

专题——热障涂层新材料、制备技术及性能评价

电子束物理气相沉积制备热障涂层研究进展

孙健^{1,2}, 刘书彬^{1,2}, 李伟^{1,2}, 姜肃猛¹, 宫骏^{1,2}, 孙超^{1,2}

(1.中国科学院金属研究所 材料表面工程研究部, 沈阳 110016; 2. 中国科学技术大学
材料科学与工程学院, 沈阳 110016)

摘要: 介绍了电子束物理气相沉积设备的主要组成、工作原理和电子束物理气相沉积热障涂层的结构特点, 并重点论述了工件转速、工件温度、靶材蒸汽入射角度、工件表面的粗糙度、粘结层预氧化、改性粘结层和双层陶瓷层等对电子束物理气相沉积热障涂层性能的影响。

关键词: 航空发动机; 电子束物理气相沉积; 热障涂层; 粘结层; 工件转速; 工件温度

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.01.001

中图分类号: TG178

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)01-0001-06

Research Progress of Thermal Barrier Coating Prepared by Electron Beam Physical Vapor Deposition

SUN Jian^{1,2}, LIU Shu-bin^{1,2}, LI Wei^{1,2}, JIANG Su-meng¹, GONG Jun^{1,2}, SUN Chao^{1,2}

(1. Research Department of Material Surface Engineering, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: The main components, working principle of electron beam physical vapor deposition equipment and the microstructures of thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition were briefly introduced. The effect of substrate rotation speed, substrate temperature, vapor incident angle, substrate roughness, bond coating pre-oxidation, modified bond coating and double-ceramic layer on the performance of thermal barrier coatings of electron beam physical vapor deposition was discussed.

KEY WORDS: aeroengine; electron beam physical vapor deposition; thermal barrier coating; bond coating; substrate rotation speed; substrate temperature

随着航空发动机向着高推重比方向发展, 燃烧室的工作温度不断提高, 发动机叶片面临更加苛刻的服役环境, 对于发动机叶片性能的要求越来越严格。镍基高温合金叶片的最高使用温度只有 1100 °C, 已经无法达到现代航空发动机的使用要求。因此除了改进高温合金叶片的冷却系统以外, 在叶片表面沉积一层热障涂层 (TBCs, Thermal Barrier Coatings), 可以有效地降低高温合金叶片的温度^[1-4]。

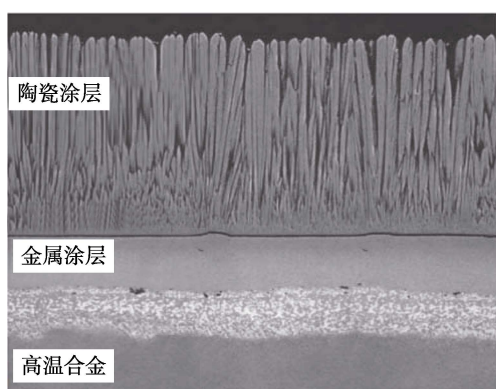
热障涂层具有较低的热导率、优异的抗氧化和抗热腐蚀性能, 目前已经被广泛应用于航空发动机的热端部件。典型的 TBCs 主要有以下两部分组成: 金属粘结层 (BC, Bond Coating), 通常为 MCrAlY、NiAl 和 PtAl 等涂层; 陶瓷层 (TC, Top Coating), 一般为 7%~8% Y₂O₃ 稳定的 ZrO₂ (YSZ), 在高温服役条件下, 氧气通过 TC 到达 BC 表面形成一层热氧化层 (TGO, Thermally Grown Oxide)^[5-6]。等离子喷涂

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-09-04

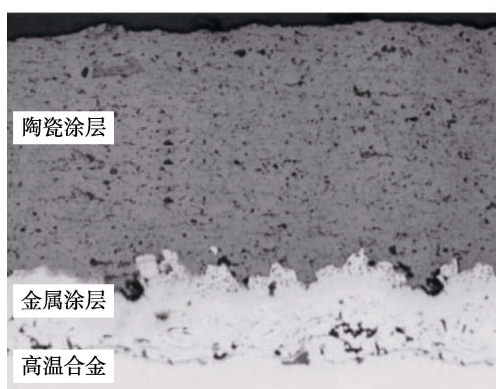
作者简介: 孙健 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高温防护涂层。

通讯作者: 宫骏 (1964—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高温防护涂层。

(APS) 和电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 是制备热障涂层的常用方法。除此之外, 等离子物理气相沉积 (PS-PVD) 是在等离子喷涂和物理气相沉积基础上发展起来的制备热障涂层的新方法, 对于 PS-PVD 的研究在国内外仍处起步阶段, 一些学者对 PS-PVD 制备的热障涂层进行了相关的研究^[7-11]。图 1^[12]为采用 EB-PVD 和 APS 方法制备的热障涂层的横截面形貌。EB-PVD 制备的 TBCs 为柱状晶结构, APS 制备的 TBCs 为片层状结构。根据报道, EB-PVD 制备的 TBCs 的抗脱落寿命比 APS 制备的 TBCs 提高约 7 倍^[13]。



a EB-PVD制备热障涂层



b APS制备热障涂层

图1 热障涂层截面形貌

EB-PVD 技术具有以下特点^[14]: 1) 蒸发速率较高, 随着高功率电子枪的出现, 对材料的加工能够达到较高的温度, 几乎可以蒸发所有物质, 为制备任意组分的涂层提供可能; 2) 电子束电流大小易于调节、束斑尺寸和位置易于控制, 有利于精确控制涂层的厚度和均匀性; 3) 使用电子束加热工件时, 工件升温速率快, 能迅速到达最优沉积温度; 4) 在真空条件下制备, 可以避免涂层被污染和氧化, 从而得到质量较高的涂层; 5) 可以采用多电子枪、多坩埚蒸镀, 制备不同体系的多层结构或者梯度结构的涂层; 6) 与其他蒸镀方法相比, 蒸发速率和沉积速率高, 而且涂层与基体之间的结合力高。

1 EB-PVD 设备的组成和基本工作原理

1.1 主真空室

主真空室是 EB-PVD 设备的主要组成部分, 位于 EB-PVD 设备的中间位置。在主真空室上面是电子枪室, 副真空室位于主真空室的一侧, 在主真空室下面是放置靶材的水冷铜坩埚和靶材升降机构。EB-PVD 设备的主要组成部分如图 2 所示^[12, 15]。

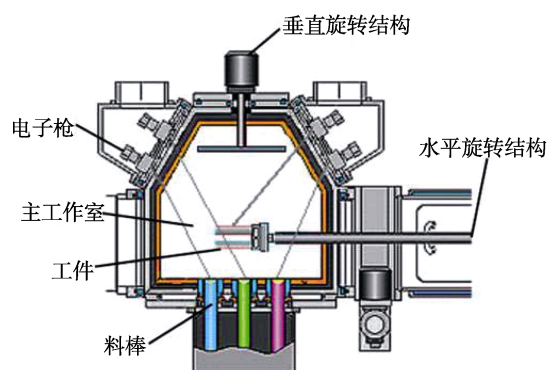


图2 EB-PVD 设备结构

涂层沉积的整个过程在主真空室中完成。工件从主真空室一侧的副真空室经过插板阀由送样机构运送到真空室的靶材上方。工件由水平旋转机构带动进行转动, 使电子束能够均匀地轰击到工件表面, 且使工件各个面受热均匀, 并沉积上涂层。随着沉积的进行, 可以通过靶材的升降和自转机构来补充靶材的消耗。

1.2 电子枪

电子枪是 EB-PVD 设备最核心的部件, 其主要作用是产生电子束对靶材和工件进行加热。电子枪主要由阴极、聚焦系统和偏转线圈组成。它工作时, 阴极发热发射大量电子, 电子在高压静电场中受到加速, 然后再经过聚焦系统进行聚焦, 形成能量密度极高的电子束。高能电子束偏转一定角度后, 轰击水冷铜坩埚中的靶材或者材料表面。

2 EB-PVD 热障涂层的主要影响因素

2.1 工件转速

Wada 等^[16]采用 EB-PVD 方法制备了热障涂层, 并研究了工件转速对涂层晶粒取向、表面形貌和截面形貌的影响。结果表明, 工件的转速对涂层的结构和形貌具有很大的影响: 当工件静止时, 形成的涂层比较致密, 而且不是柱状结构, 涂层的择优取向为 (111) 方向; 当工件转速为 1 r/min 时, 涂层为波纹形的柱

状结构, 表面为棱锥形结构, 择优取向为 (200) 方向; 当工件转速提高到 10 r/min 时, 涂层为典型的柱状结构, 表面也为棱锥形结构, 择优取向为 (200) 方向。

Jang 等^[17]也研究了工件转速对 YSZ 涂层的结构和表面粗糙度的影响。结果表明, 随着工件转速的提高, 涂层的截面形貌由致密的柱状结构变成羽毛状的柱状结构, 而且柱状晶的宽度、涂层的表面粗糙度以及孔隙率随着工件转速的提高而增加。当转速由 0 r/min 增加到 20 r/min 时, 在距离基体 200 μm 处测定柱状晶的宽度, 柱状晶的宽度由 4 μm 增加到 6 μm ; 涂层表面的粗糙度由 2 μm 增加到 7 μm ; 涂层的孔隙率由 20% 增加到 26%。由于工件旋转引起的靶材蒸汽入射角连续变化而产生的阴影效应是造成以上结果的主要原因。

Liu 等^[18]在不同工件转速条件下制备了 YSZ 涂层, 并测定了涂层的密度和热导率。随着工件转速的提高, 涂层的密度和热导率都减小。当转速由 0 r/min 增加到 20 r/min 时, 涂层密度由 5.5 g/cm^3 降低到 4.75 g/cm^3 ; 涂层的热导率由 2.0 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 降到 1.37 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。Jang 等^[19]也发现, 在工件旋转条件下所制备 YSZ 涂层的热导率比在工件静止条件下小。

2.2 工件温度

工件温度对涂层的结构有重要的影响, 蒸发靶材粒子的动能来自于粒子脱离靶材熔池时的初始动能, 涂层和工件的结合力主要取决于工件的温度。Movchan 等^[20]研究了工件温度对涂层结构的影响, 并且提出了工件温度与涂层结构的区间模型。 T_s 为工件的温度, T_m 为靶材的熔点, 根据 T_s 和 T_m 比值的不同, 涂层的结构分为三个区间。当 $T_s/T_m < 0.3$ 时, 工件温度偏低, 靶材原子的扩散能力差, 形成较粗大的圆锥状晶粒结构; 当 $0.3 < T_s/T_m < 0.5$ 时, 靶材原子的扩散能力提高, 形成相互平行的柱状晶结构; 当 $T_s/T_m > 0.5$ 时, 靶材原子的体扩散为主导, 所制备的涂层为等轴晶结构。

Sohn 等^[21]在不同工件温度条件下制备了 YSZ 涂层, 并且研究了温度对涂层晶粒结构的影响。当温度分别为 1173、1373、1403 K 时, 涂层的择优取向分别为 (111)、(311) 和 (200) 方向。由于以上温度的 T_s/T_m 都在 0.3~0.5 之间, 因此所得到的涂层都为柱状晶结构, 但随着温度的升高, 柱状晶的尺寸变大。温度为 1173 K 时, 柱状晶的直径为 5~7 μm ; 温度为 1373 K 时, 柱状晶的直径为 8~10 μm ; 温度为 1403 K 时, 柱状晶的直径为 10~12 μm 。Renteria 等^[22]在工件温度为 1123 K 条件下制备了 YSZ 涂层, 涂层为典型的羽毛形柱状晶结构。笔者课题组在工件温度为 1173 K 条件下制备的 YSZ 涂层的截面形貌如图 3 所示, 也为典型的羽毛形柱状晶结构。

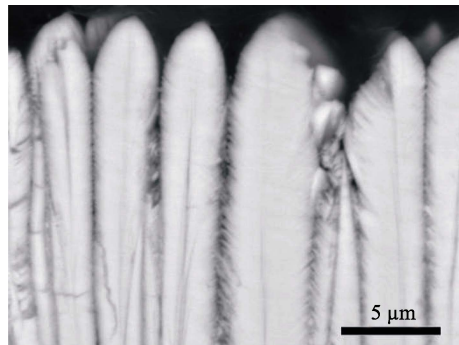


图 3 采用 EB-PVD 制备的 YSZ 涂层截面形貌

2.3 靶材蒸汽入射角度

在涂层沉积的过程中, 靶材蒸汽通常沿着直线从熔池表面自由运动到工件表面形核沉积, 靶材蒸汽的入射方向和工件表面法线方向的夹角定义为入射角 α 。涂层柱状晶生长的方向和工件表面法线方向的夹角定义为生长角 b 。Nieuwenhuizen 等^[23]研究了 α 和 b 之间的关系, 并提出了切线定律: $2\tan b = \tan \alpha$ 。当蒸发的靶材原子在工件的某些位置优先形核并形成柱状晶后, 会挡住靶材蒸汽原子, 使其无法到达工件中某些区域, 在生长表面上被遮蔽的区域就会形成空位或者空隙, 这种现象叫做阴影效应。

Wada 等^[24]分别在靶材蒸汽的入射角为 $0^\circ \sim 80^\circ$ 条件下制备了 YSZ 涂层, 研究了蒸汽入射角对涂层结构的影响。在其他沉积参数相同的条件下, 入射角由 0° 增加到 80° 时, 涂层的厚度由 400 μm 降低到 70 μm ; 柱状晶的倾斜角度不断增大, 从 0° 增加到 55° 。当入射角大于 50° 时, 涂层的孔隙率迅速增大。最终入射角为 80° 时, 涂层的孔隙率接近 60%, 而且柱状孔隙的尺寸也受到入射角的影响。随着入射角的增大, 阴影效应增强, 柱状孔隙的尺寸增大^[25-26]。在沉积的过程中当工件处于主真空室的不同位置时, 也会造成靶材蒸汽入射角的改变, 并对涂层的结构产生影响^[27]。

2.4 工件表面的粗糙度

工件表面的粗糙度会影响 TBCs 与工件之间的结合强度, 从而影响 TBCs 的使用寿命。TBCs 最重要的作用就是为发动机热端部件提供保护。在其服役过程中, 各种因素相互作用导致其失效脱落, 其中高温氧化是造成 TBCs 失效的原因之一^[28]。Zhang 等^[29]研究了粘结层表面的粗糙度对 TBCs 高温循环氧化性能的影响。当粘结层表面的粗糙度分别为 3.76、1.57、0.82 μm 时, 对应的陶瓷顶层的粗糙度分别为 2.93、1.71、1.51 μm , 由于柱状晶的生长使得陶瓷顶层的粗糙度与粘结层不一致。循环氧化结果表明, 随着粘结层粗糙度的增加, TBCs 的循环氧化寿命降低, 而且粗糙度的增加引起了陶瓷顶层与粘结层之间结合力降低。

2.5 粘结层预氧化

在高温氧化过程中,热障涂层中TGO的厚度会不断增加,这会引起陶瓷顶层和粘结层界面的体积膨胀,导致热应力增加,并且产生褶皱。同时由于陶瓷顶层和TGO的热膨胀系数不匹配,会使陶瓷顶层发生脱落^[30-31]。Tolpygo等^[32]首先在1150℃条件下对粘结层进行预氧化处理,使其表面形成致密的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,然后沉积陶瓷顶层。循环氧化实验结果表明,预氧化处理的粘结层的褶皱程度明显低于未预氧化的粘结层,而且粘结层经过预氧化处理的热障涂层,其循环氧化寿命是未经过预氧化处理的2~3倍。

Matsumoto等^[33]也研究了预氧化处理对TBCs循环氧化性能的影响。他们分别在不同的氧气分压条件下对粘结层进行预氧化处理,当氧气分压为 10^{-12} ~ 10^{-9} 时,粘结层表面的氧化膜为致密的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,并且对应的TBCs的循环氧化寿命比未经过预氧化处理和其他氧分压条件下预处理的TBCs的寿命长。在合适的氧分压条件下进行预氧化处理,初期TGO的晶粒尺寸较大,使得氧原子向内扩散和阳离子向外扩散具有相对较小的晶界面积,最终在循环氧化过程中,TGO的生长速率较慢,TBCs的循环氧化寿命得到提高^[34]。

2.6 改性粘结层

在粘结层中添加其他元素,例如Pt、Hf、Zr等可以提高粘结层的抗高温氧化性能,从而提高TBCs的性能。Xu等^[35]用电镀和化学气相沉积相结合制备的Pt改性NiAl涂层作为粘结层,然后采用EB-PVD沉积陶瓷顶层,并且研究了TBCs的失效机制。Pt改性NiAl涂层表面为典型的网状结构,在循环氧化过程中,选择性氧化发生在凸起的晶界处,在TGO和粘结层界面处容易形成空穴和发生开裂,最终导致陶瓷顶层的脱落主要发生在TGO和粘结层的界面处。Zhou等^[36]也发现,以化学气相沉积制备的Pt改性NiAl涂层作为粘结层的TBCs,在循环氧化之后,陶瓷顶层的脱落主要发生在TGO和粘结层的界面处。

Munawar等^[37]采用Hf改性的NiCoCrAlY涂层作为粘结层,循环氧化结果表明,与普通的NiCoCrAlY涂层作为粘结层的TBCs相比较,Hf质量比为0.6%的NiCoCrAlY涂层作为粘结层的TBCs的循环氧化寿命有了极大改善,提高了约10倍。Hf改性的粘结层在循环氧化初期迅速形成嵌入到粘结层内部的链状被氧化铝包裹的钪的氧化物。Hf对O具有较强的亲和力,在氧化过程中Hf主动向TGO和粘结层的界面扩散。另外,Hf提高了TGO和粘结层之间的结合力,从而提高TBCs的循环氧化寿命。Saldana等^[38]研究了以Zr改性的NiAlCr为粘结层的TBCs的循环氧化性能,Zr元素的存在抑制了粘结层中铝元素向基体扩散,而且Zr在TGO晶界处偏析抑制氧负

离子向粘结层内扩散,从而提高了热障涂层的循环氧化性能。

2.7 双陶瓷顶层

Xu等^[39]采用EB-PVD方法制备8YSZ+ $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 双陶瓷顶层热障涂层系统,循环氧化结果表明,双陶瓷顶层设计的热障涂层比单层 $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 和YSZ涂层具有更高的循环氧化寿命。双陶瓷顶层设计能有效降低粘结层和 $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 层之间热膨胀系数的不匹配程度,而且双陶瓷顶层涂层的热应力小于单层 $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 和YSZ涂层,因此其具有更优异的循环氧化性能。

Bobzin等^[40]制备了7YSZ、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 、 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 、7YSZ+ $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和7YSZ+ $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层, $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层的热导率都比7YSZ涂层的低,7YSZ+ $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层的热导率比7YSZ涂层低近50%,但是7YSZ+ $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层的热导率比7YSZ涂层高近50%。1300℃恒温氧化结果表明, $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层的脱落主要是由于陶瓷层和粘结层的热膨胀系数不匹配造成的,虽然在7YSZ+ $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和7YSZ+ $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层与TGO的界面处发现 NiCrO_3 、 NiCrO_4 和 NiCr_2O_4 等混合氧化物,但是并没有对陶瓷层的稳定性产生影响,7YSZ+ $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和7YSZ+ $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 涂层仍然具有较高氧化寿命。

3 结语

热障涂层现已广泛应用于航空、航天和燃气发电等行业,目前热障涂层制备方法以等离子体喷涂(APS)和电子束物理气相沉积(EB-PVD)为主,等离子物理气相沉积(PS-PVD)作为制备热障涂层的新方法仍处于起步阶段。与APS相比,EB-PVD在制备热障涂层方面有着诸多优点,因此EB-PVD一直是国内外学者研究的热点。通过有效控制EB-PVD沉积过程中的各种参数可以获得性能更加优异的热障涂层。文中论述了影响EB-PVD热障涂层结构和性能的主要因素,希望可以为EB-PVD热障涂层的制备提供有效的参考。

参考文献:

- [1] 张天佑,吴超,熊征,等.热障涂层材料及其制备技术的研究进展[J].激光与电子进展,2014,51(3):1-6.
- [2] 于海涛,牟仁德,谢敏,等.热障涂层的研究现状及其制备技术[J].稀土,2010,31(5):83-87.
- [3] CAI C Y, CHANG S, ZHOU Y C, et al. Microstructure Characteristics of EB-PVD YSZ Thermal Barrier Coatings Corroded by Molten Volcanic Ash[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 286: 49-56.
- [4] MUNAWAR A U, SCHULZ U, SHAHID M. Microstruc-

- ture and Lifetime of EB-PVD TBCs with Hf-doped Bond Coat and Gd-zirconate Ceramic Top Coat on CMSX-4 Substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 299: 104-112.
- [5] MUNAWAR A U, SCHULZ U, CERRI G, et al. Microstructure and Cyclic Lifetime of Gd and Dy-containing EB-PVD TBCs Deposited as Single and Double-layer on Various Bond Coats[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 245: 92-101.
- [6] CHAUDHURY Z A, NEWAZ G M, NUSIER S Q, et al. Interfacial Damage in EB-PVD Thermal Barrier Coatings due to Thermal Cycling[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 231: 34-41.
- [7] ZHANG X F, ZHOU K S, LIU M, et al. CMAS Corrosion and Thermal Cycle of Al-modified PS-PVD Environmental Barrier Coating[J]. Ceramics International, 2018, 44: 15959-15964.
- [8] REZANKA S, MACK D E, MAUER G, et al. Investigation of the Resistance of Open-column-structured PS-PVD TBCs to Erosive and High-temperature Corrosive Attack[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 324: 222-235.
- [9] ZHANG X F, ZHOU K S, LIU M, et al. Mechanisms Governing the Thermal Shock and Tensile Fracture of PS-PVD 7YSZ TBC[J]. Ceramics International, 2018, 44: 3973-3980.
- [10] DENG Z Q, ZHANG X F, ZHOU K S, et al. 7YSZ Coating Prepared by PS-PVD Based on Heterogeneous Nucleation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(4): 820-825.
- [11] WENTING H, GEORG M, ALEXANDER S, 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: 2449-2453.
- [12] 郭洪波, 彭立全, 宫声凯, 等. 电子束物理气相沉积热障涂层技术研究进展[J]. 热喷涂技术, 2009, 1(2): 7-14.
- [13] 于海涛, 宋希文, 牟仁德. 电子束物理气相沉积 YSZ 热障涂层热循环性能[J]. 航空发动机, 2010, 36(6): 50-57.
- [14] 马李, 孙跃, 赫晓东, 等. 电子束物理气相沉积工艺制备超薄高温结构材料的研究[J]. 材料导报, 2006, 20(11): 100-103.
- [15] LI H F, GUO H B, GONG S K. Failure Mechanism of EB-PVD Thermal Barrier Coatings on NiAl Substrate[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17: 811-815.
- [16] 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: 367-374.
- [17] JANG P K, MATSUBARA H. Surface Roughness and Microstructure of Yttria Stabilized Zirconia EB-PVD Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200: 4594-4600.
- [18] LIU L, ZHANG H F, LEI X G, et al. Dependence of Microstructure and Thermal Conductivity of EB-PVD Thermal Barrier Coatings on the Substrate Rotation Speed[J]. Physics Procedia, 2011, 18: 206-210.
- [19] JANG P K. Thermal Conductivity of Nanoporous ZrO_2 -4 mol.% Y_2O_3 Multilayer Coatings Fabricated by EB-PVD[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202: 1568-1573.
- [20] MOVCHAN B A, DEMCHISHIN A V. Study of the Structure and Properties of Thick Vacuum Condensates of Nickel, Titanium, Tungsten, Aluminum Oxide and Zirconium Dioxide[J]. Fiz. Metal. Metalloved, 1969, 28: 83-90.
- [21] SOHN Y H, BIEDERMAN R R, SISSON JR R D. Microstructural Development in Physical Vapour-deposited Partially Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings[J]. Thin Solid Films, 1994, 250: 1-7.
- [22] RENTERIA A F, SARUHAN B. Effect of Ageing on Microstructure Changes in EB-PVD Manufactured Standard PYSZ Top Coat of Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26: 2249-2255.
- [23] NIEUWENHUIZEN J M, Haanstra H B. Microfractography of Thin Films[J]. Philips Technology, 1966, 27: 87-91.
- [24] WADA K, YOSHIYA M, YAMAGUCHI N, et al. Texture and Microstructure of ZrO_2 -4mol.% Y_2O_3 Layers Obliquely Deposited by EB-PVD[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200: 2725-2730.
- [25] TAIT R N, SMY T, BRETTEA M J. Modelling and Characterization of Columnar Growth in Evaporated Films[J]. Thin Solid Films, 1993, 226: 196-201.
- [26] LICHTER S, CHEN J. Model for Columnar Microstructure of Thin Solid Films[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(13): 1396-1399.
- [27] BERNIER J S, LEVAN G, MANIRUZZAMAN M, et al. Crystallographic Texture of EB-PVD TBCs Deposited on Stationary Flat Surfaces in a Multiple Ingot Coating Chamber as a Function of Chamber Position[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163-164: 95-99.
- [28] RABIEI A, EVANS A G. Failure Mechanisms Associated with the Thermally Grown Oxide in Plasma-sprayed Thermal Barrier Coatings[J]. Acta Materialia, 2000, 48(15): 3963-3976.
- [29] ZHANG D B, GONG S K, XU H B, et al. Effect of Bond Coat Surface Roughness on the Thermal Cyclic Behavior of Thermal Barrier Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201: 649-653.
- [30] OKAZAKI M, YAMAGISHI S, YAMAZAKI Y, et al. Adhesion Strength of Ceramic Top Coat in Thermal Barrier Coatings Subjected to Thermal Cycles: Effects of Thermal Cycle Testing Method and Environment[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 53: 33-39.
- [31] EVANS A G, MUMM D R, HUTCHINSON J W. Mechanisms Controlling the Durability of Thermal Barrier Coatings[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46:

- 505-553.
- [32] TOLPYGO V K, CLARKE D R. The Effect of Oxidation Pre-treatment on the Cyclic Life of EB-PVD Thermal Barrier Coatings with Platinum-aluminide Bond Coats[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200: 1276-1281.
- [33] MATSUMOTO M, KATO T, HAYAKAWA K, et al. The Effect of Pre-oxidation Atmosphere on the Durability of EB-PVD Thermal Barrier Coatings with CoNiCrAlY Bond Coats[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202: 2743-2748.
- [34] MATSUMOTO M, HAYAKAWA K, KITAOKA S, et al. The Effect of Preoxidation Atmosphere on Oxidation Behavior and Thermal Cycle Life of Thermal Barrier Coatings[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 441: 119-125.
- [35] XU Z H, WANG Z K, HUANG G H, et al. Thermal cycling behavior of EB-PVD TBCs on CVD platinum modified aluminide coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 637: 226-233.
- [36] ZHOU L, MUKHERJEE S, HUANG K, et al. Failure Characteristics and Mechanisms of EB-PVD TBCs with Pt-modified NiAl Bond Coats[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 637: 98-106.
- [37] MUNAWAR A U, SCHULZ U, SHAHID M, et al. Microstructure and Lifetime of EB-PVD TBCs with Hf-doped Bond Coat and Gd-zirconate Ceramic Top Coat on CMSX-4 Substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 299: 104-112.
- [38] SALDANA J M, SCHULZA U, RODRIGUEZA G C M, et al. Microstructure and Lifetime of Hf or Zr Doped Sputtered NiAlCr Bond Coat/7YSZ EB-PVD TBC Systems[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 335: 41-51.
- [39] XU Z H, HE S M, HE L M, et al. Novel Thermal Barrier Coatings Based on $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$ Double-ceramic-layer Systems Deposited by Electron Beam Physical Vapor Deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 4273-4283.
- [40] BOBZIN K, BAGCIVAN N, BROGELMANN T, et al. Influence of Temperature on Phase Stability and Thermal Conductivity of Single- and Double-ceramic-layer EB-PVD TBC Top Coats Consisting of 7YSZ, $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ and $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 237: 56-64.