引用格式：王龙辉，刘荣军，王衍飞．环境障涂层材料、制备工艺与失效机制研究进展[J]．材料工程，2026，54(4)：161-175.
WANG Longhui，LIU Rongjun，WANG Yanfei.Research progress in fabrication technologies and failure mechanisms of environmental barrier coatings[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：161-175.

环境障涂层材料、制备工艺与失效机制研究进展

王龙辉，刘荣军，王衍飞*
（国防科技大学 空天科学学院 新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室，长沙 410073）

摘要：随着航空发动机技术的不断进步，其工作温度持续攀升，用于叶片防护的环境障涂层（EBCs）服役环境日趋苛刻，对涂层的综合性能提出了更高要求。在材料体系方面，EBCs已从第一代莫来石/YSZ体系发展到第四代热/环境障涂层（T/EBCs），其中稀土硅酸盐因其优异的高温稳定性和热膨胀系数匹配性成为研究热点。本文综述了大气等离子喷涂（APS）、电子束物理气相沉积（EB-PVD）及等离子喷涂-物理气相沉积（PS-PVD）等常用的环境障涂层制备工艺，分析了工艺参数对涂层质量的影响，并阐述了水氧腐蚀、钙镁铝硅酸盐（CMAS）侵蚀及热循环应力作用下涂层的典型失效机制。环境障涂层未来发展方向，可能聚焦于高熵新材料研发、多尺度结构设计及智能化工艺优化，以此全面提升涂层的服役性能与使用寿命。

关键词：环境障涂层；水氧腐蚀；CMAS；涂层工艺；稀土硅酸盐
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000339　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000339
中图分类号：TG174；TB32　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0161-15

Research progress in fabrication technologies and failure mechanisms of environmental barrier coatings

WANG Longhui，LIU Rongjun，WANG Yanfei*
（Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory，College of Aerospace Science and Engineering，National University of Defense Technology，Changsha 410073，China）

Abstract：With the development of aero-engine technology，the rising operating temperature makes the service environment of environmental barrier coatings（EBCs）increasingly severe，imposing higher demands on their comprehensive performance. EBCs have evolved from the first-generation mullite/YSZ system to the fourth-generation thermal/environmental barrier coatings（T/EBCs），among which rare-earth silicates have become a research hotspot owing to their excellent high-temperature stability and matched thermal expansion coefficient. This paper reviews typical EBCs preparation processes including APS，EB-PVD and PS-PVD，analyses the influence of process parameters on coating quality，and elaborates the typical failure mechanisms under water-vapor corrosion，CMAS attack and thermal cycling stress. Future development of EBCs will focus on high-entropy materials，multi-scale structural design and intelligent process optimization to further improve their service performance and lifetime.

Key words：environmental barrier coating；water oxygen corrosion；CMAS；coating process；rare earth silicate

先进航空发动机作为飞行器的“动力心脏”，其性能与寿命直接决定了航空工业的发展水平与技术突破。航空发动机热端部件（如涡轮叶片）长期处于热、力、氧、水汽等多场耦合的极端服役环境，因此亟须研发兼具轻质、耐高温、抗氧化特性，并能在高温下保持优异的机械与化学稳定性的新型材料体系[1-4]。

硅基非氧化物陶瓷基复合材料具有优异的耐高温、低密度、高比强度、高比模量、高抗氧化性和耐腐

蚀性能[5]，特别是连续碳化硅纤维增强碳化硅（SiC_f/SiC）复合材料备受关注，其目前已应用于国外军机及民机的先进航空发动机热端部件中[6]。硅基陶瓷在高温含氧的干燥环境中能与氧气发生反应，生成的致密氧化硅层能抑制其进一步的氧化[7]。但是，在实际航空发动机燃烧系统中，氧化介质不仅包括氧气，还包括碳氢化合物燃料燃烧产生的高温水蒸气[8]，一方面水蒸气与致密 SiO_2 保护膜反应生成气态 $Si(OH)_4$，另一方面，伴随气态产物的逸出，涂层内形成大量孔隙与裂纹，直接破坏了氧化硅保护膜的完整性，加速 SiC_f/SiC 复合材料的结构损伤，最终导致其力学性能急剧退化[9]。SiC_f/SiC 基复合材料不仅易受水蒸气侵蚀，在服役过程中还会受到粉尘与熔盐的腐蚀作用，进而导致性能衰减；这类腐蚀介质主要为钙镁铝硅酸盐（calcium-magnesium-aluminosilicate，CMAS）[10]。

为解决上述问题，在 SiC_f/SiC 复合材料表面制备环境障涂层（environmental barrier coatings，EBCs），有效阻隔了氧气、水蒸气及熔盐等介质侵蚀，提升了构件高温服役稳定性并延长使用寿命。综上所述，本文详细总结了 EBCs 在服役工况下的失效形式和机理，并从涂层材料体系、制备工艺及相关失效机理等方面展开综述，以期为研发高可靠、长寿命的先进环境障涂层提供参考。

1 环境障涂层材料研究进展

1.1 环境障涂层的选材与结构设计原则

EBCs 在高温、高速及富含水氧的环境中服役，同时承受剧烈的热震与热冲击作用，因此 EBCs 材料的筛选与结构的设计需综合评估力学性能、化学稳定性及热物理特性等多重因素。

（1）为了确保体系整体的可靠性，不同物质之间需保持高结合强度、化学相容性和界面稳定性。

（2）EBCs 材料要求具有较高的熔点和稳定的相成分，以确保其在服役过程中结构与功能的稳定性。

（3）为有效保护基体材料，EBCs 需兼具优异的抗水氧腐蚀与抗 CMAS 腐蚀性能。

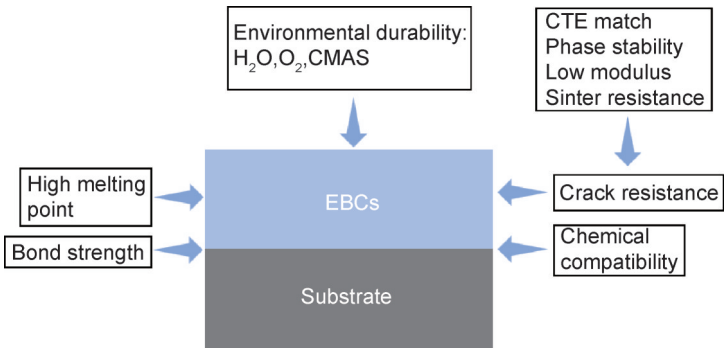


图 1 EBCs 主要设计要求[11-12]

Fig.1 Main design requirements for EBCs[11-12]

裂纹的萌生与扩展是导致 EBCs 失效的关键因素之一，直接影响涂层的服役寿命和可靠性。在高温循环载荷和复杂环境耦合作用下，涂层内部应力集中会诱发微裂纹形核，而裂纹的进一步扩展将加速涂层的剥落失效。为有效抑制 EBCs 中裂纹的萌生与扩展，材料选择需重点优化以下关键性能参数：与基体匹配的热膨胀系数（coefficient of thermal expansion，CTE）、优异的高温相稳定性、较低的弹性模量以及良好的抗烧结特性。EBCs 的主要设计要求如图 1 所示[11-12]。

1.2 环境障涂层发展历程

自 20 世纪 90 年代中期首个 EBCs 体系问世以来[13]，普遍认为 EBCs 材料的研究目前已发展至第四代，其性能与可靠性得到显著提升，为高温结构材料的工程应用提供了重要保障。

1.2.1 第一代莫来石体系 EBCs

第一代 EBCs 体系由莫来石（mullite，$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$）涂层与氧化钇稳定氧化锆（yttria-stabilized zirconia，YSZ）涂层共同组成[14-15]，采用抗水汽腐蚀能力更佳的 YSZ 取代莫来石作为面层。双层结构涂层不仅能保护硅基陶瓷免受环境的侵蚀，同时也形成过渡避免表层 YSZ 材料与复合材料基体因 CTE 不匹配而产生剥落失效。

然而，高温情况下莫来石与 YSZ 层之间存在 CTE 失配，涂层间易产生垂直裂纹最终失去保护作用[16]。第一代 EBCs 体系受限于涂层间的与 CTE 不匹配问题，难以满足实际工程应用需求。

1.2.2 第二代（莫来石+BSAS）体系 EBCs

第二代 EBCs 体系采用钡锶铝硅酸盐（$1-x$BaO-

xSrO-Al_2O_3-2SiO_2，0≤x≤1，BSAS）替代 YSZ，并以 Si 作为黏结层，构成 BSAS/Mullite/Si 三层结构的 EBCs 体系。BSAS 面层具有优异的高温稳定性，在服役环境中既能有效抵抗水氧腐蚀，又表现出突出的抗剥落能力[17]。

但是该体系依然存在 CTE 不匹配的问题，BSAS 面层、莫来石层与 Si 黏结层的 CTE 数据见表 1[18-20]。在热循环过程中，Si 黏结层氧化生成热生长氧化物（thermally grown oxide，TGO），主要成分为 SiO_2，TGO 的致密结构有效地抑制基体进一步氧化。但是在 1300 ℃以上的温度下，BSAS 会与 SiO_2 反应生成大量低熔点（约 1300 ℃）、高 O_2 渗透率的玻璃相使涂层结合能力下降，最终导致涂层失效。

表 1　不同 EBCs 材料的热膨胀系数[18-20]

Table 1　Thermal expansion coefficients of different EBCs materials[18-20]

Material	CTE/(10^{-6} ℃$^{-1}$)	Melting point/℃
SiC	4.5-5	2545
Mullite	5-6	1800
BASA（monoclinic）	4-5	1300
BSAS（hexagonal）	7-8	1300
Si	3.5-4.5	1400
YSZ	10.5	2715
$Yb_2Si_2O_7$	4-6	1850
Yb_2SiO_5	3.5-4.5，7-8，5.7-9.1	1950
RE_2SiO_5	6.94-8.84	

1.2.3　第三代稀土硅酸盐体系 EBCs

第三代 EBCs 体系主要为高熔点、低热导率且与碳化硅基体 CTE 适配的稀土硅酸盐材料。将第二代 EBCs 体系中的 BSAS 替换为稀土硅酸盐材料，构成了第三代稀土硅酸盐体系 EBCs，具体结构如图 2 所示。稀土硅酸盐种类繁多，根据熔点、热膨胀系数和耐腐蚀性能等多种因素通常选择双硅酸盐（$RE_2Si_2O_7$）与单硅酸盐（RE_2SiO_5）作为 EBCs 涂层材料。如表 1 所示，$Yb_2Si_2O_7$ 的 CTE 与基体和黏结层 Si 较为接近，因此使用 $Yb_2Si_2O_7$ 制备面层能有效地增强涂层的结合能力来抑制剥落。

1.2.4　第四代热/环境障涂层体系

EBCs 经过长期的研究与发展，有学者认为环境障涂层已经发展至第四代，即热/环境障涂层（thermal/environmental barrier coatings，T/EBCs）[21-22]。随着发动机的不断发展，热端器件所要承受的温度也在不断上升，发动机的进气温度与比核心功率有较强的关联[23]，为了有效地提升涂层的耐高温性能，学界提出了在 EBCs 表面增加 TBCs 制备复合涂层的概念，但是主要的材料体系并未发生改变。T/EBCs 体系同时具有环境障涂层与热障涂层的功能。

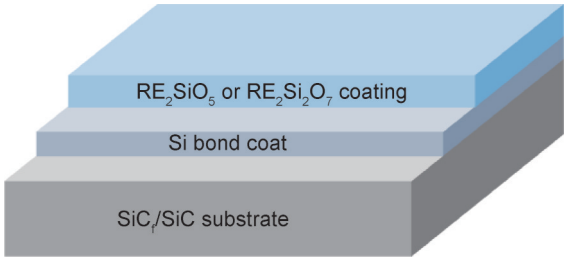


图 2　稀土硅酸盐 EBCs 结构示意图

Fig.2　Schematic diagram of structure of rare earth silicate EBCs

研究发现，包覆 $LaMgAl_{11}O_{19}$/$Yb_2Si_2O_7$（LMA/YbDS）T/EBCs 的 SiC_f/SiC 复合材料，在 1350 ℃下经 300 h 时效后仍然具有高强度保持率[24]。

1.2.5　环境障涂层未来发展趋势

经过长期的研究与发展，国内外学者对 EBCs 材料进行了广泛而深入的探索。尽管 EBCs 已发展至第四代，但目前还没有材料能完全取代硅酸盐体系。因此，当前 EBCs 材料仍以稀土硅酸盐体系为主。对稀土硅酸盐进行掺杂是改善 EBCs 性能的重要方法。Zang 等[25]将 Al_2O_3 掺杂至 $Yb_2Si_2O_7$ 中，成功实现了材料内部组分的调控，有效降低了孔隙率并提高了涂层的致密度。研究表明，Al_2O_3 的引入不仅显著大幅提高了涂层的硬度、断裂韧性等关键力学性能，还可促进涂层致密化并形成表面保护性磷灰石层，从而有效抑制 CMAS 的渗透，使涂层表现出优异的抗 CMAS 腐蚀性能。Lee 等[26]通过化学改性第二代环境障涂层在 $Yb_2Si_2O_7$ 面层中引入多种改性氧化物，显著提升抗氧化性能。EBCs 体系的发展历程见表 2[27-33]。

通过创新材料改性方法、深入机制解析及多变量协同分析，提升稀土硅酸盐 EBCs 在高温环境中的性能，是下一代环境障涂层开发的重要方向。

2　环境障涂层的主要制备工艺

随着 EBCs 材料体系与结构设计的不断优化，其制备工艺也取得了显著进展。目前，主流的 EBCs 涂层制备技术包括大气等离子喷涂（atmospheric plasma spraying，APS）、电子束物理气相沉积（electron beam-physical vapor deposition，EB-PVD）、等离子物理气相沉积（plasma spray-physical vapor deposition，PS-PVD）、化学气相渗透（chemical vapor infiltration，CVI）、浆料刷涂工艺、化学气相沉积（chemical vapor deposition，CVD）、先驱体转化法（precursor infiltration and pyrolysis，PIP）、反应熔渗透法（reactive melt infil-

表 2 EBC 体系的发展历程[27-33]

Table 2 Development process of EBCs[27-33]

Generation	Top coating	Intermediate layer	Bond coat	Surface temperature/℃	Bond coat temperature/℃	Method
Gen 1	YSZ		Mullite	≈1200	1300	Plasma spray
Gen 2	BSAS	Mullite or mullite + BSAS	Si	1300	1316	Plasma spray
Gen 3	$RE_2Si_2O_7$ or RE_2SiO_5		Si	≈1320	1316	Plasma spray, EB-PVD, *etc*
Gen 4	TBCs	EBCs	Rare earth silicate or nanocomposite ceramics	≈1650		Plasma spray, EB-PVD, *etc*

tration, RMI)、磁控溅射、包埋工艺、溶胶-凝胶法等。下文将选择当前环境障涂层制备领域应用最广泛、最具代表性的三种工艺 APS、EB-PVD 和 PS-PVD 进行介绍，主要特点见表 3。

表 3 涂层工艺特点对比

Table 3 Comparison of coating process characteristics

Process	Advantage	Shortcoming	Scope of application
APS	Smooth surface, high density; strong bonding to the matrix, high deposition efficiency; wide range of applications, easy operation	Cause substrate oxidation and deformation; high cost	Environmental barrier coatings, thermal barrier coatings, electrodes, metal coatings, ceramic coatings, *etc*
EB-PVD	High purity, strong bonding to the matrix, good uniformity; low damage to the substrate; high temperature stability	High requirements for equipment and workpiece shape; low preparation efficiency	Depositing metals, metal oxides, TiC, SiC, nitride, C, *etc*
PS-PVD	High spraying efficiency, high bonding strength; excellent thermal shock resistance	Poor process stability; high energy consumption of equipment; hard maintenance	Thermal barrier coatings, environmental barrier coatings, electrolytes, and high-temperature oxidation-resistant coatings

2.1 大气等离子喷涂

APS 技术是在大气氛围下以等离子体作为热源加热熔化喷涂粉末制造涂层的表面改性技术。

2.1.1 基本工作原理

APS 技术通过在阴极和阳极之间产生高强度电弧，将工作气体（通常为 N_2、Ar 混合少量 H_2 和 He）电离形成等离子射流。粉末颗粒在高达 10000 K 以上的等离子焰流中被迅速加热至熔融或半熔融状态，并在高速等离子气流的作用下加速喷射到基材表面，最终形成致密的涂层结构[34]，粉末与基体通过塑性变形实现粘接，沉积粉末与基体接触区域产生化学结合和物理结合形成致密的层状堆叠涂层[35]。喷涂原理见图 3[36]。

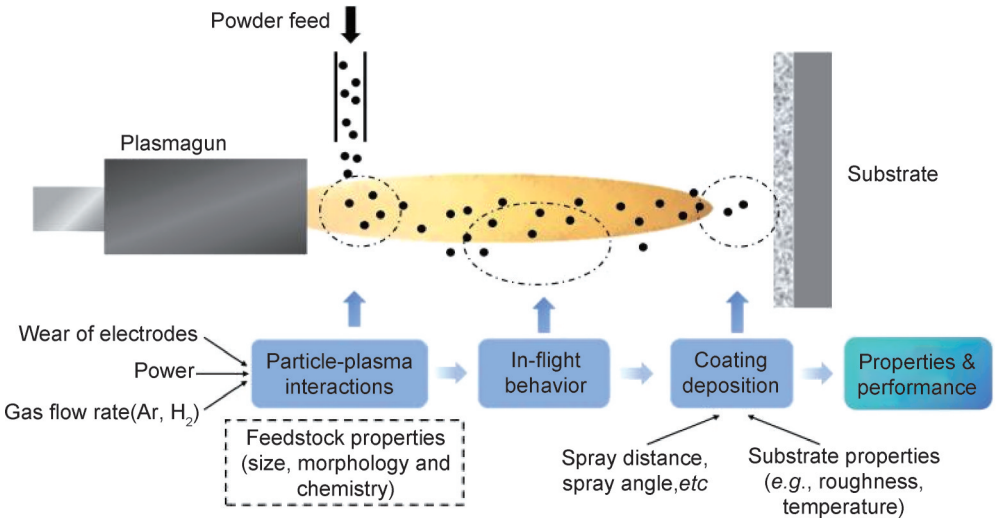


图 3 等离子喷涂过程原理图[36]

Fig.3 Schematic diagram of plasma spraying process[36]

等离子喷涂过程包含粒子与热源的相互作用以及熔滴与基体的相互作用两个关键环节。在热源作用阶段，喷涂材料在高温等离子焰流中经历加热、熔化和加速过程，粒子的温度、速度及熔化状态直接影响其后续沉积行为；在沉积成形阶段，高速运动的熔融粒子撞击基体表面后发生碰撞、铺展、扁平化和快速凝固，这一过程决定了粒子的变形程度、界面结合方式以及涂层的微观结构特征。两个阶段的协同作用最终决定了涂层的孔隙率、结合强度和综合性能。Xue 等[37]在离子喷涂制备 EBCs 的研究中发现，高温熔融粒子的高速沉积可使涂层间结合力显著增强、致密度显著提升，进而有效改善了 EBCs 的抗腐蚀性能。研究结果表明，等离子环境障涂层面层与中间层结合性较强，面层内部孔隙少，涂层致密性较好。

2.1.2　影响 APS 喷涂质量的因素

APS 工艺喷涂涂层的结构主要与熔融粉末的沉积温度和凝固速率有关，喷涂过程中熔融的陶瓷颗粒接触喷涂面时的速度和温度会影响涂层的组织结构，进而影响涂层性能。APS 具有高度可控性，通过精准调控喷涂速度和喷涂距离等关键参数，实现对涂层厚度与质量的优化调控[38-39]。以下分别阐述了喷涂功率、喷涂距离、送粉速率等关键参数的影响。

(1)喷涂功率。喷涂功率是等离子喷涂工艺中决定等离子体温度、射流速度及粉末熔化状态的关键参数，其大小直接影响涂层的致密性和界面结合强度。Liu 等[40]研究发现，40 kW 的喷涂功率能够使 $ZrSi_2$ 粉末达到最佳熔融状态，在撞击基体时形成有效的机械互锁结构，从而显著提升涂层与基体的结合强度。该功率条件下既能保证材料充分熔化，又不致引起过度气化或基体热损伤，体现了喷涂功率参数精确调控对优化涂层性能的重要性。Du 等[41]在研究等离子喷涂 TiO_2 涂层时发现，随着喷涂功率的增加，涂层的孔隙率显著降低。更高喷涂功率使得 TiO_2 粉末充分熔化并获得较高的速度，使粉末更均匀地沉积并相互结合，减少孔隙形成。Marcinauskas 等[42]研究发现，喷涂功率增大时，涂层的显微硬度也同步提升，归因于结晶相比例提高及飞溅颗粒间结合更致密，该研究表明，适当提高喷涂功率可优化涂层微观结构，从而显著提升力学性能。

多项研究表明，适中的喷涂功率可实现氧化物组合的均匀分布，不仅能有效缓解涂层内部热应力，还可通过优化微观结构显著提升材料的力学性能与使用寿命。

(2)喷涂距离。等离子火焰中颗粒速度和温度随着喷涂距离的增加先增大后减小，在一定位置达到最大值。Arhami 等[43]研究发现，当喷涂功率一致时，若喷涂距离过长，传递至涂层的热量减少，同时孔隙率升高，沉积效率降低。郑艺欣等[44]通过实验分析样品的气孔率与显微结构的变化规律，采用迭代模型得到气孔比例与热导率的关系，见式(1)，该关系式进一步证明，随着喷涂距离的增加，气孔率增加并导致热导率降低，式(2)～(4)分别为函数 Θ、Φ、Ψ 的表达式。

$$k=\Theta(\Phi(\Psi(k_m,\varphi_{gp})\varphi_{hc})\varphi_{vc}) \tag{1}$$

$$k=k_m\frac{2k_m+k_p-2(k_m-k_p)\varphi}{2k_m+k_p+2(k_m-k_p)\varphi} \tag{2}$$

$$\frac{1}{k}=\frac{\varphi}{k_p}+\frac{(1-\varphi)}{k_m} \tag{3}$$

$$k=\varphi k_p+(1-\varphi)\,k_m \tag{4}$$

式中：k 为热导率值；k_m 为固相基体的热导率；k_p 为气体热导率；φ_{gp}、φ_{hc}、φ_{vc} 分别表示近球形气孔(gp)、水平裂纹(hc)和垂直裂纹(vc)3 类气孔率；φ 表示整体气孔率值。

(3)送粉速率。送粉速率直接影响粉末在等离子焰流中的加热状态和沉积行为。李荣斌等[45]研究发现降低等离子喷涂 YSZ 粉末的送速粉率时，多数粉末可充分熔融，且适当缩短喷涂距离能促进熔融粉末快速铺展并沉积在基体上，从而提升涂层制备效率。Zhang 等[46]利用 XRD 对超声速等离子喷涂 Ni 基合金涂层的残余应力进行了分析。结果表明，低送粉速率下涂层致密且弹性模量较高，残余应力较低；随送粉速率增大，残余应力先降至极最小值后逐渐回升。残余应力与弹性模量呈正相关，弹性模量越高，涂层残余应力越大。

2.2　电子束物理气相沉积

2.2.1　基本工作原理

EB-PVD 是一种先进的真空镀膜技术，利用高能电子束在真空环境下轰击并蒸发靶材材料，使其气化后沉积在基体表面形成高性能涂层。目前，EB-PVD 技术已广泛应用于航空发动机热障涂层、环境障涂层、半导体功能薄膜、太阳能电池以及光学镀膜等领域，成为高端涂层制备的重要手段之一。高分辨率下可以看出靶材以颗粒的形式沉积在基体表面，真空环境下沉积的涂层，纯度高且结合能力强，涂层结构见图 4[47]。

EB-PVD 技术具有以下显著优势[48-50]：(1)该技术采用高能电子束作为热源，能够使材料快速气化，高功率电子枪可处理包括高熔点材料在内的多种物质。(2)通过精确调控电子束参数(如电流强度、聚焦尺寸和扫描路径)，能够精确调控涂层的沉积厚度和均匀性，使涂层结构符合设计预期。(3)电子束温度高，能

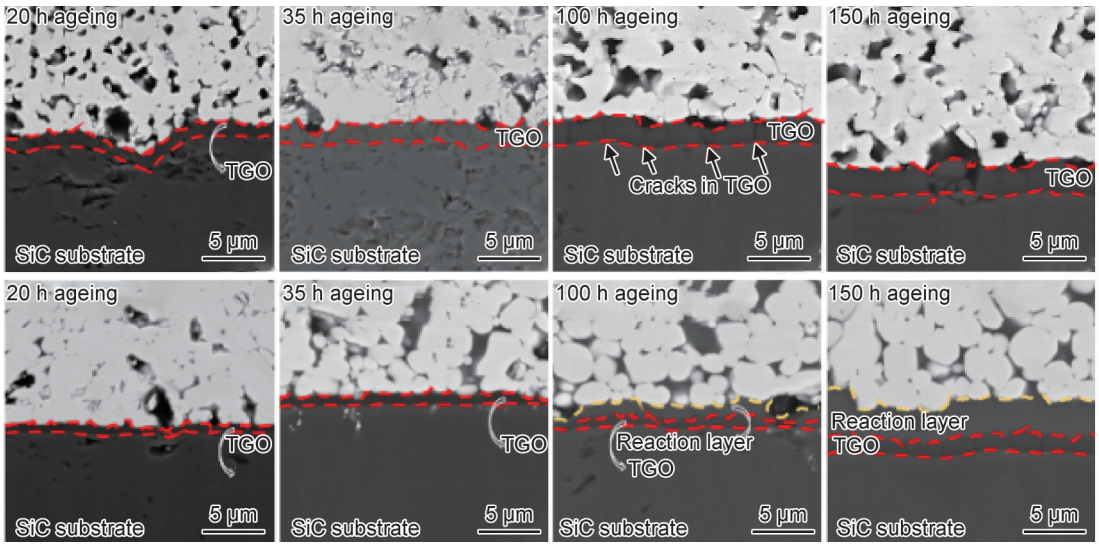


图4 不含Al_2O_3涂层结构(a)及添加质量分数1.5%的Al_2O_3涂层结构图(b)[47]

Fig.4 Without Al_2O_3 coating structure(a) and with 1.5%(mass fraction) Al_2O_3 added coating structure(b)[47]

快速加热工件使其迅速到达最优沉积温度,显著提高工艺效率。(4)整个沉积过程在真空环境中进行,有效避免了外界污染和氧化问题,确保了涂层的纯度和性能。(5)在原子尺度上精确控制涂层生长,从而在涂层与基体之间形成强化学键结合与机械互锁作用,显著提高界面结合强度。(6)通过配置多套电子束发生器和蒸发源,该技术能够灵活制备具有多层或梯度结构的复合涂层。相比传统气相沉积方法,EB-PVD在沉积速率和涂层结合强度方面表现出明显优势。

2.2.2 影响EB-PVD制备涂层质量的关键因素

在EB-PVD过程中,电子束流强度、工件旋转速度及沉积角度等关键工艺参数会显著影响涂层的微观结构和性能。

(1)电子束流强度。牟仁德等[51]研究表明,EB-PVD制备YSZ涂层时,随电子束流增大时,柱状晶尺寸粗化,尖端形貌由三角状变为金字塔状和山脊状。低束流涂层因烧结致密化内应力失效,高束流涂层受TGO生长应力影响,调控束流平衡二者能显著提升性能。Yokoi等[52]采用双电子束物理气相沉积技术,成功实现了$Yb_2Si_2O_7$涂层的原位合成与致密化。高温沉积过程有效促进表面扩散,形成了具有(110)晶面择优取向的致密柱状晶结构,避免了传统等离子喷涂的组分偏析问题和常规EB-PVD典型的羽毛状疏松结构。

(2)工件旋转速度。Matsumoto等[53]系统研究了EB-PVD工艺中基体旋转速度对YSZ热障涂层性能的影响,发现旋转速度通过调控柱状晶结构显著改变了涂层性能,静态沉积获得致密涂层,但热循环寿命较短;低速旋转形成周期性“C形”柱状晶结构,导致局部孔隙积累;而高速旋转制备的涂层具有垂直生长的均匀柱状晶和分布规则的间隙,弹性模量显著降低至30 GPa,热循环寿命较静态沉积提升3倍以上。Wada等[54]研究不同基底旋转速度下EB-PVD制备的ZrO_2-Y_2O_3涂层的晶体取向和形貌,揭示了旋转速度对织构演化的关键影响。静止沉积形成致密的(111)取向结构,而旋转沉积则促进(100)取向的柱状生长,且高速旋转下晶粒更细、取向更优。

(3)沉积角度。张彬等[55]尝试以不同入射角度制备YSZ热障涂层,结果表明,随着入射角度增大,涂层柱状晶倾斜角度和孔隙率逐渐增加,涂层厚度降低,结合强度显著下降。热冲击随角度的增大而减弱。研究证实,低入射角度能形成致密结构,综合性能最优,而高角度虽增加孔隙率但严重劣化力学性能和耐久性。孟彬等[56]研究发现,EB-PVD制备YSZ涂层时,蒸气入射角显著影响晶体取向:30°时(111)面为择优取向,45°时为(311)/(420)面,60°时为(220)/(331)面。这是由于柱状晶沿入射方向生长导致衍射晶面差异所致,晶体生长原理见图5[57],图中晶体取向与最快生长方向的倾斜角、最快生长矢量和两晶体之间的距离分别用u、v和L表示。

2.3 等离子物理气相沉积

2.3.1 基本工作原理

PS-PVD技术综合了APS与EB-PVD的技术优势,涂层结构也结合了两者的优点,见图6[58]。其工作原理为,用高能等离子束将粉末原料熔融并气化,形成气相物质。这些气相物质经喷枪加速后形成高速等离子射流,在低真空腔室压力条件下进行定向输运,最终在基体表面沉积形成涂层[59-61]。

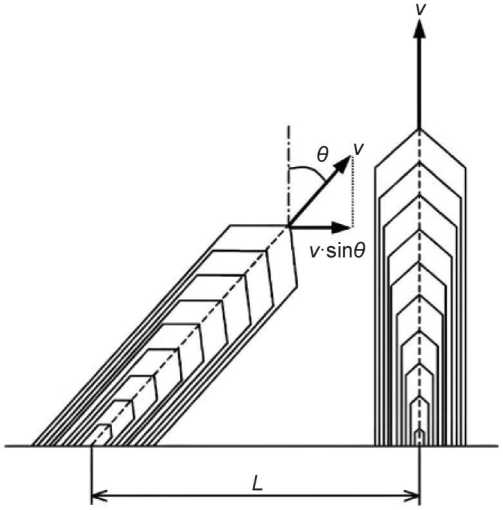


图 5　EB-PVD 制备涂层内织构的形成原理示意图[57]

Fig.5　Schematic diagram of formation principle of internal texture in EB-PVD coating[57]

PS-PVD 的核心工作原理包括：(1)气相材料在等离子射流中通过频繁碰撞绕过障碍物，覆盖复杂几何形状的阴影区域；(2)气相在最后一次碰撞后以随机方向直线沉积，形成多级羽毛状柱状结构，这一过程受阴影效应主导[62]。工艺中，射流中心以纯气相沉积为主，形成高孔隙率柱状结构，而边缘区因未完全蒸发的颗粒混合形成致密涂层。

张小锋团队[63]研究发现，同样经过 200 多小时的水氧腐蚀测试，APS 制备的 EBCs 发生显著的翘曲变形并完全失效，而 PS-PVD 制备的 EBCs 没有明显的破坏，该结果表明，PS-PVD 工艺显著提升了 EBCs 的抗水氧腐蚀性能。说明 PS-PVD 制备的 EBCs 更为致密，保护作用更强。

PS-PVD 的优点在于非视线沉积能力、高沉积速率和优异的热障性能，广泛应用于航空发动机热障与环境障涂层等领域。其技术关键在于平衡蒸发效率与沉积均匀性，通过调控压力、功率和基体温度实现高性能涂层制备。

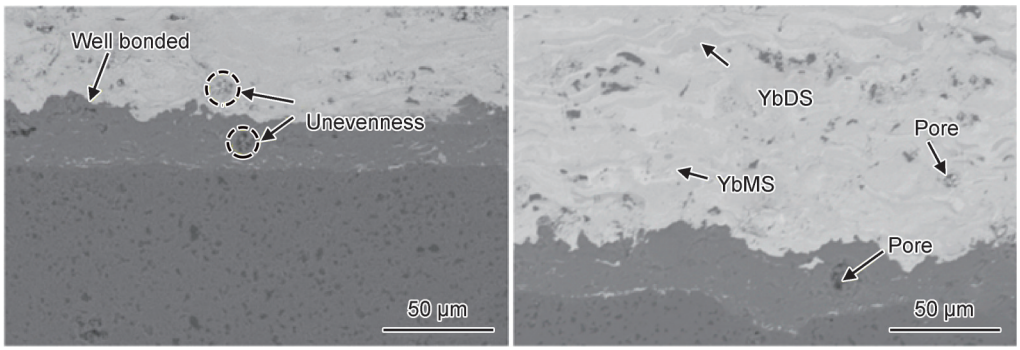


图 6　PS-PVD 制备 YbDS/Si EBCs 退火后的微观形貌和元素分布[58]

Fig.6　Microscopic morphology and elemental distribution of YbDS/Si EBCs prepared by PS-PVD after annealing[58]

2.3.2　影响 PS-PVD 涂层质量的关键因素

Deng 等[64]对 7YSZ 涂层在等离子体射流径向方向上的微观组织与沉积特性进行了系统研究。结果表明，涂层的形貌和结构呈现明显的径向分区特征，可划分为 3 个典型区域：Ⅰ区涂层呈现典型的柱状晶结构，表面由花椰菜状形貌组成，其表面粗糙度与沉积效率保持相对恒定；Ⅲ区涂层则由未完全熔化的固态颗粒、液滴和气相物质共同组成，完全不具备柱状晶特征；介于两者之间的Ⅱ区，其柱状晶结构顶部呈现圆顶状特征且晶粒尺寸显著细化。研究还发现，气相物质主要富集于等离子体射流中心区域，随着径向距离的增大，部分熔融颗粒的比例逐渐升高。值得注意的是，在湍流层的作用下，少量气化的喷涂粉末会在等离子体射流下游区域重新凝结形成细小颗粒，Ar/He 等离子体射流中粉末颗粒的分布及 3 个区域结构见图 7，图中 CZ、TZ 和 SZ 分别为中心区、过渡区和边缘区。

Mauer 等[65]将理论计算与实验相结合的方法，系统分析了等离子体与原料颗粒的相互作用机制。研究结果表明，原料在等离子源附近的初始轨迹段的处理过程对涂层的形成具有决定性作用，而在开放膨胀射流中，等离子体与颗粒的相互作用效应可忽略不计。通过精确调控等离子体气体成分和输入功率参数，能够实现对原料熔化、团簇化和蒸发过程的有效控制，从而获得具有多样化微观结构的涂层。特别值得注意的是，采用 PS-PVD 技术制备涂层时，通过气相沉积形成的柱状结构展现出优异的性能特征，包括显著提高的应变容限和卓越的抗热机械疲劳性能。

PS-PVD 制备涂层质量的关键因素包括工艺参数，比如功率、气体流量、操作压力和喷涂距离、基材特性、粉末特性、沉积机制以及设备配置[66-69]。其中，高功率和低压环境促进气相沉积，形成柱状或致密结

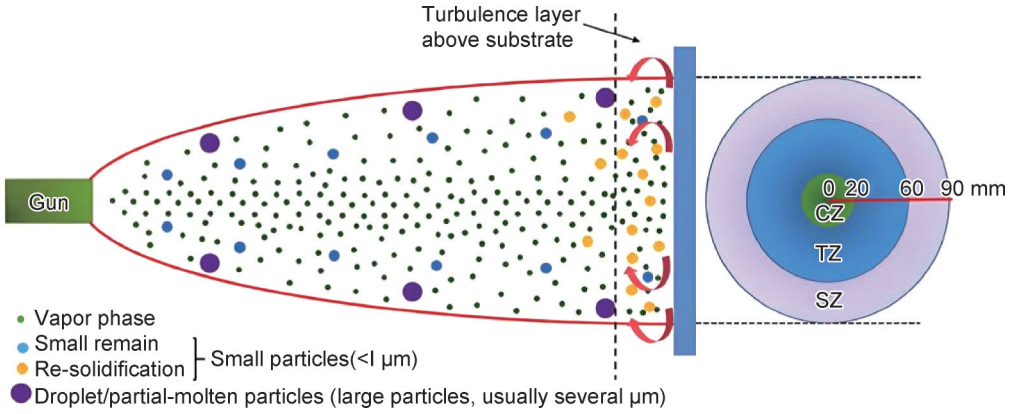


图 7 Ar/He 等离子体射流中粉末颗粒的分布及 3 区结构[64]

Fig.7 Distribution of powder particles in Ar/He plasma jet and structures in three zones[64]

构;基材的表面能和热导率影响涂层的成核与生长,高温基材倾向于形成柱状结构,而低温易形成致密或混合结构;粉末的粒径和化学稳定性决定涂层的均匀性和性能;异质成核和过冷度则进一步调控涂层的晶粒尺寸和微观形貌。通过优化这些因素,可实现涂层结构的精确控制,满足 EBCs 等高性能应用的需求。

2.4 其他制备方法

除了 APS 与 EB-PVD 两种制备 EBCs 的工艺以外,EBCs 的制备还可采用浆料浸渍法和溶胶-凝胶法等低温预制-热处理两步成膜法工艺。这些传统方法具有设备简单、成本低廉和适用性广等显著优势,尤其适合复杂形状基体的涂层制备。然而,它们也存在工艺周期长、人工操作依赖性高以及涂层厚度均匀性不足等固有缺陷。相比之下,化学气相沉积技术能够制备出具有优异均匀性和高致密性的涂层,但其工业化应用仍面临反应条件控制复杂、沉积速率低等技术瓶颈。同时研究人员提出并开发了多种高效能等离子体喷涂工艺,包括超低压等离子体喷涂、悬浮溶液等离子体喷涂、真空等离子喷涂和反应等离子喷涂等[70]。

3 环境障涂层的主要失效机制

为了有效提升 EBCs 的服役寿命,必须深入揭示其失效机理。基于这一目标,国内外学者已开展了大量系统性研究。发动机服役环境高温且成分复杂,环境障涂层损伤机理研究主要考虑其复杂工况下的结构与性能的变化过程,重点是涂层的抗高温氧化性、抗 CMAS 腐蚀性能、热冲击载荷下的涂层稳定性及耐水蒸气侵蚀性能等方面。EBCs 体系主要基于硅酸盐材料构建,其中稀土硅酸盐材料因其优异的高温性能成为研究重点。焦硅酸镜($Yb_2Si_2O_7$)是目前 EBCs 研究领域的代表材料,具有稳定的结构、良好的抗水氧腐蚀性能和较低的热膨胀系数。本文将重点针对焦硅酸镱 EBCs 的典型失效模式进行系统分析,以揭示 EBCs 的失效机制与性能退化规律。

3.1 水氧腐蚀

EBCs 作为复合材料的防护屏障,能够有效降低发动机高温运行环境对构件的水氧腐蚀作用,从而显著提升其在燃气环境中的耐久性。在高温水氧环境中,SiC 会与氧气反应生成致密的 SiO_2 保护层,但水蒸气的存在会进一步加速氧化过程。具体而言,SiO_2 与水蒸气反应生成挥发性产物如 $Si(OH)_4$ 等,导致 SiC_f/SiC 复合材料的力学性能迅速退化[71]。此外,高温水氧环境还可能诱发 EBCs 内部裂纹的萌生与扩展,最终导致涂层失效。因此,EBCs 的抗水氧腐蚀性能是评估其防护能力的关键指标,对保障基体材料的长期稳定性至关重要。

EBCs 体系在高温水氧环境中的防护性能是发动机涡轮叶片等关键部件设计与选材的核心考量因素,因此深入研究 EBCs 在高温水氧耦合作用下的损伤行为及腐蚀机理具有重要意义。

据目前已有的研究[72-76],普遍认为高温水氧环境中,稀土双硅酸盐与水蒸气发生反应并生成气相 $Si(OH)_4$,见式(5)。

$$RE_2Si_2O_7+2H_2O\rightarrow RESiO_5+Si(OH)_4(g) \quad (5)$$

在高温水氧腐蚀环境下,气相 $Si(OH)_4$ 的生成是硅酸盐涂层失效的关键机制之一。$Si(OH)_4$ 的挥发会导致涂层内部形成大量气孔,同时伴随体积收缩,进而引发局部应力集中。

Chen 等[77]开发了一种由 SiC 内层、Si 黏结层和 $Yb_2Si_2O_7$-Yb_2SiO_5 混合顶层组成的三层 EBCs 体系,并对其在 1500 ℃下进行水氧腐蚀实验。研究发现,腐蚀

过程中 $Yb_2Si_2O_7$会与水蒸气反应生成 Yb_2SiO_5和气态 $Si(OH)_4$，导致涂层表面形成多孔结构，且随着 $Yb_2Si_2O_7$含量增加，多孔层厚度逐渐增大，涂层质量损失加剧。这是由于 $Yb_2Si_2O_7$含量越高，其与水蒸气的反应越剧烈，产生的气态产物越多，不仅加速了涂层的腐蚀进程，还因体积效应导致涂层内部应力增大，最终引发涂层开裂和剥落失效。Yu 等[78]通过 APS 技术在 SiC 基体上制备了 Yb_2SiO_5-$Yb_2Si_2O_7$梯度 EBCs，并研究了其在高温水氧环境中的水氧腐蚀行为与机制。研究发现，腐蚀过程中，Yb_2SiO_5的稳定性显著延缓腐蚀进程；同时，Yb_2O_7杂质会优先与 H_2O 反应生成挥发性 $Yb(OH)_3$，进一步影响涂层结构。单层涂层中，高 Yb_2SiO_5含量的涂层腐蚀速率最低，但 CTE 失配导致高热应力引发涂层开裂；而高 $Yb_2Si_2O_7$含量的涂层虽腐蚀速率较高，却因 CTE 匹配表现出优异的抗热震性。丁坤英等[79]研究发现 $Yb_2Si_2O_7$环境障涂层在高温水氧腐蚀环境下的失效形式主要表现为 2 个阶段的耦合作用：第一阶段，涂层近表面在高温水汽环境中 Si 元素挥发，导致 $Yb_2Si_2O_7$分解为 Yb_2SiO_5，并伴随体积收缩和孔隙率增加，这一过程使涂层内部应力状态从残余压应力转变为拉应力，进而引发垂直裂纹扩展，为腐蚀介质向内部渗透提供路径；第二阶段，随着腐蚀深入，黏结层暴露于腐蚀环境，界面处因热失配应力和化学腐蚀的共同作用发生退化，导致面层出现大范围脱粘和横向裂纹。研究表明，腐蚀初期体积收缩是裂纹扩展的主要驱动力，而中后期腐蚀层与残余层之间的热失配应力成为主导因素，最终导致涂层分层失效。此外，腐蚀生成的孔隙会进一步加剧应力集中，促使裂纹在冷却阶段加速扩展，从而加速涂层的整体失效。

图 8[80]为 EBCs 在 1400 ℃下的水蒸气腐蚀机理示意图，如图所示，高温水氧环境下的热循环过程中，涂层内部萌生的微裂纹在应力作用下逐渐扩展，不仅破坏涂层的结构完整性，还为腐蚀介质（如 H_2O 和 O_2）提供了快速扩散通道。SiC 与氧气生成 SiO_2保护层，但水蒸气会使 SiO_2反应生成挥发性 $Si(OH)_4$，导致涂层多孔、体积收缩、应力集中，进而诱发裂纹萌生与扩展，最终涂层失效。稀土双硅酸盐也会与水蒸气反应生成气相 $Si(OH)_4$，加剧涂层腐蚀失效。

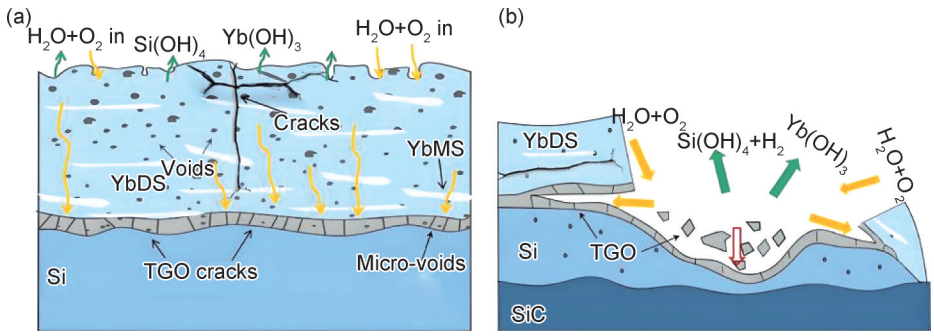


图 8　EBCs 在 1400 ℃下的水蒸气腐蚀机理示意图[80]

（a）涂层中间区域；（b）涂层边缘区域

Fig.8　Schematic diagram of water vapor corrosion mechanism of EBCs at 1400 ℃[80]

(a)middle region of coating; (b)edge region of coating

3.2　CMAS 腐蚀

在航空发动机运行过程中，火山灰、沙尘等环境颗粒物可能被吸入发动机内部，并在高温环境下形成 CMAS。这些熔融态 CMAS 会黏附在涡轮叶片等高温部件表面，渗透进涂层的孔隙和微裂纹中，导致涂层发生烧结、相变或剥落，最终造成涂层失效。随着全球气候变化加剧，干旱和荒漠化问题日益严重，发动机面临的 CMAS 侵蚀风险将进一步增大，成为影响航空发动机可靠性和耐久性的重要因素。

Hu 等[81]研究了等离子喷涂制备的 $Yb_2Si_2O_7$/Si EBSc 在 CMAS 与 $NaVO_3$混合熔体（CN）共同作用下的高温腐蚀行为与失效机制，如图 9 所示，在 1200 ℃时，CMAS 熔体完全熔化并润湿涂层表面，与 $Yb_2Si_2O_7$反应生成石榴石相（含 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Si^{4+}）和少量磷灰石相，CN 熔体通过孔隙渗入涂层下方；当温度升至 1300 ℃时，石榴石相因高温失稳分解，$Yb_2Si_2O_7$持续溶解使 Yb^{3+}浓度达到临界值，促使磷灰石层增厚，但其动态溶解-再生平衡导致层内形成孔隙，低黏度 CN 熔体通过孔隙快速渗透并逐步贯穿整个涂层；随着腐蚀时间延长，磷灰石层逐渐溶解，熔体完全穿透至 Si 黏结层界面，由于热膨胀系数差异，渗入熔体在冷却凝固后引发热应力积累，受 Si 层约束的中间层通过屈曲释放应力，最终导致涂层宏观孔洞形成、层间剥离及功能失效。

Liang 等[82]设置不同的 Ca/Si 比例研究高温 CMAS 熔体对 Yb_2SiO_5涂层的腐蚀作用情况。研究结

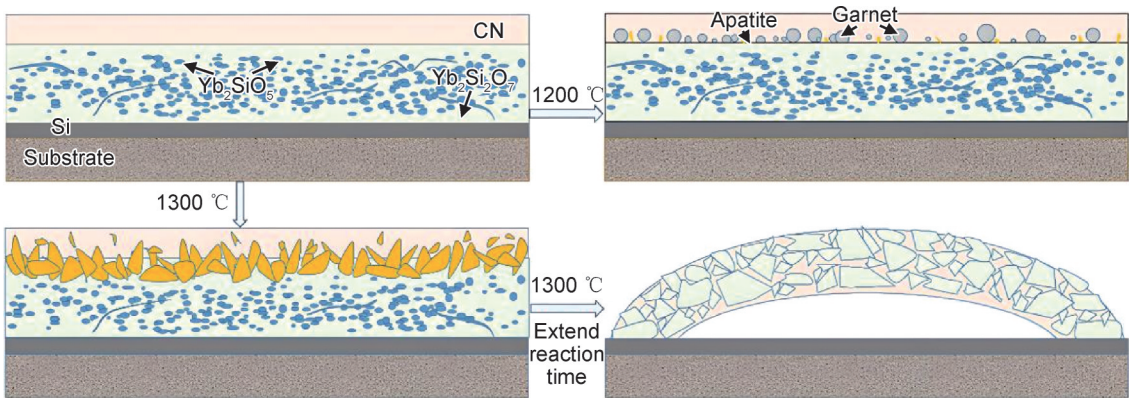


图 9 APS 制备 $Yb_2Si_2O_7$/Si 涂层在 1200 ℃和 1300 ℃下暴露于 CMAS+$NaVO_3$(CN)的腐蚀机制示意图[81]

Fig.9 Schematic diagram of corrosion mechanisms of APS preparation of $Yb_2Si_2O_7$/Si coatings exposed to CMAS+$NaVO_3$(CN)at 1200 ℃ and 1300 ℃[81]

果表明,高 Ca/Si 比例熔体因黏度低而渗透性强,与涂层反应生成多孔硅钙钇石、石榴石固溶体及缺陷型磷灰石,导致 25 h 后腐蚀层厚度达 250 μm 且保护性显著下降;中等比例熔体生成致密磷灰石形成 8~14 μm 连续屏障层,有效抑制渗透;低 Ca/Si 比例熔体因高黏度仅生成 4~6 μm 致密 $Yb_2Si_2O_7$ 层且表面残留未反应熔体;当腐蚀时间延长至 50 h,高 Ca/Si 比例体系出现稳定态磷灰石向缺陷态转变的相结构劣化现象,而低 Ca/Si 比例体系因反应动力学缓慢仅表现为厚度小幅增加。

Harder 等[83]对 $Yb_2Si_2O_7$ 体系 EBCs 在 CMAS 与高温含氧水蒸气共同作用下的腐蚀行为进行了深入研究。实验结果表明,暴露于 CMAS 的 EBCs 中形成了钙镱磷灰石,且不同组分配比的 CMAS 对磷灰石的生成量具有显著差异。在微观结构层面,CMAS 不仅调控了晶粒的生长行为,导致晶粒尺寸和形态发生变化,还显著影响 TGO 的生成速率。具体而言,在蒸汽暴露 100 h 后,TGO 的厚度显著减小,同时残余玻璃中 SiO_2 的含量因反应而增加,而 CaO 的含量则相应下降。研究还发现,CMAS 的渗透作用削弱了涂层界面结合强度,即便是低负载的 CMAS 也能迅速渗透至黏结层。最终结论表明,CMAS 暴露通过化学和机械作用的综合效应,复杂地影响了 EBCs 的蒸汽氧化性能,即便低负载的 CMAS 也能显著改变 EBCs 的结构特性。

在高温下,CMAS 熔体熔化并润湿涂层表面,与涂层反应生成石榴石相、磷灰石相等产物。随着温度升高和腐蚀时间延长,石榴石相分解,涂层溶解使离子浓度变化,促使磷灰石层增厚或发生相结构劣化,但其动态平衡导致层内形成孔隙,低黏度熔体通过孔隙快速渗透,贯穿涂层。熔体冷却凝固后引发热应力积累,导致涂层宏观孔洞形成、层间剥离及功能失效。同时,CMAS 调控晶粒生长行为,影响 TGO 生成速率,削弱涂层界面结合强度。

3.3 其他腐蚀机制

除了高温含氧水蒸气与熔融 CMAS 的腐蚀作用,涂层的失效也可能来自内部 TGO 的生成与涂层内部的应力变化,此类失效形式只与高温环境和氧化物质相关,无水蒸气与 CMAS 的参与。

Liu 等[84]系统研究了 Si-HfO_2/$Yb_2Si_2O_7$/Yb_2SiO_5 高熵铪酸盐多层 T/EBCs 在高温热循环条件下的氧化动力学与裂纹演变机制。研究发现,TGO 层中的定向裂纹起源于 SiO_2 基体微裂纹,随着热循环次数增加,TGO 层与邻近界面的层间裂纹显著发展,尤其在陶瓷基复合材料(CMC)/TGO 和 TGO/$Yb_2Si_2O_7$ 界面处形成应力集中区,界面裂纹的扩展将诱发涂层分层剥落,微观机制见图 10[85]。

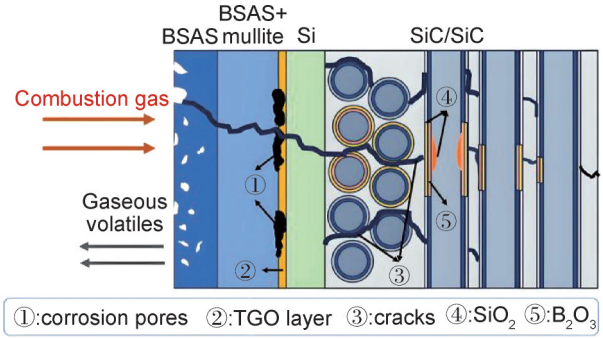


图 10 SiC/SiC-EBC 在高温下的微观结构演变机制[85]

Fig.10 Microstructure evolution mechanism of SiC/SiC EBC at high temperature[85]

涂层内部的应力演变主要源于其内部相结构转变及反应产物的体积变化,如新相析出引发的晶格畸变和热膨胀系数失配,此类体积效应在层间界面区域形成显著的应力梯度分布,促使界面处萌生微裂纹并沿弱结合路径扩展,最终诱发涂层分层失效。

4　结束语

EBCs作为保障高温部件在恶劣环境下长期稳定运行的关键材料体系，历经多年发展已取得显著进展。目前，第三代稀土硅酸盐凭借高熔点、低热导率以及良好的CTE匹配性成为研究热点，然而其面临的熔融CMAS侵蚀问题，成为制约其进一步广泛应用的关键瓶颈。第四代热/环境障涂层采用TBCs与EBCs的多层设计，有效提升了涂层在超高温环境下的综合性能，为应对更严苛的服役条件提供了新的解决方案。

在制备工艺领域，APS技术以其高沉积效率与良好的工艺可控性在工业生产中得到广泛应用，但涂层质量受喷涂功率、距离和送粉速率等参数的显著影响，这要求在实际应用中需精准调控工艺参数以获得理想的涂层性能。EB-PVD技术能够在真空环境中制备出高纯度、高结合强度的涂层，且其微观结构可通过调控电子束流强度、基体旋转速度和沉积角度等参数实现精细控制，为制备高性能涂层提供了有力手段。此外，浆料浸渍、溶胶-凝胶法等传统工艺因成本低、适用性广，仍在特定应用场景中发挥着不可或缺的作用，满足了不同领域对涂层制备的多样化需求。

深入探究EBCs的失效机制发现，水氧腐蚀、CMAS侵蚀以及热应力引发的裂纹扩展是导致涂层失效的主要原因。水氧环境下，稀土硅酸盐与水蒸气反应生成挥发性$Si(OH)_4$，引发涂层多孔化与应力集中，严重削弱涂层的防护性能；CMAS熔体则通过渗透和化学反应破坏涂层结构，加速涂层失效进程。针对这些失效机制，梯度涂层设计与成分优化（如调整$Yb_2Si_2O_7/Yb_2SiO_5$比例）被证实可有效提升涂层的耐腐蚀性，为改善涂层性能提供了新的思路。同时，界面应力管理（如引入缓冲层）与裂纹扩展抑制（如低弹性模量设计）作为延长涂层寿命的关键策略，对于提高涂层的可靠性和耐久性具有重要意义。

综上所述，尽管EBCs在材料体系、制备工艺以及失效机制研究等方面已取得诸多成果，但面对日益严苛的服役环境和不断提高的性能要求，仍需进一步深入开展研究工作。未来，应着重解决第三代稀土硅酸盐的CMAS侵蚀问题，优化第四代T/EBCs的多层结构设计，探索新型制备工艺以提高涂层质量，并深入理解涂层失效机制以开发更有效的防护策略，从而推动EBCs技术不断向前发展，为高温部件的可靠运行提供更坚实的保障。

未来研究应聚焦于开发新型高熵材料以平衡热物理性能与化学稳定性，同时通过优化多尺度结构设计（如梯度化、纳米化）提升涂层的环境耐受性，并探索智能化制备技术以实现工艺参数的精准调控。

比如高熵涂层的智能化设计，其核心在于结合大数据分析、机器学习算法以及人工智能模型，实现材料性能的精准预测与优化设计。通过构建多组分材料的成分-结构-性能数据库，利用数据挖掘技术提取关键特征参数，建立高维非线性映射关系。机器学习方法如随机森林、支持向量机等可处理海量实验数据，识别影响涂层硬度、耐磨性、抗氧化性的主导因素。深度神经网络则能模拟复杂物理化学过程，预测不同元素配比下的相组成和微观结构演变。强化学习算法可自主探索未知材料组合，结合第一性原理计算实现跨尺度模拟。未来有希望根据基体材料的物理性能与化学性能，定制性调控得到热膨胀系数匹配且抗腐蚀性能更强的涂层体系。

这种智能设计范式可显著加速了新材料的开发周期，降低实验成本，提高材料体系设计效率，使高熵涂层能够同时满足高强度、耐腐蚀、抗辐照等多元性能要求，在航空航天、核能装备等极端环境应用中展现出巨大潜力。

此外，需深化多场耦合环境下的失效机理研究，为涂层寿命预测提供理论支持。通过材料、工艺和结构的协同创新，EBCs将在下一代航空发动机中发挥更重要的作用。

参考文献

[1] VARGAS GARCIA J R, GOTO T. Thermal barrier coatings produced by chemical vapor deposition[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2003, 4(4): 397-402.

[2] LIU B, WANG Y, LI C, et al. Research on the thermal shock simulation of the super high speed aircraft[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023, 30(9): 1889-1896.

[3] PARVEEZ B, KITTUR M I, BADRUDDIN I A, et al. Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: a review[J]. Polymers, 2022, 14(22): 5007.

[4] PARKER R, FEDDER G. Aircraft engines: a proud heritage and an exciting future [J]. The Aeronautical Journal, 2016, 120 (1223): 131-169.

[5] LEE K N, VAN ROODE M. Environmental barrier coatings enhance performance of SiC/SiC ceramic matrix composites. American Ceramic Society Bulletin, 2019, 98(3): 46.

[6] WANG X, GAO X, ZHANG Z, et al. Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(9): 4671-4688.

[7] 马壮，张学勤，刘玲. 环境障涂层的发展瓶颈及应对措施[J]. 中国表面工程，2020，33(5)：99-114.
MA Z, ZHANG X Q, LIU L. Restrictions and corresponding so-

lutions of environmental barrier coatings[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(5): 99-114.

[8] JACOBSON N S. ChemInform abstract: corrosion of silicon-based ceramics in combustion environments [J]. ChemInform, 1993, 24(14): chin.199314310.

[9] HU Q, ZHONG Z, ZHANG H, et al. Properties of Si/Yb_2SiO_5/$LaMgAl_{11}O_{19}$ tri-layered EBCs in high-temperature water vapor environment[J]. Ceramics International, 2025, 51(4): 4239-4248.

[10] LUAN S, REN K, WANG Y. Effect of CMAS concentration on the failure mode of $Yb_2Si_2O_7$-based environmental barrier coatings in water vapor environments[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(6): 117233.

[11] 刘涛,何箐.SiC/SiC复合材料环境障涂层研究进展[C]//第二十一届国际热喷涂研讨会(ITSS'2018)暨第二十二届全国热喷涂年会(CNTSC'2018)论文集.天津:中国农业机械化科学研究院表面工程技术研究所,2018:43-56.
LIU T, HE J. Research Progress of Environmental Barrier Coatings for SiC/SiC Composites[C]//The 21st International Thermal Spraying Symposium (ITSS'2018) and the 22nd National Thermal Spraying Annual Conference (CNTSC'2018). Tianjin: Institute of surface Engineering, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018: 43-56.

[12] LEE K N. Current status of environmental barrier coatings for Si-based ceramics [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133/134: 1-7.

[13] PAKSOY A H, XIAO P. Review of processing and design methodologies of environmental barrier coatings for next generation gas turbine applications [J]. Advances in Applied Ceramics, 2023, 122(1): 36-56.

[14] LEE K N. Key durability issues with mullite-based environmental barrier coatings for Si-based ceramics[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(4): 632-636.

[15] BASU S N, KULKARNI T, WANG H Z, et al. Functionally graded chemical vapor deposited mullite environmental barrier coatings for Si-based ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(2): 437-445.

[16] MESQUITA-GUIMARÃES J, GARCÍA E, MIRANZO P, et al. Mullite-YSZ multilayered environmental barrier coatings tested in cycling conditions under water vapor atmosphere [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 209: 103-109.

[17] 崔永静, 郭孟秋, 马玉洁, 等. 大气等离子喷涂 Si/mullite+BSAS/$Yb_2Si_2O_7$环境障涂层的制备与水氧腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2024, 44(4): 37-45.
CUI Y J, GUO M Q, MA Y J, et al. Preparation and water-oxygen corrosion behavior of Si/mullite+BSAS/$Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coating by atmospheric plasma spraying [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(4): 37-45.

[18] 白博添, 章德铭, 冀晓鹃, 等. 环境障涂层选材研究进展[J]. 热喷涂技术, 2022, 14(3): 1-12.
BAI B T, ZHANG D M, JI X J, et al. Research progress on the selection of materials for environmental barrier coating[J]. Thermal Spray Technology, 2022, 14(3): 1-12.

[19] 王佳宁, 王超会, 王铀, 等. 稀土硅酸盐环境障涂层综述[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 21-32.
WANG J N, WANG C H, WANG Y, et al. Review of rare earth silicate environmental barrier coatings[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 21-32.

[20] 史昆, 刘天翼, 刘时兵, 等. 等离子喷涂制备典型涂层研究进展[J]. 铸造, 2023, 72(3): 225-234.
SHI K, LIU T Y, LIU S B, et al. Research progress of typical coatings prepared by plasma spraying [J]. Foundry, 2023, 72(3): 225-234.

[21] 胡祥鹏, 蒋文昊, 李彪. 双硅酸镱环境障涂层的高温水氧腐蚀机理研究[J]. 材料保护, 2024, 57(3): 63-69.
HU X P, JIANG W H, LI B. High temperature water oxygen corrosion mechanism of ytterbium disilicate environmental barrier coatings[J]. Materials Protection, 2024, 57(3): 63-69.

[22] 庄铭翔, 都业源, 袁建辉, 等. 等离子体喷涂环境障涂层高温失效研究进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 33-49.
ZHUANG M X, DU Y Y, YUAN J H, et al. Research progress of high temperature failure of plasma sprayed environmental barrier coatings [J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 33-49.

[23] PADTURE N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 804-809.

[24] LÜ K, HUANG Y, ZHAO K, et al. High-temperature oxidation resistance of SiC_f/SiC composites annealed and cladded with $LaMgAl_{11}O_{19}$/$Yb_2Si_2O_7$ thermal/environmental barrier coatings [J]. Corrosion Science, 2024, 231: 111962.

[25] ZANG K, LIANG W, MIAO Q, et al. Mechanical and CMAS resistance properties of Al_2O_3 modified $Yb_2Si_2O_7$ ceramics[J]. Ceramics International, 2025, 51(4): 4847-4860.

[26] LEE K N, STUCKNER J, GARG A, et al. Influence of coating variables on the steam oxidation of modified silicon/ytterbium disilicate environmental barrier coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 496: 131696.

[27] LUO J C, YANG W Q, CHEN L, et al. Silicon-based bond coatings for environmental barrier coatings: present status and prospective[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2024, 21(6): 3771-3788.

[28] 赵春玲, 杨博, 李阔, 等. 陶瓷基复合材料表面环境障涂层材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(4): 257-266.
ZHAO C L, YANG B, LI K, et al. Research progress on environmental barrier coatings materials for ceramic matrix composites [J]. Materials China, 2021, 40(4): 257-266.

[29] 曹鑫鑫, 栾新刚, 王钰磊, 等. 带BSAS体系EBC的SiC/SiC复合材料在1300 ℃水氧耦合气氛中的[J]. 航空科学技术, 2024, 35(12): 71-81.
CAO X X, LUAN X G, WANG Y L, et al. Damage behavior of SiC/SiC composites with BSAS-based EBC in wet oxygen atmosphere at 1300 ℃ [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(12): 71-81.

[30] TEJERO-MARTIN D, BENNETT C, HUSSAIN T. A review on environmental barrier coatings: history, current state of the art and future developments[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(3): 1747-1768.

[31] GARCIA E, MESQUITA-GUIMARÃES J, MIRANZO P, et al. Mullite and mullite/ZrO_2-7wt.% Y_2O_3 powders for thermal spraying of environmental barrier coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1): 286-293.

[32] FAN D, ZHONG X, MAO F, et al. High temperature performances of tri-layer environmental barrier coating with Si bond layer modified by Yb_2O_3[J]. Ceramics International, 2023, 49(8): 11837-11845.

[33] CHEN D. Achieving superior durability of environmental barrier coatings through the use of a modified silicon bond coat[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2024, 33(6): 2097-2103.

[34] 徐滨士, 李长久, 刘世参, 等. 表面工程与热喷涂技术及其发展[J]. 中国表面工程, 1998, 11(1): 3-9.
XU B S, LI C J, LIU S C, et al. Surface engineering and thermal spraying technology and their developments[J]. China Surface Engineerign, 1998, 11(1): 3-9.

[35] 何洪泉, 王峰, 张兰. 热喷涂系列综述之一: 等离子喷涂[J]. 山东陶瓷, 2005, 28(3): 14-17.
HE H Q, WANG F, ZHANG L. Summary of thermal spraying series: plasma spraying[J]. Shandong Ceramics, 2005, 28(3): 14-17.

[36] YIN Z, TAO S, ZHOU X, et al. Particle in-flight behavior and its influence on the microstructure and mechanical properties of plasma-sprayed Al_2O_3 coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(6): 1143-1148.

[37] XUE Z, ZHENG Y, ZHU Y, et al. Preparation and phase structure optimization of plasma-sprayed Yb_2SiO_5 environmental barrier coating[J]. Ceramics International, 2024, 50(22): 47089-47097.

[38] SIVAKUMAR R, JOSHI S V. Protective coatings by plasma spraying: a review[J]. Transactions of the Indian Ceramic Society, 1991, 50(1): 1-14.

[39] MAUER G, JARLIGO M O, MARCANO D, et al. Recent developments in plasma spray processes for applications in energy technology[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 181(1): 012001.

[40] LIU F, LI H, GU S, et al. Spraying power influence on microstructure and bonding strength of $ZrSi_2$ coating for SiC coated carbon/carbon composites [J]. Ceramics International, 2018, 44(6): 6619-6625.

[41] DU H, CHEN H, MOON B K, et al. Influence of spraying power and distance on porosity and microhardness of plasma sprayed TiO_2 coatings[J]. Materials Science Forum, 2005, 486/487: 89-92.

[42] MARCINAUSKAS L, KAVALIAUSKAS Ž, KĖŽELIS R. Formation of carbon composite coatings by plasma spraying[J]. Vacuum, 2015, 122: 326-331.

[43] ARHAMI F, BEN ATTOUIL F, MOREAU C. Process parameters for enhanced microstructure and composition of as-sprayed $Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coatings *via* atmospheric plasma spray[J]. Ceramics International, 2024, 50(18): 34184-34196.

[44] 郑艺欣, 梁嘉, 龚江宏, 等. 大气等离子喷涂距离对TBC性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(增刊1): 449-452.
ZHENG Y X, LIANG J, GONG J H, et al. Influence of air plasma spay distance on the properties of TBC[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(Suppl 1): 449-452.

[45] 李荣斌, 邢悦, 张志玺, 等. 等离子喷涂YSZ热障涂层的工艺研究[J]. 表面技术, 2024, 53(7): 217-229.
LI R B, XING Y, ZHANG Z X, et al. Plasma spraying process of YSZ thermal barrier coatings[J]. Surface Technology, 2024, 53(7): 217-229.

[46] ZHANG X C, XU B S, WU Y X, et al. Porosity, mechanical properties, residual stresses of supersonic plasma-sprayed Ni-based alloy coatings prepared at different powder feed rates[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(13): 3879-3889.

[47] YILMAZ E, PAKSOY A H, GIBSON G, et al. Constrained sintering and thermal ageing behaviour of electrophoretically deposited $Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coating[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(14): 6427-6439.

[48] RAHMANI H, CABANAS I L. Development of alloy coatings by electron beam physical vapour deposition method[J]. Surface Engineering, 2021, 37(3): 325-333.

[49] NADZRI N I M, HALIN D S C, KHEMAR A, et al. Development of iron thin films by electron beam physical vapour deposition (EBPVD): a review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 957(1): 012043.

[50] MACIASZEK G, NOWOTNIK A. Influence of bond coat roughness on adhesion of thermal barrier coatings deposited by the electron beam-physical vapour deposition process [J]. Applied Sciences, 2024, 14(16): 7401.

[51] 牟仁德, 丁宁, 刘冠熙, 等. 不同电子束流EB-PVD制备YSZ热障涂层的组织结构演变、热循环寿命与失效行为分析[J]. 材料工程, 2024, 52(12): 44-52.
MU R D, DING N, LIU G X, et al. Microstructure evolution, thermal cycling lifetime, and failure behavior analysis of YSZ thermal barrier coatings prepared by EB-PVD with different electron beam currents[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(12): 44-52.

[52] YOKOI T, YAMAGUCHI N, TANAKA M, et al. Preparation of a dense ytterbium disilicate layer *via* dual electron beam physical vapor deposition at high temperature[J]. Materials Letters, 2017, 193: 176-178.

[53] MATSUMOTO M, WADA K, YAMAGUCHI N, et al. Effects of substrate rotation speed during deposition on the thermal cycle life of thermal barrier coatings fabricated by electron beam physical vapor deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(15): 3507-3512.

[54] WADA K, YAMAGUCHI N, MATSUBARA H. Effect of substrate rotation on texture evolution in ZrO_2-4 mol.% Y_2O_3 layers fabricated by EB-PVD[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 191(2/3): 367-374.

[55] 张彬, 蔡妍, 张涛, 等. 沉积入射角度对热障涂层形貌和性能的影响[J]. 真空, 2023, 60(3): 5-11.
ZHANG B, CAI Y, ZHANG T, et al. Effect of incident angle under deposition on the morphology and properties of thermal barrier coatings[J]. Vacuum, 2023, 60(3): 5-11.

[56] 孟彬, 杨青青, 孙跃, 等. 工艺参数对EB-PVD制备YSZ涂层

的影响[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(2): 27-31.
MENG B, YANG Q Q, SUN Y, et al. Effects of process parameters on YSZ coatings prepared by EB-PVD[J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(2): 27-31.

[57] WADA K, YAMAGUCHI N, MATSUBARA H. Crystallographic texture evolution in ZrO_2-Y_2O_3 layers produced by electron beam physical vapor deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 184(1): 55-62.

[58] MA R, QIAN J, GAO X, et al. High-temperature oxidation behavior and mechanical properties of PS-PVD sprayed $Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 494: 131303.

[59] HE W, MAUER G, SCHWEDT A, et al. Advanced crystallographic study of the columnar growth of YZS coatings produced by PS-PVD[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(5): 2449-2453.

[60] HE Q, LI X, ZHANG Y, et al. Investigation of the interface diffusion layer's impact on the thermal cycle life of PS-PVD thermal barrier coatings[J]. Coatings, 2025, 15(1): 13.

[61] MAUER G, HOSPACH A, VAßEN R. Process development and coating characteristics of plasma spray-PVD[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 220: 219-224.

[62] ZHAO H, ZENG Z, ZHANG X, et al. Towards enhanced corrosion resistance of PS-PVD TBCs in marine environments by structural design[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 494: 131391.

[63] 张小锋. PS-PVD制备Yb_2SiO_5环境障涂层及水蒸气腐蚀性能研究[C]//第九届国际稀土开发与应用研讨会暨2019中国稀土学会学术年会摘要集. 广州:广东省新材料研究所现代材料表面工程国家工程实验室,2019:294.
ZHANG X F. Study on the preparation of Yb_2SiO_5 environmental barrier coating by PS-PVD and its steam corrosion properties[C]//Chinese Rare Earth Society Summary of the 9th International Symposium on Rare Earth Development and Application and the 2019 Academic Annual Meeting of the Chinese Rare Earth Society National Engineering Laboratory of Modern Materials Surface Engineering. Guangzhou: Guangdong New Materials Research Institute, 2019: 294.

[64] DENG Z Q, MAO J, LIU M, et al. Regional characteristic of 7YSZ coatings prepared by plasma spray-physical vapor deposition technique[J]. Rare Metals, 2021, 40(11): 3308-3315.

[65] MAUER G, JARLIGO M O, REZANKA S, et al. Novel opportunities for thermal spray by PS-PVD[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 268: 52-57.

[66] SHI J, LIU S H, WEI L L, et al. Effects of different nano-agglomerated powders on the microstructures of PS-PVD YSZ coatings[J]. Ceramics International, 2023, 49(2): 2157-2166.

[67] DENG Z, ZHANG X, ZHOU K, et al. 7YSZ coating prepared by PS-PVD based on heterogeneous nucleation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(4): 820-825.

[68] 何箐, 由晓明, 邹晗, 等. 不同制备工艺参数对PS-PVD-8YSZ涂层微结构及性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 192-205.
HE Q, YOU X M, ZOU H, et al. Effect of different thermal spray process parameters on the microstructure and properties of PS-PVD 8YSZ coatings[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 192-205.

[69] 刘方圆, 魏连峰, 张薇薇, 等. 等离子体喷涂致密陶瓷涂层技术研究进展[J]. 中国表面工程, 2024, 37(5): 195-219.
LIU F Y, WEI L F, ZHANG W W, et al. Research progress in plasma spraying dense ceramic coating technology[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(5): 195-219.

[70] LIANG B, JI S, PANG S, et al. A novel strategy to improve the corrosion resistance of SiC_f/SiC composites in high-temperature combustion environments by cooperation of self-healing SiBCN and high-stability $Yb_2Si_2O_7$[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 489: 131098.

[71] XIAO F, YAN M, WANG Y, et al. Water vapor corrosion behaviours of nanostructured Yb_2O_3-Yb_2SiO_5/mullite/Si environmental barrier coatings[J]. Ceramics International, 2025, 51(1): 279-289.

[72] FAN K, OU H, ZHANG X, et al. Long term durability against water vapor corrosion at 1500 ℃ for environmental barrier coating modified by alumina[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(10): 117354.

[73] ZHANG T, WANG Z, DING K. Evolution features and corrosion behavior of $(Yb_{0.2}Y_{0.2}Lu_{0.2}Er_{0.2}Sc_{0.2})_2Si_2O_7$ environmental barrier coatings under water vapor conditions at 1400 ℃[J]. Ceramics International, 2025, 51(10): 13186-13196.

[74] LI G, DENG L, JIANG J, et al. Water vapor corrosion and cyclic oxidation behavior of SiC_f/SiC coated with Si/YbDS-YbMS/YbMS/LMA coating[J]. Materials Characterization, 2025, 222: 114821.

[75] CHENG X, ZHANG Q, YE F, et al. Recent progress on wet-oxygen corrosion resistance of SiC_f/SiC composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 4360-4388.

[76] CHEN L, YANG B, LI G R, et al. Thermochemical stability of $Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coatings during thermal cycling and water vapor corrosion at 1350 ℃[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2023, 32(6): 1811-1827.

[77] CHEN G, ZHANG Y, KONG J, et al. Water vapor corrosion behavior of SiC/Si/mixed $Yb_2Si_2O_7$-Yb_2SiO_5 environmental barrier coating for C/C composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1002: 175348.

[78] YU S, CHEN G, FU J, et al. Yb_2SiO_5-$Yb_2Si_2O_7$ gradient environment barrier coating: rational design and corrosion behavior in water vapor environment at 1300 ℃[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(10): 6097-6112.

[79] 丁坤英, 刘子剑, 王梦潇, 等. 水氧腐蚀对$Yb_2Si_2O_7$涂层裂纹扩展的影响[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(9): 2981-2994.
DING K Y, LIU Z J, WANG M X, et al. Effect of water oxygen corrosion on crack propagation of $Yb_2Si_2O_7$ coating[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(9): 2981-2994.

[80] LI K, ZHUANG T, ZHANG J, et al. Impact of Al-modified ytterbium disilicate EBCs on corrosion resistance to water vapor at 1400 ℃[J]. Ceramics International, 2025, 51(8): 10533-10542.

[81] HU X, CHEN Y, GUO H, et al. Corrosion behaviors and failure mechanism of plasma sprayed $Yb_2Si_2O_7$/Si environmental barrier coatings exposed to CMAS+ $NaVO_3$[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(3): 117005.

[82] LIANG R, ZHONG X, HONG D, et al. Reaction of Yb_2SiO_5 EBCs against CMAS melts with different composition[J]. Ceramics International, 2024, 50(11): 20200-20208.

[83] HARDER B J, STOKES J L, KOWALSKI B A, et al. Steam oxidation performance of $Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coatings exposed to CMAS[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(4): 2486-2498.

[84] LIU R, LIANG W, MIAO Q, et al. Revealing the oxidation growth mechanism and crack evolution law of Si-HfO_2/$Yb_2Si_2O_7$/Yb_2SiO_5/high-entropy hafnate thermal/environmental barrier coatings during thermal cycling[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(3): 116979.

[85] WANG Z, CAO X, HONG Z, et al. Failure behavior of SiC/SiC with BSAS-based EBC in gas combustion environment[J]. Ceramics International, 2024, 50(14): 25041-25051.

收稿日期:2025-06-11;**录用日期**:2025-07-10

通讯作者:王衍飞(1983—),男,副研究员,博士,研究方向为陶瓷基复合材料,联系地址:湖南省长沙市开福区德雅路109号国防科技大学空天科学学院(410073),E-mail:wangyanfei@nudt.edu.cn

(本文责编:齐书涵)