

文章编号:1674-8190(2020)03-308-08

# 航空发动机新型热障涂层研究进展

彭睿<sup>1</sup>, 常振东<sup>2</sup>, 孙莉莉<sup>3</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院 产品发展部, 北京 100095)

(2. 中国航发北京航空材料研究院 表面工程研究所, 北京 100095)

(3. 中国航发北京航空材料研究院 透明件研究所, 北京 100095)

**摘要:** 随着航空发动机使用环境要求不断提升, 现有热障涂层技术在热物理性能和热稳定方面难以满足现代航空发动机的发展需求。本文介绍了热障涂层制备工艺, 热障涂层材料的设计和选择, 以及热障涂层的失效机理; 归纳了热障涂层新型材料在材料热物理性能及材料稳定性方面的研究进展。指出了后续航空发动机新型热障涂层的发展趋势, 为后续研究提供了方向。

**关键词:** 航空发动机; 热障涂层; 热物理性能; CMAS

中图分类号: V263; TG174.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research Status of Thermal Barrier Coatings in Aero-engine Application

PENG Rui<sup>1</sup>, CHANG Zhendong<sup>2</sup>, SUN Lili<sup>3</sup>

(1. Department of Product Development, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Institute of Surface Engineering, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(3. Institute of Transparent Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** With the increase of the operation environment requirements for aero-engine, the thermal barrier coating technology is difficult to satisfy the development requirement of aero-engine in the aspects of thermo-physical properties and thermo-stability. The preparation techniques of thermal barrier coating, design and selection of thermal barrier coating material, and failure mechanism of thermal barrier coating are introduced. The up-to-date research of material for better thermo-physical properties and better performance in CMAS (CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) resistance are discussed, which provide a direction for further research on thermal barrier coatings.

**Key words:** aero-engine; thermal barrier coating; thermo-physical properties; CMAS

## 0 引言

近年来,随着航空发动机的发展,其推重比也不断提高。根据相关资料,推重比为 10 的航空发动机燃烧室进气口温度为 1 900 K 左右,推重比为 12~15 发动机进气口温度为 2 100 K,而当推重比

达到 20 时,燃烧室进气口温度将达到 2 200~2 400 K<sup>[1]</sup>。热障涂层技术是将耐高温,同时又具有低导热性和高抗腐蚀性的陶瓷材料以涂层的形式涂覆在基体材料表面的合金表面防护技术,且研发和制造成本相对较低,工艺更加容易实现,能够有效提高发动机整体使用寿命,是目前航空发动机

收稿日期:2020-04-13; 修回日期:2020-06-01

通信作者:彭睿, vergil99@163.com

引用格式:彭睿,常振东,孙莉莉. 航空发动机新型热障涂层研究进展[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 308-315.

PENG Rui, CHANG Zhendong, SUN Lili. Research status of thermal barrier coatings in aero-engine application[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 308-315. (in Chinese)

科研及生产制造过程中的关键技术之一<sup>[2-4]</sup>。随着航空发动机使用环境要求不断提升,对热障涂层也提出了更高的要求,现阶段热障涂层材料在热导率和热稳定性方面难以满足航空发动机发展需求。

本文介绍了现阶段应用较为广泛的热障涂层制备技术和材料选择,以及航空发动机新型热障涂层材料的研究进展,提出了热障涂层抗腐蚀的几点建议。

## 1 热障涂层技术研究现状

目前,热障涂层根据不同需求,主要有双层结构、多层结构和梯度结构三种结构形式,如图1所示,其中双层结构应用最为广泛<sup>[5-6]</sup>。

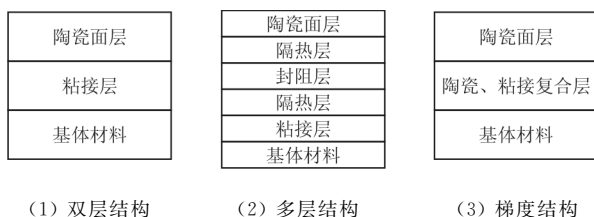


图1 热障涂层常见结构

Fig. 1 Regular structures of TBCs

### 1.1 热障涂层制备工艺

随着热障涂层制备工艺的不断发展和完善,现阶段粘接层主要采用低压等离子喷涂(LPPS)、真空电弧离子镀(VAIP)、化学气相沉积(CVD)等方法,而陶瓷层常用的具有代表性的工艺有等离子喷涂(PS)和电子束物理气相沉积(EB-PVD)等方法。

低压等离子喷涂也称作真空等离子喷涂,是将等离子喷涂在低压保护气体中进行操作,从而获得涂层的制备方法。但低压气体等离子射流的加热效率过低,导致此技术不易喷涂高熔点的材料。

真空电弧离子镀是目前航空发动机热障涂层粘接层制备应用最为广泛的技术。在真空状态下,将零件作为阳极,靶材作为阴极,阴极产生高度离化、有较高能量的等离子体,随后等离子体在零件表面沉积从而形成涂层。与其他工艺相比,镀层厚度更加均匀,且沉积效率更高,同时因为腔体内各种介质的分散能力强,复杂的零件表面也能够进行沉积<sup>[7]</sup>。

化学气相沉积是通过气体在零件表面发生化

学反应,随后形成所需涂层的制备方法。通过对反应气体的导流,可以对复杂零件表面或零件内部进行涂层沉积,表面涂覆率高,不容易出现堵孔等问题,但沉积速率较低。

等离子喷涂是通过喷枪产生等离子体,将陶瓷靶材加热至熔融状态并喷射在基体材料表面形成涂层。目前等离子喷涂的热障涂层在火焰筒、涡轮叶片上均开展应用。但等离子喷涂制备的涂层表面粗糙度差,容易存在夹杂物和微裂纹等,在高温环境下涂层的结合度容易降低,从而影响涂层整体性能<sup>[8]</sup>。目前,针对等离子喷涂制备梯度热障涂层也取得了一些新的进展,通过对优化喷涂过程模型设计改善喷涂参数,针对单个喷枪进行送粉等方法,能够有效改善等离子喷涂制备的梯度热障涂层的性能<sup>[9]</sup>。

电子束物理气相沉积是在真空条件下,通过电子束激发靶材,将靶材以原子或分子的形式传递到基体材料表面,形成涂层,是一种化学形式结合方式。EB-PVD制备的涂层,其显微结构为柱状晶,柱状晶与粘结层结合,同时柱状晶的结构能够提高涂层的抗应变能力,提高涂层寿命,此外 EB-PVD制备的涂层抗腐蚀性能好,是目前应用较为广泛的一项技术。但因工艺限制,EB-PVD难以实现对大型工件和内腔存在涂层要求的进行涂层制备。

### 1.2 热障涂层材料选择

根据航空发动机叶片的设计要求,较低的热导率和密度是热障涂层材料的最基本要求,在材料设计和选择方面,整体可以总结为三个方面:第一,材料必须能够承受在使用过程中因热循环引起的热膨胀而带来的形变,且涂层材料的热膨胀系数需与金属基体材料相近;第二,涂层材料必须能够起到抗氧化性的作用;第三,随着发动机的发展,燃烧室的温度不断提升,叶片工作环境愈发恶劣,涂层必须能够保证基体材料使用过程中不会超过其最高使用温度,从而保证整体叶片在使用过程中不会失效。

在现阶段,粘接层中的主要材料为 MCrAlY (M 为 Ni, Co, 或 Ni+Co), 主要作用是增加陶瓷面层与基体材料的结合同时依靠其中的 Al 起到抗氧化的作用<sup>[10]</sup>, 能够满足涂层材料抗氧化的要求。在陶瓷面层的选择方面,通过对  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{NiO}$  等一系列材料的对比,发现  $\text{ZrO}_2$  具有高熔点、低热传导系数等特点,同时热膨胀系数与目前作为基体材料的镍基高温合金相近,且密度较小,是理想的陶瓷面层材料。但因其稳定性较差,不适合直接作为陶瓷面层材料,因此主要选用 6%~8%  $\text{Y}_3\text{O}_2$  和部分稳定的  $\text{ZrO}_2$  (YSZ) 作为陶瓷面层的材料。该成分是由美国 NASA 在 20 世纪 70 年代首先提出,其材料在试验中具有最佳性能<sup>[8,11]</sup>。

### 1.3 热障涂层失效机理

热障涂层在长期使用过程中,热稳定性是重要的性能之一,而热稳定性最主要的表现形式就是在高温下是否会失效,对于热障涂层来说,最为直接的失效模式就是剥落,在粘接层和陶瓷层间会形成热生长氧化物(TGO),当 TGO 达到 2~4  $\mu\text{m}$  即可引起陶瓷层的剥落<sup>[12]</sup>。TGO 引起热障涂层失效机理主要分为三类:一是 TGO-粘接层界面开裂,由于热膨胀系数的差异,在 TGO-粘接层界面产生了面外拉应力,随着 TGO 厚度的增加,拉应力增大,最终引起界面开裂;二是陶瓷层-TGO 界面开裂,随着 TGO 厚度增加,加上蠕变变形,面内生长应力出现局部松弛,随后 TGO 生长引起面外应力增大,导致部分柱状晶剥落;三是在冷却时 TGO 承受极大的面内应力,可能导致涂层大规模卷曲<sup>[13]</sup>。

除 TGO 引起的涂层失效外,在航空发动机运行过程中,环境中一种主要成分为  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  的微粒(简称 CMAS)会从热化学、力学等多方面因素对涂层产生较大的破坏,是目前航空发动机在使用过程中最主要的危害。YSZ 会溶解在 CMAS 中,产生晶型转变,产生内应力;CMAS 会渗入涂层内部,由于其密实作用产生较大的内应力导致涂层剥落失效;此外在热循环中,由于 CMAS 的腐蚀作用,涂层容易产生分层和开裂,进而造成失效<sup>[14-15]</sup>。

## 2 新型热障涂层材料研究进展

### 2.1 材料热物理性能研究

#### 2.1.1 掺杂稀土元素改性 YSZ

在 YSZ 材料中添加稀土氧化物能够增大晶格

畸变,从而降低晶格振动频率,而材料的导热系数与晶格振动频率成正比,因此掺杂稀土元素能够有效降低材料的热导系数,冀晓鹏等<sup>[16]</sup>通过建模计算和 XRD 对掺杂摩尔分数为 25% 的 La, Ce, Gd, Nd, Yb 氧化物 YSZ 粉末的晶格常数数值进行对比,结果在添加稀土元素后  $\text{ZrO}_2$  晶胞发生畸变,导致 X-O  $\text{ZrO}_2$  晶格常数变大,因此,掺杂稀土元素能够有效的降低  $\text{ZrO}_2$  的热导率。此外,共价半径大的稀土元素会造成更大的膨胀畸变,从而带来更大的热导系数的降低<sup>[17]</sup>。Zhang Yanli 等<sup>[18]</sup>对一定浓度的稀土元素氧化物共同掺杂的 YSZ 材料性能进行了研究,研究表明  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  和  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  掺杂 YSZ 材料,能够在 300~1 600 K 保持相对稳定,而在 300~1 500 K 其热导率明显低于 YSZ,但热膨胀系数与 YSZ 相近,同时,在 1 573 K 烧结 10 h 后,稀土元素氧化物共同掺杂 YSZ 的收缩变形仅为 0.02%,远低于 8YSZ 的 0.056%。M. Matsumoto 等<sup>[19]</sup>和 D. G. Giovanni 等<sup>[20]</sup>分别对 YSZ 中掺杂  $\text{La}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$  后的性能进行研究,结果表明,掺杂虽然能够有效降低材料的热导率,但同时会带来材料硬度、热循环寿命降低等问题,影响涂层性能。掺杂 16.6%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ +16.6%  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  在腐蚀环境下 500 h 仅表现出轻微的被腐蚀性,而 YSZ 在 50~100 h 时即表现出同等的腐蚀状况<sup>[21-23]</sup>。

#### 2.1.2 钙钛矿结构材料

具有钙钛矿( $\text{ABO}_3$ )结构的材料因其具有高熔点,低热导率以及良好的化学相容性等特点也被视为现有 YSZ 材料的替代材料之一。马伯乐等<sup>[24]</sup>对大气等离子喷涂制备的  $\text{SrZrO}_3$  涂层的热物理性能、热循环寿命和制备工艺展开了研究,结果表明,在喷涂距离低于 90 mm 或高于 110 mm 时,因粉末加热不良、速度小或距离过大提前降温等原因,导致整体结合强度差,且涂层孔隙率高,涂层性能较差。 $\text{SrZrO}_3$  涂层的热导率在 1 873 K 不同热处理时间如图 2 所示<sup>[24]</sup>,可以看出:在 1 073~1 273 K,涂层热扩散系数整体呈现上升趋势,热处理时间为 0~20 h 时, $\text{SrZrO}_3$  涂层的热扩散系数随热处理时间(具体变化曲线如图 3 所示<sup>[24]</sup>)延长而逐渐增大,在 100~360 h 时,热扩散系数整体下降。此外,对比  $\text{SrZrO}_3$ /YSZ 双涂层和  $\text{SrZrO}_3$  单涂层,双涂层的热循环次数远远大于单涂层<sup>[24]</sup>。

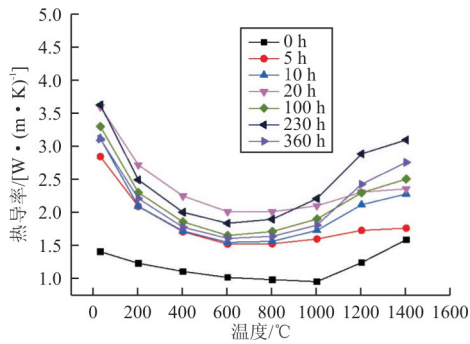


图 2 SrZrO<sub>3</sub> 涂层 1 873 K 热处理不同时间热导率曲线

Fig. 2 Different thermal conductivity of SrZrO<sub>3</sub> heat treated by 1 873 K for different time

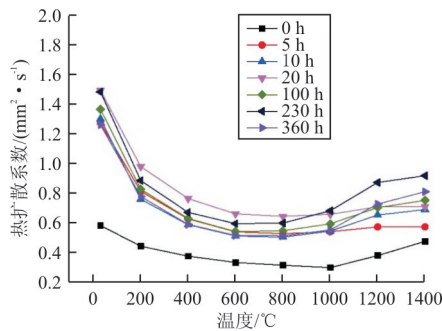


图 3 SrZrO<sub>3</sub> 涂层 1 873 K 热处理不同时间热扩散系数

Fig. 3 Thermal diffusion coefficient of SrZrO<sub>3</sub> heat treated by 1 873 K for different time

2.1.3 铁磁性稀土材料

此外,一系列具有铁磁性的稀土化合物 RENbO<sub>4</sub> (RE 为 Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb) 由于较低的热导率而被认为具有替代现有 YSZ 陶瓷材料的潜力。Zhang P 等<sup>[25]</sup>对 RENbO<sub>4</sub> 的性能展开了系列研究, XRD 结果表明单晶 m-RENbO<sub>4</sub> 可以成功通过固态反应合成,同时 RENbO<sub>4</sub> 表现出了比 YSZ 更好的热性能和类似的力学性能。RENbO<sub>4</sub> 具有更低的热导率,晶格畸变也导致了更高的热扩散系数。同时,RENbO<sub>4</sub> 系列化合物因其良好的抗热应变性能而被认为具有更高的热稳定性<sup>[25]</sup>。

2.1.4 稀土锆酸盐

La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 作为稀土锆酸盐陶瓷,其熔点高,热稳定强且热导率较低,能够提升材料的稳定性,是目前 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 型烧绿石和萤石结构化合物中作为热障涂层材料研究较为广泛且较为理想的替代材料。La<sup>3+</sup> 和 Zr<sup>2+</sup> 的半径比决定了 Ln<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的烧绿石或萤石晶体结构的稳定性,当半径比在 1.46~1.78 之间时,烧绿石结构在室温

至 1 700 K 左右稳定存在,而 La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 作为较早研究范围的烧绿石结构化合物,它比 YSZ 具有更低的弹性模量、热导率和热稳定性,但相较之下,热循环性能因为热扩散系数低引起的断裂韧性差的问题,与 YSZ 有一定的差距<sup>[11,26]</sup>。李英杰等<sup>[27]</sup>通过固相反应合成 Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-SrZrO<sub>3</sub> (GZSZ) 复合陶瓷粉末,并对大气等离子喷涂法制备的涂层进行了热扩散系数的表征,结果表明,涂层经过 1 673 K 热处理 5 h 后热扩散系数与 8YSZ 的热扩散系数接近(不同温度处理下热扩散系数如图 4 所示<sup>[27]</sup>),且涂层在 1 273 K 下的热导率低于 8YSZ 涂层,经过 1 673 K 热处理 360 h 后,热扩散系数虽然有一定提高,但仍然具有良好的隔热性能。

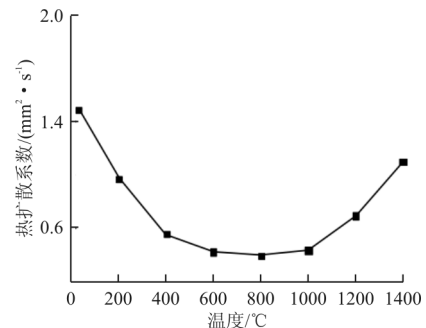


图 4 GZSZ 在不同温度下热扩散系数

Fig. 4 Thermal diffusion coefficient of SGZSZ at different temperatures

张少朋等<sup>[28]</sup>以 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub>、CeO<sub>2</sub> 为原料,通过高温固相反应制备 Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 和 Gd<sub>2</sub>(Ce<sub>x</sub>Zr<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 陶瓷材料,并对其热扩散系数和热导率进行了研究,CeO<sub>2</sub> 的掺杂能够将 Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的晶体结构变为缺陷萤石结构,无序度增加,从而降低热导率,具体变化如图 5~图 6 所示<sup>[28]</sup>。

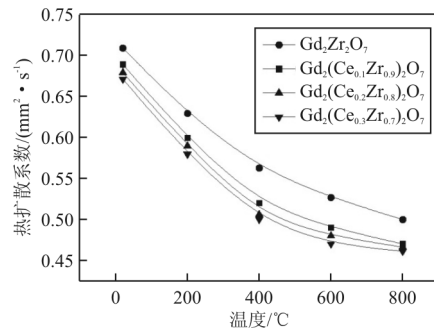


图 5 不同温度下热扩散系数

Fig. 5 Thermal diffusion coefficient at different temperatures

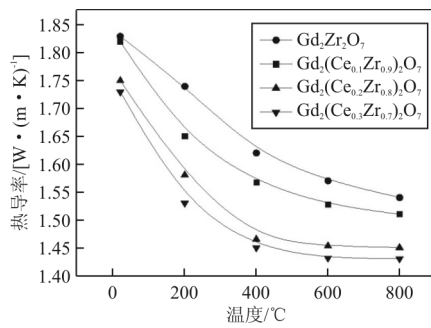


图 6 不同温度下热导率

Fig. 6 Thermal conductivity coefficient at different temperatures

## 2.2 材料热稳定性研究

R. Amarendra 等<sup>[29]</sup>发现在保护涂层不受 CMAS 腐蚀时,在原有涂层外涂覆一层湿润的涂层,能够减少涂层和熔融 CMAS 的接触,从而减少 CMAS 对涂层的影响,并且当湿润涂层为 Pd-Ag (20~80 wt%)、Pd、Pt、AlN、BN、SiC、MoSi<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>、ZrSiO<sub>4</sub>、SiOC 及其混合物时,效果最好。

周子民等<sup>[30]</sup>通过电镀和 EB-PVD 的方法在高温合金表面制备带有 Pt、Dy 掺杂 NiAl 粘接层的双层陶瓷结构的热障涂层,顶层为 La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub>,底层为 YSZ,结果表明,在 1 473 K 条件下 1 000 次热循环后,掺杂的涂层界面结合良好,仅在顶层出现少量微裂纹,如图 7 所示<sup>[30]</sup>。

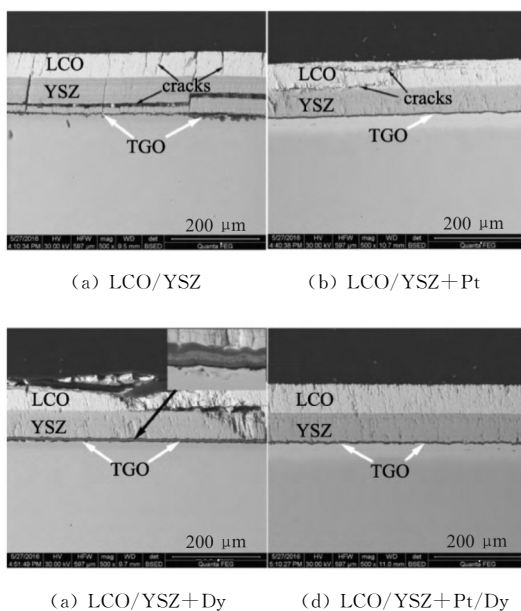


图 7 四种样品热循环 500 次后截面形貌

Fig. 7 Microstructure of samples after 500 times heat cycle

从图 7 可以看出:不掺杂的涂层在 500 次循环后已出现大量微裂纹。因此,在粘接层中加入 Pt 等元素也能有效地对热障涂层进行改良,延缓涂层的退化。

WANG L 等<sup>[31]</sup>在 YSZ 涂层表面通过 EB-PVD 涂覆了 Pt/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 层,并在 1 500 K 左右经历 4 h CMAS 侵蚀,观察其化学成分和微观结构。结果表明,产生的致密的 Pt 层能够有效的阻止 CMAS 从而起到防护作用。

M. D. Kadir 等<sup>[32]</sup>进行了 YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 双层热障涂层的尝试,他们在基体上涂覆 CoNiCrAlY 作为粘接层,通过 EB-PVD 分别涂覆 YSZ、Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 和 YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 作为面层,分别进行形貌和涂层性能的对比。三种涂层的厚度没有明显区别,但不同的是 YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 涂层中 YSZ 和 Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 有明显的分层,两者的厚度相当,在涂层涂覆的过程中未发现 YSZ 和 Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 之间的化学反应。三种热障涂层系统在高温下均表现出良好的稳定性,而涂覆 YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 在 TGO 生成方面具有更好的表现。

周飞飞等<sup>[33]</sup>通过对化学共沉积法合成的 La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 材料进行改进,以 La<sub>2</sub>(Zr<sub>0.75</sub>Ce<sub>0.25</sub>)<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 粉末为原料,通过球磨、喷雾干燥和热处理工艺制备出纳米结构 La<sub>2</sub>(Zr<sub>0.75</sub>Ce<sub>0.25</sub>)<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 喂料,采用大气等离子喷涂的方法制备 La<sub>2</sub>(Zr<sub>0.75</sub>Ce<sub>0.25</sub>)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/8YSZ 双陶瓷结构的涂层,结果表明,La<sub>2</sub>(Zr<sub>0.75</sub>Ce<sub>0.25</sub>)<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 能够对 8YSZ 起到很好的热防护作用。对比 8YSZ 和 La<sub>2</sub>(Zr<sub>0.75</sub>Ce<sub>0.25</sub>)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/8YSZ 双陶瓷结构涂层,在 1 473、1 523 和 1 573 K 下的隔热性能,当温度高于 1 473 K 时,双陶瓷结构涂层效果明显优于 8YSZ 单涂层结构,同时对于包括不同厚度比在内的结构设计,能够进一步提升双层结构涂层的性能。

稀土锆酸盐材料除了具有良好的热力学性能外,在 CMAS 防护方面也有突出的表现,除 Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 外, Y<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>[34]</sup>, Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub><sup>[35]</sup>, SrZrO<sub>3</sub><sup>[36]</sup>, La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>[37]</sup> 也均被发现具有抗 CMAS 侵蚀的作用。

A. AYSEGUL 等<sup>[38]</sup>将摩尔分数为 20% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 5% 的 TiO<sub>2</sub> 掺杂进 YSZ 涂层中,并通过 SPDS 进行涂覆。Al 和 Ti 的共同作用能够有效地组织 CMAS 渗透,进而减缓了热障涂层的失效。

Al元素能够使熔融CMAS从难结晶状态转化为易结晶状态,而Ti元素充当了形核的定位点,CMAS在熔入了Al和Ti后,反应形成了尖晶石及钙长石结构的CMAS约束层,能够有效阻止CMAS的侵蚀<sup>[39]</sup>。

楼思余等<sup>[40]</sup>将不同成分的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对涂层阻抗CMAS效果进行了深入的对比,通过制备不同成分的涂层,在1523K分别进行4和24hCMAS腐蚀试验,结合涂层的化学性能对比得出优化的成分组合。在8YSZ中掺杂Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>能够有效减缓CMAS的腐蚀,随着Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>浓度的升高,减缓速率先增后减,当浓度为30%时,减缓速率达到最大。

### 3 结束语

本文介绍了目前航空发动机热障涂层的制备技术和材料选择以及涂层的失效机理,同时综述了国内外新型热障涂层技术的研究进展,满足日益提升的航空发动机的使用要求。

新型航空发动机热障涂层材料未来的研究方向主要在:(1)在匹配热膨胀系数的前提下,具有比YSZ更低的热导率的替代材料;(2)比YSZ具有更好的抗CMAS腐蚀的替代材料。

而在抗CMAS腐蚀方面,主要考虑:(1)在涂层表面预制保护层,降低CMAS在原涂层表面的湿润性,减少熔融态CMAS与原涂层的接触,例如在原有涂层上涂覆Pd-Ag(20~80wt%)等具有湿润性的涂层;(2)在涂层表面形成致密的保护层,物理上隔绝CMAS,例如生成致密的Pt层,阻隔CMAS;(3)与CMAS进行反应,改变CMAS的状态从而达到阻隔CMAS侵蚀的效果,例如稀土锆酸盐或在YSZ中掺杂Al和Ti元素。

### 参考文献

- [1] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(s2): 18-26.  
GUO Hongbo, GONG Shengkai, XU Huibin. Progress in thermal barrier coatings for advanced aeroengines[J]. Materials China, 2009, 28(s2): 18-26. (in Chinese)
- [2] 陈孟成, 霍晓, 高阳, 等. 高温涂层的研究和发展[J]. 材料工程, 1999(6): 41-43, 46.  
CHEN Mengcheng, HUO Xiao, GAO Yang, et al. The prospect and study on high temperature coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 1999(6): 41-43, 46. (in Chinese)
- [3] SCHILZ U, LEYENS C. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings[J]. Aerospace Science & Technology, 2003, 7(1): 73-80.
- [4] 于海涛, 牟仁德, 谢敏, 等. 热障涂层的研究现状及其制备技术[J]. 稀土, 2010, 31(5): 83-88.  
YU Haitao, MU Rende, XIE Min, et al. Evolution status and processing technologies of thermal barrier coatings[J]. Chinese Rare Earths, 2010, 31(5): 83-88. (in Chinese)
- [5] CLARKE D R, LEVI C G. Materials design for the next generation thermal barrier coatings[J]. Annual Review of Materials Research, 2003, 33(1): 383-417.
- [6] 杨宏波, 刘朝辉, 丁逸栋, 等. 热障涂层的制备工艺及研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(14): 786-791.  
YANG Hongbo, LIU Zhaohui, DING Yidong, et al. Preparation technologies and research progress of thermal barrier coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(14): 786-791. (in Chinese)
- [7] 龚颖勇. 镍基单晶合金表面NiCrAlYSi涂层真空电弧镀工艺及高温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
GONG Yingyong. Study on vacuum arc deposition and high temperature properties of NiCrAlYSi coatings on surface of nickel-based single crystal alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] 牟仁德, 何利民, 陆峰, 等. 热障涂层制备技术研究进展[J]. 机械工程材料, 2007(5): 1-4.  
MU Rende, HE Limin, LU Feng, et al. Development in research on TBC deposition technologies[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007(5): 1-4. (in Chinese)
- [9] 周雳, 邢志国, 王海斗, 等. 等离子喷涂金属/陶瓷梯度热障涂层研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 122-131.  
ZHOU Li, XING Zhiguo, WANG Haidou, et al. Research progress of metal/ceramic gradient thermal barrier coatings by plasma spraying[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 122-131. (in Chinese)
- [10] 张罡, 梁勇. 激光制备陶瓷热障涂层的研究和发展[J]. 沈阳工业大学学报, 2000(1): 1-7.  
ZHANG Gang, LIANG Yong. Progress and research of laser prepared thermal barrier coatings[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2000(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] 郑蕾, 郭洪波, 郭磊, 等. 新一代超高温热障涂层研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(6): 14-24.  
ZHENG Lei, GUO Hongbo, GUO Lei, et al. New generation thermal barrier coatings for ultrahigh temperature applications[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(6): 14-24. (in Chinese)
- [12] 周绪强, 王红顺, 王艳. 浅谈燃气涡轮发动机热障涂层技术发展[J]. 内燃机与配件, 2019(24): 22-23.  
ZHOU Xuqiang, WANG Hongshun, WANG Yan. Research on TBC of gas turbine engine[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(24): 22-23. (in Chinese)
- [13] 唐诗白, 荆甫雷. 航空发动机热障涂层的主要失效模式[J]. 航空动力, 2019(3): 73-75.

- TANG Shibai, JING Fulei. Main failure modes of TBC of aero engine[J]. *Aerospace Power*, 2019(3): 73-75. (in Chinese)
- [14] 杨姗姗, 彭徽, 郭洪波. 热障涂层在 CMAS 环境下的失效与防护[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 43-51.  
YANG Shanjie, PENG Hui, GUO Hongbo. Failure and protection of TBC in the environment of CMAS[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(2): 43-51. (in Chinese)
- [15] 彭春玉. 氧化钇稳定氧化锆涂层的研究现状[J]. *广州化工*, 2019, 47(13): 44-46.  
PENG Chunyu. Research progress on failure mechanism of thermal barrier coating[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(13): 44-46. (in Chinese)
- [16] 冀晓鹃, 官声凯, 徐惠彬, 等. 添加稀土元素对热障涂层 YSZ 陶瓷层晶格畸变的影响[J]. *航空学报*, 2007(1): 196-200.  
JI Xiaojuan, GONG Shengkai, XU Huibin, et al. Influence of rare earth elements additions in YSZ ceramic coatings of thermal barrier coatings on lattice distortion [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007(1): 196-200. (in Chinese)
- [17] 薛召露, 郭洪波, 官声凯, 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 Zhaolu, GUO Hongbo, GONG Shengkai, et al. Research progress on insulated ceramic material for TBCs[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(2): 10-20. (in Chinese)
- [18] ZHANG Yanli, GUO Lei. Influence of  $Gd_2O_3$  and  $Yb_2O_3$  co-doping on phase stability, thermo-physical properties and sintering of 8YSZ [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(6): 948-953.
- [19] MATSUMOTO M, AOYAMA K. Thermal conductivity and phase stability of plasma sprayed  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $La_2O_3$  coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2004, 194(1): 31-35.
- [20] GIOVANNI D G, CATERINA B. Structure and thermal properties of heat treated plasma sprayed ceria-yttria co-stabilized zirconia coatings[J]. *Ceramics International*, 2009, 36(3): 964-968.
- [21] SAMUEL S, PANKAJ S. The tetragonal-monoclinic, ferroelastic transformation in yttrium tantalate and effect of zirconia alloying[J]. *Acta Materialia*, 2014(9): 196-202.
- [22] ANDI M L, SAMUEL S. Thermal conductivity of single and multi-phase compositions in the  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Ta_2O_5$  system[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34(12): 3085-3094.
- [23] FELICIA M P, CARLOS G L. Opportunities for TBCs in the  $ZrO_2$ - $YO_{1.5}$ - $TaO_{2.5}$  system [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(12): 6044-6050.
- [24] 马伯乐, 马文, 黄威, 等. 大气等离子喷涂  $SrZrO_3$  热障涂层工艺与性能的研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(1): 17-23.  
MA Bole, MA Wen, HUANG Wei, et al. Process and properties of  $SrZrO_3$  thermal barrier coating prepared by atmospheric plasma spray[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(1): 17-23. (in Chinese)
- [25] ZHANG P, FENG Y J. Thermal and mechanical properties of ferroelastic  $RENbO_4$  (RE = Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb) for thermal barrier coatings[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 180: 51-56.
- [26] UWE S, ANDRZEJ N. Effect of processing and interface on the durability of single and bilayer 7YSZ/gadolinium zirconate EB-PVD thermal barrier coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 381: 1-7.
- [27] 李英杰, 马文, 黄威, 等. 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[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(2): 555-560.  
LI Yingjie, MA Wen, HUANG Wei, et al. Microstructure and properties of  $Gd_2Zr_2O_7$ - $SrZrO_3$  TBC deposited by PS [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(2): 555-560. (in Chinese)
- [28] 张少朋, 花银群, 帅文文, 等.  $Gd_2(Ce_xZr_{1-x})_2O_7$  陶瓷材料的热物理性能研究[J]. *陶瓷学报*, 2019, 40(3): 301-306.  
ZHANG Shaopeng, HUA Yinqun, SHUAI Wenwen, et al. Thermophysical properties of  $Gd_2(Ce_xZr_{1-x})_2O_7$  ceramic materials[J]. *Journal of Ceramics*, 2019, 40(30): 301-306. (in Chinese)
- [29] AMARENDRA R. CMAS resistant thermal barrier coatings[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2009, 7(5): 662-674.
- [30] 周子民, 牟仁德, 郭孟秋, 等. 采用 Pt、Dy 改性粘结层的钨酸镧/氧化锆双陶瓷层抗氧化行为研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(1): 24-29.  
ZHOU Zimin, MU Rende, GUO Mengqiu, et al. Oxidation resistance behavior of  $La_2Ce_2O_7$ /YSZ double ceramic layer with Pt/Dy doped bond coat[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(1): 24-29. (in Chinese)
- [31] WANG L, GUO L, LIU Z Z, et al. Protectiveness of Pt and  $GdZr_2O_2$  layers on EB-PVD YSZ thermal barrier coatings against calcium-magnesium-alumina-silicate (CMAS) attack[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(9): 11662-11669.
- [32] KADIR M D, ABDULLAH C K, NANCY M. Performance of single YSZ,  $Gd_2Zr_2O_7$  and double-layered YSZ/ $Gd_2Zr_2O_7$  thermal barrier coatings in isothermal oxidation test conditions[J]. *Vacuum*, 2020, 177: 1-6.
- [33] 周飞飞, 刘敏, 邓春明, 等. 等离子喷涂超高温热障涂层用纳米结构  $La_2(Zr_{0.75}Ce_{0.25})_2O_7$  球形喂料及应用展望[J]. *表面技术*, 2020, 49(4): 98-103, 112.  
ZHOU Feifei, LIU Min, DENG Chunming, et al. Nanostructured  $La_2(Zr_{0.75}Ce_{0.25})_2O_7$  spherical feedstocks for plasma sprayed ultra-high temperature thermal barrier coatings[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(4): 98-103, 112.

- (in Chinese)
- [34] AMANDA R K, HECTOR F G.  $2\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$  thermal barrier coatings resistant to degradation by molten CMAS—Part II: interactions with sand and fly ash[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(12): 3950-3957.
- [35] ALI A N, MAJID M, TONNY W J. Hot corrosion behavior of calcium magnesium aluminosilicate (CMAS) on the  $\text{Yb}_2\text{SiO}_5$ -8YSZ composite as a candidate for environmental barrier coatings [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 243: 1-4.
- [36] 张珊榕, 董红英, 马文, 等. 等离子喷涂  $\text{SrZrO}_3$  热障涂层的  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (CMAS) 腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(1): 53-57.  
ZHANG Shanrong, DONG Hongying, MA Wen, et al. Corrosion resistance of air plasma sprayed thermal barrier coating  $\text{SrZrO}_3$  on superalloy In718 against  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (CMAS) [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(1): 53-57. (in Chinese)
- [37] 王梦雨, 吴琼, 冀晓鹏, 等. 双层  $\text{YSZ/La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$  热障涂层高温性能研究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(3): 30-35.  
WANG Mengyu, WU Qiong, JI Xiaojuan, et al. High temperature performance of a double-layered  $\text{YSZ/La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$  thermal barrier coating [J]. Thermal Spray Technology, 2015, 7(3): 30-35. (in Chinese)
- [38] AYSEGUL A, ALEXANDER L V. Novel thermal barrier coatings that are resistant to high-temperature attack by glassy deposits[J]. Acta Materialia, 2007, 55(20): 6734-6745.
- [39] 郭巍, 马壮, 刘玲, 等. 航空发动机用热障涂层的 CMAS 侵蚀及防护[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(3): 159-175.  
GUO Wei, MA Zhuang, LIU Ling, et al. CMAS corrosion and protection of thermal barrier coatings for aeroengine [J]. Advanced Ceramics, 2017, 38(3): 159-175. (in Chinese)
- [40] 楼思余, 单萧, 赵晓峰. 大气等离子喷涂热障涂层 CMAS 防护层成分及厚度优化[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 208-217.  
LOU Siyu, SHAN Xiao, ZHAO Xiaofeng. Composition and thickness optimization of anti-CMAS layer on air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface Technology, 2018, 47(2): 208-217. (in Chinese)

### 作者简介:

彭睿(1993—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:热障涂层生产过程管理、质量提升。

常振东(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:热障涂层产品生产、质量控制和工艺改进。

孙莉莉(1983—),女,博士,工程师。主要研究方向:产品生产和工艺改进。

(编辑:丛艳娟)

### (上接第 307 页)

- trend of Shipborne air refueling aircraft[J]. Aircraft Design, 2017, 41(4): 51-53. (in Chinese)
- [12] 顾俊. 分析空中加油机的特点和发展趋势分析[J]. 智库时代, 2018, 10(2): 220-221.  
GU Jun. The analysis of the characteristics and development trend of air tanker[J]. Think Tank Era, 2018, 10(2): 220-221. (in Chinese)
- [13] 侯玉燕. 国外空中加油技术的发展和展望[J]. 飞行力学, 1994, 12(4): 14-22.  
HOU Yuyan. The development and prospect of foreign air refueling Technology[J]. Flight Dynamics, 1994, 12(4): 14-22. (in Chinese)
- [14] BOLKCOM C. Air force aerial refueling methods—flying boom versus hose and drogue; CRS Report for Congress RL-32910[R]. USA: CRS, 2006.
- [15] NALEPKA J P, HINCHMAN J L. Automated aerial refueling: extending the effectiveness of unmanned air vehicles; AIAA-2005-6005[R]. USA: AIAA, 2005.
- [16] RO K, KAMMAN J W. Modeling and simulation of hose-paradogue aerial refueling systems[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2010, 33(1): 53-63.
- [17] 林一平. 现代空中加油机[J]. 交通与运输, 2015(1): 53-55.  
LIN Yiping. Modern aerial refueling aircraft[J]. Traffic and Transportation, 2015(1): 53-55. (in Chinese)
- [18] JHMED A S. Dynamics of multibody systems[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.

### 作者简介:

王秀香(1983—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器总体综合设计。

高旭(1983—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器总体综合设计。

高亚奎(1959—),男,博士,研究员、博导。主要研究方向:飞行器控制。

(编辑:丛艳娟)