# 航空发动机用环境障涂层的发展\*

丛 凯<sup>1</sup>, 高贤志<sup>1</sup>, 张宝鹏<sup>2</sup>

(1. 海装驻北京地区第三军事代表室,北京 100071;
 2. 航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

摘 要: 扼要介绍了环境障涂层的发展历史, 概述了不同环境障涂层材料及其制备技术的特点和应 用情况, 介绍了涂层的多种考核方法及涂层失效模式; 并根据环境障涂层技术的研究现状和技术难点, 提出了加快发展环境障涂层技术的意见。

关键词: 航空发动机; 陶瓷基复合材料; 环境障涂层; 制备; 考核; 综述 中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 10-2161-08 DOI: 10.13675/j.enki. tjjs. 200456

# Development of Environmental Barrier Coatings for Aero-Engines

CONG Kai<sup>1</sup>, GAO Xian-zhi<sup>1</sup>, ZHANG Bao-peng<sup>2</sup>

(1. Beijing Bureau of Naval General Armamnets Department, Beijing 100071, China;2. Aerospace Institute of Advanced Materials & Processing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The history of environmental barrier coatings was summarized. The features and application status of different materials and preparation techniques of environmental barrier coatings were analyzed. Various assessment methods and failure modes of the coatings were introduced. Some suggesstions for speeding up the development of environmental barrier coatings were proposed according to the relevant research status and technical difficulties.

Key words: Aero-engines; Ceramic matrix composite; Environmental barrier coatings; Preparation; Assessment; Review

# 1 引 言

更高的效率和更强的推动力是高性能航空发动 机进口温度不断提高的驱动力。在不同年代,发动 机材料承温能力的发展历程与趋势如图1所示。当 发动机推重比达到15以上,其涡轮进口温度可达 1900~2100℃。即使在气膜冷却和热障涂层的防护 下,高温合金材料也很难达到上述耐温需求<sup>[1-2]</sup>。因 此,需要研发耐温性能更高的先进结构材料。

SiC<sub>4</sub>/SiC陶瓷基复合材料具有低密度、耐高温、高 比强度、高比模量等优点,是下一代高推重比航空发 动机热端部件的主要候选材料之一<sup>[3-5]</sup>。法国 Snecma公司制备的 SiC<sub>4</sub>/SiC 调节片、密封片已获得应用, 其耐温性和疲劳寿命优于高温合金<sup>[6]</sup>。美国采用 SiC<sub>4</sub>/SiC 制备的燃烧室已经通过考核验证,最高温度 为 1200℃,通过了全寿命 5000h 和高温区 500h 的

作者简介: 丛 凯, 硕士, 助理工程师, 研究领域为装备及质量监督。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-06-23;修订日期: 2020-08-26。

通讯作者:张宝鹏,博士,工程师,研究领域为热防护涂层材料及制备。

引用格式:丛 凯,高贤志,张宝鹏.航空发动机用环境障涂层的发展[J].推进技术,2021,42(10):2161-2168. (CONG Kai, GAO Xian-zhi, ZHANG Bao-peng. Development of Environmental Barrier Coatings for Aero-Engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(10):2161-2168.)

考核[7]。

在航空发动机恶劣的服役环境(如高温、氧气、 水蒸气、高速燃流冲刷等)下,SiC<sub>4</sub>/SiC材料面临严重 的腐蚀问题。尤其是水蒸气、燃烧反应产物与SiC<sub>4</sub>/ SiC表面氧化形成的保护性二氧化硅反应,形成气态 反应产物,主要为Si(OH)<sub>4</sub>,导致材料损失、稳定性和 使用性能迅速下降<sup>[8-10]</sup>。为了解决水-氧腐蚀问题, 需要在SiC<sub>4</sub>/SiC表面制备环境障涂层(Environmental barrier coatings, EBCs),提高该材料的服役寿命和安 全可靠性<sup>[11-12]</sup>。因此,高性能EBCs涂层对SiC<sub>4</sub>/SiC部 件的实际使用至关重要。



capabilities of the aero-engine materials<sup>[1]</sup>

# 2 EBCs的关键要求

EBCs涂层主要用于保护SiC,/SiC免受高温水蒸 气引起的材料损伤和性能退化。EBCs涂层的关键性 能要求如图2所示。具体包括:



Fig. 2 A schematic of key EBCs requirements<sup>[11]</sup>

(1)环境稳定性高。根据热循环条件下的长寿 命需求,热膨胀系数(CTE)是涂层材料选择的重要标 准之一。传统的高温耐火氧化物,如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,ZrO<sub>2</sub>等, 其CTE 明显高于SiC。而难熔硅酸盐,如莫来石、钡 锶铝硅酸盐(Ba<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>,0<x<1,BSAS)和稀土硅 酸盐与SiC的CTE匹配,如图3所示<sup>[8]</sup>。选择EBCs材料的另一个关键标准是其在水蒸气下的挥发性。根据热/动力学计算结果<sup>[13]</sup>,与SiC相比,莫来石、BSAS和稀土硅酸盐的挥发性较低,适宜用作EBCs涂层材料。



Fig. 3 Comparison of the thermal expansion of refractory oxides and silicates with the thermal expansion of SiC<sup>[8]</sup>

(2)化学兼容性好。EBCs需要与基体材料之间 具有良好的化学相容性,无有害化学反应发生。图4 为BSAS涂层SiC,/SiC材料在1300℃循环使用1000h 后的截面微观形貌。从图中可以看出,在SiO<sub>2</sub>/BSAS 界面处产生了玻璃状反应区,并存在多个孔洞。这 是由于在BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>三元体系中存在低熔点共 晶(熔点~1300℃),而孔隙是由于低黏度共晶玻璃鼓 泡所致。在长时间使用下,孔隙不断生长、合并,可 能导致涂层剥落失效。因此,需要在BSAS和SiC,/SiC 间制备过渡层,避免BSAS与基体直接接触。



Fig. 4 Cross section morphologies of BSAS-coated CMC-SiC<sub>f</sub>/SiC after 1000h with 2h cycle at *T*=1300°C,  $p(H_2O)=0.9MPa^{[14]}$ 

(3)结合强度高。在难熔氧化物或硅酸盐涂层与SiC<sub>4</sub>/SiC基体之间通常需要制备一层黏结层来改善结合性能。Si与SiC<sub>4</sub>/SiC之间以强化学键结合,且Si的CTE与SiC<sub>4</sub>/SiC相近,因而是一种比较有效的黏结层材料<sup>[14]</sup>。

(4)良好的高温相稳定性。涂层材料在室温至

高温区间内发生相转变后可能会导致热膨胀系数、 体积等发生变化,增大涂层内应力,不利于涂层的长 时间使用。因此,相稳定性是影响 EBCs 寿命的另一 个因素<sup>[15-16]</sup>。

## 3 EBCs 材料的发展

20世纪90年代,美国NASA开始使用EBCs对CMC-SiC<sub>f</sub>/SiC材料进行水-氧环境下的热防护。经过近30年的发展,EBCs材料大致经历了4个阶段:(1) 莫来石体系<sup>[17]</sup>;(2)钡锶铝硅酸盐(BSAS)体系<sup>[18-19]</sup>; (3)稀土硅酸盐体系<sup>[20-23]</sup>;(4)耐温性更高的热/环境 障复合涂层体系<sup>[24-25]</sup>。

#### 3.1 莫来石体系

莫来石与SiC陶瓷的匹配度和化学相容性较好。 采用等离子喷涂制备的莫来石涂层具有良好的高温 强度、抗氧化性和抗化学腐蚀性。Lee等<sup>[17]</sup>发现非晶 莫来石涂层的结晶和热收缩是导致传统等离子喷涂 莫来石涂层热循环耐久性差的根本原因,如图5(a) 所示。NASA随后开发了一种改进的等离子喷涂工 艺,莫来石涂层以结晶态沉积,显著改善了热循环 耐久性,如图5(b)所示。莫来石体系涂层的主要 缺陷是其中的SiO<sub>2</sub>组分会与高温水蒸气反应生成 气态Si(OH)<sub>4</sub>,导致涂层持续损伤直至失效。

#### 3.2 BSAS体系

针对第一代莫来石材料自身长期稳定性不足的问题,NASA研发了第二代 EBCs 涂层,即 BSAS体



(a) Conventional plasma spraying



(b) Modified plasma spraying Fig. 5 Comparison of two mullite coatings processed by different plasma spraying<sup>[17]</sup>

系<sup>[14,26]</sup>。该体系以Si为黏结层、莫来石或莫来石+ BSAS为过渡层,BSAS为陶瓷面层。

图 6 为 BSAS 涂层 CMC-SiC<sub>t</sub>/SiC 在 1300℃循环 1000h 后的截面微观形貌。如图 6 所示,涂层没有发 生可见的氧化或者降解。第二代 EBCs 热循环耐久性 的提高主要是由于低模量 BSAS 的加入,降低了涂层 在高温循环过程中积累的应变。BSAS体系 EBCs 涂 层的不足之处在于:首先,在高温高速燃气流环境 下,BSAS 材料的抗冲刷性能较差,挥发速率快,导致 使用寿命降低。其次,BSAS 涂层体系的最高使用温 度不超过 1300℃。图 7 所示为 BSAS 涂层复合材料在 1440℃下氧化 20h 后的截面微观形貌,此时涂层已经 从基体表面剥落,在 BSAS 表面形成了大量的玻璃相 成分。原因是在 1300℃以上,BSAS 快速挥发,同时 BSAS 与 SiO<sub>2</sub>反应形成低熔点玻璃相,影响了涂层的 使用温度和服役寿命。



Fig. 6 Cross-section of Si/mullite+20wt.% BSAS/BSAScoated CMC-SiC<sub>1</sub>/SiC after 1000h with 1h cycle at T=1300°C, p(H,O)=0.9MPa<sup>[14]</sup>



Fig. 7 Cross section of mullite+20wt% BSAS/BSAS-coated SiC after 20h at 1440°C in air<sup>[14]</sup>

## 3.3 稀土硅酸盐体系

由于莫来石和BSAS体系均无法满足1300℃以 上的使用要求。经过广泛筛选试验<sup>[20-23]</sup>,稀土硅酸盐 被选为第三代环境障涂层材料。稀土硅酸盐熔点 高,在水蒸气中的稳定性高、挥发速率慢,其CTE与 CMC-SiC<sub>t</sub>/SiC的匹配性较好。目前主要有两种类型的稀土硅酸盐,分别是稀土单硅酸盐(RE<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>)和稀 土焦硅酸盐(RE<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>),Re表示稀土元素,目前研究 较多的稀土元素包括Y,Sc,Lu,Yb,Er等。结果表 明<sup>[26]</sup>,在高温水蒸气中,稀土单硅酸盐的挥发性明显 低于BSAS,而稀土焦硅酸盐与BSAS挥发性相近。图 8为Si/莫来石/Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>涂层SiC<sub>t</sub>/SiC在1380℃下循环 1000h后的截面微观形貌,高温循环后EBCs与基体 结合较好,涂层内部几乎没有裂纹。与BSAS体系 EBCs相比,稀土硅酸盐EBCs在1300~1400℃长时使 用下不会形成明显的玻璃相<sup>[27]</sup>。



Fig. 8 Cross section of Si/mullite/Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>-coated SiC<sub>7</sub>/SiC after 1000h with 1h cycle at  $T=1380^{\circ}$ C, p(H,O)=0.9MPa<sup>[27]</sup>

## 3.4 热/环境障复合涂层

第三代稀土硅酸盐 EBCs 涂层已经基本满足 1400℃燃气环境下的长时使用需求。随着 EBCs 涂层 CMC-SiC,/SiC组件的即将使用,研究单位和实验室在 相关环境中继续改进和优化 BSAS 和稀土硅酸盐 EBCs 技术,开发具有成本效益和长寿命 EBCs 的制 备方法,同时开发模拟真实环境的验证测试方法。 此外,着眼于先进 CMC-SiC,/SiC 复合材料的发展与 应用,研究人员正在开展耐温性更高的热/环境障复 合涂层,使用温度可达1650℃。其中,NASA Glenn中 心的 Zhu 等<sup>[24]</sup>, Spitsberg 等<sup>[25]</sup>结合热障涂层技术,提 出了热/环境障复合涂层的设计思路,以满足未来 SiC,/SiC 陶瓷基复合材料叶片等热端部件的更高耐温 需求。

# 4 EBCs 制备技术

## 4.1 浆料刷涂-烧结法

浆料刷涂-烧结法(Slurry painting-sintering)是将 涂层材料粉体与溶剂、分散剂等混合后,通过刷涂等 方法在基材表面制备涂层坯体,经过100~200℃保温 处理除去涂层中的溶剂后,再经高温烧结得到 EBCs<sup>[28-29]</sup>。该方法工艺过程简单、成本低,可以在形 状复杂的结构件表面制备均匀涂层。缺点在于,该 方法一次性制得的涂层厚度较低,因此需要多个刷 涂-高温烧结循环才能获得满足厚度要求的涂层,而 多次的高-低温循环过程和较高的烧结温度可能会 损伤SiC纤维,导致材料力学性能下降。此外,浆料 刷涂-烧结法制备的涂层结合强度一般低于等离子 喷涂和物理气相沉积涂层。

## 4.2 等离子喷涂法

等离子喷涂法(Air plasma spraying, APS)广泛用 于制备热障及环境障涂层,其原理是先利用高温的 等离子射流加热 EBCs粉末至熔融或半熔融状态。随 后,高速等离子射流携带着 EBCs粉末撞击在基材表 面,凝固后形成 EBCs涂层<sup>[30-31]</sup>。该技术的优点是工 艺成熟、稳定,喷涂效率高,涂层与基体的结合强度 较高。主要缺点是涂层一般为无定形态,在高温使 用时涂层容易发生析晶和晶粒长大,进而影响涂层 使用性能。此外,等离子喷涂法制备的涂层孔隙率 一般较高(>10%),内部的缺陷和裂纹较多。

图 9 所示为等离子喷涂涂层的共同特征<sup>[32]</sup>。在 涂层中发现的两种明显的裂纹形态是:(1)在喷涂过 程中熔化的扁平物质之间的细长裂纹,基本与界面 方向平行。它们的形成是由于液滴冷却时热收缩造 成的。(2)与等轴晶颗粒相邻的空隙,主要原因是这 些粉末颗粒在射流加热过程中没有完全熔化。



Fig. 9 Thermal spray coating microstructure showing common features<sup>[32]</sup>

# 4.3 电子束物理气相沉积法

电子束物理气相沉积法(Electron beam physical vapor deposition, EB-PVD)首先由电子枪产生高能电子束,通过磁场或电场聚焦在EBCs靶材上,并在靶材的表面形成高温熔池,EBCs材料会在熔池的上方发生气化。基体材料被放置在靶材的上方,当气相原

子扩散到达基体表面时发生沉积、形核并生长成连续涂层。研究发现,该方法制备的涂层为柱状结构, 如图 10 所示,柱状涂层垂直于基体表面,具有较高的 应变容限<sup>[33-35]</sup>。与等离子喷涂相比,电子束物理气相 沉积涂层在高温热循环过程中,柱状晶之间的间隙 可以缓解涂层内热应力对涂层的损害,从而提高涂 层的抗热震性能和使用寿命。然而,电子束物理气 相沉积方法属于视线沉积过程,气相原子只能扩散 到基体正面沉积,无法到达背面区域进行沉积,这一 问题一般采用旋转基材的方法进行缓解。



Fig. 10 Cross-sectional morphology of the coating deposited by EB-PVD

# 4.4 等离子物理气相沉积法

等离子物理气相沉积<sup>[36-38]</sup>(Plasma spray-physical vapor deposition, PS-PVD)是一种新型的环境障涂层 制备技术,既具有等离子喷涂技术沉积效率高、成本 低的特点,又具有气相沉积中涂层均匀、结合力好的 优势。PS-PVD可以配备多个送粉口,可以实现多层 涂层的快速、一体化制备。更重要的是,PS-PVD技术 具有很好的绕镀性,可以在几何形状复杂的样件表面 均匀沉积涂层。近年来,等离子物理气相沉积技术受 到了国内外研究机构的广泛关注,有望成为今后先进 涡轮发动机环境障涂层制备的关键技术之一。

张小锋等<sup>[39-40]</sup>采用 PS-PVD 在 SiC<sub>4</sub>/SiC 基体表面 依次喷涂了 Si, 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2SiO<sub>2</sub>, Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>三层涂层,形貌 如图 11 所示。其中,涂层内部致密,各涂层间界面结 合紧密。PS-PVD 技术采用高喷涂功率(60~100kW) 和低喷涂气压(200Pa 左右),产生高温、高速的等离 子射流。射流可以将 Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>等喷涂粉末熔化甚至 气化,实现固、液、气多相沉积。气相小分子可以沉 积在涂层内部孔隙处,提高涂层致密度,从而获得致 密的结构或功能涂层。经过实验验证<sup>[40]</sup>,该体系环 境障涂层在 1300℃循环 50次后涂层基本没有剥落, 显示出良好的抗热震性能。Bakan等<sup>[41]</sup>采用 PS-PVD 制备了Yb<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>环境障涂层,涂层致密、无裂纹。与 APSYb<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O,涂层相比,PS-PVD通过等离子射流加 热的方式可以长时间地保持较高的沉积温度,因而 涂层的结晶度更高。



(a) Cross-section of EBC

(b) Interface of Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> and mullite coating

substrate<sup>[39</sup>



(c) Interface of mullite and Si coating

Fig. 11 SEM images<sup>[39]</sup>

# 5 涂层考核与失效

EBCs涂层考核的关键因素包括水蒸气、气体流 速、温度梯度、外来环境沉积物(如CMAS:CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>)等。表1列出了目前用于EBCs考核的各 类平台及能力。其中,蒸汽循环平台成本低,维护费 用低,是筛选EBCs体系和长期抗水-氧腐蚀验证比 较理想的设备<sup>[42]</sup>。高速-高蒸汽平台已被证实在 EBCs的长期衰退试验中是有效的<sup>[43]</sup>。高热流密度激 光装置是进行温度梯度循环试验和热导率随时间变 化的理想测量装置[44]。高压燃烧器试验台可用于 EBCs性能衰退试验。目前,NASA已经开发出同时考 察燃气、温度梯度和热疲劳等因素的综合评价平 台<sup>[45]</sup>。GE在燃烧室盖板和衬环表面制备了Si/莫来 石/BSAS环境障涂层并进行了考核试验,结果表明, 该体系涂层在1200℃发动机环境下的使用寿命约为 15000h<sup>[46]</sup>。国内,西北工业大学建立了航空发动机 环境模拟考核平台,研究了CMC-SiC/SiC复合材料 在发动机环境下的性能演变规律[47]。但与国外相 比,我国尚缺乏完备的航空发动机环境性能考核评 价体系,基础研究及工程应用数据比较匮乏。

导致 EBCs 性能退化并最终失效的原因大致可以 分为三类,分别是化学、物理和机械类<sup>[48-50]</sup>。表 2 列 Mechanical

	Table 1 Testing rigs for EBG	_8
Rig	Typical testing parameter	Capability
High steam cycling	$p(H_2O) < 1MPa$ , v is very low	Long-term cyclic steam oxidation test
High velocity-high steam burn	her $p(H_2O)=0.2\sim0.5MPa$ , $v=100m/s$	Recession test
High heat flux laser	$p(H_2O)$ is very low, $v=0$	Temprerature gradient cycling
High pressure burner	$p(H_2O)=0.5\sim1MPa$ , $v=20\sim30m/s$ , $p_{total}=5$	5MPa Recession test
	Table 2   Sources of EBCs degraded	dation
Category	Source	Degradation mode
Chemical	$H_2O$ , chemical incompatibility, CMAS	Volatilization, oxidation, chemical reactions
Physical	Phase transformation, sintering	Cracking, delamination

Themal stress, external stress, foreign objects

出了每个类别的典型退化模式和最终失效模式。

化学反应方面,EBCs与高温水蒸气或其他化学 性质不兼容的物质发生有害反应,造成 EBCs 损伤。 近年来,涡轮发动机叶片的CMAS腐蚀问题日益突 出,由CMAS引起的热障/环境障涂层失效问题正受 到国内外研究机构的广泛关注<sup>[12, 47, 49]</sup>。CMAS是指 飞机发动机在服役时吸入的大气中的沙砾、尘埃及 火山灰等外环境的污染物,其主要成分为CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>,熔点一般在1150~1300℃。在涡轮发动机 的高温服役环境下,CMAS熔融后附着在涂层表面, 随后渗入涂层内部并对涂层产生侵蚀和破坏作用。 Stolzenburg 等<sup>[51]</sup>研究了第三代环境障涂层材料 Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>和Yb<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>与CMAS之间的相互作用。结果 表明,在1300℃下Yb,SiO5与CMAS反应强烈,形成六 方晶 Ca<sub>2</sub>Yb<sub>8</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>O<sub>2</sub>沉积,如图 12 所示。与之相比, CMAS和Yb,Si,O,之间没有发生明显化学反应,主要 原因是 Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>比 Yb<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>具有更高的 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>反应 活性。



Fig. 12 SEM image of 70wt% Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> mixed with 30wt% CMAS after 4h at 1300°C<sup>[51]</sup>

在物理类损伤中,EBCs在高-低温循环或应力作 用下可能发生相组成转变或晶粒烧结等现象,使 EBCs发生体积变化,增大内应力。在机械损伤方面, 涂层在高速燃气流冲刷或外来物体撞击等情况下受 到机械应力作用,可能会发生分层、剥蚀等现象,导 致涂层性能退化甚至失效。图 13 是 Si/莫来石+BSAS/ BSAS涂层复合材料依次经过外来物室温碰撞试验和 高温水-氧腐蚀后的截面微观形貌。从图中看出,在 冲击正面(a区域)处EBCs明显剥落,在冲击背面(b区 域)涂层发生分层,内部出现横向裂纹。而在未受到 冲击的区域,涂层基本完整,这说明冲击损伤对涂层 的使用寿命有较大影响。值得注意的是,在发动机实 际工作环境中,EBCs的各种退化因素同时存在。因 此,各种退化因素之间存在较强的相互作用。

Cracking, erosion, delamination



Fig. 13 Cross section of EBC-coated SiC<sub>4</sub>/SiC impact tested at room temperature at 290m/s and then oxidized at 1316°C for 500h<sup>[50]</sup>

#### 6 结 论

高性能 EBCs 涂层可显著提高 CMC-SiC/SiC 复合 材料的使用温度和服役寿命,对提高发动机推重比、 降低重量等具有重要意义,已经成为该领域的一项 关键技术。因此,必须突破EBCs涂层材料、制备及考 核评价技术。

(1) 面对未来高推重比航空发动机对 CMC-SiC/ SiC复合材料的要求,需要持续开发耐温性和抗环境 腐蚀性更好的热/环境障涂层材料体系。

(2)亟须开发沉积效率高、缺陷少、非视线沉积的先进 EBCs 制备技术,如等离子-物理气相沉积技术等。

(3)亟须建立低成本、高效、准确的 EBCs 考核评价方法,建立 EBCs 性能验证数据库,获得可靠的 EBCs 寿命预测方法。

**致** 谢:感谢航天科工集团第三研究院青年科技者协会 课题资助。

#### 参考文献

- [1] Padture N P. Advanced Structural Ceramics in Aerospace Propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15: 804-809.
- [2] 刘大响.一代新材料,一代新型发动机:航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J].材料工程,2017,45(10):1-5.
- [3] 李世波,徐永东,张立同.碳化硅纤维增强陶瓷基复合 材料的研究进展[J].材料导报,2001,15(1):45-49.
- [4] 肖 鹏,徐永东,张立同.高温陶瓷基复合材料制备 工艺的研究[J].材料工程,2000,28(2):41-44.
- [5] 卢国锋,乔生儒,徐 艳.连续纤维增强陶瓷基复合 材料界面层研究进展[J].材料工程,2014,42(11).
- [6] 张立同,成来飞.连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续 发展战略探讨[J].复合材料学报,2007,24(2):1-6.
- [7] Cofer C G, Economy J. Oxidative and Hydrolytic Stability of Boron Nitride—A New Approach to Improving the Oxidation Resistance of Carbonaceous Structures [J]. Carbon, 1995, 33 (4): 389-395.
- [8] Smialek J L, Robinson R C, Opila E J, et al. SiC and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Recession Due to SiO<sub>2</sub> Scale Volatility under Combustor Conditions [J]. Advanced Composite Materials, 1999, 8 (1): 33-45.
- [9] 黄璇璇,郭双全,姚改成,等.航空发动机SiC/SiC复 合材料环境障碍涂层研究进展[J].航空维修与工程, 2017(2):28-31.
- [10] Dong J P, Yang I J, Kim H G, et al. Oxidation Behavior of Silicon Carbide at 1200°C in Both Air and Water-Vapor-Rich Environments [J]. Corrosion Science, 2014, 88: 416-422.
- [11] Lee K N. Current Status of Environmental Barrier Coatings for Si-Based Ceramics [J]. Surface and Coatings Technology, 2000(133/134): 1-7.
- [12] 马 壮,刘 玲,郑 伟.航空发动机环境障涂层:材 料及性能[J].现代技术陶瓷,2019,40(5):331-344.
- [13] Lee K N, Zhang F. Recession of Environmental Barrier Coatings for Ceramic Matrix Composites [C]. Irsee: Thermal Barrier Coatings Ⅲ, 2011.

- [14] Lee K N, Fox D S, Eldridge J I, et al. Upper Temperature Limit of Environmental Barrier Coatings Based on Mullite and BSAS[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2003, 86 (8): 1299-1306.
- [15] Faber K T, Weyant C, Harder B, et al. Internal Stresses and Phase Stability in Multiphase Environmental Barrier Coatings [J]. International Journal of Materials Research, 2007, 98: 1188-1195.
- [16] Harder B, Ramirez-Rico J, Almer J, et al. Chemical and Mechanical Consequences of Environmental Barrier Coating Exposure to Calcium-Magnesium-Aluminosilicate[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94, 178-185.
- [17] Lee K N, Miller R A, Jacobson N S. New Generation of Plasma-Sprayed Mullite Coatings on Silicon Carbide [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78(3).
- [18] Kimmel J, Miriyala N, Price J, et al. Evaluation of CF-CC Liners with EBC after Field Testing in a Gas Turbine
  [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22 (14): 2769-2775.
- [19] 刘金铃. 抗高温水氧腐蚀硅酸盐的第一性原理研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- [20] Lee K N, Eldridge J I, Robinson R C. Residual Stresses and Their Effects on the Durability of Environmental Barrier Coatings for SiC Ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2005, 88(12): 3483-3488.
- [21] Ueno S, Ohji T, Lin H. Designing Lutetium Silicate Environmental Barrier Coatings for Silicon Nitride and Its Recession Behavior in Steam Jets[J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2006, 7(1): 20-23.
- [22] Hong Z L, Cheng L F, Zhang L T, et al. Water Vapor Corrosion Behavior of Scandium Silicates at 1400°C [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2009, 92(1).
- [23] Maier N, Nickel K G, Rixecker G. High Temperature Water Vapor Corrosion of Rare Earth Disilicates (Y, Yb, Lu)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> in the Presence of Al (OH)<sub>3</sub> Impurities
  [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27 (7): 2705-2713.
- [24] Zhu D M, Bansal N P, Miller R A. Thermal Conductivity and Stability of Hafnia- and Zirconate-Based Materials for 1650°CThermal/Environmental Barrier Coating Applications [J]. Ceramic Transactions, 2003, 153: 331-343.
- [25] Spitsberg I, Govern C, Nagaraj B A, et al. Thermal/Environmental Barrier Coating for Silicon-Comprising Materials[P]. EP: 1683774, 2012-09-19.
- [26] Lee K N, Fox D S, Bansal N P. Rare Earth Silicate Environmental Barrier Coatings for SiC/SiC Composites and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics[J]. Journal of the European Ceramic So-

2168

ciety, 2005, 25: 1705-1715.

- [27] Lee K N. Current Status of Environmental Barrier Coatings for SiC/SiC Composites and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics [C]. Baltimore: 107th Annual Meeting and Exposition of the American Ceramic Society, 2005.
- [28] Hong Z L, Cheng L F, Zhang L T, et al. Internal Friction Behavior of C/SiC Composites with Environmental Barrier Coatings in Corrosive Environment [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2011, 8 (2): 342-350.
- [29] Ramasamy S, Tewari S N, Lee K N, et al. Environmental Durability of Slurry Based Mullite-Gadolinium Silicate EBCs on Silicon Carbide[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(6): 1123-1130.
- [30] Kohyama A, Khan Z S, Hinoki T. Microstructure of Environmental Barrier Mullite and Erbium Silicate Coatings on SiC-Fiber Bonded Composites [J]. Key Engineering Materials, 2005, 287: 471-476.
- [31] 刘巧沐,黄顺洲,何爱杰.碳化硅陶瓷基复合材料环境 障涂层研究进展[J].材料工程,2018,46(10):1-8.
- [32] Davis J R. Handbook of Thermal Spray Technology [M]. Russell: ASM International, 2004.
- [33] Harder B J, Zhu D. Plasma Spray-Physical Vapor Deposition (PS-PVD) of Ceramics for Protective Coatings [J]. Advanced Ceramic Coatings and Materials for Extreme Environments, 2011, 32(1): 73-84.
- [34] Goral M, Kotowski S, Nowotnik A, et al. PS-PVD Deposition of Thermal Barrier Coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 237: 51-55.
- [35] Hall A C, Mccloskey J F, Urrea D A. Low Pressure Plasma Spray-Thin Film at Sandia National Laboratories [C]. Las Vegas: Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 2009: 725-728.
- [36] Gao L H, Wei L L, Guo H B, et al. Deposition Mechanisms of Yttria Stabilized Zirconia Coatings During Plasma Spray Physical Vapor Deposition [J]. Ceramics International, 2016, 42: 5530-5536.
- [37] Gao L H, Guo H B, Wei L L, et al. Micro Structure and Mechanical Properties of Yttria Stabilized Zirconia Coatings Prepared by Plasma Spray Physical Vapor Deposition
   [J]. Ceramics International, 2015, 41: 8305-8311.
- Zhang X F, Zhou K S, Deng C M, et al. Gas-Deposition Mechanisms of 7YSZ Coating Based on Plasma Spray-Physical Vapor Deposition [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36: 697-703.
- [39] 张小锋,周克崧,刘 敏,等.离子喷涂-物理气相沉 积Si/莫来石/Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>环境障涂层[J].无机材料学报, 2018,33(3):325-330.

- [40] Wang C, Zhang X F, Zhou K S, et al. Nano-composite Structured Environmental Barrier Coatings Prepared by Plasma Spray-Physical Vapor Deposition and Their Thermal Cycle Performance[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48 (11): 3455-3462.
- [41] Bakan E, Mauer G, Vassen R. As Assessment of Thermal Spray Technologies for Deposition of Environmental Barrier Coatings (EBC)[J]. Thermal Spray Technology, 2018, 10 (2), 60-62.
- [42] Fritsch M, Klemm H. The Water Vapor Hot Gas Corrosion Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Materials, Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> and Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-Coated Alumina in a Combustion Environment
  [C]. Cocoa Beach: The 30th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites, 2006.
- [43] Choi S R, Eldridge J I, Lee K N, et al. Surface Cracking and Interface Reaction Associated Delamination Failure of Thermal and Environmental Barrier Coatings [J]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2003, 24 (3): 469-475.
- [44] Robinson R C, Smialek J L. SiC Recession Caused by SiO<sub>2</sub> Scale Volatility under Combustion Conditions: I, Experimental Results and Empirical Model[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1999, 82(7).
- [45] Lee K, Roode M V, Kashyap T, et al. Environmental Barrier Coatings for Ceramic Matrix Composites—An Overview[R]. GRC-E-DAA-TN31119, 2017.
- [46] Roode M V. Transactions of the ASME [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129 (1), 21-30.
- [47] 栾新刚.3D C/SiC 在复杂耦合环境中的损伤机理与寿 命预测[D].西安:西北工业大学,2007.
- [48] Evans A G, Mumm D R, Hutchinson J W, et al. Mechanism Controlling the Durability of Thermal Barrier Coatings[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46: 505-553.
- [49] Kramer S, Faulhaber S, Chambers M, et al. Mechanism of Cracking and Delamination Within Thick Thermal Barrier Systems in Aero-Engines Subject to Calcium-Magnesium-Alumino-Silicate (CMAS) Penetration[J]. Materials Science Engineering A, 2008, 490: 26-35.
- [50] Bhatt R T, Choi S R, Cosgriff L M, et al. Impact Resistance of EBC Coated MI SiC/SiC Composites [J]. Materials Science Engineering A, 2008, 476: 8–19.
- [51] Stolzenburg F, Johnson M T, Lee K N, et al. The Interaction of Calcium-Magnesium Aluminosilicate with Ytterbium Silicate Environmental Barrier Materials [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 284: 44-55.

(编辑:梅 瑛)