应用, 本文综述了氧化物(一元、二元、多元)稳定 ZrO₂、MZrO₃化合物及 Ln₂Zr₂O₇化合物的研究情况。结果指出氧化物稳定 ZrO₂在热障涂层上的应用空间已十分有限, 随着航空发动机技术的发展, 化学式为 A₂³⁺B₂⁴⁺O₇焦绿石结构的陶瓷材料有望替代 YSZ, 根据声子导热理论和晶体化学原理, 用稀土元素离子对 A₂³⁺B₂⁴⁺O₇型陶瓷材料进行掺杂进一步降低其热导率, 将为热障涂层技术应用开辟广阔的空间。该机理对 MZrO₃同样适用。

关键词 热障涂层, ZrO₂基陶瓷, 掺杂, 热物理性能

Progress in ZrO₂-Based Ceramic Materials for Thermal Barrier Coatings

Zhang Hongsong^{1,2} Xu Qiang² Wang Fuchi² Zhu Shizhen² Liu Ling²

(1 Henan Textile College, Zhengzhou 450007)

(2 School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract In view of the extending useness of ZrO₂-based ceramic materials on thermal barrier coatings, the research status of ZrO₂ doped with oxides(one type, two types and multitype), compounds of MZrO₃ and Ln₂Zr₂O₇ are summarized in this paper. It is pointed out that the application range of ZrO₂ stabilized with different oxides on thermal barrier coatings is limited. With the development of aero turbine engines technology, the pyrochlore structure ceramic materials with chemistry formula of A₂³⁺B₂⁴⁺O₇ may substitute zirconia stabilized by yttria. And according to the theory of phonon thermal conduction and principle of crystal chemistry, by doping the A₂³⁺B₂⁴⁺O₇ ceramic materials with rare earth oxides in order to reduce their thermal conductivity, a wide space for the application of thermal barrier coatings technology will be opened up. This method is applicable to MZrO₃ as well.

Key words Thermal barrier coating, ZrO₂-Based ceramic, Doping, Thermophysical property

0 引言

热障涂层由于其优异的隔热性能而广泛用于保护航空发动机高温部件, 至今已有几十年的历史^[1]。选择的热障涂层陶瓷材料一般应具备以下基本功能^[2]: (1)熔点高; (2)在室温与工作温度之间的温度范围内没有相变; (3)热导率低; (4)化学稳定性高; (5)线性膨胀系数与金属基体接近; (6)与金属基体具有良好的结合力; (7)烧结收缩率低。其中以线性膨胀系数、热导率 and 高温稳定性最为重要。

在热障涂层陶瓷材料中, 纯 ZrO₂由于自身存在的

相变问题不能直接用于热障涂层, 而经过稳定化处理 ZrO₂以其良好的综合性能而成为热障涂层陶瓷层的首选材料。近年来, 随着航空发动机向高推重比、高流量比、高涡轮进口温度方向的发展, 使得发动机高温部件必须承受更高的温度, 从而对热障涂层陶瓷材料提出了新的要求^[3]。为此, 传统 ZrO₂基陶瓷材料必须要进行改进。本文综述了 ZrO₂基热障涂层陶瓷材料的发展现状, 并对其未来发展方向进行了探讨。

1 一元氧化物稳定 ZrO₂

提高 ZrO₂相稳定性的常用方法是向其晶格内加

收稿日期: 2006 - 08 - 17; 修回日期: 2007 - 01 - 22

基金项目: 清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室开放课题 (2003 ~ 2005)

作者简介: 张红松, 1977 出生, 博士, 主要从事热障涂层表面陶瓷层材料的研究

入氧化物稳定剂,已有的 ZrO_2 稳定剂按照其阳离子化合价可分为二价、三价、四价、五价稳定剂,现分别叙述如下。

1.1 二价稳定剂

MgO 和 CaO 不但是最早使用的二价稳定剂,同时也是最早使用的稳定剂。 MgO 和 CaO 具有等轴晶系的立方晶体结构,掺入 ZrO_2 晶体中能使 ZrO_2 晶型由单斜晶体转变为立方晶体,20世纪60年代用 MgO 、 CaO 稳定的 ZrO_2 热障涂层已成功应用于燃烧室等热端部件上,用于防止热蚀点生成以延长工件热疲劳寿命^[4]。这一材料体系使用了将近20年,但后来的使用及研究发现,以这两种氧化物作稳定剂的涂层组织稳定性不好,燃气的硫化作用以及热循环作用能使 CaO 和 MgO 从固溶体中析出,降低对 ZrO_2 的相稳定作用,提高涂层热导率,使涂层的热循环寿命大大降低^[5],目前 MgO 、 CaO 二价稳定剂已基本被 Y_2O_3 所取代。

1.2 三价稳定剂

目前已报道的三价稳定剂主要有 Ce_2O_3 ^[6]、 Dy_2O_3 ^[7]、 Nd_2O_3 ^[7]、 Gd_2O_3 ^[8]、 Er_2O_3 ^[9]、 Sm_2O_3 ^[10]、 Yb_2O_3 ^[11]、 Y_2O_3 ^[12] 等,不同氧化物的相稳定程度和稳定化机理各有不同,稳定化程度主要与阳离子在高温下的运动难易程度有关。如 Dy_2O_3 稳定的 ZrO_2 涂层,在加热冷却过程中易发生四方相向立方相的转变和四方相向单斜相的转变,在1400℃退火10h也会有大量的立方相转变为四方相,这主要由 Dy^{3+} 在高温下的迁移造成的。相比之下, Sm^{3+} 和 Er^{3+} 要稳定的多,在高温下涂层中的 Ce^{3+} 容易在粘结层附近富集,增加粘结层与氧的接触,其迁移也有增强的趋势^[6,13]。Sasak等^[14]总结了各种氧化物稳定剂的稳定化作用,指出阳离子半径从 Sc^{3+} 增大到 Y^{3+} ,稳定作用呈增大趋势,但从 Y^{3+} 到 La^{3+} ,稳定化作用呈下降趋势, La^{3+} 的稳定化作用比 Sc^{3+} 还要低。尽管稳定机理和稳定程度不同,但部分三价稀土氧化物稳定 ZrO_2 涂层具有更高的热疲劳寿命,如 Stecura等研究了质量分数为8.0%的 Yb_2O_3 稳定的 ZrO_2 ,发现在同等条件下涂层的寿命比质量分数为6.1% Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 提高了近30%^[11]。但目前在实际的应用中,以 Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 则是应用最广的热障涂层陶瓷材料,在热障涂层系统发展过程中,现役的两代热障涂层[大气等离子喷涂(APS)M-Cr-Al-Y/7% (质量分数)YSZ体系和低压等离子喷涂(LPPS)的M-Cr-Al-Y/7% (质量分数)YSZ]都是以这一材料体系为基础的^[15]。

Y_2O_3 的含量对 ZrO_2 的热物理性能影响很大,从而使热障涂层具有不同的抗热震性能。表1给出了不同质量分数 Y_2O_3 稳定 ZrO_2 的热物理性能^[4],由表可知质量分数为6%~8%YSZ因具有合适的热物理性能而成为目前广泛研究和应用的热障涂层材料,并

且YSZ涂层表现出比 CaO 、 MgO 稳定 ZrO_2 涂层更优异的抗 Na_2SO_4 和 V_2O_5 腐蚀能力^[16]。但在1200℃以上的环境下长期循环使用时,四方相将转化为四方相和立方相的混合体,新产生的四方相在冷却时会转变为单斜相并伴有4%左右的体积改变,易在涂层中产生裂纹并使其弹性模量等力学性能降低;同时高温下涂层易烧结,体积的收缩降低了涂层的应变容限;高温时涂层中大量的氧空位会加速氧的传输而造成粘结层的快速氧化。为适应热障涂层在高温下的应用,必须对现役材料进行改进或寻求具有更低热导率的陶瓷材料以提高涂层的隔热性能。

表1 不同质量分数 Y_2O_3 稳定 ZrO_2 的热物理性能

Tab 1 Thermophysical properties of ZrO_2 stabilized with different content of Y_2O_3

材料	熔点 T_m / K	$\lambda / (m \cdot K)^{-1}$	$/10^{-6} K^{-1}$
ZrO_2	2973	2.17	15.3
3YSZ	2973	2.12	11.5
6% ~ 8%YSZ	-	1.75	10.7
18%YSZ	-	2.10	10.53

1.3 四价稳定剂

与三价稳定剂相比,四价稳定剂的报道相对较少。目前报道的主要有 CeO_2 ^[12-13]、 HfO_2 ^[17],其中 HfO_2 具有最高的熔点和最低的热导率。 HfO_2 与 ZrO_2 晶体结构和相转变行为相似,但其热导率低于 ZrO_2 ,因此 HfO_2 稳定的 ZrO_2 涂层的热导率比YSZ低,但在高温下长期循环使用时会出现与YSZ相似的相变问题,从而限制了其在高温下的应用^[14]。Brandon等^[12]研究了抗热腐蚀性能较好的 ZrO_2 -25% (质量分数) CeO_2 系热障涂层,发现在1500℃、100h后陶瓷仍然保持了立方相,在1600℃、100h后仅有13%的单斜相生成,表明 CeO_2 稳定 ZrO_2 涂层具有良好的抗热循环性能。只是喷涂过程中 Ce^{4+} 容易变成 Ce^{3+} 从而在涂层中形成亚稳相,高温下涂层粘结层的氧化会带走陶瓷层的部分氧元素,在陶瓷层与粘结层界面处形成 CeO_2 的富集区,而且当涂层在密闭环境下运转时, CeO_2 部分稳定的 ZrO_2 容易分解成 $Zr_{0.84}Ce_{0.16}O_2$ 和 $Zr_{0.4}Ce_{0.6}O_2$ 而影响涂层的性能。

1.4 五价稳定剂

无论是哪种价态的氧化物,其对材料热导率影响的本质主要是通过点缺陷影响声子散射从而降低材料热导率,只是不同的氧化物产生的点缺陷类型可能不同,从而在降低热导率方面的发挥主要作用的点缺陷的类型也有不同,原子质量和离子半径差别较大有利于降低增强声子的散射而降低材料热导率。以此理论为基础,S.R. Aghavan等^[14]研究了 Ta^{5+} 、 Nb^{5+} 掺杂对材料热导率的影响,其中 Ta^{5+} (180.9g) 的质量约为 Zr^{4+} (91.2g) 的两倍, Nb^{5+} (92.9g) 的质量与 Zr^{4+} 基

本相等,二者的离子半径 ($6.8 \times 10^{-11} \text{ m}$) 小于 Zr^{4+} ($7.9 \times 10^{-11} \text{ m}$)。结果表明 Ta^{5+} 、 Nb^{5+} 对热导率的影响与 Y^{3+} 基本相当,说明仅靠原子之间的质量差造成的声子散射来预测掺杂 ZrO_2 陶瓷材料的热导率并不充分。

2 二元氧化物稳定 ZrO_2

由于 YSZ 良好的热物理性能,最初的二元稳定多是在 YSZ 的基础上加入其他氧化物。而在众多的氧化物中, CeO_2 由于在 ZrO_2 中具有较宽的固溶含量范围 (质量分数为 5% ~ 85% CeO_2) ,并且与 YSZ 涂层相比 CeO_2 - ZrO_2 涂层具有较低的热导率、较高的韧性和热冲击强度^[18],所以最初二元稳定 ZrO_2 是在 YSZ 的基础上加入 CeO_2 ^[19]。Hanshin Choi 等对等离子喷涂 CeO_2 - Y_2O_3 - ZrO_2 (CYSZ) 热障涂层研究表明,由于等离子喷涂过程中由 Ce^{4+} 转化的 Ce^{3+} 会重新被氧化为 Ce^{4+} ,减少了涂层中的氧空位,从而降低了立方相向单斜相转化的驱动力,使得 CYSZ 涂层具有比 YSZ 涂层更好的相稳定性、更低的热导率及热疲劳寿命^[19]。除 CeO_2 以外,YSZ 中加入的氧化物还有 Sc_2O_3 ^[20]、 La_2O_3 、 Al_2O_3 、 Er_2O_3 、 Pr_2O_3 、 Nd_2O_3 等^[21],不同的氧化物稳定机理及稳定作用也不尽相同。如 YSZ 中加入 Sc_2O_3 因有效稳定四方相而使 Sc_2O_3 - Y_2O_3 - ZrO_2 涂层具有比 YSZ 涂层更好的高温相稳定性和抗钒酸盐、硫酸盐热腐蚀性能^[20]。Mineaki 等就几种不同添加剂对 YSZ 涂层性能影响研究表明, Al_2O_3 、 CoO 的加入因会降低涂层的抗烧蚀性能而不适合作为第二相, La_2O_3 、 SiO_2 、 Pr_2O_3 、 Nd_2O_3 等因提高涂层在高温下的抗烧蚀性能而使其具有比 YSZ 更低的热导率和良好的高温相稳定性,其中 La_2O_3 的效果最明显,其次为 SiO_2 、 Pr_2O_3 和 Nd_2O_3 ,而 Er_2O_3 基本没有影响^[21]。目前在二元稳定 ZrO_2 中除在 YSZ 的基础上添加其他氧化物以外,另外一种方式就是直接用两种完全不同于 Y_2O_3 的氧化物来直接稳定 ZrO_2 ,如 CeO_2 - ThO_2 - ZrO_2 系统^[22]和 CaO - CeO_2 - ZrO_2 系统^[23],两系统对应的热障涂层在高温下的性能均优于 YSZ 涂层。无论哪一种形式的二元稳定 ZrO_2 ,这些用来稳定 ZrO_2 的氧化物的共同特点是:(1)较高的化学稳定性;(2)在 ZrO_2 中有限固溶;(3)较高的熔点。因此在二元稳定的 ZrO_2 中,只有当氧化物的含量适中时对应的热障涂层在高温下的性能才能最好。

3 多元氧化物稳定 ZrO_2

在一元和二元稳定 ZrO_2 基础上,也有采用多种稀土氧化物同时掺杂 ZrO_2 的报道。如, NASA 的 D. Zhu 等^[24]用 Nd_2O_3 、 Gd_2O_3 、 Sm_2O_3 及 Yb_2O_3 、 Sc_2O_3 分别掺杂 ZrO_2 。结果表明,与 YSZ 涂层相比,经多元掺杂 ZrO_2 涂层的热疲劳寿命明显提高,当掺杂物含量在 6% ~ 13% (摩尔分数) 时涂层具有最低的热导率

[$0.5 \sim 0.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$],而线胀系数也有所提高 [$25 \sim 1400$ 之间为 $(11.5 \sim 13.5) \times 10^{-6}/\text{K}$]。该类稳定的 ZrO_2 中,多种稀土氧化物有效的阻止了立方相或四方相 ZrO_2 向单斜相 ZrO_2 的转变而使涂层的热疲劳寿命提高,同时使材料成分复杂化并引入了更多的点缺陷,加剧了声子的散射,降低了材料的材料的热导率。

4 MZrO_3

具有钙钛矿结构的 MZrO_3 化合物中,目前仅有 MgZrO_3 ^[25]、 BaZrO_3 ^[26]、 SrZrO_3 ^[27] 用于热障涂层的研究报道。等离子喷涂 MgZrO_3 功能梯度涂层在 600 时 MgO 容易从固溶体中析出而不适于高温下应用^[27], BaZrO_3 和 SrZrO_3 具有较高熔点 (分别为 2273 和 2963 K),但其线胀系数 (303 ~ 1273 K 之间,分别为 7.9×10^{-6} 和 $10.9 \times 10^{-6}/\text{K}$) 比 YSZ 低,前期的工作表明用 BaZrO_3 制备的热障涂层的抗热冲击性能并不比 YSZ 涂层好, SrZrO_3 在高温下的相稳定性较差从而限制了其在热障涂层上的应用^[26]。但根据固溶体基本理论, MZrO_3 中的 M 位和 Zr 位均能被其他元素所取代,若用适当的氧化物对 MZrO_3 进行掺杂以改善 MZrO_3 在热物理性能方面的不足, BaZrO_3 和 SrZrO_3 等化合物也有可能取代 YSZ 用于高温热障涂层。

5 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (Ln: 镧系元素)

在化学式为 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 的锆酸盐中,主要有萤石和烧绿石两种晶体结构。目前的研究主要集中在烧绿石结构的锆酸盐 $\text{A}_2^{3+}\text{B}_2^{4+}\text{O}_7$,该锆酸盐具有比 YSZ 更低的热导率、更高的高温稳定性而引起研究者的关注^[28]。研究表明,从元素 La 到 Gd 的锆酸盐至少在 1500 下具有良好的相稳定性,这是烧绿石结构的锆酸盐可用做热障涂层陶瓷材料的一个重要原因。在 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 的烧绿石晶体结构中,共顶点的 ZrO_6 八面体构成整个晶体点阵的骨架,处于 Ln 位置的金属阳离子位于 6 个 ZrO_6 八面体构成的间隙中,正是该晶体结构使得通过增加掺杂量或用质量大于 Zr^{4+} 、 Y^{3+} 的阳离子取代而使其热导率降低到比 YSZ 还要低的水平。目前有关元素 La、Nd、Sm、Eu、Gd、Dy、Er 及 Yb 锆酸盐的热导率已有报道 (表 2)^[29~34]。

表 2 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 陶瓷的热导率

Tab 2 Thermal conductivities of $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ceramics	
材料	$W \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ (1073 K)
$\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	~1.6
$\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	~1.5
$\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	~1.5
$\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	~1.33
$\text{Eu}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	~1.5
$\text{Dy}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	~1.4

从表 2 可知, $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 的热导率在 1.1 ~ 1.7 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,低于 YSZ 的热导率 (表 1),这与分子动

力学模拟的结果一致^[28]。由于烧结致密体不可避免的存在一定气孔以及热导率测试技术的影响,在 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 热导率数值方面还存在学术上的分歧,但是当制备 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 热障涂层时,由于其良好的抗烧蚀性能,即使在高温下,涂层中的气孔率也相对比较稳定,所以涂层仍具有良好的隔热性能,同时有利于提高涂层的应变容限和隔热效率。

在 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 系列化合物中,比较特殊的是 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$,其在一定的温度下将发生烧绿石至萤石的晶体结构转变,但对其热导率大小并无显著影响。目前有关 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 用做热障涂层材料报道最多的当属 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ^[29],如 B. Saruhan 等采用 EB-PVD 技术成功制备了 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 热障涂层,结果表明该涂层具有良好的高温稳定性和隔热性能^[35]。但是 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 的线胀系数低于 YSZ,这是限制其用作高温热障涂层陶瓷材料的一个主要因素,尽管 $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Eu}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 的线胀系数大于 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$,但其大小与 YSZ 相当^[36],因此应当在保持其热导率的前提下设法提高 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 系列化合物的线胀系数使其更符合热障涂层陶瓷材料对性能的要求。

$\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 化合物之所以具有如此低的热导率,主要是由于晶体内点缺陷与声子间散射作用降低了声子的平均自由程。在 $\text{A}_2^{3+}\text{B}_2^{4+}\text{O}_7$ 结构的钇酸盐中,A 位和 B 位均可被其他元素所取代,如果用其他元素同时进行 A 位和 B 位取代或者用更多的稀土氧化物同时掺杂以进一步降低热导率并改善线性膨胀性能将是 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 系列化合物用作热障涂层陶瓷材料的一个重要发展趋势。

6 展望

根据热障涂层陶瓷材料的要求,可知二元稳定 ZrO_2 、多元稳定的 ZrO_2 以及烧绿石结构的 $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 钇酸盐将有望代替 YSZ 而成为下一代热障涂层陶瓷材料,由于二者实际上都是以 ZrO_2 为基的固溶体,若根据声子导热机制和缺陷化学原理,向其晶格内部掺杂更多的氧化物部分取代原晶体结构的金属阳离子而引入点缺陷,可进一步降低热导率并改善线胀系数,将是 ZrO_2 基热障涂层陶瓷材料的发展趋势。如果能用合适的氧化物对 BaZrO_3 和 SrZrO_3 进行处理以改善其热物理性能, BaZrO_3 和 SrZrO_3 也有潜力取代 YSZ 而用于下一代热障涂层。而且现在研究主要集中在 ZrO_2 热障涂层陶瓷材料的热物理性能以及相稳定性,而对于相应热障涂层性能及其应用的研究相对较少,因此加强相应热障涂层性能的研究将是另一重要发展趋势。

参考文献

1 Nitin, Padture P, Maurice Gell et al Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications Materials Science, 2002; 4(12): 280 ~ 284

2 Cao X Q, Vasseh R, Stoeber D. Ceramic materials for thermal barrier coatings Journal of European Ceramic Society, 2000; 24: 1 ~ 10

3 Beele W, Marijnissen G, Van Lieshout A. The evolution of thermal barrier coatings-status and upcoming solutions for today's key issues Surface and Coatings Technology, 1999; 120: 61 ~ 67

4 Brandt R. Thermal diffusivity measurements in plasma sprayed CaO-stabilized ZrO_2 . High Temperature-High Pressure, 1979; 13: 279 ~ 285

5 Famer S C, Mitchell T E, Huer A H. Diffusional decomposition in $c\text{-ZrO}_2$ in MgO-PSZ Advanced Ceramics, 1984; 12: 152 ~ 163

6 Robert L Jones Catalytic combustion effects of m-ZrO₂ doped with various metal nitrates Surface and Coatings Technology, 1996; 86: 127 ~ 134

7 Khor K A, Yang J. Rapidly solidified neodymia-stabilised zirconia coatings prepared by DC plasma spraying Surface and Coatings Technology, 1997; 96: 313 ~ 322

8 Wu Jie, Padture N P, Maurice Gell High-temperature chemical stability of low thermal conductivity $\text{ZrO}_2\text{-GdO}_{1.5}$ thermal-barrier ceramics in contact with $\text{-Al}_2\text{O}_3$. Scripta Materialia, 2004; 50: 1 315 ~ 1 318

9 Khor K A, Yang J. Lattice parameters tetragonality (c/a) and transformability of tetragonal zirconia phase in plasma sprayed $\text{ZrO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ coatings Material Letter, 1997; 12(31): 23 ~ 28

10 Khor K A, Yang J. Plasma sprayed $\text{ZrO}_2\text{-Sm}_2\text{O}_3$ coatings: lattice parameters, tetragonality (c/a) and transformability of tetragonal zirconia phase Journal of Materials Science Letters, 1997; 12(16): 1 002 ~ 1 004

11 Zhang Y H, Withers P J, Fox M D. Damage mechanism of coated systems under thermomechanical fatigue. Materials Science and Technology, 1999; 15: 1 031 ~ 1 036

12 Brindley W J, Miller R A. Thermal barrier coating life and isothermal oxidation of low pressure plasma sprayed bond coat alloys Surface and Coating Technology, 1991; 44: 446 ~ 457

13 John Thomson, Amit Majumdar, Grant McAdam. Enhanced cerium migration in ceria-stabilized zirconia Surface and Coatings Technology, 1997; 94: 112 ~ 117

14 Raghavan S, Wang H, Porter W D et al Thermal properties of zirconia co-doped with trivalent and pentavalent oxides Acta Mater, 2001; 49: 169 ~ 179

15 Li J F, Liao H L, Ding C X et al Optimizing the plasma spray process parameters of yttria stabilized zirconia coatings using a uniform design of experiment Journal of Materials Processing Technology, 2005; 160: 34 ~ 42

16 Voyer, Gitzhofer J F, Boulus M I Study of performance of TBC under thermal cycling conditions using acoustic emission rig Journal of Thermal Spray Technology, 1998; 7(2): 181 ~ 190

17 Singh J, Wolfe D E, Miller R A et al Tailored microstructure of zirconia and hafnia-based thermal barrier coatings with low thermal conductivity and high hemispherical reflectance by EB-PVD. Journal of Materials Science, 2004; 39: 1 975 ~ 1 985

18 Hamsworth P D, Stevens R. Microstructure and phase composition of $\text{ZrO}_2\text{-CeO}_2$ thermal barrier coatings Journal of Materials Science Letters, 1991; 26: 3 991 ~ 3 995

- 19 Hanshin choi, Hyungjun Kim, ChangHee Lee Phase evolution of plasma sprayed ceria and yttria stabilized zirconia thermal barrier coating Journal of Materials Science Letters, 2002; 21: 1 359 ~ 1 361
- 20 Leoni M, Jones R L, Scardi P. Phase stability of scandia-yttria-stabilized zirconia TBCs Surface and Coatings Technology, 1998; 108: 107 ~ 113
- 21 Mineaki Matsumoto, Norio Yamaguchi, Hideaki Matsubara Low thermal conductivity and high temperature stability of ZrO_2 - Y_2O_3 - La_2O_3 coatings produced by electron beam PVD. Scripta Materialia, 2004; 50: 867 ~ 871
- 22 Grover V, Tyagi A K Lattice thermal expansion studies on single-phase compositions in CeO_2 - ThO_2 - ZrO_2 system. Ceramics International, 2005; 31: 769 ~ 772
- 23 Parvati Ramaswamy, Seetharamu S, Vama K B R et al Evaluation of CaO - CeO_2 partially stabilized zirconia thermal barrier coatings Ceramics International, 1999; 25: 317 ~ 324
- 24 Zhu D, Nesbitt J A, McCue T R et al Furnace cyclic behavior of plasma-sprayed zirconia-yttria and multi-component rare earth oxide doped thermal barrier coatings In: Ceramic engineering and science proceedings, 2002; 23 (4): 533 ~ 545
- 25 Tekmen C, Ozdemir I, Celik E Failure behaviour of functionally gradient materials under thermal cycling conditions Surface and Coatings Technology, 2003; 174: 1 101 ~ 1105
- 26 Shinsuke Yamanaka, Masaki Fujikane, Tuyoishi Hamaguchi et al Thermophysical properties of $BaZrO_3$ and $BaCeO_3$. Journal of Alloys and Compounds, 2003; 359: 109 ~ 113
- 27 Vassen R, Cao X, Tietz F et al Zirconates as new materials for thermal barrier coatings Journal of American Ceramic Society, 2000; 83 (8): 2 023 ~ 2 028
- 28 Bast U, Schumann E Development of novel oxide materials for TBCs In: Ceramic engineering and science proceeding 2002; 23: 525 ~ 532
- 29 Thomas Jacob K, Niladri Dasgupta Composition-graded solid electrolyte for determination of the gibbs energy for formation of lanthanum zirconate. Journal of American Ceramic Society, 1998; 81 (7): 1 926 ~ 1 930
- 30 Jung M in Sohn, Seong Ihl Woo. The effect of chelating agent on the catalytic and structural properties of $Sm_2Zr_5O_7$ as methane combustion catalyst Catalysis Letters, 2002; 4 (79): 1 ~ 4
- 31 Patwe S J, Ambekar B R, Tyagi A K Synthesis, characterization and lattice thermal expansion of some compounds in the system $Gd_xCe_{1-x}Zr_{2-x}O_7$. Journal of Alloys and Compounds, 2005; 389: 243 ~ 246
- 32 Xu Qiang, Pan Wei, Wang Jingdong et al Preparation and thermophysical properties of $Dy_2Zr_2O_7$ ceramic for thermal barrier coatings Materials Letters, 2005; 23: 2 804 ~ 2 807
- 33 Hiroshi Yamamura, Hanako Nishino, Katsuyoshi Kakimura Ac Conductivity for $Eu_2Zr_2O_7$ and $La_2Ce_2O_7$ with Pyrochlore-Type Composition Journal of the Ceramic Society of Japan, 2004; 10 (112): 553 ~ 558
- 34 Lutique S, Konings R J M, Rondinella V V et al The thermal conductivity of $Nd_2Zr_2O_7$ pyrochlore and thermal behaviour of pyrochlore-based inert matrix fuel Journal of Alloys and Compounds, 2003; 352: 1 ~ 5
- 35 Saruhan B, Francois P, Fritscher K et al EB-PVD processing of pyrochlore-structured $La_2Zr_2O_7$ -based TBCs Surface and Coatings Technology, 2004; 182: 175 ~ 183
- 36 Satoshi Yamazaki, Toshiyuki Yamashita, Tsuneo Matsui et al Thermal expansion and solubility limits of plutonium-doped lanthanum zirconia Journal of Nuclear Materials, 2001; 294: 183 ~ 187

(编辑 任涛)

《宇航材料工艺》期刊第八届编委会成立大会在京召开

《宇航材料工艺》编辑部按照国家新闻出版总署有关期刊组织建设的规定,编委会每四年换届一次,两年召开一次工作会议。经过一段时间的筹备,《宇航材料工艺》期刊编委会的换届工作已完成,组建了新一届编委会——期刊第八届编委会,并于2007年4月20日在中国运载火箭技术研究院长征宾馆召开了第八届编委会成立大会。

会议由《宇航材料工艺》主办单位航天材料及工艺研究所所长、第八届编委会主任郭玉明主持,中国运载火箭技术研究院质量技术部副部长杨双进宣布期刊第八届编委会成员名单并对编委会成员作简单介绍,编辑部李洪泉向大会汇报了编辑部工作。

会议对编辑部的工作和新一届编委会如何把握办刊方向、确定刊物报道重点、如何扩大稿件来源、提升期刊质量等进行了充分的讨论。与会代表发言踊跃,首先肯定了期刊已取得的成绩,提出了存在的不足,并从以下几方面为刊物的发展提出了建设性的意见和建议:(1)刊物的定位为立足航天、服务全国,以特色求发展,并以此确定期刊的形式目标和技术目标;(2)及时跟踪国防工业“十一五”规划中宇航材料工艺发展需要的材料工艺技术,对重点项目约定有创新性的高质量稿件,并对一些重大课题组组织出版不同研究阶段的专集;(3)为适应材料学科新的发展需要,增加“计算材料学”栏目,以增强期刊的可读性;(4)全面提升期刊质量,每期有高质量的稿件,编、校、印、装等质量优秀,同时尽量多出一些专刊,增强刊物的适用性和提高期刊的引用率;(5)加强宣传力度,扩大赠阅面,让更多从事材料工艺技术研究的人员能阅读到本刊,进而不断壮大读者和作者队伍,提高期刊的影响力。

编辑部将认真考虑这些意见和建议,不断改进工作,调整编辑人员的知识结构,提高综合素质和服务的能力,提升策划能力和行业洞察力,在期刊学术水平和编、校、印、装质量上下功夫,全面提升期刊的质量,为航天事业的发展做出更大的贡献。