

氧化锆基双陶瓷层热障涂层表层材料研究进展

吴硕^{1,2}, 赵远涛¹, 李文戈¹, 赵忠贤¹, 刘未来³, 吴艳鹏⁴

(1.上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2.山东交通学院, 济南 250357;
3.沪东中华造船集团有限公司, 上海 200129; 4.中国船级社上海规范研究所, 上海 200135)

摘 要: 双陶瓷层热障涂层是热障涂层技术的发展方向之一。等离子喷涂和电子束-物理气相沉积技术是目前最常用的双层涂层制备技术, 但存在的固有缺点影响涂层性能的发挥。可实现非视线沉积的等离子-物理气相沉积技术效率高, 能对涂层微观结构进行精准调控, 发展潜力巨大。稀土氧化物掺杂 ZrO_2 、 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 型烧绿石和萤石结构化合物、钇铝石榴石、独居石结构的稀土磷酸盐、氧化铝等材料被作为表层陶瓷, 分别与传统的 6%~8% Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2 ((6~8)YSZ) 层组合构成双陶瓷层, 可有效降低涂层的热导率, 极大地改善抗熔盐热腐蚀性能, 提高耐热温度等。如 YSZ/ CeO_2 和 TiO_2 共稳定的 ZrO_2 双层涂层可大幅提高隔热性能, $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 能有效提高整个涂层的使用寿命, 钇铝石榴石能阻隔氧渗入 YSZ 层并防止粘结层金属的氧化, GdPO_4 能与 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$ 熔盐反应形成稠密反应层并抑制熔盐的进一步渗入, 纳米 Al_2O_3 可形成致密结构, 并提高涂层的抗热腐蚀能力和抗高温氧化能力。但是, 绝大部分材料的热膨胀系数较低、断裂韧性较差, 限制了涂层整体性能的发挥。结合纳米技术和等离子-物理气相沉积等新的制备技术, 改性修饰稀土锆酸盐等表层材料的热物理性能, 引入稀土钽酸盐等热导率低、韧性强、阻氧性好的材料, 被认为能提高双层涂层的隔热性能和使用寿命。

关键词: 氧化锆基双陶瓷层; 表层材料; 等离子-物理气相沉积; 氧化; 热腐蚀; 韧性

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0101-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.010

Research Progress on Top Coating Materials of Thermal Barrier Coatings with Double-ceramic-layer Based on Zirconia

WU Shuo^{1,2}, ZHAO Yuan-tao¹, LI Wen-ge¹, ZHAO Zhong-xian¹, LIU Wei-lai³, WU Yan-peng⁴

(1.Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2.Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;
3.Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co. Ltd, Shanghai 200129, China;
4.Shanghai Rules & Research Institute, China Classification Society, Shanghai 200135, China)

ABSTRACT: Double-ceramic-layer (DCL) thermal barrier coatings (TBCs) are one of development directions of novel TBCs. Plasma spraying technology and electron beam-physical vapor deposition technology are the commonly used technologies to

收稿日期: 2020-04-22; 修订日期: 2020-06-23

Received: 2020-04-22; Revised: 2020-06-23

作者简介: 吴硕 (1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新型船舶材料。

Biography: WU Shuo (1984—), Male, Doctoral student, Research focus: new materials on ships.

通讯作者: 李文戈 (1966—), 男, 博士, 教授、博士研究生导师, 主要研究方向为材料表面工程与船机修复再制造技术。邮箱: liwenge66@163.com

Corresponding author: LI Wen-ge (1966—), Male, Doctor, Professor, Doctoral tutor, Research focus: surface engineering of material and ship repair and remanufacturing technology. E-mail: liwenge66@163.com

引文格式: 吴硕, 赵远涛, 李文戈, 等. 氧化锆基双陶瓷层热障涂层表层材料研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 101-108.

WU Shuo, ZHAO Yuan-tao, LI Wen-ge, et al. Research progress on top coating materials of thermal barrier coatings with double-ceramic-layer based on zirconia[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 101-108.

prepare DCL TBCs, but the inherent defects of the two technologies restrict the performances of DCL TBCs. With high efficiency and the ability of nonline-of-sight depositing, PS-PVD technology can accurately adjust and control the microstructure of TBCs, thus having great application potentials. DCL coatings could be prepared by ZrO_2 doped by rare earth oxide, $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ -type pyrochlore and fluorite, yttrium aluminium garnet, rare earth phosphates of monazite structure, and aluminium oxide as top coating and zirconia stabilized by 6wt.%~8wt.% Y_2O_3 as bottom coating, thus reducing the thermal conductivity effectively, improving the resistance to molten salt hot corrosion largely, increasing the thermal resistance, etc. For example, YSZ/ CeO_2 and TiO_2 co-stabilized ZrO_2 DCL TBCs could improve thermal barrier effect substantially, $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ could effectively increase the service life of TBCs, yttrium aluminium garnet could obstruct oxygen infiltration and prevent oxidation of metals in bond coating, GdPO_4 could react with $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ and form dense reaction layer to inhibit permeation of molten salts and nano-structured Al_2O_3 could form compact structure to enhance hot corrosion resistance and high temperature oxidation resistance. However, the performances were still restricted by lower coefficient of thermal expansion and poor fracture toughness. For this, some proposals to improve thermal barrier performances and service life of DCL TBCs, such as combining with nanotechnology and PS-PVD technology, modifying thermophysical properties of such new materials as rare earth zirconate by doping, inducing new materials (e.g. tantalate) with low thermal conductivity, strong fracture toughness, and good resistance to oxygen transmission, were put forward.

KEY WORDS: double-ceramic-layer based on zirconia; top coating material; PS-PVD; oxidation; hot corrosion; fracture toughness

热障涂层 (Thermal Barrier Coatings, TBCs) 广泛用于航天、舰船、兵器、能源等装备动力装置高温端部件的防护,能有效隔绝热流和腐蚀介质,延长高温端部件的使用寿命^[1-3]。热障涂层体系一般由~100 μm 厚的金属粘结层 (MCrAlY, $\text{M}=\text{Ni}$ 、 Co 、 $\text{Ni}+\text{Co}$ 等) 和~300 μm 厚的陶瓷面层组成 (如图 1a 所示)。目前使用最广泛的陶瓷面层材料为 6%~8% (质量分数) Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2 (Yttria-Stabilized Zirconia, YSZ)^[4],但其在 1473 K 以上的工作环境中长期工作时,涂层会发生相变和烧结,且易被 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS)、 Na_2SO_4 和 V_2O_5 等盐类腐蚀,大幅降低使用寿命,不能满足日益发展的工业需求^[5-9]。为此,研究人员从制备工艺、新材料研发及结构设计等方面开展了大量研究。其中,一些具有或部分具有高熔点、低热导率、低烧结速率、高稳定性等优点的新材料,被用来与(6~8)YSZ 相结合组成双层、多层或者梯度热障涂层^[10] (如图 1b、c、d 所示),以提高热障涂层

的高温适用性和使用寿命,适应发展需求。其中,双陶瓷层结构的热障涂层 (Double-ceramic-layer, DCL) 由 2 个陶瓷层组成 (如图 1b、图 2 所示),表层陶瓷一般为研发的陶瓷新材料,起隔热、抗腐蚀等作用;底层陶瓷一般用来缓解表面陶瓷层、粘结层、金属基体之间因热膨胀系数差异而产生的热应力,以提高涂层的整体韧性等^[11]。 ZrO_2 基双陶瓷层热障涂层既能发挥 ZrO_2 基涂层热膨胀系数大、断裂韧性高等优点,又能发挥表层陶瓷新材料热稳定性好、不易相变、隔热性能好、抗烧结、耐腐蚀等性能,实现优势互补,已成为热障涂层领域的研究热点之一。从近年国内外研究情况来看,国外研究者们经过前期大量的实验积累,对 ZrO_2 基双陶瓷层表层材料的热物理性能等掌握已较为全面,普遍认为稀土锆酸盐 (Gd 、 La) 是双陶瓷层较为理想的表层材料,当前的研究也主要集中于其热腐蚀防护等高温化学性能的研究。国内关于热障涂层的研究虽然起步晚,但是近 20 年来在产品

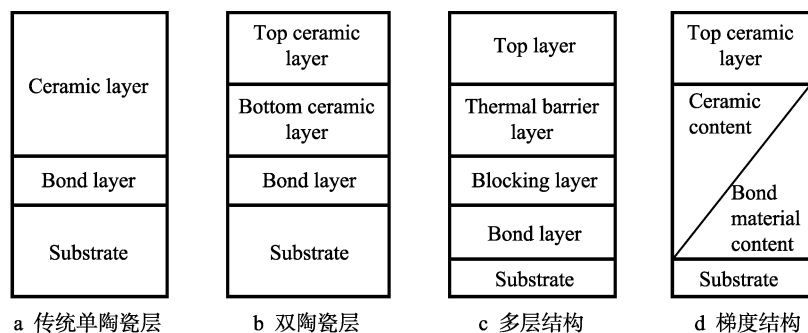
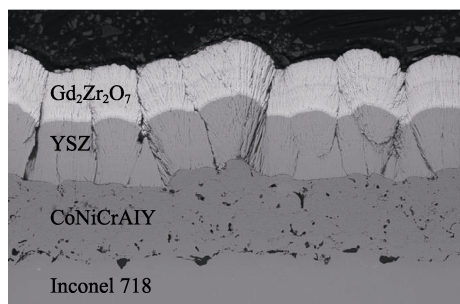


图 1 热障涂层的结构模型

Fig.1 Structure models of thermal barrier coatings: (a) traditional single ceramic layer; (b) DCL; (c) multilayered structure; (d) gradient structure

图 2 YSZ-Gd₂Zr₂O₇ 双陶瓷层结构^[12]Fig.2 Microstructure of YSZ-Gd₂Zr₂O₇ double-ceramic-layer^[12]

研发和应用方面积累了大量经验,与国外的差距正迅速缩小,当前国内研究者虽也将稀土锆酸盐等作为表层材料的研究重点,但研究多集中于材料热传导、高温氧化等基础性能研究。本文对近年来 ZrO₂ 基双陶瓷层热障涂层的表层材料研究情况进行论述,并探讨了存在的问题和主要研究方向。

1 热障涂层双陶瓷层制备技术

近年来,热障涂层制备技术的发展促进了涂层性能的提升^[13],其中较为常见的制备方法有等离子喷涂 (Plasma Spraying, PS)、电子束-物理气相沉积法 (Electron Beam-Physical Vapor Deposition, EB-PVD)、等离子-物理气相沉积 (Plasma Spray-Physical Vapor Deposition, PS-PVD) 等方法。

PS 主要有以下几种形式: 低压等离子喷涂 (Low Pressure Plasma Spraying, LPPS)、空气等离子喷涂 (Atmospheric/Air Plasma Spraying, APS)、超音速等离子喷涂 (Supersonic Plasma Spraying, SPS)、溶液前驱等离子喷涂 (Solution Precursor Plasma Spraying, SPPS) 等^[10]。其基本工作原理是通过等离子电弧加热喷涂材料至熔化或半熔化状态,高速喷向部件表面,撞击形成薄片堆叠的层状组织^[10]。等离子喷涂技术的主要优点为设备及操作相对简单,加热温度超过 10 000 K,对喷涂材料的要求较低,沉积效率高、成本低,形成的片层状涂层组织夹杂的孔隙多,隔热性好,但其技术缺点为面层粗糙度大,涂层内部的粘结力较弱,抗热震能力不强^[13-15]。王世兴等^[16]发现等离子喷涂工艺参数变化对 La₂Ce₂O₇ 涂层的微观结构影响较大,适当降低喷涂功率能促进粒子间的结合,减少横向裂纹,增加垂直裂纹。Robert Vaßen 等^[17]通过使用不同的 APS 参数制备 YSZ/Gd₂Zr₂O₇ 涂层,发现微观结构对其抗烧结、热循环、隔热等性能有重要影响,且相比 YSZ 层, Gd₂Zr₂O₇ 涂层更难在高孔隙率下获得粘结良好的微观结构。

EB-PVD 技术的原理是在高真空中利用电子束将材料加热至气化状态,然后沉积到基体上形成涂层^[13-14]。该技术制备的涂层表面光洁,致密度高,微观结构呈柱状,结合力强,应变容限高,抗热震性能良好,热

循环寿命长;但其设备昂贵,生产效率低,制备的涂层质量不稳定且热导率偏高^[13-15]。刘敏^[18]使用 EB-PVD 技术制备多种 YSZ/Al₂O₃ 涂层,发现形成的空隙和裂纹结构降低了涂层的弹性模量,增大了应变容限,但也为氧原子的扩散提供通道。Zaoyu Shen 等^[19]使用 EB-PVD 技术制备 YSZ/La₂O₃-ZrO₂-CeO₂ 双层涂层,发现小范围增加电流可使涂层形成羽状的分层体系结构,使涂层的热循环寿命和隔热性能提高。

PS-PVD 技术是基于 LPPS 技术与 EB-PVD 技术发展而来,其具备两者的技术优势。PS-PVD 技术通过增加等离子体功率来促进粉末的气化,可实现涂层准柱状结构高效、均匀、快速沉积,同时还可实现大面积的非视线沉积^[20]。研究发现,PS-PVD 技术具有较好的涂层微观结构与厚度的可控性,可以赋予 TBCs 多样性的组织结构与较大的厚度范围^[21-23]。刘梅军等^[24]研究发现,PS-PVD 制备的柱状结构涂层中广泛存在类树枝状分级结构,形成大量层间孔隙,阻碍热量传递,使涂层具有较好的隔热性能,而柱状结构之间存在的纵向贯通孔隙又提高了涂层的热应变容限。

除上述制备技术外,还有冷气体动力学喷涂 (Cold Gas Dynamic Spraying, CGDS)^[13,25]、化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD)、火焰辅助物理气相沉积 (Flame-assisted Vapor Deposition, FAVD) 等^[26]方法。在这些方法中,等离子喷涂技术被广泛用于静叶片和燃烧室部件 TBCs 的制备,EB-PVD 技术更适用于动叶片涂层的制备,而 PS-PVD 技术可融合两者制备涂层隔热性能好、应变容限高等优点,应用前景广阔。

2 表层陶瓷材料研究进展

稀土氧化物掺杂的 ZrO₂、烧绿石或萤石结构的 A₂B₂O₇ 型化合物、钇铝石榴石、独居石等新型 TBCs 表层陶瓷材料,与 YSZ 材料相比,均在某一方面或某几方面具有一定的优势,如高隔热性、耐熔盐腐蚀、高温相稳定性等。然而,这些材料存在热膨胀系数不匹配、断裂韧性差等缺点,限制了其单独作为 TBCs 的应用^[27]。为此,将这些新材料与传统的 ZrO₂ 基材料相结合组成双陶瓷层 (YSZ 为底层/新材料为表层) TBCs,并对其隔热性能、热腐蚀性能、热循环寿命等开展研究,成为了当前的研究热点。

2.1 稀土氧化物掺杂 ZrO₂

稀土氧化物的熔点高,化学稳定性好,与 ZrO₂ 掺杂后会形成置换型固溶体,大直径稀土离子取代 Zr⁴⁺ 的位置,使得 t'-ZrO₂ 相更加稳定,不易发生相变;同时使 t'-ZrO₂ 具有较好的四方度,提高其韧性,降低裂纹的萌生,并提高涂层寿命。稀土元素的掺杂可使 ZrO₂ 晶粒产生高浓度的晶格缺陷,导致声子散射

增强,在单方面或多方面显著降低涂层的热导率,提升耐腐蚀性和抗烧蚀性等^[6,13]。将掺杂改性的 ZrO_2 与 YSZ 共同构成双陶瓷层,能改善隔热和抗热腐蚀性能,但整体改善效果有限。如 YSZ/YSZ-10% La_2O_3 (质量分数)涂层能减少 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$ 熔盐渗入,延缓单斜相 ZrO_2 的生成^[28]; 15% CeO_2 和 5% TiO_2 (物质的量分数)共稳定的 ZrO_2 (CTZ) 涂层+YSZ (质量分数 7.4% Y_2O_3) /CTZ 双层涂层的热稳定性好,热导率低 (0.76~0.89 W/(m·K)),但涂层间热膨胀系数的不匹配导致热循环寿命较低^[29]。因此,通过掺杂稀土氧化物可以有效改善 ZrO_2 涂层性能,而多元稀土氧化物共掺杂 ZrO_2 可进一步提高其耐腐蚀、耐烧蚀等性能,其为稀土氧化物掺杂 ZrO_2 提供了更多的可能。

2.2 烧绿石结构或萤石结构的 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 型化合物

$\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 型 (A 为稀土元素, B 为 Zr、Ce、Hf 等元素) 化合物依据氧空位排列是否有序分为烧绿石结构和萤石结构^[27],其熔点高、高温稳定性好、热膨胀系数适中,能有效抵抗 CMAS 等熔盐的腐蚀,且高浓度的氧空位加强了声子散射使,其热导率非常低 (1.2~2.2 W/(m·K))^[7],其中稀土钨酸盐和稀土铈酸盐是双陶瓷层表层材料研究的热点。

2.2.1 稀土钨酸盐 ($\text{A}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$)

稀土钨酸盐具有焦绿石或萤石结构,其复杂的晶体结构和高浓度的氧空位增强了声子散射,阻碍了热量传播^[30]。其中, $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 陶瓷的热导率低,分别为 1.56 W/(m·K) (1073 K) 与 1.6 W/(m·K) (973 K),抗熔盐化学腐蚀能力强,且具备更好的高温稳定性以及与 ZrO_2 相近的断裂韧性,但是其较低的热膨胀系数,导致其抗热疲劳能力不足^[30-31]。因此, Kadir Mert Doleker 等学者^[32-41]尝试结合 YSZ 构成双涂层以降低热导率,减少热收缩不匹配带来的应力过大等问题,解决与粘结层上热生长氧化层 (Thermally Grown Oxide, TGO) 中 Al_2O_3 的化学相容性差等问题。

在热腐蚀性性能改善方面, $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 中的 La^{3+} 会与 CMAS 反应,生成具有封阻作用的致密磷灰石 $\text{Ca}_2\text{La}_8(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2$,有效抑制 CMAS 的渗入,具有较好的抗腐蚀性^[11]。 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 会与 Na_2SO_4 和 V_2O_5 的熔盐中的 V_2O_5 和 NaVO_3 反应生成 GdVO_4 ,但反应速度不够快,不能有效阻止熔盐渗入,且由于涂层断裂韧性较差,渗入的熔盐可使涂层的应变容限变差,加剧熔盐的渗入,抗腐蚀性能并不理想^[32-33]。

在高温稳定性方面,由于 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层的隔热性能好,不易渗氧,与 YSZ 构成双层涂层后,能抑制粘结层的快速氧化和 TGO 的生长,减少 TGO 突起的频次和尖晶石氧化物的数量,且其抗氧化性能和热循环寿命均优于 YSZ 涂层^[11,34-35]。 La^{3+} 能降低亚稳 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 至稳定 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的转变率,使残

余应力降低,并能抑制粘结层中阳离子的扩散,保证粘结力^[36]。

在抗热震性能及热循环寿命改善方面, $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 热膨胀系数不匹配产生的应力集中和其自身的低断裂韧性, $8\text{YSZ}/\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层的热循环寿命低于 8YSZ 单陶瓷层^[11],但由于 8YSZ 涂层的缓冲作用,其热循环寿命比 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 单层涂层高^[37],降低 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 的弹性模量可延长涂层的使用寿命^[38]。 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 的隔热性和阻氧能力较好,与 8YSZ 组成双层涂层可取长补短,比 8YSZ 有更高的抗氧化和热循环寿命^[12],且 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层越厚,其耐久性相对越好^[39]。 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 较差的断裂韧性和裂纹的生长最终导致了双层涂层的失效^[40]。

此外,研究验证微观结构对涂层的性能有重要影响, $8\text{YSZ}/\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 双陶瓷热障涂层采用纳米结构可提高隔热效果和抗高温氧化性能^[41]。在一定范围内降低 $8\text{YSZ}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层的孔隙率,会对涂层的隔热性、抗烧蚀性、热循环寿命等产生不利影响,且相比 YSZ 涂层, $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层更难形成高孔隙率结构^[17]。

2.2.2 稀土铈酸盐 ($\text{A}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$)

稀土铈酸盐及掺杂稀土铈酸盐以萤石结构为主,是稀土氧化物溶于 CeO_2 晶格中形成的化合物,其热膨胀系数高于相应的钨酸盐,结构中大量的氧空位加剧了声子散射,使其具有较低的热导率^[42-43],与 YSZ 构成双层涂层后,可降低涂层整体的热导率。在热腐蚀性性能改善方面, $\text{YSZ}/\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ 双层涂层的 $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ 会与 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$ 熔盐中的 NaVO_4 反应生成腐蚀产物,延缓熔盐渗入的速度,减少单斜相 ZrO_2 的容积率,其抗热腐蚀性性能优于 YSZ 涂层^[44]。在涂层中添加 Gd^{3+} 会有助于表面多孔反应薄层的生成,进一步抑制熔盐渗入^[45],其中, APS 制备的双层涂层的抗热腐蚀性性能要优于溶液前驱等离子喷涂技术制备的存在垂直裂纹和小孔隙的涂层^[45]。在抗热震性能及热循环寿命改善方面,块状 $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ 在 1673 K 长时间热处理后依然能保持萤石结构,高温下 (1473 K) 的热膨胀系数高达 $14\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,已是最接近于粘结层合金热膨胀系数 ($13\times 10^{-6}\sim 16\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 的高温无机材料之一。与 YSZ 构成的双层涂层的抗热震性能和弯曲性能较好,热循环寿命高于单 YSZ 涂层^[45-46],同时改变涂层的制备参数会对涂层的使用寿命产生较大影响^[24]。但是, $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ 在 523 K 左右时,会存在可能是由于化学键中 O^{2-} 横向振动所引起的热膨胀系数迅速下降甚至负膨胀现象,限制其应用^[30]。

2.2.3 $\text{La}_2(\text{Zr}_x\text{Ce}_{1-x})_2\text{O}_7$ 型混合物

烧绿石结构的 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和萤石结构的 $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ 通过固态反应法、共沉淀法等可组成混合物 $\text{La}_2(\text{Zr}_x\text{Ce}_{1-x})_2\text{O}_7$,增多的离子半径和原子量差异,增

加了点缺陷对声子扩散的散射,使其热导率更低,抗烧结能力强,且在高温下能保持相稳定。其中,APS 制备的 $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 涂层在 1273 K 时的热导率为 $\sim 0.48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,隔热性能优越,但其热膨胀系数 ($(8.9\sim 10.2)\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 比传统的 YSZ 涂层低^[47]。

$\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 与 YSZ 形成双层结构涂层后,其隔热性能和抗烧结性能均优于传统的 YSZ 涂层,由于 $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 与 CMAS 形成的高熔点结晶物可有效阻碍 CMAS 渗入,其抗 CMAS 腐蚀性能优越,加之底层 YSZ 涂层缓解了其与基底之间的热膨胀系数差异,使涂层整体的高温热循环寿命远高于传统的 YSZ 涂层^[47-49],热膨胀系数的不匹配最终导致了各层之间裂纹的产生和 $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 的逐层剥离,导致涂层失效^[48,50];纳米结构双层涂层间的粘结力比同等厚度的 8YSZ 涂层稍弱,但热导率会进一步降低^[51];EB-PVD 技术制备的 YSZ/LaZrCeO (元素比值 La : Zr : Ce=1 : 0.55 : 0.75) 双层涂层呈现柱状和羽状的微结构,如图 3 所示,具有极佳的热循环和抗热震性能,并保持较好的相稳定性^[50]。

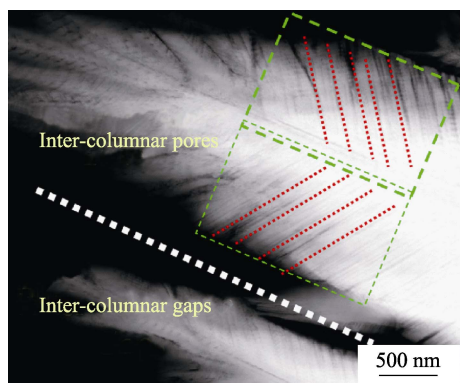


图 3 YSZ/LaZrCeO 双层涂层微观结构高角环形暗场像^[50]
Fig.3 HAADF image of YSZ/LaZrCeO DCL microstructure^[50]

此外, $\text{Sm}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 的相稳定性好,抗烧结阻力较 YSZ 高,热传导系数远低于 YSZ,1473 K 时的热膨胀系数为 $\sim 10.8\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,与 YSZ 构成双层涂层的热循环寿命高于 8YSZ/ $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 双层涂层, $\text{Sm}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 较低的断裂韧性 ($1.5\sim 2.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 是导致涂层失效的主要原因^[52]。

上述研究结果表明,YSZ 与烧绿石和萤石结构的 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 型化合物构成双层涂层,在降低涂层热导率、增强高温耐腐蚀能力和抗烧结能力、增长热循环寿命等方面的优势较为明显,显示了优异的性能,尽管仍存在热膨胀系数不匹配、断裂韧性过低、抗热震性能不足等一方面或多方面的问题,但仍是一种较有发展潜力的双陶瓷层表层陶瓷材料。同时,发现涂层的微观结构对涂层的粘结力、热导率、耐腐蚀性等性能有重要影响,不同制备技术制备的涂层在热导率、热循环性能等方面差异较为明显。在涂层制备组织结构调控方面,PS-PVD 技术具有较好的优势,其为 YSZ 与

烧绿石和萤石结构的 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 型化合物构成双层涂层制备提供了可能。

2.3 钇铝石榴石(Yttrium Aluminum Garnet, YAG)

YAG 是抗蠕变性能最强的氧化物晶体,在熔点 (2243 K) 下无相变,高温下热导率为 $2.4\sim 3.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,1273 K 时的热膨胀系数为 $9.1\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,氧扩散系数极低 (比 ZrO_2 小 10 个数量级)^[14,42],与 YSZ 结合构成双层涂层可增强其热力学性能,阻隔氧的传播,防止粘结层金属的氧化,降低 TGO 的生长速率,但界面多、层间热膨胀系数相差大等因素导致其抗热震性能较差^[53-54]。使用 Gd^{3+} 部分替代 Y^{3+} ,可提高其热循环寿命,并与 CMAS 熔盐反应生成 $\text{Ca}_4\text{Y}_6(\text{SiO}_4)_6\text{O}$ 和 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$,可有效抑制 CMAS 的渗入^[55]。上述研究结果表明,双陶瓷涂层中 YAG 层的存在降低了涂层的整体热导率,提高了涂层的抗熔盐热腐蚀能力,降低了粘结层的氧化速度,小范围内延长了涂层的服役寿命;但仍需改进其在高温下的热膨胀系数不匹配、烧结和再结晶等问题,也可将其掺入其他材料,以提高阻氧性、抗腐蚀性等性能。

2.4 独居石结构的稀土磷酸盐

独居石结构的稀土磷酸盐隔热性能好,高温相稳定性好,化学稳定性优越 (可有效抵抗燃气中 S、V 化合物的腐蚀,与 TGO 层中 Al_2O_3 之间的化学稳定性好),但其热膨胀系数相对较低、与粘结层的结合强度不足等问题,导致其应用的范围受限^[30-31]。YSZ/ LaPO_4 双层涂层对 V_2O_5 具有较高的热腐蚀阻力,但 LaPO_4 的断裂韧性差,使涂层易碎裂^[56]。YSZ/ GdPO_4 双层涂层能与 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$ 熔盐反应形成包含 GdVO_4 和 $\text{Gd}_4(\text{P}_2\text{O}_7)_3$ 的稠密反应层,并抑制熔盐的进一步渗入^[57],但 GdPO_4 较低的断裂韧性和高温下出现的相变及晶粒长大,易使涂层出现碎裂^[58]。稀土磷酸盐断裂韧性差等缺陷较为明显,可作为掺杂材料以提高其他材料制备涂层的隔热和抗热腐蚀等性能。

2.5 氧化铝 (Al_2O_3)

氧化铝硬度高、性质稳定。在 YSZ 涂层表面喷涂 Al_2O_3 能有效地提高涂层的稳定性、耐磨性和抗热震性能^[14,59],并能有效地隔绝 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$ 熔盐和火山灰熔盐的渗入,纳米 Al_2O_3 的致密结构使其抗热腐蚀能力和抗高温氧化能力更好,能提高整个 YSZ 涂层的寿命^[22,60]。如何结合制备工艺改善结构,降低涂层的热导率,并进行较为全面的热循环寿命测试,应是下一步的研究重点。但 APS 制备的 Al_2O_3 涂层会产生相变并伴随 $\sim 10\%$ (体积分数) 变化,易因应力过大而产生裂纹^[14],因此 Al_2O_3 表层涂层不宜过厚。

2.6 稀土钽酸盐(RETaO_4 、 RE_3TaO_7 , RE=La, Nd, Dy, Gd, Yb 等)

当前关于稀土钽酸盐热障涂层的研究证实, 稀土钽酸盐熔点高, 热稳定性好; 因 Ta 原子质量较大而引起的非简谐效应, 使稀土钽酸盐高温热导率极低 (1273 K , $1.1\sim 1.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 制备的涂层抗透氧性好, 可抑制粘附层氧化, 热膨胀系数相对较高, 弹性模量低, 特别是单斜相结构的 RETaO_4 陶瓷, 具有优异的铁弹增韧特性^[30], 可形成类似纤维复合材料的铁弹畴, 能抑制裂纹生长, 提高服役寿命, 且温度升高时, 增强的非简谐振动使声子散射变强, 使热导率进一步降低^[31,61], 是极有前景的热障涂层材料。选用 PS、EB-PVD 和 PS-PVD 等技术制备 ZrO_2 基双陶瓷涂层, 并对涂层的抗热冲击性能、抗熔盐热腐蚀性能、使用寿命等进行实验验证, 是今后重点发展方向。

3 结语

YSZ 可与稀土氧化物掺杂 ZrO_2 、 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 型烧绿石和萤石结构化合物、钇铝石榴石、独居石结构的稀土磷酸盐、氧化铝等材料, 构成双陶瓷层的新型热障涂层。涂层的组织结构可通过相应的制备工艺进行调整, 有效降低了涂层热传导率, 提高了涂层抗熔盐热腐蚀性能和工作温度。其中, $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 等部分 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 型化合物、 Al_2O_3 等材料, 能有效提高整个涂层的使用寿命。但是, 材料存在的热膨胀系数不匹配和断裂韧性较差等问题, 会限制涂层整体性能的提高。而纳米技术和 PS-PVD 等新的制备技术具有组织结构调控性好等优点, 可有效改善涂层材料的热膨胀系数及断裂韧性等性能, 从而为进一步提高涂层的热障与热循环寿命提供了条件。另外, 稀土钽酸盐具有隔热梯度大、断裂韧性好、抗透氧性强等性能特点, 其可用来制备新型 ZrO_2 基稀土钽酸盐双陶瓷涂层, 从而赋予涂层高隔热、使用寿命长的性能, 是一种有潜力的新型热障涂层表层材料。

参考文献:

- [1] 王旭. 燃气轮机在船舶动力装置中的应用[J]. 内燃机与配件, 2018(9): 46-47.
WANG Xu. Application of gas turbine in marine power plant[J]. Internal combustion engine & parts, 2018(9): 46-47.
- [2] 钟颖虹. 燃气轮机透平叶片热障涂层的研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2015: 5-12.
ZHONG Ying-hong. Study on thermal barrier coatings of gas turbine blade[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2015: 5-12.
- [3] 罗亮, 肖程波, 陈晶阳, 等. 工业燃气轮机涡轮叶片用铸造高温合金研究及应用进展[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 34-41.
LUO Liang, XIAO Cheng-bo, CHEN Jing-yang, et al. Research and application progress in casting superalloys for industrial gas turbine blades[J]. Journal of materials engineering, 2019, 47(6): 34-41.
- [4] 宋希文. 热障涂层新材料、制备技术及性能评价[J]. 装备环境工程, 2019, 16(1): 10.
SONG Xi-wen. Project introduction of evaluation of new materials, preparation technology and properties of thermal barrier coatings[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(1): 10.
- [5] 朱晨, 于建海, 郭亚飞, 等. 航空发动机热障涂层存在的问题及其发展方向[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 13-19.
ZHU Chen, YU Jian-hai, GUO Ya-fei, et al. Problems of aircraft engine thermal barrier coating and its developing direction[J]. Surface technology, 2016, 45(1): 13-19.
- [6] 王卫泽, 方焕杰, 黄继波. 防 CMAS 腐蚀热障涂层开裂的研究现状[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 23-29.
WANG Wei-ze, FANG Huan-jie, HUANG Ji-bo. Research status on cracking of thermal barrier coatings against CMAS corrosion[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 23-29.
- [7] EMINE Bakan, ROBERT Vaßen. Ceramic top coats of plasma-sprayed thermal barrier coatings: Materials, processes, and properties[J]. Journal of thermal spray technology, 2017, 26: 992-1010.
- [8] CHANG Hai-li, CAI Can-ying, WANG Yan-guo, et al. Calcium-rich CMAS corrosion induced microstructure development of thermal barrier coatings[J]. Surface & coatings technology, 2017, 324: 577-584.
- [9] 张小锋, 周克崧, 张吉卓, 等. 热震中 7YSZ 热障涂层结构演变[J]. 无机材料学报, 2015, 30(12): 1261-1266.
ZHANG Xiao-feng, ZHOU Ke-song, ZHANG Ji-fu, et al. Structure evolution of 7YSZ thermal barrier coating during thermal shock testing[J]. Journal of inorganic material, 2015, 30(12): 1261-1266.
- [10] 谢志敏. 几种提高热障涂层组织性能的方法[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015: 5-7.
XIE Zhi-min. Several methods to improve the microstructure and performance of thermal barrier coatings[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015: 5-7.
- [11] 杨乐馨. LZO/8YSZ 双陶瓷热障涂层高温氧化及 CMAS 腐蚀性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019: 1-12.
YANG Le-xin. Study on high temperature oxidation and CMAS corrosion properties of LZO/8YSZ double ceramic thermal barrier coatings[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019: 1-12.
- [12] KADIR M D, YASIN O, HAYRETTIN A, et al. Evaluation of oxidation and thermal cyclic behavior of YSZ, $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ and YSZ/ $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ TBCs[J]. Surface & coatings technology, 2019, 371: 262-275.
- [13] 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.
- [14] 王春杰, 王月, 张志强. 纳米热障涂层材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.
WANG Chun-jie, WANG Yue, ZHANG Zhi-qiang. Nano-sized thermal barrier coating materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.
- [15] 朱晨, 于建海, 郭亚飞, 等. 航空发动机热障涂层存在的问题及其发展方向[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 13-19.
ZHU Chen, YU Jian-hai, GUO Ya-fei, et al. Problems of

- aircraft engine thermal barrier coating and its developing direction[J]. Surface technology, 2016, 45(1): 13-19.
- [16] 王世兴, 袁涛, 詹华, 等. 不同结构等离子喷涂热障涂层的性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 21-24.
WANG Shi-xing, YUAN Tao, ZHAN Hua, et al. Research on properties of plasma sprayed thermal barrier coatings with different microstructure[J]. Surface technology, 2013, 42(1): 21-24.
- [17] ROBERT V, EMINE B, DANIEL M, et al. Performance of YSZ and $Gd_2Zr_2O_7$ /YSZ double layer thermal barrier coatings in burner rig tests[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(2): 480-490.
- [18] 刘敏. Al_2O_3 改性 YSZ 热障涂层的 EB-PVD 法制备、性能表征与抗火山灰腐蚀性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019: 49-51.
LIU Min. Preparation, characterization and corrosion resistance of Al_2O_3 modified YSZ thermal barrier coating prepared by the EB-PVD method[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019: 49-51.
- [19] SHEN Zao-yu, HE Li-min, XU Zhen-hua. LZC/YSZ DCL TBCs by EB-PVD: Microstructure, low thermal conductivity and high thermal cycling life[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39: 1443-1450.
- [20] 陈文龙. PS-PVD 羽-柱状结构 7YSZ 热障涂层的制备与性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017: 10.
CHEN Wen-long. Fabrication and properties of feather-like columnar structure 7YSZ thermal barrier coatings by PS-PVD[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017: 10.
- [21] 张啸, 刘敏, 张小锋, 等. 等离子喷涂-物理气相沉积高温防护涂层研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 39-53.
ZHANG Xiao, LIU Min, ZHANG Xiao-feng, et al. Research progress of high temperature protective coatings by plasma spray-physical vapor deposition[J]. China surface engineering, 2018, 31(5): 39-53.
- [22] 石佳, 魏亮亮, 张宝鹏, 等. 等离子物理气相沉积热障涂层研究进展[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 1-9.
SHI Jia, WEI Liang-liang, ZHANG Bao-peng, et al. Research process in plasma spray physical vapor deposited thermal barrier coatings[J]. Journal of aeronautical materials, 2018, 38(2): 1-9.
- [23] 何庆兵, 李忠盛, 吴护林, 等. 等离子喷涂 ZrO_2 基纳米涂层研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(11): 128-132.
HE Qing-bing, LI Zhong-sheng, WU Hu-lin, et al. Research progress of plasma sprayed ZrO_2 -based nano-coatings[J]. Journal of ordnance equipment engineering, 2016, 37(11): 128-132.
- [24] 刘梅军, 李广荣, 杨冠军, 等. 等离子-物理气相沉积 (PS-PVD) 热障涂层的结构调控与高隔热机理[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 88-103.
LIU Mei-jun, LI Guang-rong, YANG Guan-jun, et al. Structural regulation and high thermal insulation mechanism of thermal barrier coatings prepared by plasma spray-physical vapor deposition(PS-PVD)[J]. Journal of Xiangtan University(natural science edition), 2019, 41(6): 88-103.
- [25] 宋婉, 沈艳芳, 吴杰, 等. 冷喷涂沉积陶瓷涂层的研究历程[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(1): 1-10.
SONG Wan, SHEN Yan-fang, WU Jie, et al. Review on the research course of ceramic coatings deposited by cold spray[J]. Thermal spray technology, 2015, 7(1): 1-10.
- [26] 周美丽, 岳蕾, 陈强. 脉冲微波表面波 PECVD 在有机 PET 表面沉积 DLC 薄膜的阻隔性研究[J]. 包装工程, 2019, 40(17): 72-80.
ZHOU Mei-li, YUE Lei, CHEN Qiang. Barrier properties of PET coated by DLC film through microwave surface wave plasma enhanced chemical vapor deposition[J]. Packaging engineering, 2019, 40(17): 72-80.
- [27] 薛召露, 郭洪波, 宫声凯, 等. 新型热障涂层陶瓷隔热层材料[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 10-20.
XUE Zhao-lu, GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai, et al. Novel ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. Journal of aeronautical materials, 2018, 38(2): 10-20.
- [28] MOHAMMAD H K, MAJID M, MOJTABA G. Hot corrosion performance and electrochemical study of CoNiCr-AlY/YSZ/YSZ- La_2O_3 multilayer thermal barrier coatings in the presence of molten salt[J]. Materials chemistry and physics, 2018, 220: 23-34.
- [29] WANG Jin-shuang, SUN Jun-bin, YU Jie-yan, et al. Phase stability, thermo-physical properties and thermal cycling behavior of plasma-sprayed CTZ, CTZ/YSZ thermal barrier coatings[J]. Ceramics international, 2018, 44: 9353-9363.
- [30] 宗若菲, 吴福硕, 冯晶. 稀土钽酸盐在热障涂层中的研究与应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 20-31.
ZONG Ruo-fei, WU Fu-shuo, FENG Jing. Research and application of rare earth tantalate ceramics for thermal barrier coatings[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2019, 62(3): 20-31.
- [31] 陈琳, 汪俊, 冯晶. 稀土钽酸盐陶瓷热障涂层的研究进展[J]. 中国材料进展, 2017, 36(12): 938-949.
CHEN Lin, WANG Jun, FENG Jing. Research progress of rare earth tantalate ceramics as thermal barrier coatings[J]. Materials China, 2017, 36(12): 938-949.
- [32] YASIN O, KADIR M D, ABDULLAH C K. Hot corrosion behavior of YSZ, $Gd_2Zr_2O_7$ and YSZ/ $Gd_2Zr_2O_7$ thermal barrier coatings exposed to molten sulfate and vanadate salt[J]. Applied surface science, 2018, 438: 96-113.
- [33] KRISHNA P J, SATYAPAL M, NICHOLAS C, et al. Hot corrosion mechanism in multi-layer suspension plasma sprayed $Gd_2Zr_2O_7$ /YSZ thermal barrier coatings in the presence of $V_2O_5+Na_2SO_4$ [J]. Journal of thermal spray technology, 2017, 26: 140-149.
- [34] KADIR M D, HAYRETTIN A, ABDULLAH C K. Investigation of isothermal oxidation behavior of thermal barrier coatings(TBCs) consisting of YSZ and multilayered YSZ/ $Gd_2Zr_2O_7$ ceramic layers[J]. Oxidation of metals, 2017, 88: 109-119.
- [35] KADIR M D, YASIN O, ABDULLAH C K. Isothermal oxidation and thermal cyclic behaviors of YSZ and double layered YSZ/ $La_2Zr_2O_7$ thermal barrier coatings(TBCs)[J]. Surface & coatings technology, 2018, 351: 78-88.
- [36] DONG Tian-shun, WANG Ran, DI Yue-lan. Mechanism of high temperature oxidation resistance improvement of double-layer thermal barrier coatings(TBCs) by La[J]. Ceramics international, 2019, 45: 9126-9135.
- [37] GUO Xing-ye, LU Zhe, PARK Hye-yeong, et al. Thermal properties of $La_2Zr_2O_7$ double-layer thermal barrier coatings[J]. Advances in applied ceramics, 2019, 118(3): 91-97.
- [38] CHENG Bo, WEI Zhi-yuan, CHEN Lin, et al. Prolong the durability of $La_2Zr_2O_7$ /YSZ TBCs by decreasing the cracking driving force in ceramic coatings[J]. Journal of the

- European Ceramic Society, 2018, 38: 5482-5488.
- [39] SATYAPAL M, NICHOLAS C, STEFAN B. Durability of gadolinium zirconate/YSZ double-layered thermal barrier coatings under different thermal cyclic test conditions[J]. Materials, 2019, 12(2238): 1-14.
- [40] LASHMI P G, MAJITHIA S, SHWETHA V, et al. Improved hot corrosion resistance of plasma sprayed YSZ/Gd₂Zr₂O₇ thermal barrier coating over single layer YSZ[J]. Materials characterization, 2019, 147: 199-206.
- [41] 王铀, 王亮, 刘赛月, 等. 热喷涂纳米结构 La₂Zr₂O₇(LZ)/8YSZ 双陶瓷热障涂层[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 16-24.
- WANG You, WANG Liang, LIU Sai-yue, et al. Nanostructured La₂Zr₂O₇(LZ)/8YSZ double ceramic layer thermal barrier coatings fabricated by thermal spraying[J]. China surface engineering, 2016, 29(1): 16-24.
- [42] 吕艳红, 张启富. 新型热障涂层研究现状及发展趋势[J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(1): 8-13.
- LYU Yan-hong, ZHANG Qi-fu. Current research status and development trend of advanced thermal barrier coatings[J]. Powder metallurgy industry, 2015, 25(1): 8-13.
- [43] 张仙平, 陈晓鸽, 张红松. 热障涂层用陶瓷材料研究进展[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(7): 1906-1912.
- ZHANG Xian-ping, CHEN Xiao-ge, ZHANG Hong-song. Research progress of ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. Journal of synthetic crystals, 2016, 45(7): 1906-1912.
- [44] LASHMI P G, ANANTHAPADMANABHAN P V, CHAKRAVARTHY Y, et al. Hot corrosion studies on plasma sprayed bi-layered YSZ/La₂Ce₂O₇ thermal barrier coating fabricated from synthesized powders[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 711: 355-364.
- [45] PRAVEEN K, SRAVANI N, ALROY R J, et al. Hot corrosion behaviour of atmospheric and solution precursor plasma sprayed(La_{0.9}Gd_{0.1})₂Ce₂O₇ coatings in sulfate and vanadate environments[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(14): 4233-4244.
- [46] 曲飞, 袁福河. 一种新型的双层结构热障涂层及其性能[J]. 热喷涂技术, 2017, 9(4): 44-49.
- QU Fei, YUAN Fu-he. A novel double-layered thermal barrier coating and its properties[J]. Thermal spray technology, 2017, 9(4): 44-49.
- [47] 汪超, 周鑫, 解旭阳, 等. 重型燃气轮机用 La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/YSZ 双层热障涂层热循环性能研究[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(3): 14-21.
- WANG Chao, ZHOU Xin, XIE Xu-yang, et al. Thermal cycle behavior of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/YSZ double-layer thermal barrier coatings for heavy duty gas turbines[J]. Thermal spray technology, 2019, 11(3): 14-21.
- [48] 王梦雨, 吴琼, 冀晓鹏, 等. 双层 YSZ/La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇ 热障涂层高温性能研究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(3): 30-35.
- WANG Meng-yu, WU Qiong, JI Xiao-juan, et al. High temperature performance of a double-layered YSZ/La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇ thermal barrier coating[J]. Thermal spray technology, 2015, 7(3): 30-35.
- [49] 刘玉琢, 牟仁德, 何利民, 等. 电子束物理气相沉积 YSZ/La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇ 双层热障涂层热循环性能研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(1): 32.
- LIU Yu-zhuo, MOU Ren-de, HE Li-min, et al. Research on thermal cycling performance of EB-PVD YSZ/La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇ double-layer thermal barrier coatings[J]. Journal of aeronautical materials, 2009, 29(1): 32.
- [50] SHEN Zao-yu, HE Li-min, XU Zhen-hua, et al. LZC/YSZ double layer coatings: EB-PVD, microstructure and thermal cycling life[J]. Surface & coatings technology, 2019, 367: 86-90.
- [51] ZHOU Fei-fei, WANG You, LIU Min. Bonding strength and thermal conductivity of novel nanostructured La₂(Zr_{0.75}Ce_{0.25})₂O₇/8YSZ coatings[J]. Applied surface science, 2019, 481: 460-465.
- [52] HUO Pan-jie, SONG Wen-jia, ZHOU Xin. Microstructures and properties of Sm₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/8YSZ double-ceramic-layer thermal barrier coatings deposited by atmospheric plasma spraying[J]. Journal of thermal spray technology, 2019, 28: 986-999.
- [53] 李文生, 张义, 安国升, 等. YAG/8YSZ 双陶瓷热障涂层等温氧化性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(12): 3961-3968.
- LI Wen-sheng, ZHANG Yi, AN Guo-sheng, et al. Isothermal oxidation properties of YAG/8YSZ double ceramic thermal barrier coatings[J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(12): 3961-3968.
- [54] 张义. YAG/8YSZ 双陶瓷热障涂层体系高温氧化和CMAS 腐蚀性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019: 52-53.
- ZHANG Yi. Study on isothermal oxidation and CMAS corrosion properties of YAG/8YSZ double ceramic thermal barrier coatings[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019: 52-53.
- [55] SUN Shi-yu, XUE Zhao-lu, HE Wen-ting. Corrosion resistant plasma sprayed(Y_{0.8}Gd_{0.2})₃Al₅O₁₂/YSZ thermal barrier coatings towards molten calcium-magnesium-alumina-silicate[J]. Ceramics international, 2019, 45: 8138-8144.
- [56] ZHANG Cheng-long, FEI Jing-ming, GUO Lei, et al. Thermal cycling and hot corrosion behavior of a novel LaPO₄/YSZ double ceramic layer thermal barrier coating[J]. Ceramics international, 2018, 44: 8818-8826.
- [57] LI Ming-zhu, CHENG Yu-xian, GUO Lei, et al. Preparation of plasma sprayed nanostructured GdPO₄ thermal barrier coating and its hot corrosion behavior in molten salts[J]. Ceramics international, 2017, 43: 7797-7803.
- [58] GUO Lei, YAN Zheng, LI Zhi-hua, et al. GdPO₄ as a novel candidate for thermal barrier coating applications at elevated temperatures[J]. Surface & coatings technology, 2018, 349: 400-406.
- [59] 张小锋, 周克崧, 刘敏, 等. 镀铝表面改性 7YSZ 纳米热障涂层热震性能分析[J]. 无机材料学报, 2017, 32(9): 973-979.
- ZHANG Xiao-feng, ZHOU Ke-song, LIU Min, et al. Thermal shock analysis of surface Al-modified 7YSZ nano-thermal barrier coating[J]. Journal of inorganic material, 2017, 32(9): 973-979.
- [60] PAKSERESHT A H, JAVADI A H, GHASALI E, et al. Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed thermal barrier coatings with graded intermediate layer and double ceramic top layer[J]. Surface & coatings technology, 2016, 288: 36-45.
- [61] 汪俊. 稀土钽酸盐低热导陶瓷制备与热学及力学性质的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017: 34-35.
- WANG Jun. Research on preparation, thermal and mechanical properties of low thermal conductivity rare earth tantalate ceramics[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017: 34-35.