引用格式：柯希嘉，周邦阳，任佳奇，等. 大气等离子喷涂硅酸镱环境障涂层循环水氧腐蚀行为及衰退机制[J]. 材料工程，2026，54(4)：322-329.
KE Xijia, ZHOU Bangyang, REN Jiaqi, et al. Cycling water vapor corrosion behavior and degradation mechanism of air plasma sprayed ytterbium silicate environmental barrier coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(4): 322-329.

大气等离子喷涂硅酸镱环境障涂层循环水氧腐蚀行为及衰退机制

柯希嘉，周邦阳*，任佳奇，王天颖，崔永静，王长亮，郭孟秋，焦 健
（中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室，北京 100095）

摘要：环境障涂层（environmental barrier coatings，EBCs）是高性能航空发动机陶瓷基复合材料（ceramic matrix composites，CMCs）热端部件的关键防护技术，能够显著提高部件的服役稳定性与可靠性。采用大气等离子喷涂技术制备Si/$Yb_2Si_2O_7$/Yb_2SiO_5三层结构EBCs，研究其在1350 ℃、循环水氧条件下的腐蚀行为和衰退机制。结果表明，热处理态涂层主要由单斜结构的Yb_2SiO_5相和立方结构的Yb_2O_3相组成，纳米尺寸的Yb_2O_3相弥散分布在Yb_2SiO_5中。循环水氧腐蚀后Yb_2SiO_5涂层表面呈脊状结构并伴随一定数量的孔洞，腐蚀产物$Yb_2Si_2O_7$含量随循环次数增加而增加。$Yb_2Si_2O_7$的形成与干湿交替的腐蚀环境和$Si(OH)_4$气态物质有关。Yb_2SiO_5涂层内部存在贯穿裂纹但终止于Yb_2SiO_5/$Yb_2Si_2O_7$界面，Si黏结层氧化生成的SiO_2薄膜整体与$Yb_2Si_2O_7$中间层和Si黏结层结合良好。本工作中三层EBCs体系在1350 ℃下具有优异的抗循环水氧腐蚀性能。

关键词：环境障涂层；单硅酸镱；大气等离子喷涂；循环水氧腐蚀；衰退机制
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000581 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000581
中图分类号：TG174 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2026)04-0322-08

Cycling water vapor corrosion behavior and degradation mechanism of air plasma sprayed ytterbium silicate environmental barrier coatings

KE Xijia, ZHOU Bangyang*, REN Jiaqi, WANG Tianying, CUI Yongjing, WANG Changliang, GUO Mengqiu, JIAO Jian
(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Environmental barrier coatings (EBCs) are a key protective technology for the ceramic matrix composites (CMCs) hot end components of high-performance aircraft engines, which can significantly improve the service stability and reliability of the components. In this paper, Si/$Yb_2Si_2O_7$/Yb_2SiO_5 tri-layer structural EBCs are prepared by air plasma spray, and their corrosion behavior and degradation mechanism under 1350 ℃ and cycling water vapor conditions are investigated. The results show that the as-annealed coating is mainly composed of monoclinic Yb_2SiO_5 phase and cubic Yb_2O_3 phase, with nano-sized Yb_2O_3 phase dispersed in Yb_2SiO_5. The surface of Yb_2SiO_5 coating exhibits a ridge-like structure accompanied by a certain number of pores after cyclic water vapor corrosion, and the content of corrosion products $Yb_2Si_2O_7$ increases with the number of cycles. The formation of $Yb_2Si_2O_7$ is related to the alternating wet to dry corrosive environment and the gaseous substance $Si(OH)_4$. Penetrating cracks exist within the Yb_2SiO_5 coating but terminate at the Yb_2SiO_5/$Yb_2Si_2O_7$ interface, and the SiO_2 film generated from the oxidation of the Si bond coat is well bonded to the $Yb_2Si_2O_7$ interlayer and the Si bond coat in general. The tri-layer

EBCs system in this paper exhibits excellent resistance to cyclic water vapor corrosion at 1350 ℃.

Key words: environmental barrier coating; ytterbium monosilicate; air plasma spray; cycling water vapor corrosion; degradation mechanism

研发高推重比航空发动机一直是航空工业的发展重心，提高发动机涡轮前温度和结构减重是提高推重比的重要途径。目前，航空发动机涡轮叶片等高温部件均采用单晶高温合金制备，即便通过双层壁超气冷结构和热障涂层技术等方法，单晶高温合金构件的使用温度已接近其承温极限，未来先进航空发动机的发展亟须研发耐更高温度的材料体系。碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料（SiC fiber reinforced SiC ceramic matrix composites，SiC_f/SiC-CMCs）具有低密度、高比强和高承温等特点，被认为是新一代航空发动机的革命性材料，有望取代传统高温合金应用于燃烧室、导向叶片以及涡轮外环等热端部件[1-2]。

然而，在复杂高温燃气环境中，燃烧产生的大量水蒸气和过量氧气与CMCs反应生成挥发性的$Si(OH)_x$，导致CMCs构件尺寸呈线性减小，最终造成热力学性能严重下降[3]。因此，需要在CMCs构件表面制备耐高温、长寿命环境障涂层（environmental barrier coatings，EBCs）来提高其在热力化耦合腐蚀条件下的服役可靠性与稳定性[4-5]。美国等航空大国对EBCs的研究起步较早，经过广泛的材料探索与测试筛选，明确了以稀土硅酸盐为代表的EBCs发展方向[6]。其中，单硅酸镱（Yb_2SiO_5，YbMS）凭借较高的熔点、优异的高温稳定性和耐腐蚀性能，受到国内外众多学者的广泛关注[7-8]。研究表明，Yb_2SiO_5在高温腐蚀环境中保持化学稳定的主要原因在于其相对稳定的晶体结构和较低的SiO_2活度[9]。即便如此，一方面，Yb_2SiO_5的热膨胀系数较CMCs基体和Si黏结层相差较大，冷热循环过程中由于热应力迅速积累产生贯穿裂纹，致使界面氧化剥落；另一方面，现阶段Yb_2SiO_5涂层性能考核实验大多针对单一性能，随着未来航空服役环境愈发恶劣，亟须开展多因素交叉耦合腐蚀条件下EBCs性能演变规律和损伤失效机理研究。

综上，本工作采用大气等离子喷涂（air plasma spray，APS）技术制备$Si/Yb_2Si_2O_7/Yb_2SiO_5$三层结构EBCs，研究其在1350 ℃下的循环水氧腐蚀行为，揭示热化耦合作用下涂层物相、微结构演变过程和性能衰退机制，为新一代航空发动机CMCs热端部件表面高性能EBCs的研制提供理论支撑。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

实验选用尺寸为Φ25 mm×6 mm的SiC陶瓷片（杭州鑫飞达有限公司）为基体材料，为确保涂层与基体的结合强度，喷涂前采用200目刚玉砂对基体进行粗糙化处理。涂层由$Si/Yb_2Si_2O_7/Yb_2SiO_5$三层结构组成，Si粉末为市售熔融破碎Si粉，粒度为44～74 μm；以Yb_2O_3和SiO_2为原材料，将两者按照特定摩尔比混合，采用固相烧结＋喷雾造粒工艺得到粒度为15～50 μm的$Yb_2Si_2O_7$和Yb_2SiO_5喷涂粉末。

采用Multicoat等离子喷涂系统，按照表1中的工艺参数，在SiC基体表面依次制备Si黏结层、$Yb_2Si_2O_7$中间层和Yb_2SiO_5面层。将喷涂后试样置于高温箱式炉（DC-B15/15型，北京独创科技有限公司）中1300 ℃保温6 h。

表1　大气等离子喷涂工艺参数

Table 1　Parameters of air plasma spray

Material	Current/A	Voltage/V	Ar (NLPM)	H_2 (NLPM)	Space distance/mm
Si	400	50	40	6	120
$Yb_2Si_2O_7$	500	55	45	8	120
Yb_2SiO_5	500	55	45	8	120

1.2　实验方法

高温循环水氧耦合腐蚀性能测试采用本团队自研装置，包含气氛控制系统、高温加热系统和自动升降系统，如图1所示。炉温设定为1350 ℃，气体比例为90%H_2O-10%O_2（体积分数），循环制度为保温1 h，空冷1 h。采用氧化锆坩埚装载试样，分别在30、60、120、200、250次循环后取出试样进行物相和显微组织分析。

采用X射线衍射仪（XRD，XD-3，Aeris）对试样进行物相分析，射线源为Cu $K\alpha_1$，波长为λ=0.15418 nm，扫描速度为6 (°)/min，步长为0.02°。参照YB/T 5320—2006中的K值法分析涂层中各物相含量。利用扫描电子显微镜（SEM，Zeiss G300型）对喷涂粉末和涂层试样的微观形貌进行观察，并用附带能谱仪（EDS）测定涂层微区化学成分。

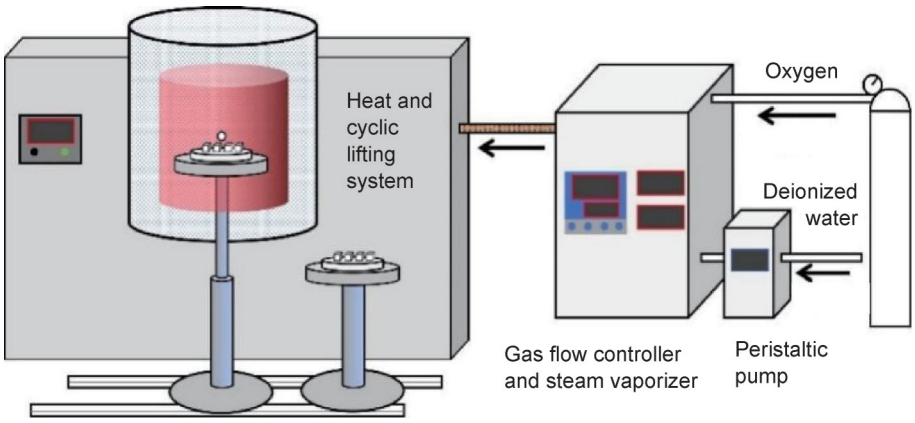


图1 循环水氧耦合腐蚀性能测试平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of cycling water vapor corrosion performance test platform

2 结果与分析

2.1 粉末物相组成与显微组织

固相烧结+喷雾造粒后 Yb_2SiO_5 粉末的表面形貌如图2(a)所示。粉末为实心球形结构,由大量亚微米尺寸颗粒团聚而成,粒径 D_{10}、D_{50} 和 D_{90} 分别为24.7、36.3 μm 和 53.4 μm。图2(b)XRD结果显示,喷涂粉末为纯X2-Yb_2SiO_5相,并未检测到其他杂相存在,表明本工艺制得的粉体可以用于后续涂层制备。

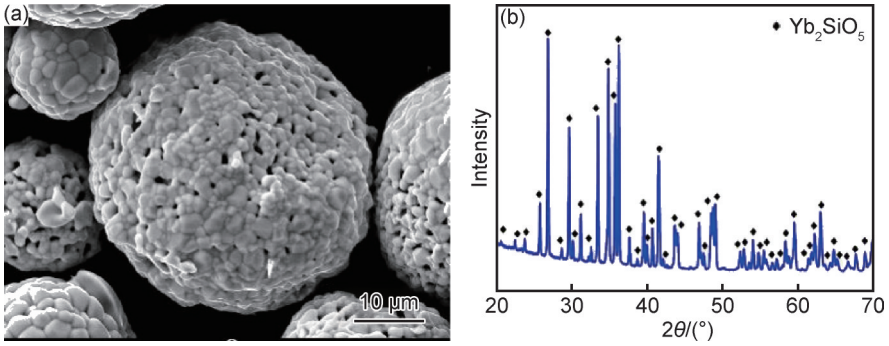


图2 Yb_2SiO_5喷涂粉末形貌与物相 (a)表面形貌;(b)物相组成

Fig.2 Morphology and phase constitution of Yb_2SiO_5 spray powders (a)surface morphology;(b)phase constitution

2.2 涂层物相组成与显微组织

图3(a)是热处理前后 Yb_2SiO_5 涂层的XRD图谱。制备态涂层主要由单斜结构的 Yb_2SiO_5、立方结构的 Yb_2O_3 以及非晶相(约30°处的漫散射峰)组成。其中,非晶相产生的原因在于熔融 Yb_2SiO_5 粒子在基体表面迅速冷却,使其以非晶的形式保留在涂层中。而 Yb_2O_3 相的出现则说明 Yb_2SiO_5 喷涂过程中发生分解现象[10],即 $Yb_2SiO_5(l)\rightarrow Yb_2O_3(l)+SiO_2(g)$。制备态涂层室温~1450 ℃的DSC曲线(图3(b))表明,涂层在1040 ℃左右出现非常尖锐的放热峰,这主要是由于非晶相晶化造成的。对制备态涂层进行1300 ℃、6 h热处理后,涂层仍然保持 Yb_2SiO_5 和 Yb_2O_3 两相,但 Yb_2SiO_5 衍射峰强度显著增大,表明涂层完成了非晶相到晶相转变。图3(c)是热处理态 Yb_2SiO_5 涂层的表面形貌,涂层表面呈现两种典型的形貌特征:(1)光滑平整表面,是由于粉末颗粒在等离子射流中完全熔化,高速撞击基体后变形、连接和堆叠形成;(2)凹凸不平的粗糙表面,与等离子射流中的半熔甚至未熔颗粒有关。由涂层的截面形貌可知(图3(d)),涂层为三层结构,自基体向外依次为Si黏结层、$Yb_2Si_2O_7$ 中间层和 Yb_2SiO_5 面层,各层间结合紧密。涂层内部未发现贯穿性裂纹,但是存在一定数量的孔洞和微裂纹。其中,横向裂纹主要存在于熔融粉末颗粒扁平化堆叠形成的层状薄片的层与层之间,是由于薄片的不规则变形使得两层薄片层之间脱离黏结造成的;纵向裂纹的产生与熔融粉末凝固过程中内应力以及 Yb_2SiO_5 由非晶相到单斜相的相变有关。高倍照片(图3(e))则显示 Yb_2SiO_5 涂层内部呈现暗灰色和亮灰色两种衬度。其中,亮灰色区域中弥散分布大量纳米尺寸的白色颗粒。EDS结果表明(表2),暗灰色区域主要是 Yb_2SiO_5

相，亮灰色区域是Yb_2SiO_5和Yb_2O_3的混合物，白色颗粒为Yb_2O_3。由此可知，Yb_2O_3在涂层中并不是独立存在的，而是与Yb_2SiO_5共存。研究表明，Yb_2O_3的存在形式与喷涂过程中Yb_2SiO_5中SiO_2的挥发程度有关：喷涂过程中，粒径较小的Yb_2SiO_5粒子最外层受热充分，分解相对严重，这些粒子中的SiO_2大量蒸发，冷却后形成Yb_2SiO_5+Yb_2O_3区域；而对于粒径较大的粒子，Yb_2SiO_5热导率较低，表面与内部温度梯度明显，故而SiO_2挥发程度不同，粒子内部SiO_2挥发少，冷却后最终形成完全Yb_2SiO_5区域。

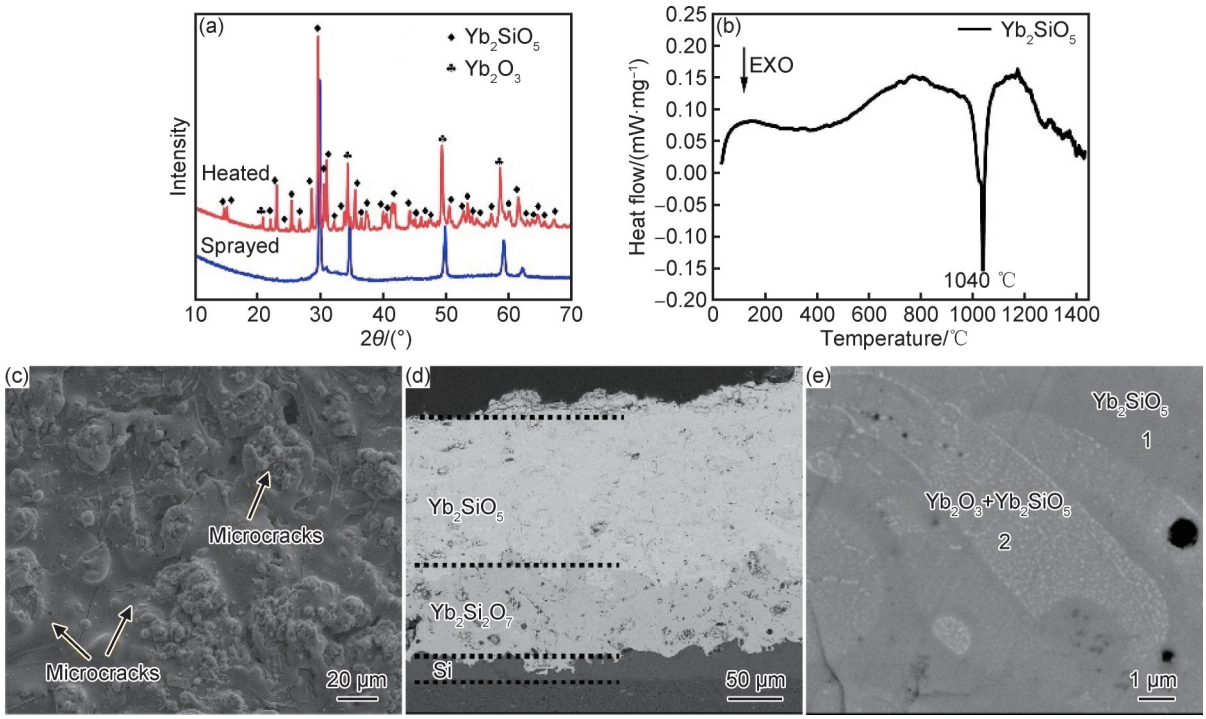


图3　Yb_2SiO_5涂层物相、DSC曲线和显微组织

(a)XRD图谱；(b)DSC曲线；(c)表面形貌；(d)截面形貌；(e)截面高倍照片

Fig.3　Phase constitution, DSC curves, and microstructures of Yb_2SiO_5 coatings

(a)XRD patterns; (b)DSC curve; (c)surface morphology; (d)cross-section morphology; (e)cross-section morphology with high magnification

表2　不同区域的化学成分（原子分数/%）

Table 2　Chemical compositions of different regions (atom fraction/%)

Point	Yb	Si	O
1	26.43	12.82	60.75
2	39.54	10.21	50.25

2.3　Yb_2SiO_5涂层循环水氧腐蚀行为

图4是循环水氧腐蚀不同周次后Yb_2SiO_5涂层的XRD图谱。经过30个循环后，涂层中除X2-Yb_2SiO_5相外，并未检测到Yb_2O_3相，取而代之的是新生成的$Yb_2Si_2O_7$相。随着腐蚀时间的延长，$Yb_2Si_2O_7$相的衍射峰强度增加。相含量计算结果显示，经过30、60、120、200、250次循环后，$Yb_2Si_2O_7$相的含量分别为15%、19%、22%、27%和32%。在高温水氧环境中，Yb_2SiO_5的稳定性优于Yb_2O_3，后者倾向于与水蒸气反应生成挥发性$Yb(OH)_3$，如反应式(1)所示。随着腐蚀时间延长，Yb_2SiO_5也会缓慢与水蒸气发生式(2)反

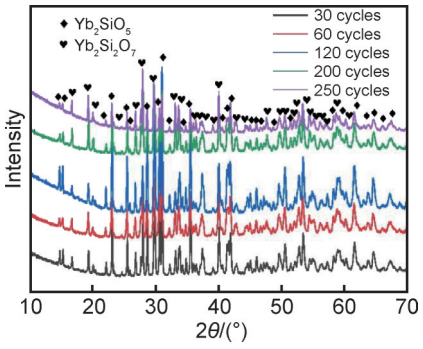


图4　循环水氧腐蚀不同周次后Yb_2SiO_5涂层的XRD图谱

Fig.4　XRD patterns of Yb_2SiO_5 coating after cyclic water vapor corrosion for different cycles

应生成过渡产物$Yb_2Si_2O_7$相。然而，一方面，Yb_2SiO_5晶体中四面体[SiO_4]和多面体[YbO_6]为共顶点连接，$Yb_2Si_2O_7$晶体中多面体[YbO_6]和[Si_2O_7]为共棱连接，中心正离子由于间距缩短导致斥力增大；另一方面，Yb_2SiO_5晶体中Yb—O和Si—O的平均键长要小于$Yb_2Si_2O_7$晶体，上述两点表明Yb_2SiO_5相比$Yb_2Si_2O_7$具

有更加稳定的晶体结构[11]。因此，过渡产物 $Yb_2Si_2O_7$ 会同时与水蒸气反应，重新生成 Yb_2SiO_5 相。

$$Yb_2O_3(s)+3H_2O(g)\rightarrow 2Yb(OH)_3(g) \quad (1)$$

$$2Yb_2SiO_5(s)+3H_2O(g)\rightarrow Yb_2Si_2O_7(s)+2Yb(OH)_3(g) \quad (2)$$

$$Yb_2Si_2O_7(s)+2H_2O(g)\rightarrow Yb_2SiO_5(s)+Si(OH)_4(g) \quad (3)$$

图 5 是循环水氧腐蚀不同周次后涂层的表面形貌，低倍照片中腐蚀后涂层形貌与制备态相比变化不明显，但高倍照片显示，涂层表面出现褶皱现象并伴随一定数量的气孔。其中，褶皱区域为典型的脊状结构。对于脊状结构形成的原因，目前仍然存在争议。有学者指出，当 Yb_2SiO_5 涂层与高温水蒸气接触时，其表面晶粒均被腐蚀，即发生式(2)和式(3)反应，晶粒中心产生凹坑，晶界凸出，最终形成脊线形貌。不过，也有学者认为脊状组织来源于 Yb_2SiO_5 的部分晶面在水蒸气腐蚀过程中被优先刻蚀，其中晶界随腐蚀时间延长被刻蚀得更明显。后续还需对脊状结构的产生进行更加深入和系统的分析。值得注意的是，涂层表面部分晶粒并未观察到明显的腐蚀痕迹，这种腐蚀不均匀的原因可能在于不同晶粒在腐蚀过程中暴露的晶面有所区别，活性较大的晶面倾向于被优先腐蚀。孔洞的产生则是因为 Yb_2O_3 与 H_2O 反应生成挥发性 $Yb(OH)_3$。不过，随着腐蚀时间的延长，孔洞数量有所减少。这是因为高温下 Yb_2SiO_5 晶粒长大，有利于促进涂层内部显微缺陷的烧结愈合。同时，Yb_2SiO_5 向 $Yb_2Si_2O_7$ 转变过程中伴随一定程度的体积膨胀，自动修复了涂层中部分孔洞及微裂纹[12]。

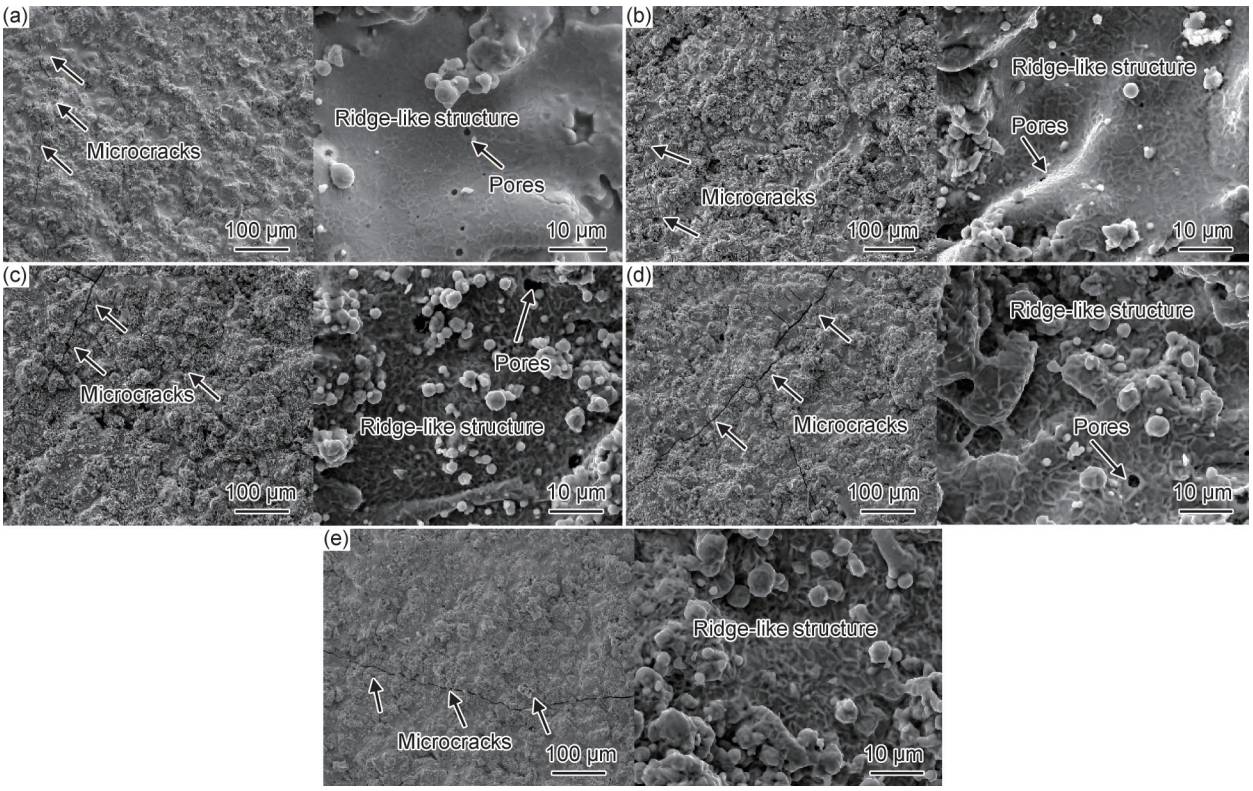


图 5 循环水氧腐蚀不同周次后 Yb_2SiO_5 涂层的表面形貌

(a)30 周次；(b)60 周次；(c)120 周次；(d)200 周次；(e)250 周次

Fig.5 Surface morphologies of Yb_2SiO_5 coating after cyclic water vapor corrosion for different cycles

(a)30 cycles; (b)60 cycles; (c)120 cycles; (d)200 cycles; (e)250 cycles

图 6 是循环水氧腐蚀不同周次后涂层的截面形貌。可以看到，$Si/Yb_2Si_2O_7/Yb_2SiO_5$ 三层涂层各层间结合良好，未观察到明显的界面裂纹。随循环次数增加，Yb_2SiO_5 面层出现少量贯穿裂纹，但终止于 $Yb_2SiO_5/Yb_2Si_2O_7$ 界面处。Yb_2SiO_5 较大的热膨胀系数使其在冷热交替过程中产生较大拉应力，导致涂层产生贯穿裂纹。但由于 $Yb_2Si_2O_7$ 热膨胀系数与 Si 黏结层和 CMCs 基体相当，其内部压应力阻止了裂纹进一步扩展。此外，$Yb_2Si_2O_7$ 涂层内部强/韧相间的层状结构进一步提高了涂层整体的抗裂纹拓展能力[13]，从而提高了 $Si/Yb_2Si_2O_7/Yb_2SiO_5$ 体系的热循环抗力。高倍形貌表明，腐蚀后涂层表层由深灰色和浅灰色两相组成，结合 XRD(图 3(a))和 EDS 结果(表 2)可知，深灰色区域(点 3)为 $Yb_2Si_2O_7$ 相，浅灰色区域(点 4)为

Yb_2SiO_5相。目前，关于$Yb_2Si_2O_7$相的形成机制尚不明晰。部分学者认为Yb_2SiO_5-$Yb_2Si_2O_7$的转变至少发生在1350 ℃以上温度，不过也有学者指出只有当腐蚀环境在潮湿-干燥两种状态间切换时，该反应才能发

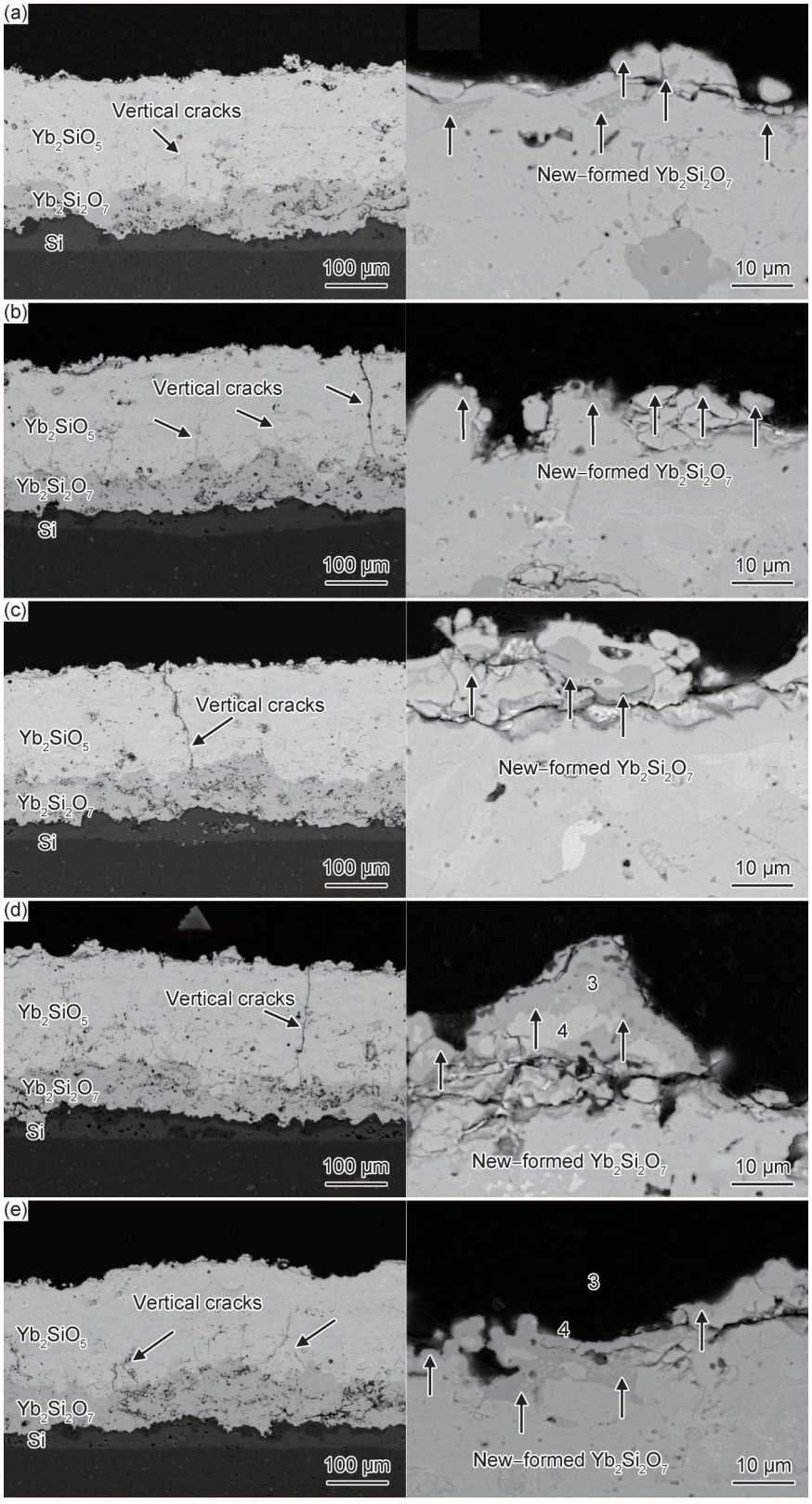


图6　循环水氧腐蚀不同周次后Yb_2SiO_5涂层的截面形貌

(a)30周次；(b)60周次；(c)120周次；(d)200周次；(e)250周次

Fig.6　Cross-sectional morphologies of Yb_2SiO_5 coating after cyclic water vapor corrosion for different cycles

(a)30 cycles; (b)60 cycles; (c)120 cycles; (d)200 cycles; (e)250 cycles

生[14]，这与本文的实验状态相似。还有研究发现，对于单面喷涂的EBCs体系，裸露的SiC基体与高温水蒸气反应生成气态物质$Si(OH)_4$，该物质不仅能够促进$Yb_2Si_2O_7$相生成（反应式（2）），还会覆盖在$Yb_2Si_2O_7$表面并分解成SiO_2薄膜，阻止$Yb_2Si_2O_7$相挥发[15]。后续还需从热力学和动力学角度对此反应进行深入解析。随着腐蚀时间延长，表层$Yb_2Si_2O_7$相含量显著增加，这与XRD的结果相符。

图7是循环水氧腐蚀不同周次后$Si/Yb_2Si_2O_7$界面形貌。在高温环境下，Si黏结层氧化形成SiO_2薄膜，且SiO_2厚度与腐蚀时间成正比。经过250次循环后，氧化膜厚度在5～15 μm之间。可以看到，SiO_2厚度存在显著的不均匀性，这是由于APS涂层内部的显微缺陷（孔隙、微裂纹等）本身分布不均匀，腐蚀过程中垂直裂纹的产生进一步为腐蚀介质的扩散提供快速通道，导致Si黏结层不同区域腐蚀速率和程度有所差异。SiO_2薄膜与Si黏结层和$Yb_2Si_2O_7$中间层结合较为紧密，未观察到明显的横向分层裂纹，但是SiO_2内部存在少量孔洞和微裂纹。冷热循环过程中，SiO_2在220 ℃左右会发生α/β方石英相变，相变的体积变化（约2.8%）是微裂纹产生的主要原因[16]。同时，SiO_2还会与扩散进入的水蒸气反应形成挥发性的$Si(OH)_4$，造成SiO_2薄膜内部出现孔洞。除SiO_2外，$Si/Yb_2Si_2O_7$界面处没有其他相生成，表明Si和$Yb_2Si_2O_7$在高温下具有良好的化学兼容性。

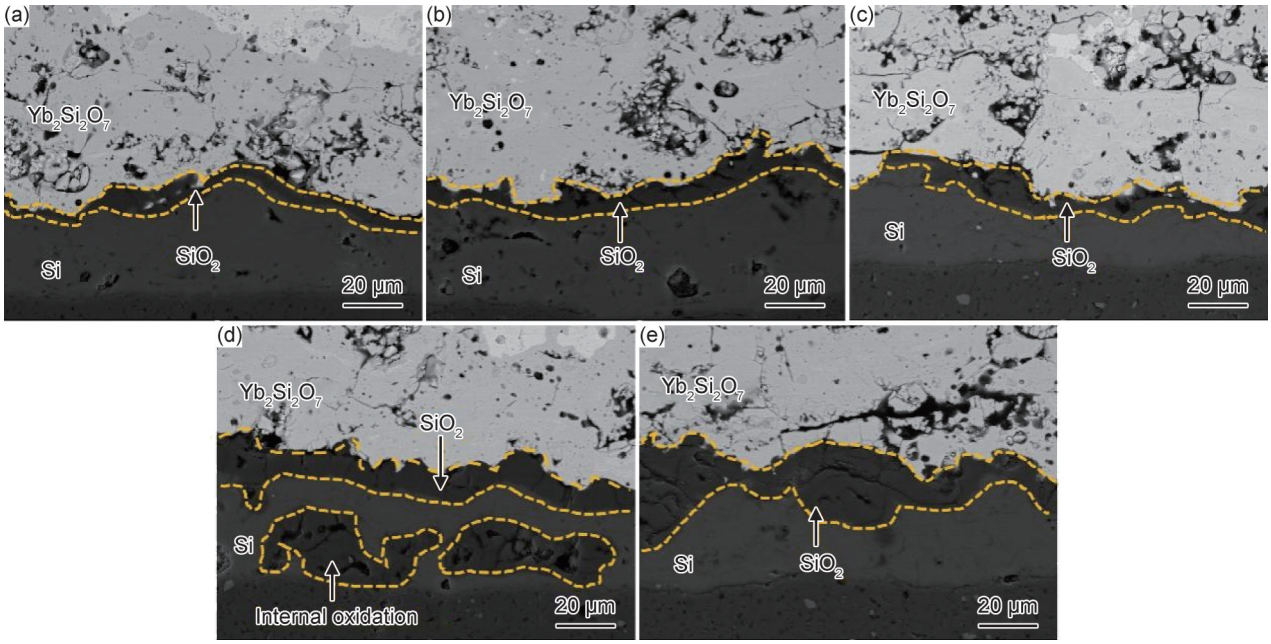


图7 循环水氧腐蚀不同周次后$Si/Yb_2Si_2O_7$界面形貌

（a）30周次；（b）60周次；（c）120周次；（d）200周次；（e）250周次

Fig.7 Morphologies of $Si/Yb_2Si_2O_7$ interface after cyclic water vapor corrosion for different cycles

(a)30 cycles; (b)60 cycles; (c)120 cycles; (d)200 cycles; (e)250 cycles

3 结论

（1）制备态Yb_2SiO_5涂层由单斜结构的Yb_2SiO_5相、立方结构的Yb_2O_3和非晶相组成，1300 ℃热处理后非晶相消除，纳米尺寸的Yb_2O_3相弥散分布在Yb_2SiO_5中。

（2）循环水氧腐蚀后Yb_2SiO_5涂层表面呈脊状结构并伴随一定数量的孔洞，腐蚀产物$Yb_2Si_2O_7$含量随循环次数增加而增加。$Yb_2Si_2O_7$的形成与干湿交替的腐蚀环境和$Si(OH)_4$气态物质有关。

（3）Yb_2SiO_5涂层内部存在贯穿裂纹但终止于$Yb_2SiO_5/Yb_2Si_2O_7$界面，Si黏结层氧化生成的SiO_2薄膜内部存在少量微裂纹，但整体与$Yb_2Si_2O_7$中间层和Si黏结层结合良好。

（4）本工作中的$Si/Yb_2Si_2O_7/Yb_2SiO_5$三层EBCs经过250次循环水氧腐蚀后未见明显分层，未来通过对粉末形态、涂层结构和喷涂工艺参数等进行优化，有望进一步提高其高温腐蚀抗力，为EBCs工程化应用提供技术支撑。

参考文献

[1] 刘巧沐，黄顺洲，何爱杰. 碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用需求及挑战[J]. 材料工程，2019，47(2)：1-10.
LIU Q M，HUANG S Z，HE A J. Application requirements and challenges of CMC-SiC composites on aero-engines[J]. Journal of

Materials Engineering, 2019, 47(2): 1-10.

[2] 左平, 何爱杰, 李万福, 等. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料的发展及在航空发动机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32(5): 47-52.
ZUO P, HE A J, LI W F, et al. Application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites on aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2019, 32(5): 47-52.

[3] SMIALEK J L, ROBINSON R C, OPILA E J, et al. SiC and Si_3N_4 recession due to SiO_2 scale volatility under combustor conditions[J]. Advanced Composite Materials, 1999, 8(1): 33-45.

[4] 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.

[5] 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.

[6] LI Y R, LUO Y X, TIAN Z L, et al. Theoretical exploration of the abnormal trend in lattice thermal conductivity for monosilicates RE_2SiO_5 (RE=Dy, Ho, Er, Tm, Yb and Lu)[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(10): 3539-3546.

[7] XIANG H M, FENG Z H, ZHOU Y C. Mechanical and thermal properties of Yb_2SiO_5: first-principles calculations and chemical bond theory investigations[J]. Journal of Materials Research, 2014, 29(15): 1609-1619.

[8] 钟鑫. 等离子喷涂硅酸镱涂层结构与性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2018.
ZHONG X. Microstructure and properties of ytterbium silicates coating deposited by atmospheric plasma spray[D]. Shanghai: Shanghai University, 2018.

[9] ZHOU B Y, WU Y, KE X J, et al. Resistance of ytterbium silicate environmental barrier coatings against molten calcium-magnesium-aluminosilicate (CMAS): a comprehensive study[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 479: 130540.

[10] XIAO J, LIU Q M, LI J C, et al. Microstructure and high-temperature oxidation behavior of plasma-sprayed Si/Yb_2SiO_5 environmental barrier coatings[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(8): 1994-1999.

[11] LIU P P, ZHONG X, NIU Y R, et al. Reaction behaviors and mechanisms of tri-layer $Yb_2SiO_5/Yb_2Si_2O_7/Si$ environmental barrier coatings with molten calcium-magnesium-alumino-silicate[J]. Corrosion Science, 2022, 197: 110069.

[12] 柯希嘉, 王长亮. 大气等离子喷涂制备 $Yb_2Si_2O_7$ 环境障涂层 1350～1500 ℃水蒸气下的腐蚀行为[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(7): 2341-2349.
KE X J, WANG C L. Corrosion behavior of atmospheric plasma sprayed $Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coatings in water vapor at 1350-1500 ℃[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(7): 2341-2349.

[13] 王浩宇. 几种稀土硅酸盐环境障涂层的制备、表征与性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
WANG H Y. Preparation, characterization and properties of several rare-earth silicates environmental barrier coatings[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.

[14] WADA M, MATSUDAIRA T, KAWASHIMA N, et al. Effect of water vapor on mass transfer in polycrystalline $Yb_2Si_2O_7$ under oxygen potential gradients at high temperatures[J]. Acta Materialia, 2020, 201: 373-385.

[15] WU J, YANG W C, ZHANG X F, et al. Corrosion behavior of PS-PVD spray $Yb_2Si_2O_7$ environmental barrier coatings during continuous water vapor exposure[J]. Corrosion Science, 2023, 210: 110831.

[16] 周益春, 王明明, WU Rudder, 等. 环境障涂层黏结层的研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 61(13): 14-25.
ZHOU Y C, WANG M M, RUDDER W, et al. Research progress on bond coat of environmental barrier coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 61(13): 14-25.

基金项目: 中国科学技术协会“青年人才托举工程”项目(2023QNRC001)
收稿日期: 2024-08-15; **录用日期**: 2024-10-29

通讯作者: 周邦阳(1991—), 男, 工程师, 博士, 研究方向为热障涂层、环境障涂层、热喷涂技术, 联系地址: 北京市 81 信箱 5 分箱(100095), E-mail: zhouby1001@163.com

(本文责编: 齐书涵)