

等离子喷涂 $Gd_2Zr_2O_7-SrZrO_3$ 复合陶瓷涂层的微观结构和性能

李英杰, 马文, 黄威, 杨曦, 刘颖, 陈伟东, 白玉

(内蒙古工业大学 内蒙古自治区薄膜与涂层重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 通过固相反应法合成了 $Gd_2Zr_2O_7-SrZrO_3$ (GZSZ, $Gd_2Zr_2O_7:SrZrO_3=7:3$) 复合陶瓷粉末, 并采用喷雾造粒法和大气等离子喷涂法分别制备了适合等离子喷涂使用的相应喷涂粉末及涂层。使用 X 射线衍射、扫描电子显微镜对粉末和涂层的相组成、显微结构进行分析。借助激光热导仪、高温热膨胀仪对涂层的热扩散系数和热膨胀系数、烧结系数进行了表征。结果表明, 制备的 GZSZ 复合陶瓷粉末和涂层都由 $Gd_2Zr_2O_7$ 和 $SrZrO_3$ 两相组成, 粉末中的 $Gd_2Zr_2O_7$ 为烧绿石结构, 而涂层中的 $Gd_2Zr_2O_7$ 为萤石结构, $SrZrO_3$ 都为钙钛矿结构。制备态 GZSZ 涂层的孔隙率为~14%。GZSZ 涂层 1400 °C 热处理 5 h 后的热膨胀系数为 $(9.8\sim 11.2)\times 10^{-6} K^{-1}$ 。制备态 GZSZ 涂层的热导率为 $\sim 0.8 W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$, 与制备态 $SrZrO_3$ 涂层的热导率 $\sim 1.0 W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ 相比降低~20%。1400 °C 热处理 360 h 后 GZSZ 涂层的热导率增加到 $\sim 1.5 W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ 。综上所述, GZSZ 涂层是一种很有前景的复合陶瓷热障涂层材料。

关键词: 大气等离子喷涂; 热障涂层; 热导率; 热膨胀系数

中图分类号: TQ174.75⁺8.16

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)02-0555-06

热障涂层是涂覆在叶片表面具有隔热和防腐蚀作用的陶瓷涂层, 在航空、航天、武器、电力和交通等方面都有重要的应用价值^[1]。目前使用范围最广, 最经典的热障涂层材料是 8YSZ (质量分数 8% Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2)。但是, 8YSZ 涂层表面最大耐热温度为 1427 K, 当涂层在高温下长期工作时, 8YSZ 涂层部分相变会引起体积的膨胀^[2], 同时, 涂层的气孔减少, 出现致密化, 热导率增加, 导致涂层发生烧结。体积膨胀和烧结都会导致涂层过早的失效, 此外 $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ (CMAS) 腐蚀失效也是涂层面临的问题。因此研究和开发耐更高使用温度、综合性能更好的新型热障涂层材料是十分必要的^[3,4]。

烧绿石结构 ($A_2B_2O_7$) 材料是近年来公认的具有良好应用前景的热障涂层材料。烧绿石结构的 $Gd_2Zr_2O_7$ 具有高熔点、低热导率和良好的抗 CMAS 腐蚀性^[5-7], 是很有潜力的热障涂层材料, 但是其较低的断裂韧性, 会导致其热循环寿命较低^[8]。钙钛矿结构 (ABO_3) 材料具有较高的熔点, 较低的热导率和较高的热膨胀系数。钙钛矿结构的 $SrZrO_3$, 在高温下其涂层的热膨胀系数比 8YSZ 涂层高 4.5% 左右, 其断裂韧性与 8YSZ 相当, 但 $SrZrO_3$ 在室温到高温会发生相变^[9]。

蔡丽平等^[10]采用共沉淀法制备了 $Gd_2Zr_2O_7$ 和 $SrZrO_3$ 的复合陶瓷粉末, 并用放电等离子烧结 (spark plasma sintering, SPS) 制备了 $Gd_2Zr_2O_7-SrZrO_3$ 复合陶瓷, $Gd_2Zr_2O_7$ 相可以抑制 $SrZrO_3$ 相变, 同时当 $Gd_2Zr_2O_7$ 比例在 70%, $SrZrO_3$ 占比 30% 时, $SrZrO_3$ 的相变得到完全抑制, 而且 GZSZ 陶瓷块材具有较高的热膨胀系数 ($(9.3\sim 10.9)\times 10^{-6} K^{-1}$), 较低的热导率 ($0.81\sim 1.21 W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$), 同时具有很好的高温相稳定性和抗腐蚀能力。

本实验通过固相合成法制备了满足大气等离子喷涂要求的 $Gd_2Zr_2O_7-SrZrO_3$ 复合陶瓷粉末并采用大气等离子喷涂制备了涂层。对粉末和涂层的结构和形貌进行观察和分析, 并对涂层相稳定性和热物理性能进行研究。

1 实验

实验选用 Gd_2O_3 (纯度 99.99%, 有研稀土新材料股份有限公司), ZrO_2 (纯度 99.5%, 广东东方锆业科技股份有限公司), $SrCO_3$ (山东西亚化学股份有限公司) 作为初始原料, 按照化学计量比配成浆料并用球磨机进行球磨, 使原料混合均匀。将球磨后的浆料用

收稿日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51462026, 51672236); 内蒙古科技重大专项 (2018-810)

作者简介: 李英杰, 男, 1989 年生, 硕士生, 内蒙古工业大学材料学院, 内蒙古 呼和浩特 010051, 电话: 0471-6575752, E-mail: Yingjie.li.imut@qq.com

喷雾干燥机进行喷雾造粒，将纳米级别的小颗粒团聚起来，得到几百微米的团聚体粉末颗粒。采用固相合成法在 1450 °C 下热处理 24 h，得到两相成相良好的粉末，并进行过筛处理，使粒径分布满足等离子喷涂粉末的要求。采用 MC60 (Medicoat AG, Switzerland) 大气等离子喷涂系统制备涂层。喷涂前对基体进行喷砂处理，有助于提高涂层的结合力^[1]，喷涂参数如表 1 所示。为方便获得独立涂层，基底采用喷砂处理后的 60 mm×30 mm×8 mm 的石墨片。用于测试热膨胀系数的 GZSZ 涂层尺寸为 30 mm×5 mm×1 mm，用于测量热扩散系数的 GZSZ 涂层尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm。

采用激光粒度分析仪 (BT-2003, 辽宁丹东百特仪器有限公司) 对喷涂粉末粒度进行分析。采用 X 射线衍射仪 (D/MAX-2500/PC, 日本理学株式会社) 对 GZSZ 粉末及不同热处理时间的涂层进行相分析。使用高温热膨胀仪 (DIL 402E, Netzsc, Germany) 对 GZSZ 涂层的热膨胀系数进行测量。采用激光热导仪 (LFA-427, Netzsc, Germany) 测量 GZSZ 涂层的热扩散系数，涂层密度采用阿基米德法测量。采用差热-热重同步分析仪 (STA 409 PC Luxx, Setaram, France) 对 GZSZ 涂层进行热量和质量损失的分析，从而研究涂层的相稳定性。

2 结果与讨论

2.1 GZSZ 粉末和涂层的形貌、相组成

GZSZ 粉末在 1450 °C 热处理并经筛分处理后的粉末粒径分布如图 1 所示。大气等离子喷涂对喷涂粉末的粒径分布有一定要求，粒径太小的粉末难以进入等离子火焰中心，粒径太大又容易穿透火焰来不及融化。一般粒径分布范围是 11~125 μm。一定的粒径分布有利于提高涂层的孔隙率，处于这区间的粉末经过火焰时，大、小粉末颗粒分别处于部分融化和完全融化状态，未完全融化的颗粒导致涂层产生孔隙，从而影响涂层的孔隙率^[2]。从图 1 中可知，经过筛分后的 GZSZ 粉末的粒径主要分布在 40~115 μm 范围内，完全满足等离子喷涂对粉末的粒径要求。

大气等离子喷涂对于喷涂粉末的另一个要求就是流动性，粉末的流动性不好会导致送粉管堵塞。粉末流动性的好坏取决于粉末颗粒的形貌，粉末颗粒形状越规则越接近球形，表面越光滑，粉末颗粒的流动性

越好。由图 2a 可知，GZSZ 粉末颗粒多数呈球状、碗状的规则形状，颗粒之间无团聚现象，有助于提高粉末的流动性。单个颗粒的表面形貌如图 2b 所示，每个大颗粒都是由成千上万个几十纳米、几百纳米的小颗粒团聚而成。团聚的纳米小颗粒之间排列密集，无大的缺口，从而保证了颗粒的完整性，有助于提高粉末的流动性。

热处理后的 GZSZ 粉末和制备态涂层的 XRD 图谱如图 3 所示。经过 1450 °C 热处理 24 h 后，粉末中的 Gd₂Zr₂O₇ 和 SrZrO₃ 两相成相良好，结晶度高，无其他杂质相。从图中看出，在粉末图谱的 2θ 分别为 28°(311)、37°(331)、45°(511) 的位置出现了立方烧绿

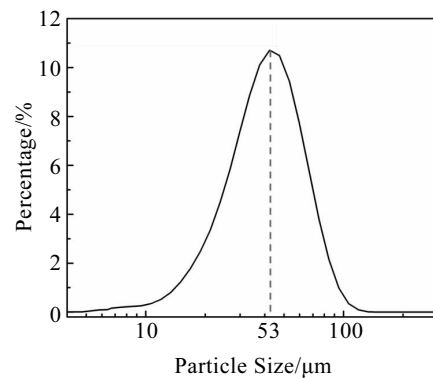


图 1 喷涂粉末的粒径分布图

Fig.1 Particle size distribution of the spray dried powders

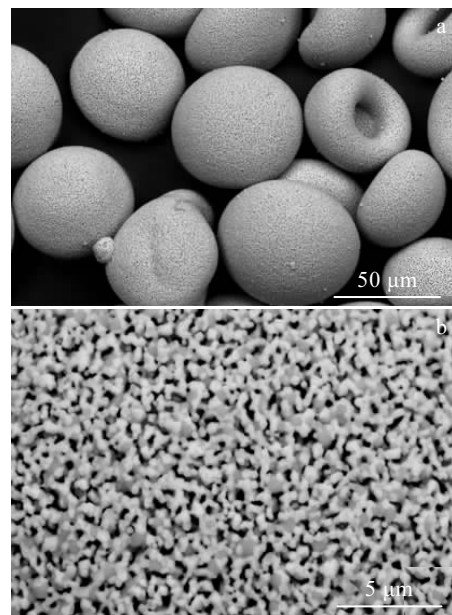


图 2 GZSZ 喷涂粉末的 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of the spray dried GZSZ powders (a) and surface morphology of a single particle (b)

表 1 大气等离子喷涂工艺参数

Table 1 Process parameters of atmospheric plasma spraying			
Torch current/A	Argon flow rate/L·min ⁻¹	Hydrogen flow rate/L·min ⁻¹	Spray distance/mm
600	40	12	100

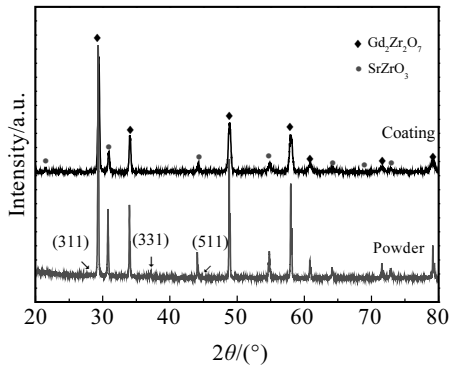


图 3 GZSZ 粉末和涂层的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of GZSZ powder and coating

石的超晶格衍射特征峰^[12]，说明粉末中的 Gd₂Zr₂O₇ 是以烧绿石相存在。大气等离子喷涂制备的涂层也仅包含 Gd₂Zr₂O₇ 和 SrZrO₃ 两相，并无其他相出现。与粉末图谱相比较，不存在上述 3 个特征峰，而且峰强度降低，峰宽增加，这是由于大气等离子喷涂特点导致。大气等离子喷涂火焰中心温度很高，而烧绿石结构向萤石结构转变温度为 1530 °C，是一个微弱的吸热过程，相应的焓变很小，是一个比较容易的转变过程^[13,14]。当烧绿石结构的粉末颗粒进入高速等离子火焰时，烧绿石结构向萤石结构转变，然后又迅速冷却，由于冷却速度极快，抑制了离子扩散，使萤石结构保留下来，所以导致涂层中的 Gd₂Zr₂O₇ 是萤石结构。而且由于冷却速度快，使结晶度降低，使得涂层的 XRD 图谱与粉末的相比衍射峰强度降低，峰宽增大。

图 4 为大气等离子喷涂制备的 GZSZ 涂层的截面显微形貌图。从 4a 可以看出，制备态涂层具有典型的 APS 涂层的层状结构，融化良好，无大的缺陷。由 4b 可明显地看出，涂层有层状结构、微裂纹和孔洞，对于陶瓷涂层，疏松的结构比致密的结构更有助于涂层

的隔热性能和抗热冲击性能。有研究表明，孔隙率为 10%~15% 的 8YSZ 涂层的热循环寿命最长^[1]。本研究制备的 GZSZ 涂层的孔隙率约为 14%。从图 4c 中可以看到，复合陶瓷涂层中两相镶嵌互补、相互交错构成了两相涂层，经过能谱分析可知，浅灰色为 Gd₂Zr₂O₇ 相，深灰色晶粒为 SrZrO₃ 相。

2.2 GZSZ 涂层的热物理性能

涂层在升温过程中相的稳定性是影响涂层寿命的一个重要因素。如涂层在升温过程中发生相变，大部分相变都伴随着体积的变化，体积的突然膨胀和收缩都会导致涂层失效。材料的相变伴随着能量的变化可通过 TG-DSC 曲线进行表征。图 5a 是 SrZrO₃ 制备态涂层的 TG-DSC 曲线。从图中看出，在 1000 和 1100 °C 之间有 1 个明显的放热峰，此时对应的是 SrZrO₃ 相发生了四方(t)向立方相(c)的相转变。GZSZ 涂层的从室温到高温的 TG-DSC 曲线如图 5b 所示。从室温到高温 GZSZ 涂层的 DSC 曲线没有吸热或者放热峰，说明在升温过程中 GZSZ 涂层具有良好的相稳定性，也说明了通过材料的复合抑制了 SrZrO₃ 的相变。

GZSZ 涂层不同温度下的热膨胀系数如图 6 所示，图中同时给出了制备态涂层与 1400 °C 热处理 5 h 后涂层的热膨胀系数曲线。制备态涂层的热膨胀系数为 (8.8~10.0)×10⁻⁶ K⁻¹，涂层较疏松，有层间裂纹和微裂纹，使得其测试值偏低。值得注意的是制备态涂层在 200~400 °C 之间热膨胀数有一个明显的上升过程，由于这个阶段的温度较低，样品不可能发生烧结现象，因此排除了这个因素。另外一种可能是发生相变，但是根据 TG-DSC 曲线分析可知，这个温度范围内并没有明显的吸热或者放热峰产生，也就是说并未发生相变，因此可能是测试仪器的原因。而涂层热处理 5 h 后的热膨胀系数为 (9.8~11.0)×10⁻⁶ K⁻¹，略高于 8YSZ 涂层的热膨胀系数 (~10.7×10⁻⁶ K⁻¹)^[15]。

热扩散系数是热障涂层材料的最重要的热物理性

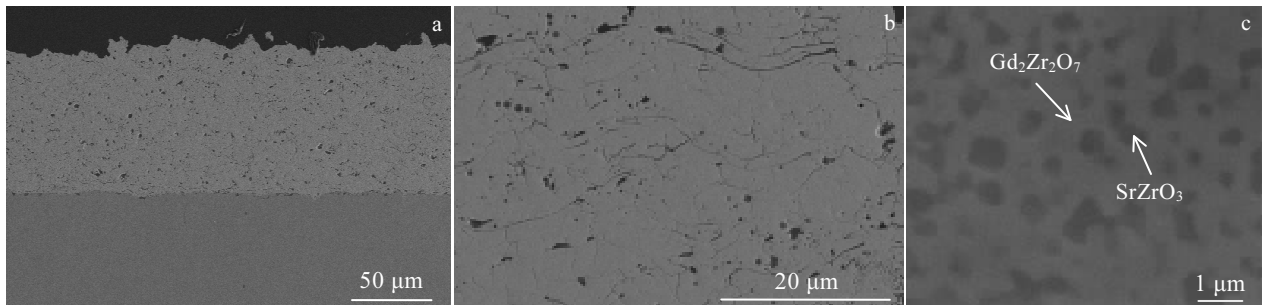


图 4 GZSZ 涂层的截面显微形貌

Fig.4 Cross-sectional morphologies of the GZSZ coating

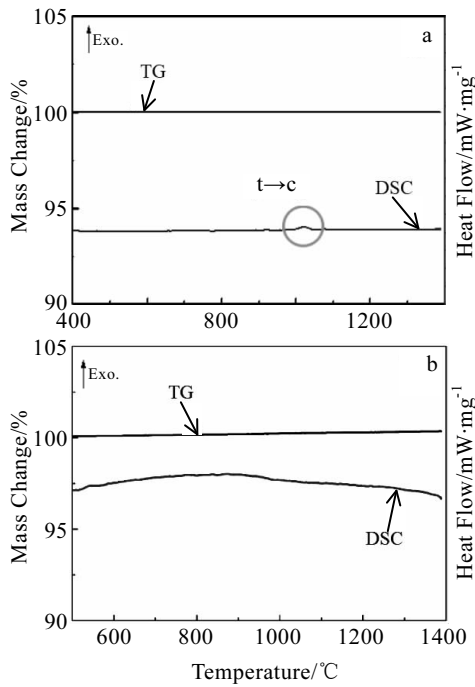


图 5 SrZrO₃ 和 GZSZ 涂层的 TG-DSC 曲线

Fig.5 TG-DSC curves of the SrZrO₃ (a) and GZSZ coatings (b)

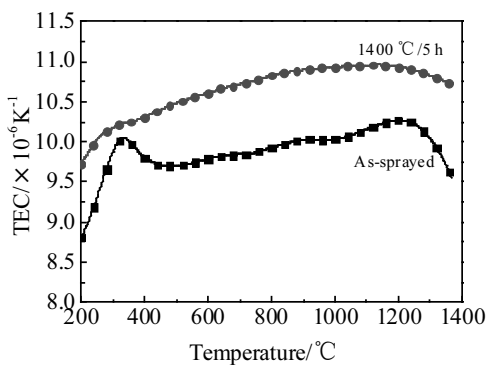


图 6 GZSZ 涂层不同温度下的热膨胀系数

Fig.6 Thermal expansion coefficients (TEC) of the GZSZ coating at various temperatures

能之一，它是表征材料隔热效果的一个物理量。图 7 是 GZSZ 涂层在不同温度下的热扩散系数。800 °C 之前 GZSZ 涂层的热扩散系数随着温度的升高而减小，800 °C 以后随着温度升高热扩散系数增加。800 °C 之前热扩散系数随着温度升高而减小的关系说明 GZSZ 涂层的前期热扩散是由声子的碰撞机制起主导作用，与大多数陶瓷材料类似。800 °C 时涂层的热扩散系数最低，为 0.27 mm²·s⁻¹。而 800 °C 以后随着温度升高而升高是因为温度对热扩散的影响也很重要，在高温条件下，热传导不仅通过声子传导同时也通过光子传导，制备态涂

层在 1400 °C 时的热扩散系数为 0.36 mm²·s⁻¹。

热导率是选择热障涂层材料的重要指标，低热导率涂层是未来热障涂层发展的趋势。热导率 λ 是由材料的密度、比热、热扩散系数的乘积来决定，其公式^[16]为：

$$\lambda = D_{th} C_p \rho \tag{1}$$

其中，λ、D_{th}、C_p 和 ρ 分别表示热导率、热扩散系数、比热和样品的密度。

图 8 是 GZSZ 涂层不同温度下的比热容。比热容是由 Neumann-Kopp rule^[17] 公式计算得出，GZSZ 的比热容计算公式为：

$$C_p[(Gd_{0.7}Sr_{0.3})ZrO_{3.35}] = 0.35C_p(Gd_2O_3) + 0.3C_p(SrO) + C_p(ZrO_2) \tag{2}$$

GZSZ 涂层制备态和 1400 °C 热处理 360 h 的热导率如图 9 所示。热导率的变化趋势和热扩散系数的变化趋势是一样的，在 800 °C 之前热导率随着温度的升高逐渐降低，此时导热为声子导热，温度升高，声子

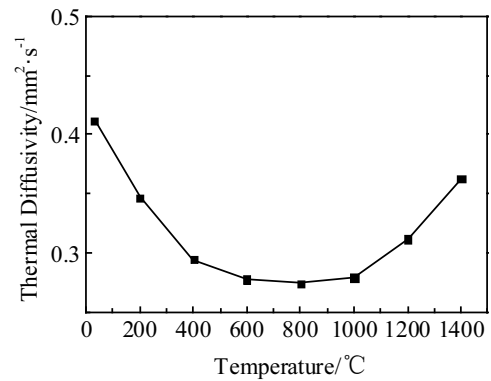


图 7 GZSZ 涂层在不同温度下的热扩散系数

Fig.7 Thermal diffusivities of the GZSZ coating at various temperatures

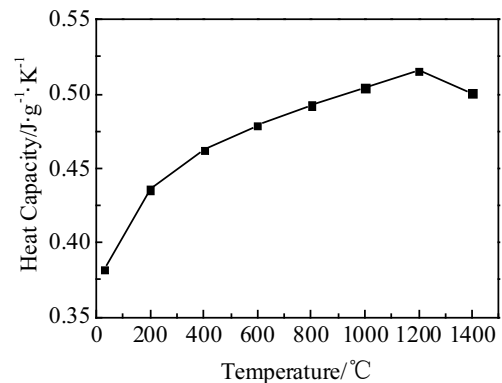


图 8 GZSZ 涂层在不同温度下的比热容

Fig.8 Specific heat capacities of the GZSZ coating at various temperatures

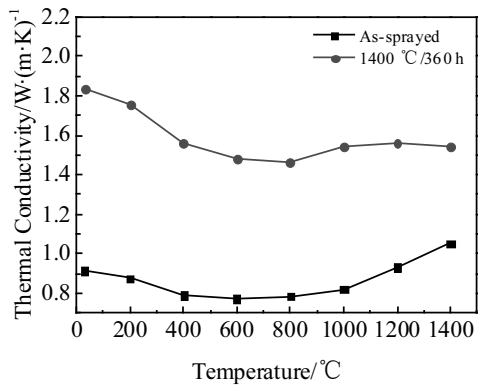


图 9 GZSZ 涂层制备态和 1400 °C 热处理 360 h 后的热导率

Fig.9 Thermal conductivities of the as-sprayed GZSZ coating and heat treated coating at 1400 °C for 360 h

间产生碰撞, 声子的平均自由程减小, 导热系数就会减小。随着温度升高, 声子平均自由程达到上限, 此时光子导热占据主导地位, 此时由于高温热辐射的影响, 热导率在 800 °C 以后回升^[18]。而制备态 GZSZ 涂层高温下热导率回升较快的另一个原因是因为涂层在高温下烧结收缩, 孔隙率降低, 热导率增加较快。从图 9 中热处理 360 h 后的涂层和制备态涂层在 1000~1400 °C 热导率对比可知, 高温热处理后涂层发生烧结, 使涂层致密, 孔隙率降低, 所以热处理后涂层的热导率与制备态涂层相比有所升高。在 1000 °C 下, 制备态 GZSZ 涂层的热导率为 $\sim 0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 与制备态 $SrZrO_3$ 涂层的热导率 $\sim 1.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 相比低 $\sim 20\%$, 略低于 8YSZ 涂层热导率 ($\sim 0.85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 1000 °C, 14% 孔隙率)^[19]。热导率是选择热障涂层的重要指标, 尤其要满足高温下长期工作的要求, GZSZ 涂层在 1400 °C 热处理 360 h 后其热导率为 $\sim 1.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (1000 °C), 尤其在高温区间 1000~1400 °C 内 GZSZ 涂层的热导率基本趋于稳定, 这是由于 GZSZ 中的 $Gd_2Zr_2O_7$ 具有较低的热导率^[20]。综上所述, GZSZ 涂层是一种很有前景的耐高温热障涂层材料。

3 结 论

1) GZSZ 粉末在 1450 °C 热处理 24 h 后, $Gd_2Zr_2O_7$ 和 $SrZrO_3$ 两相成相良好, 无其他杂质相, 且 $Gd_2Zr_2O_7$ 以烧绿石结构存在, 粉末形貌大多呈球状和碗状。

2) 大气等离子喷涂制备的 GZSZ 涂层中 $Gd_2Zr_2O_7$ 和 $SrZrO_3$ 两相成相良好, 涂层中 $Gd_2Zr_2O_7$ 以萤石结构存在, 涂层融化良好, 无大的缺陷和孔洞, 孔隙率为 $\sim 14\%$ 。

3) GZSZ 涂层从室温到高温具有良好的相稳定

性, 1400 °C 热处理 5 h 后的热膨胀系数为 $(9.8\sim 11.0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 与 8YSZ 涂层的热膨胀系数接近。

4) GZSZ 涂层在 1000 °C 下的热导率为 $\sim 0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 比制备态 $SrZrO_3$ 涂层热导率降低 $\sim 20\%$, 低于 8YSZ 涂层的热导率。1400 °C 热处理 360 h 后涂层的热导率为 $\sim 1.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 表明 GZSZ 涂层在高温仍有良好的隔热性能。

参考文献 References

- [1] Cao Xueqiang(曹学强). *Thermal Barrier Coating New Materials and New Structures*(热障涂层新材料和新结构)[M]. Beijing: Science Press, 2007: 22
- [2] Li Jia(李嘉), Xie Zheng(谢铮), He Jing(何箐). *Surface Technology*(表面技术)[J], 2015(9): 18
- [3] Taylor R, Bandon J R, Paul M. *Surface and Coatings Technology*[J], 1992, 50(2): 141
- [4] Guo Hongbo(郭洪波), Gong Shengkai(宫声凯), Xu Huibin(徐惠彬). *Materials China* (中国材料进展)[J], 2009, 28 (9-10): 18
- [5] Leckle R M, Krämer S, Rühle M *et al. Acta Materialia*[J], 2005, 53(11): 3281
- [6] Zhu P, Olga F, Seifert H J. *Journal of Phase Equilibria & Diffusion*[J], 2011, 32(1): 2
- [7] Xu Qiang(徐强), Liu Yan(刘燕), Wang Jingdong(王敬东) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(S1): 587
- [8] Yuan Xiaohu(袁小虎), Guo Hongbo(郭洪波), Peng Hui(彭徽) *et al. Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2013, 30(5): 138
- [9] Ma W, Mack D E, Vassen R *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 2008, 91(8): 2630
- [10] Cai Lili(蔡丽丽), Ma Wen(马文), Li Xinhui(李新慧) *et al. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*(中国腐蚀与防护学报)[J], 2017, 37(1): 47
- [11] Shen Zaoyu(申造宇), Huang Guanghong(黄光宏), He Limin(何利民) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(3): 776
- [12] Tao S, Yu J, Zhao H *et al. Thermal Spray Technology*[J], 2012, 4(2): 47
- [13] Lian J, Wang L M, Chen J *et al. Acta Materialia* [J], 2003, 51(5): 1493
- [14] Cao X, Vassen R, Stoeber D. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2004, 24(1): 1
- [15] Ma Wen(马文), Song Fengyu(宋峰雨), Dong Hongying(董红英) *et al. Journal of Inorganic Materials*(无机材料学

- 报)[J], 2012, 27(2): 212
- [16] Jiang K, Liu S B. *Advanced Engineering Materials*[J], 2015, 17(1): 21
- [17] Leitner J, Chuchvalec P, Sedmidubsky D *et al.* *Thermochimica Acta*[J], 2002, 395(1-2): 27
- [18] Pawlowski L, Fauchais P. *Metallurgical Reviews*[J], 1992, 37(1): 271
- [19] Qu Z X, Wan C L, Pan W. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(6-7): 2948
- [20] Kang Yongxia(亢永霞), Bai Yu(白宇), Liu Kun(刘琨) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(1): 282

Microstructure and Properties of Plasma Sprayed $Gd_2Zr_2O_7$ - $SrZrO_3$ Composite Ceramic Coatings

Li Yingjie, Ma Wen, Huang Wei, Yang Xi, Liu Ying, Chen Weidong, Bai Yu

(Inner Mongolia Key Laboratory of Thin Film and Coatings Technology,
Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: $Gd_2Zr_2O_7$ - $SrZrO_3$ (GZSZ, $Gd_2Zr_2O_7$: $SrZrO_3$ =7:3) composite ceramic powder was synthesized by solid state reaction. Spray drying and atmospheric plasma spray (APS) method were used to prepare corresponding spray powders and coatings, respectively. The phase composition and microstructures of the spray dried powders and APS coatings were characterized by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The thermal diffusivity, thermal expansion coefficient and sintering coefficient of the coatings were characterized by a laser flash method and a high-temperature dilatometer. The result shows that both GZSZ composite powders and coatings are composed of $Gd_2Zr_2O_7$ and $SrZrO_3$. The $Gd_2Zr_2O_7$ powder has a pyrochlore structure, while the $Gd_2Zr_2O_7$ coating has a fluorite structure, and both the $SrZrO_3$ powders and coatings have a perovskite structure. The porosity of the coating is ~14%, and its thermal expansion coefficient after heat treatment at 1400 °C for 5 h is $(9.8\sim 11.2)\times 10^{-6} K^{-1}$. The thermal conductivity of the as-sprayed GZSZ coating is $\sim 0.8 W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$, which is ~20% lower than that of the $SrZrO_3$ coating ($\sim 1.0 W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$). And the thermal conductivity of the GZSZ coating increases to $\sim 1.5 W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ after heat treatment at 1400 °C for 360 h. The results indicate that the GZSZ coating is a promising thermal barrier coating material.

Key words: atmospheric plasma spraying; thermal barrier coating; thermal conductivity; thermal expansion coefficient

Corresponding author: Ma Wen, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China, Tel: 0086-471-6575752, E-mail: wma@imut.edu.cn