

# 等离子蒸发沉积热障涂层抗 CMAS 附着研究进展

张宝鹏, 于新民, 刘 伟, 霍鹏飞, 金 鑫

(航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 热障涂层是先进航空发动机核心热端部件高压涡轮叶片表面防护的关键技术。随着发动机服役温度的不断提高, 一种主要化学成分为  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (简称 CMAS) 的环境沉积物对叶片的危害日益严重, 不仅堵塞叶片表面气膜冷却孔, 降低叶片冷却效率, 而且导致热障涂层早期剥落失效, 服役寿命大幅度降低。高温熔融 CMAS 在涂层表面的附着过程及防护方法是目前热障涂层研究领域的热点和难点。本文针对新型等离子蒸发沉积技术制备的热障涂层, 梳理了近年来在热障涂层抗 CMAS 附着、渗入和腐蚀方面的最新研究成果, 指出了涂层抗 CMAS 侵蚀研究的发展方向。

**关键词:** 等离子蒸发沉积; 热障涂层; CMAS; 氧化钇稳定氧化锆; 附着

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)10-3646-07

热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 是将具有耐高温、低热导、抗腐蚀等性能的陶瓷材料以涂层的形式沉积在金属基体表面, 是延长涡轮发动机叶片使用寿命, 提高发动机效率的一种表面防护技术<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。涂覆热障涂层后, 涡轮叶片的使用温度可以提高 150~200 °C<sup>[3]</sup>。

典型的热障涂层由两层构成: 与高温合金基体接触的是一层金属粘结层 (bond coat, BC), 主要起抗高温氧化和粘结过渡的作用; 在粘结层上则是外层的陶瓷涂层 (top coat, TC), 主要起隔热的作用<sup>[4,5]</sup>。目

前, 研究最多、应用范围最广的热障涂层陶瓷层材料是  $\text{Y}_2\text{O}_3$  部分稳定的  $\text{ZrO}_2$  (YSZ)。热障涂层的制备技术比较多样<sup>[6-9]</sup>, 其中主要包括等离子喷涂 (plasma spraying, PS)、电子束物理气相沉积 (electron beam physical vapor deposition, EB-PVD)、磁控溅射 (magnetron sputtering, MS)、化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD)、电弧离子镀 (arc ion plating)、电弧蒸镀 (arc evaporation) 等技术。在上述涂层制备技术中, 应用最广的是等离子喷涂和电子束物理气相沉积技术。其中, 等离子喷涂成本低, 容易操作, 沉积效率高, 但是所得到的涂层为层状结构的等轴晶, 涂层与金属基体之间为机械结合, 结合力较低; 电子束物理气相沉积可以制备出柱状结构的陶瓷涂层, 涂层抗高温热震性能好, 循环使用寿命高, 但 EB-PVD 设备价格昂贵, 且涂层沉积效率较低。

等离子蒸发沉积<sup>[10-12]</sup> (plasma spray-physical vapor deposition, PS-PVD) 作为一种新型的热障涂层制备技术, 既具有等离子喷涂技术沉积效率高、成本低廉的特点, 又具有气相沉积中涂层均匀、结合力好的优势。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。因此, 等离子蒸发沉积技术有望成为今后先进涡轮发动机热障涂层制备的关键技术之一。

近来, 涡轮发动机叶片的 CMAS 腐蚀问题日益突出, 由 CMAS 引起的热障涂层失效问题正受到各国研

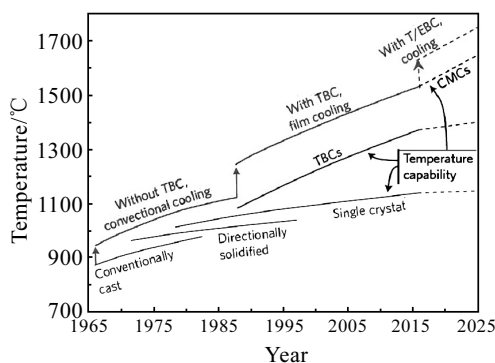


图 1 发动机材料承温能力的发展历程与趋势

Fig.1 Progression and projection of temperature capabilities of the turbine engine materials<sup>[2]</sup>

收稿日期: 2019-10-25

作者简介: 张宝鹏, 男, 1991 年生, 博士, 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074, 电话: 010-68743595, E-mail: bhzbp1129@buaa.edu.cn

究机构的广泛关注。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  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ，简称为 CMAS。在涡轮发动机的高温服役环境下，CMAS 熔融后附着在热障涂层表面，随后渗入涂层内部并对涂层产生侵蚀和破坏作用<sup>[13]</sup>。目前，传统的等离子喷涂（PS）和电子束物理气相沉积（EB-PVD）制备的 YSZ 涂层均没有抵抗 CMAS 腐蚀的性能<sup>[14,15]</sup>。有关 PS-PVD 制备热障涂层领域的报道主要集中在等离子束流特性、涂层组织结构调控、涂层高温稳定性及循环使用寿命等方面<sup>[16-20]</sup>。此外，高温下 CMAS 对热障涂层的渗透、腐蚀作用机制及抗 CMAS 涂层的设计及制备在近几年内已经成为了热障涂层领域的研究热点。很多学者研究了熔融 CMAS 对热障涂层的腐蚀机制，并提出了涂层抗 CMAS 附着的方法，本文将系统梳理近年来世界各国学者在该领域的最新研究成果。

## 1 CMAS 成分及性质

CMAS 在高温下会形成玻璃态的物质，其主要成分是  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ ，此外还含有少量的  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  等成分。一般在研究过程中会忽略这些微量的 S、Fe、Na、K、V 等元素。对于 CMAS 成分中各组分的比例，在不同的地理环境、不同的服役发动机乃至发动机上不同叶片表面都有一定的差别<sup>[21-23]</sup>，各国研究者们采用的成分也都不尽相同，表 1 中列出了几种文献中报道的 CMAS 组分。此外，CMAS 成分的不同会造成其熔点存在差异，一般来说，CMAS 的熔融温度在 1150~1300 °C 范围内。Kramer 等选取的典型 CMAS 成分的熔融温度约为 1240 °C<sup>[22]</sup>。

## 2 熔融 CMAS 附着及铺展行为

研究表明<sup>[24,26]</sup>，高温下 CMAS 熔体在热障涂层表面具有一定的润湿性。若 CMAS 熔体可以浸润热障涂层，则会在涂层表面发生粘连、流动及铺展。其中，铺展过程决定了 CMAS 与热障涂层之间接触和发生化学反应的区域，对预估涂层受腐蚀破坏的程度尤为重要。此外，改变热障涂层的微观结构有可能改变 CMAS

熔体的表面润湿性，使涂层具有抗 CMAS 渗透、腐蚀的效果。

Song 等<sup>[25]</sup>研究了不同温度下 CMAS 在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  表面的铺展速率变化，如图 2 所示。研究发现，当温度高于 CMAS 的玻璃化转变温度时，CMAS 熔体的平均铺展速率随温度的升高近似呈指数形式增长，由此提出，温度是控制 CMAS 熔体铺展速率的关键因素。从图 3 中可以看出，CMAS 熔体的粘度随温度升高呈现明显的下降趋势。因此，温度越高，熔体的粘度越低，导致其流动、铺展速率加快。

根据文献报道<sup>[24,26]</sup>，CMAS 在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 YSZ 表面的熔融和铺展过程大致可以分为 2 个阶段。第 1 阶段为 CMAS 熔体的快速铺展过程，主要原因为 CMAS 块体熔融时表面张力急剧减小，CMAS 液滴很快在涂层表面铺开。在第 2 阶段中，由于 CMAS 熔体具有一定的粘度，可以发生流动，因而 CMAS 与涂层表面的接触圆半径随时间的增加而增大，这一阶段被称为 CMAS 熔体的自由流动阶段，其流动铺展速率主要由 CMAS 的自身粘度控制。根据实际测试结果，CMAS 熔体在第 1 阶段的铺展速率显著高于第 2 阶段。

## 3 熔融 CMAS 渗入及腐蚀机理

传统的等离子喷涂（PS）或电子束物理气相沉积（EB-PVD）制备的 YSZ 涂层均没有抵抗 CMAS 渗透、腐蚀的性能<sup>[27]</sup>。高温熔融的 CMAS 会沿着涂层中的孔隙、微裂纹或柱状晶间隙渗入涂层内部，对涂层产生腐蚀和破坏作用，如图 4 所示。

根据文献报道<sup>[28-33]</sup>，CMAS 对 APS 和 EB-PVD 制备的 YSZ 涂层的影响主要包括以下几个方面：（1）CMAS 中的 Ca 与 Si 元素扩散进入 YSZ 涂层内部，导致涂层快速烧结、致密化，降低了涂层的热膨胀系数、

表 1 不同研究机构报道的 CMAS 成分

Table 1 Various CMAS compositions investigated by different research groups (mol%)

Researcher	Ca	Mg	Al	Si
Aygun et al. <sup>[21]</sup>	37	6	8	49
Krämer et al. <sup>[22]</sup>	33	9	13	45
Smialek et al. <sup>[23]</sup>	20	7	18	55

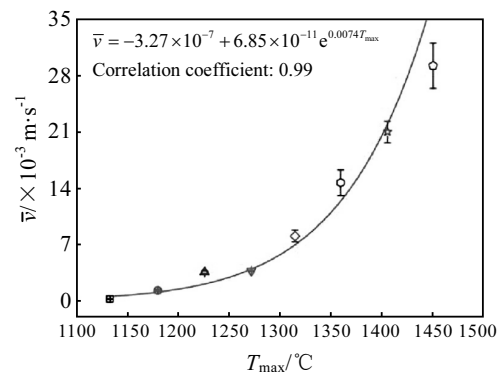


图 2 CMAS 熔体的平均铺展速率随温度的变化曲线

Fig.2 Mean spreading velocity of the molten CMAS as a function of the temperature<sup>[25]</sup>

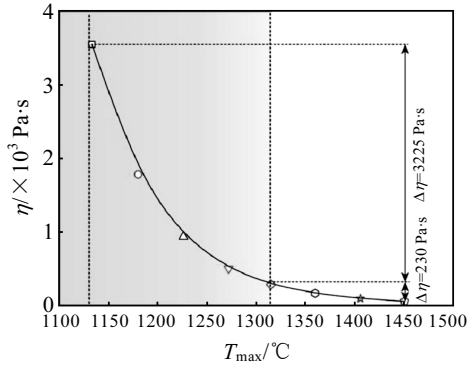


图 3 CMAS 熔体的粘度随温度的变化曲线

Fig.3 Viscosity of molten CMAS as a function of the temperature<sup>[25]</sup>

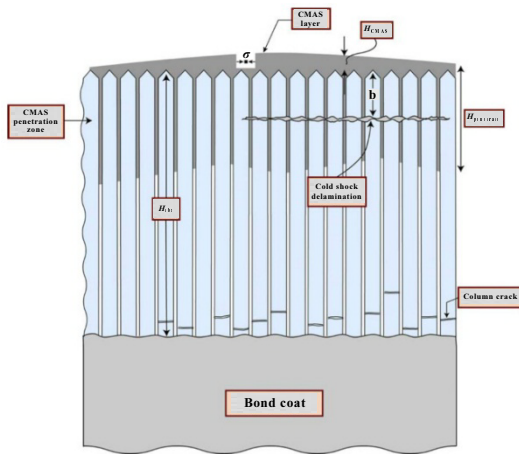


图 4 高温下 CMAS 熔体渗入、破坏 EB-PVD YSZ 涂层示意图

Fig.4 Schematic of the infiltration and attack of CMAS melts towards EB-PVD YSZ TBCs<sup>[27]</sup>

断裂韧性等性能；(2) CMAS 的渗入堵塞了涂层中的孔隙、微裂纹和柱状晶间隙，降低了涂层的应变容限，在热循环时会产生很大的内应力，使涂层发生破坏失效；(3) YSZ 中的  $Y_2O_3$  会与 CMAS 发生反应、溶解，使亚稳态的  $t'$ - $ZrO_2$  逐渐向  $m$ - $ZrO_2$  转变，产生 3%~5% 的体积膨胀，加速涂层失效；(4) 在 CMAS 与 YSZ 的接触界面上，YSZ 首先会溶于 CMAS 熔体中，随后会析出严重缺 Y 的  $ZrO_2$  颗粒，形成网状疏松的结构。综上所述，CMAS 对 YSZ 涂层的影响比较复杂，既会改变涂层的物理性能，又会与 YSZ 发生热化学作用。

#### 4 热障涂层抗 CMAS 附着及腐蚀研究

目前,CMAS 的腐蚀防护措施主要有以下 3 种方式:

(1) 改变原有热障涂层的成分<sup>[21,34]</sup>,即加入能够促进 CMAS 结晶化的物质,阻碍 CMAS 熔体渗入,降低 CMAS 熔体的流动性,使 YSZ 陶瓷层得到防护。

Aygun 等<sup>[21]</sup>采用溶液先驱体等离子喷涂制备了固溶 YSZ+Al+Ti 的涂层,Al 的添加可以让 CMAS 从难结晶的相区转移到容易结晶的相区,而 Ti 作为形核剂,可以促进 CMAS 相转变,该涂层具有一定的抗 CMAS 性能。

(2) 化学防护<sup>[35-39]</sup>,即在热障涂层表面再涂覆一层化学保护层,该防护层材料与 CMAS 反应后形成致密新相,阻碍 CMAS 继续向涂层内部渗入。

Mohan 等<sup>[35]</sup>利用电泳沉积制备了  $Al_2O_3$  涂层,经过烧结处理后形成了 CMAS 防护层, $Al_2O_3$  与 CMAS 反应后主要生成高熔点的钙长石相,可以阻挡 CMAS 渗入。Song 等<sup>[36]</sup>利用磁控溅射在 YSZ 涂层表面首先沉积了一层 Al 的薄膜,通过真空热处理使 Al 与 YSZ 涂层中的 O 发生原位反应,形成  $Al_2O_3$  层,对 CMAS 可以起到阻挡作用。Krämer 等<sup>[37]</sup>采用 EB-PVD 技术制备出  $Gd_2Zr_2O_7$  涂层,高温下  $Gd_2Zr_2O_7$  与 CMAS 形成约 6  $\mu m$  的反应层,反应层的主要成分为  $Gd_8Ca_2(SiO_4)_6O_2$  和含微量 Gd、Ca 的  $ZrO_2$  固溶体,反应产物填满柱状晶的间隙,从而抑制 CMAS 的渗入和反应。Gao 等<sup>[38]</sup>采用 APS 在 YSZ 涂层上沉积了一层  $La_2Ce_2O_7$  作为第二陶瓷层。研究发现,在 1250  $^\circ C$  下  $La_2Ce_2O_7$  可作为牺牲层与 CMAS 反应生成  $CeO_2$  和  $Ca_2(La_xCe_{1-x})_8(SiO_4)_6O_{6-4x}$  结晶相,有效阻止了 CMAS 的持续渗透。

YSZ+Al+Ti 涂层及  $Gd_2Zr_2O_7$  涂层减缓、阻碍 CMAS 熔体渗透热障涂层的示意图如图 5 所示。

(3) 抗 CMAS 附着改性<sup>[40-42]</sup>,即通过调控热障涂层微观结构或在原有涂层表面涂覆 CMAS 隔绝层,降低熔融 CMAS 在涂层表面的附着能力,延缓甚至抵抗熔融 CMAS 向涂层内部渗入

Wang 等<sup>[40]</sup>采用电镀法在 YSZ 涂层表面沉积了厚度低于 10  $\mu m$  的 Pt 涂层,提高了 CMAS 在涂层表面的接触角,高温下 CMAS 没有向涂层内部渗入,结果如图 6 所示。

Darolia 等<sup>[41]</sup>采用密封剂或抵抗熔融 CMAS 润湿的 Pt 类金属来提高 YSZ 涂层抗 CMAS 附着和腐蚀性。Naraparaju 等<sup>[32]</sup>通过调控涂层微观结构,制备出了一种多羽毛状的 YSZ 涂层。与普通 EB-PVD YSZ 涂层相比,多羽毛状 YSZ 涂层柱状晶(垂直基体方向)的直径缩短,二次枝晶的深度加长。当 CMAS 熔体沿柱状晶晶间和内部枝晶间的缝隙渗入时,由于枝晶间间隙的方向倾斜于熔融 CMAS 的主要流动方向,因而

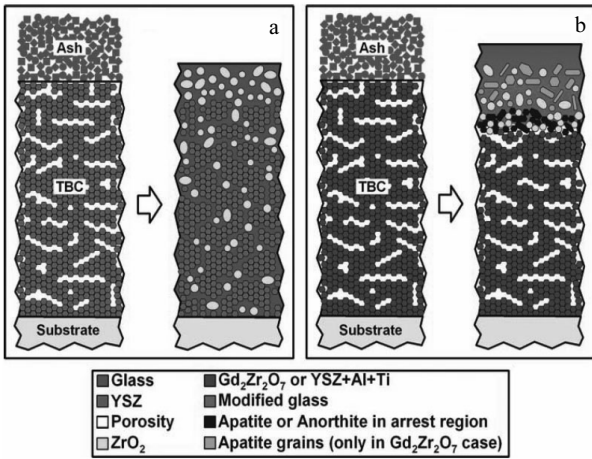


图 5 CMAS 腐蚀前后 YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 或 YSZ+Al+Ti 涂层的截面示意图

Fig.5 Schematic diagrams of cross-sections of coatings before and after CMAS heat-treatment: (a) YSZ and (b) Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> or YSZ+Al+Ti TBCs<sup>[39]</sup>

可以起到分流 CMAS 的作用，一定程度上降低了 CMAS 在垂直基体方向上的渗透速率，缓解了 CMAS 对 YSZ 涂层的渗透和破坏。

Guo 等<sup>[42]</sup>利用新型的等离子蒸发沉积技术制备出了具有微纳米分级结构的 YSZ 涂层。该涂层的形貌及分级结构如图 7 所示。从图 7e 中可以观察到 3 μm 的突起（分别以 A、B、C 表示），而微米突起是由纳米级的突触构成的（如图 7f 所示）。

Guo 等<sup>[42]</sup>研究了典型成分的 CMAS（成分如表 1 所示）在新型 PS-PVD, APS 及 EB-PVD YSZ 涂层表面的润湿行为，结果如图 8 所示。

从图中可以看出，当保温时间达到 180±30 s 时，

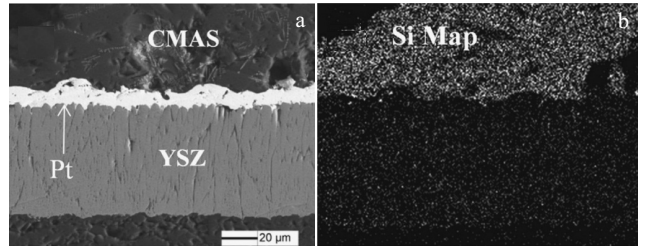


图 6 CMAS 在 1250 °C 处理 4 h 后 Pt/YSZ 涂层的截面形貌及 Si 元素面分布

Fig.6 Cross-section image of YSZ coating with Pt film after CMAS heat-treatment at 1250 °C for 4 h (a) and the corresponding Si elemental mapping (b)<sup>[40]</sup>

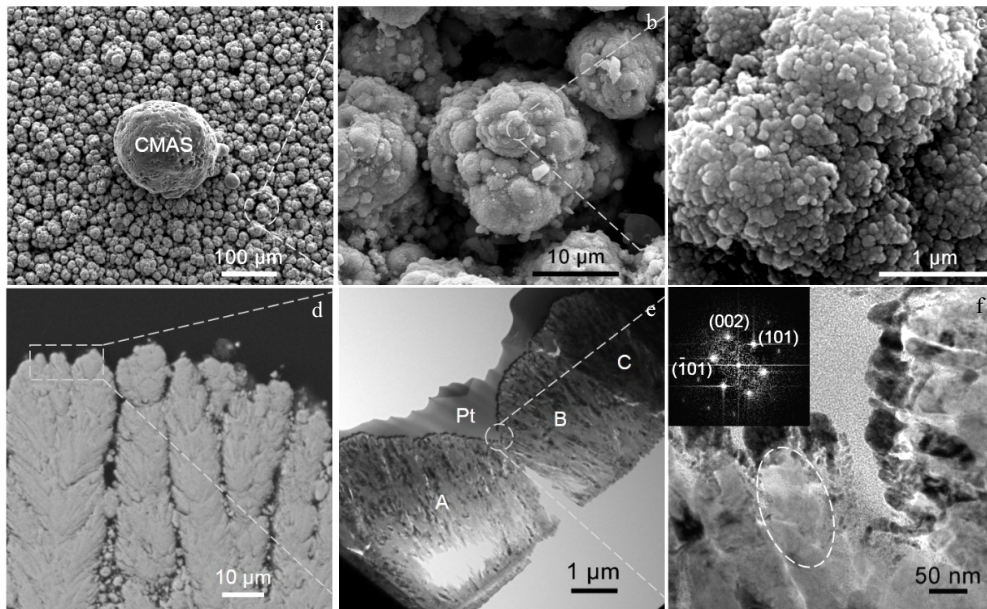


图 7 CMAS 热处理后 PS-PVD YSZ 涂层的表征：1250 °C 下 CMAS 腐蚀 4 h 后涂层表面形貌；微米级突起表面形貌；纳米突起高倍形貌；涂层截面形貌；微米突起（A, B, C）的 TEM 明场像；纳米级突起的 TEM 形貌及傅里叶变换图

Fig.7 Characterization of PS-PVD YSZ TBC surface after CMAS heat-treatment: SEM surface morphology of TBC after interaction with CMAS at 1250 °C for 4 h (a), magnified micro-protuberances (b), and further enlarged nano-protuberances (c); TEM image of cross-sectional of PS-PVD YSZ TBC (d); TEM bright-field image of micro-protuberances marked from "A" "B" "C" (e), and enlarged nano-protuberances (f)<sup>[42]</sup>

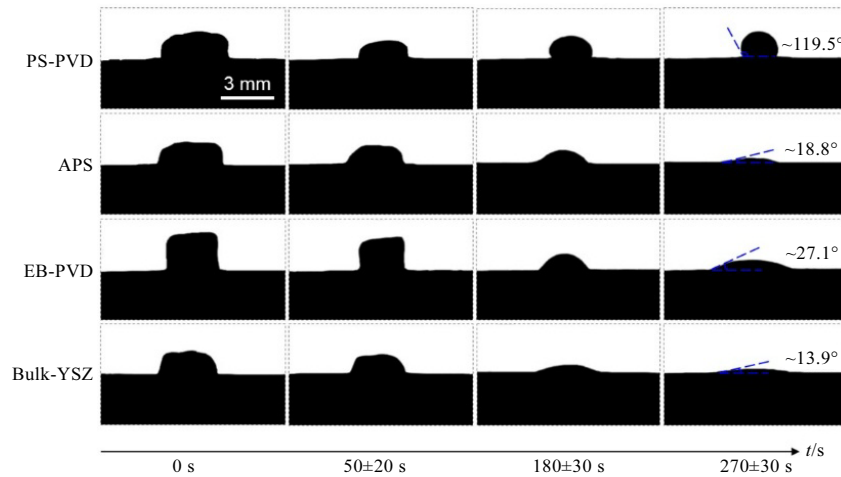


图 8 1250 °C 下 CMAS 在涂层表面熔化的动态过程

Fig.8 Melting dynamic processes of CMAS onto substrates at 1250 °C<sup>[42]</sup>

CMAS 样品已经完全熔化，并在 APS、EB-PVD YSZ 涂层及 YSZ 块材表面发生部分铺展。当保温时间延长至 270±30 s 时，CMAS 熔滴在 APS、EB-PVD YSZ 涂层及 YSZ 块材表面完全铺展。然而，CMAS 在新型 PS-PVD YSZ 涂层表面仍然保持球状熔体且没有浸润涂层表面。通过实际测量，CMAS 熔滴在新型 PS-PVD YSZ 涂层表面的静态接触角约为 119.5°，明显高于 CMAS 在其他 2 种 YSZ 涂层(APS YSZ 约 18.8°;EB-PVD YSZ 约 27.1°)及 YSZ 块材(约 13.9°)表面的接触角。该结果一方面说明 PS-PVD 微纳米复合结构 YSZ 涂层具有排斥

CMAS 熔体浸润表面的特性，另一方面也证实涂层微结构的不同确实会造成 CMAS 表面润湿性的差异。

为了进一步验证 PS-PVD 微纳米复合结构 YSZ 涂层在抵抗高温 CMAS 腐蚀方面的有效性，该研究设计了 CMAS 浸润、渗透不同结构 YSZ 涂层的实验。具体实验过程如下：将一定量的 CMAS 悬浊液均匀涂覆在 PS-PVD，APS 和 EB-PVD 涂层表面，使涂层表面的 CMAS 浓度约为 20 mg/cm<sup>2</sup>，随后将其倾斜一定角度(与水平面夹角约 10°)放入高温炉中，升温至 1250 °C 后保温 4 h。结果如图 9 所示。与 APS 和 EB-PVD YSZ

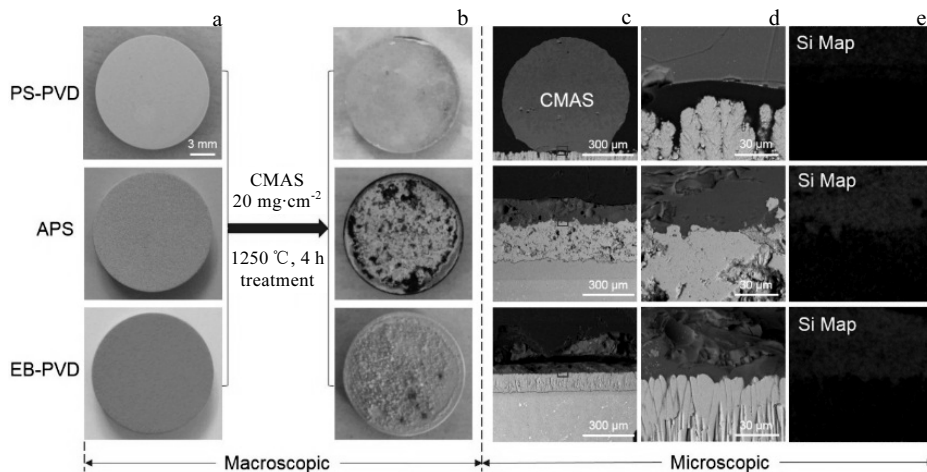


图 9 CMAS 在不同结构 YSZ 涂层表面的润湿性和渗透状态：CMAS 热处理前及处理后 PS-PVD，APS，EB-PVD YSZ 涂层的宏观照片；CMAS 处理后不同结构涂层的截面微观形貌；Si 元素面分布图

Fig.9 Wettability and infiltration state of molten CMAS on various TBC surfaces: photographs of PS-PVD, APS and EB-PVD YSZ TBCs before (a) and after (b) CMAS heat treatment at 1250 °C for 4 h; SEM images of cross-section of various TBCs after interaction with CMAS at 1250 °C for 4 h (c) and enlarged regions of CMAS/TBC interfaces marked in Fig.9c (d), Si elemental EDS maps corresponding to the SEM images in Fig.9d (e)<sup>[42]</sup>

涂层相比, 在新型 PS-PVD YSZ 涂层表面几乎没有发现 CMAS 沉积的现象。从涂层截面微观形貌上看, 除了少数类似球状的 CMAS 残留在微纳米结构表面外, 绝大部分 CMAS 已经消失不见。说明高温 CMAS 熔体可以在 PS-PVD YSZ 涂层表面滚动后离开涂层, 而不是与涂层发生粘连后渗透、腐蚀涂层。因而, 高温下 CMAS 熔滴在 PS-PVD YSZ 涂层表面的滚动角较小 ( $<10^\circ$ )。同时, 根据 Si 元素能谱分析, 高温下 CMAS 并没有沿着 PS-PVD YSZ 涂层的柱状晶间隙渗入涂层内部。此外, 从图 7a~7c 可以看出, 涂层经过  $1250^\circ\text{C}$ , 4 h 的 CMAS 处理后, 表面的微纳米结构依然存在。该实验结果说明 PS-PVD 微纳米复合结构 YSZ 涂层具有抵抗高温 CMAS 熔体浸润、渗透涂层的性能。该涂层在高温 CMAS 作用下的长时结构稳定性还需要进一步研究。

该研究分析了 PS-PVD YSZ 涂层微观结构和高温 CMAS 熔体接触角之间的关系。由于熔融 CMAS 类似水滴在荷叶表面一样悬浮在涂层表面的微纳米复合结构上, 接触角  $\theta$  在分级结构上的递归关系可表示为<sup>[43-45]</sup>:

$$\cos\theta_{n+1} = (1 - \omega_n)\cos\theta_n - \omega_n$$

其中,  $n$  为分级结构的级数,  $\omega$  是液体悬停在表面结构上的面积分数。显然, 分级数  $n$  越大, 表面结构的尺度差异也越大。值得注意的是, 上述公式是单调递减的, 由于  $\cos\theta_n$  的值介于 -1 和 1 之间, 因此  $\cos\theta_n$  必然收敛。在公式中  $\cos\theta_n$  的极限是 1, 代表接触角的极限为  $180^\circ$ 。其中, YSZ 材料对熔融 CMAS 的本征接触角  $\theta_0$  约为  $13.9^\circ$ 。随着  $n$  值的增加, 熔融 CMAS 在 YSZ 涂层表面的接触角也相应地增大, 从而在理论上说明 PS-PVD 微纳米分级结构 YSZ 涂层具备排斥高温 CMAS 熔滴的性能。此外, 高温下 CMAS 熔滴悬停在微纳米分级结构上, 有助于降低 CMAS 与涂层表面之间的接触面积, 减小粘附力, 便于 CMAS 熔体发生滚动后离开涂层表面, 如图 10 所示。

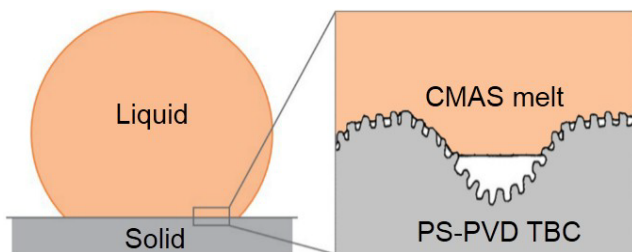


图 10 PS-PVD 微纳米分级结构 YSZ 涂层表面排斥 CMAS 熔体的示意图

Fig.10 Illustration of liquid repellency on solid surface with micro-nano protuberances<sup>[42]</sup>

## 5 结 语

本文针对新型等离子蒸发沉积热障涂层, 综述了热障涂层在抗 CMAS 附着、渗入和腐蚀的最新研究成果, 梳理了目前热障涂层抗 CMAS 侵蚀研究的发展现状。未来相关研究主要集中在以下几个方向:

1) 进一步研究微纳复合结构热障涂层的抗 CMAS 附着机理。

2) 由于在不同环境下 CMAS 的成分存在差异, 可能会影响涂层的抗 CMAS 附着效果。因此, 涂层抵抗不同成分 CMAS 附着的普适性是今后抗 CMAS 附着腐蚀的研究方向之一。

3) 涂层在 CMAS 作用下的长时高温结构稳定性也是需要关注和研究的重点。

## 参考文献 References

- [1] Pature N P, Gell M, Jordan E H. *Science*[J], 2002, 296(4): 280
- [2] Pature N P. *Nature Materials*[J], 2016, 15: 804
- [3] Evans A G, Mumm D R, Hutchinson J W *et al. Prog Mater Sci* [J], 2001, 46(5): 505
- [4] Xu Huibin(徐惠彬), Gong Shengkai(宫声凯), Liu Fushun(刘福顺). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2000, 21(1): 7
- [5] Guo Hongbo(郭洪波), Xu Huibin(徐惠彬), Gong Shengkai(宫声凯) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(2): 151
- [6] Flores Renteria A, Schulz U, Raetzer-Scheibe H J *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2006, 201: 2611
- [7] Zhou Jing(周 静), Zhang Longping(张隆平), Wu Hulin(吴护林). *Surface Technology*(表面技术)[J], 2004, 33(2): 7
- [8] Song P, Naumenko D, Vassen R *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 221: 207
- [9] Miller R A. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 1997, 6(1): 35
- [10] Hospach A, Mauer G, Vaßen R *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2011, 20(1-2): 116
- [11] Gindrat M, Hohle H M, Niessen K V *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2011, 20(4): 882
- [12] Niessen K V, Gindrat M, Refke A. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2010, 19(1-2): 502
- [13] Miao Wenhui(苗文辉), Wang Lu(王 璐), Guo Hongbo(郭洪波) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(复合材料学报)[J], 2012, 5: 76
- [14] Lou Siyu(楼思余), Shan Xiao(单 萧), Zhao Xiaofeng(赵晓峰). *Surface Technology*(表面技术)[J], 2018, 47(2): 208
- [15] Levi C G, Hutchinson J W. *MRS Bulletin*[J], 2012, 37: 932
- [16] Mauer G. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*[J], 2014,

- 34(5): 1171
- [17] Harder B J, Zhu D. *Advanced Ceramic Coatings and Materials for Extreme Environments*[J], 2011, 32(1): 73
- [18] Goral M, Kotowski S, Nowotnik A *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 237: 51
- [19] Niessen K V, Gindrat M. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2011, 20(4): 736
- [20] Mauer G, Hospach A, Zotov N *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2013, 22(2-3): 83
- [21] Aygun A, Vasiliev A L, Padture N P *et al. Acta Materialia*[J], 2007, 55(20): 6734
- [22] Krämer S, Yang J, Levi C G *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 2006, 89(10): 3167
- [23] Smialek J L, Archer F A, Garlick R G. *Journal of Materials* [J], 1994, 46(12): 39
- [24] Song W J, Hess K U, Damby D E *et al. Geophysical Research Letters*[J], 2014, 41: 2326
- [25] Song W J, Lavalley Y, Wadsworth F B *et al. The Journal of Physical Chemistry Letters*[J], 2017, 8: 1878
- [26] Zhang B P, Song W J, Guo H B. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2018, 38(10): 3546
- [27] Mercer C, Faulhaber S, Evans A G *et al. Acta Materialia*[J], 2005, 53(4): 1029
- [28] Stott F H, De-wet D J. *Taylor R Materials Research Bulletin* [J], 1994, 19: 46
- [29] Li L, Hitchman N, Knapp J. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2010, 19(1-2): 148
- [30] Krämer S, Faulhaber S, Chambers M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 490(1-2): 26
- [31] Wu J, Guo H B, Gao Y Z *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2011, 31(10): 1881
- [32] Naraparaju R, Huttermann M, Schulz U *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2017, 37(1): 261
- [33] Krause A R, Garces H F, Dwivedi G *et al. Acta Materialia*[J], 2016, 105: 355
- [34] Bacos P M, Dorcaux J M, Landais S *et al. High Temperature Materials*[J], 2011, AL03-04(3): 1
- [35] Mohan P, Yao B, Patterson T *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2009, 204(6-7): 797
- [36] Song J B, Zhang X F, Deng C M *et al. Ceramics International*[J], 2016, 42: 3163
- [37] Krämer S, Yang J, Levi C G. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2008, 91(2): 576
- [38] Gao L H, Guo H B, Gong S K *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2014, 34(10): 2553
- [39] Drexler J M, Gledhill A D, Shinoda K *et al. Advanced Materials*[J], 2011, 23(21): 2419
- [40] Wang L, Guo L, Li Z M *et al. Ceramics International*[J], 2015, 41: 11 662
- [41] Darolia R, Nagaraj B A. *US Patent*, 6720038[P], 2004
- [42] Zhang B P, Song W J, Wei L L *et al. Scripta Materialia*[J], 2019, 163: 71
- [43] Herminghaus S. *Europhysics Letters*[J], 2000, 52: 165
- [44] Koch K, Bhushan B, Jung Y C *et al. Soft Matter*[J], 2009, 5(7): 1386
- [45] Bhushan B, Jung Y C, Koch K. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*[J], 2009, 367(1894): 1631

## Research Status on Plasma Spray-Physical Vapor Deposited Thermal Barrier Coatings Against the Adhesion of Molten CMAS Deposits

Zhang Baopeng, Yu Xinmin, Liu Wei, Huo Pengfei, Jin Xin

(Aerospace Institute of Advanced Materials & Processing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Due to the increasing demand for higher operating temperatures in gas turbine engines, a reliability problem has emerged on thermal barrier coatings (TBCs) by the attack of calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) deposits. These contaminants yield glassy melts adhering to the TBC surface at high temperatures, followed by infiltrating and interacting into/with TBC, which result in its severe degradation and premature failure. The adhesion of molten CMAS and the protection methods are hot and difficult points in the field of thermal barrier coatings. In this paper, the latest research results on CMAS adhesion, infiltration and corrosion resistance of plasma spray-physical vapor deposited TBCs were reviewed. The approaches for developing corrosion-resistant TBCs were proposed.

**Key words:** plasma spray-physical vapor deposition; thermal barrier coatings; CMAS; YSZ; adhesion

Corresponding author: Zhang Baopeng, Ph. D., Aerospace Institute of Advanced Materials & Processing Technology, Beijing 100074, P. R. China, Tel: 0086-10-68743595, E-mail: bhzbp1129@buaa.edu.cn