

引文格式: 王博, 李珊, 章凯, 等. 沉积参数对电子束物理气相沉积制备的GYbZ热障涂层微观组织结构影响[J]. 航空制造技术, 2026, 69(17): 26010064.

WANG Bo, LI Shan, ZHANG Kai, et al. Effect of deposition parameters on microstructure of GYbZ thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(17): 26010064.

沉积参数对电子束物理气相沉积制备的 GYbZ 热障涂层微观组织结构影响

王 博^{1,2}, 李 珊³, 章 凯¹, 王福德⁴

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

2. 北京航空航天大学, 北京 100191;

3. 苏州国家实验室, 苏州 215006;

4. 中国人民解放军 93156 部队, 沈阳 110042)

[摘要] 氧化镱掺杂锆酸钇($\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1}$) $_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GYbZ) 具有优异的高温相稳定性和极低的热导率, 是 1300 ℃ 以上超高温热障涂层的理想材料。电子束物理气相沉积(EB-PVD) 是目前航空发动机涡轮工作叶片热障涂层制备的主流技术。本文研究了靶材蒸发电流、沉积温度和旋转速度对 GYbZ 涂层表面和截面形貌的影响规律, 当靶材蒸发电流降低至 0.8 A, GYbZ 涂层的柱状晶主干粗大, 两侧枝晶细密; 随着电流增大至 1.2 A, 柱状晶尺寸减小, 枝晶长度变短。当沉积温度低或者旋转速度小时, 柱状晶尺寸细小且分布不均, 随着沉积温度的升高或者旋转速度的增大, 涂层柱状晶尺寸增大, 尺寸差异减小。

关键词: 电子束物理气相沉积(EB-PVD); ($\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1}$) $_2\text{Zr}_2\text{O}_7$; 热障涂层; 沉积参数; 组织结构

中图分类号: V2; TG174.4

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26010064



王 博

正高级工程师, 博士, 研究方向为高温防护涂层。

随着航空发动机涡轮进口温度不断提高, 传统的 $\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ (YSZ) 热障涂层已无法满足先进航空发动机涡轮叶片更高温度下长寿命的使用需求^[1-3], 因此迫切需要研制超高温热障涂层^[4-6]。近年来稀土锆酸盐材料受到广泛关注^[7-8], 其中 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GZO) 抗 CMAS ($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) 腐蚀性能优异^[9-11], 熔点约为 2570 ℃, 相变温度为 1530 ℃, 相变时无体积效应, 而热导率却是传统 YSZ 的 1/3^[12-13], 通过向 GZO 中掺杂 Yb 可进一步降低其导热系数, 并且在 1200 ℃ 时的热膨胀系数与 YSZ 相当^[14-15]。电子束物理气相沉积(EB-

PVD) 作为先进的功能薄膜与涂层制备技术, 代表了高性能热障涂层制备技术的发展, 采用 EB-PVD 制备的陶瓷涂层具有典型的柱状晶结构, 这种结构具有较高的应变容限, 能够显著提高涂层在高温下的使用寿命^[16-17]。国内外对 EB-PVD 电子束特性、涂层沉积机理、涂层组织调控及性能方面开展了较多的研究工作, 获得了涂层显微结构的多样化控制机制^[18]。现有研究表明, 沉积温度达到约涂层熔点的 30%~40% 时可制备出具有典型柱状晶结构的热障涂层^[19-20]。试样组织结构随主轴的旋转速度变换而改变, 主要通过“自阴影效应”控制涂

收稿日期: 2026-04-15; 退修日期: 2026-05-06; 录用日期: 2026-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(U2541255)

层的结构,旋转速度升高时,涂层由致密结构向柱状晶演变^[21],此时涂层热导率也发生变化^[22-23]。

然而目前关于 EB-PVD 制备技术的研究多是针对 YSZ 涂层,针对 GYbZ 等新型热障涂层的研究有限,亟须开展 EB-PVD 制备 GYbZ 涂层的系统研究,实现 GYbZ 涂层结构精确控制。在 EB-PVD 制备热障涂层过程中,靶材蒸发电流、沉积温度和旋转速度等参数显著影响涂层的组织和性能,通过对相关参数的调控能够实现热障涂层的高效优质制备。本文针对 IC21 单晶高温合金表面 GYbZ 热障涂层开展研究,厘清 GYbZ 靶材与 EB-PVD 电子束之间的交互作用机制,建立 EB-PVD 参数与 GYbZ 涂层显微组织间的联系,并总结 EB-PVD GYbZ 热障涂层微观结构调控规律。

1 试验及方法

1.1 基体材料

基体材料选用 IC21 单晶高温合金,合金成分如表 1 所示,采用电火花线切割将高温合金基体切割成尺寸为 30 mm×10 mm×2.5 mm 的试样。随后经过 240# 水性 SiC 砂纸打磨及 200 目白刚玉湿喷砂处理,在 50 g/L 的 NaOH 溶液中煮 10 min,然后使用丙酮和乙醇混合溶液超声清洗样品 15 min,吹干备用。

1.2 涂层制备

将 IC21 合金放入 100 ml/L 的稀盐酸溶液进行表面活化,冲洗干净后放入 NiCl₂ 溶液中冲击镀 Ni,随后放入镀 Pt 溶液中电镀 30 min,获得 5 μm 厚的 Pt 层。在 1050 ℃真空下退火 2 h,提高 Pt 层与 IC21 合金的结合强度,消除制备过程中引入的氢,降低镀层应力。对退火后的镀 Pt 样品进行气相渗 Al,渗剂为含 Al (质量分数 49%) 的 Fe-Al 粉和 2% NH₄Cl 的混合粉末。采用高温低活度渗 Al 工艺,渗 Al 温度为 1050 ℃,保温时间 5 h,随后随炉冷却,获得 β-(Ni, Pt)Al 单相涂

层,制备态 (Ni, Pt)Al 涂层表面粗糙度 R_a 约为 1.2~1.6 μm。作为 GYbZ 热障涂层的金属黏结层,(Ni, Pt)Al 能够提升涂层抗氧化性,同时减小基体合金与陶瓷面层间热膨胀系数的不匹配,提高陶瓷层与基体结合力。

采用 EB-PVD 设备 (EB-PVD, UE205, Paton),使用沉积厚度约为 150~200 μm 的 (Gd0.9Yb0.1)₂Zr₂O₇ (GYbZ) 陶瓷面层作为靶材,靶材与基材之间的距离为 150 mm;真空室真空度为 1×10⁻² Pa;电子枪电压为 20 kV;氧气流速为 300 cm³/min,涂层沉积参数及柱状晶平均直径如表 2 所示,沉积态 GYbZ 热障涂层结构如图 1 所示。

1.3 测试与表征

采用扫描电子显微镜 (SEM, Gemini 300, Zeiss) 观察涂层的表面和截面的微观结构。

2 结果与讨论

2.1 靶材蒸发电流对 GYbZ 涂层结构的影响

图 2 是靶材蒸发电流分别为 0.8 A、1.2 A 和 1.3 A 时 GYbZ 涂层的截面形貌。GYbZ 层的平均柱状晶宽度随 GYbZ 层的生长发生变化,远离 GYbZ 涂层与 IC21 合金界面的平均柱状晶宽度比靠近界面的大。这是因为在 EB-PVD 沉积过程中,随着 GYbZ 小颗粒在界面处成核,垂直于界面的柱状晶相互竞争、择优生长,导致柱状晶粗化、合并,从而形成锥形柱状结构^[24-25]。

靶材蒸发电流为 0.8 A 时,柱状晶主干较为粗大,这是由于靶材蒸发电流低,靶材蒸气粒子的飞行路径较长,粒子沉积到基板表面后有更多时间进行表面扩散和聚集长大。较低的沉积速率也为晶粒的侧向扩展提供了更多的时间和空间,使得柱状晶两侧的枝晶更细密。当靶材蒸发电流逐渐增加到 1.2 A 和 1.3 A 时,涂层内柱状晶的尺寸逐渐减小且两侧枝晶臂长度逐渐减小,同时涂层中的孔隙数量增多。原因在于靶材蒸发电流越大,靶材的蒸发速率越快,沉积速率加快,单位时间内沉积到基片上的气相原子增多。此时形核过程

表 1 高温合金基体成分(原子数分数)

Table 1 Chemical composition of the substrate superalloy (atomic fraction) %

成分	Ni	Al	Cr	Co	Mo	W	Re	Ta	Nb	Ru
含量	Bal.	15.1	2.1	—	6.3	—	0.4	1.1	—	—

表 2 GYbZ 涂层 EB-PVD 参数及柱状晶平均直径

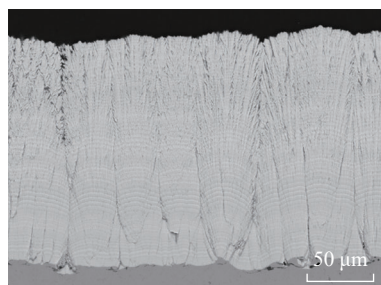
Table 2 EB-PVD parameter and mean column grain diameter of GYbZ coating

序号	靶材加热电流 I/A	沉积温度 T/℃	旋转速度 V/(r · min ⁻¹)	柱状晶平均宽度 D/μm
1	0.8	900	20	16.3
2	1.2	900	20	14.7
3	1.3	900	20	12.7
4	1.3	500	20	6.0
5	1.3	700	20	7.2
6	1.3	1000	20	16.3
7	1.3	900	5	8.4
8	1.3	900	10	9.6
9	1.3	900	30	15.6

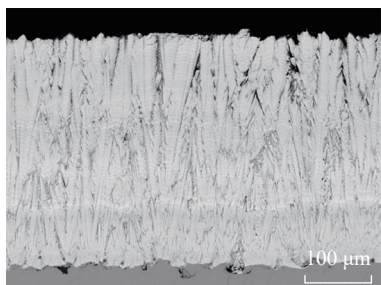
占主导地位,抑制了相邻晶核间的相互接触扩散,晶粒没有足够时间和空间进一步长大,使柱状晶主要垂直于基板表面“堆积”式生长,导致柱状晶尺寸偏小,枝晶长度缩短。此外,



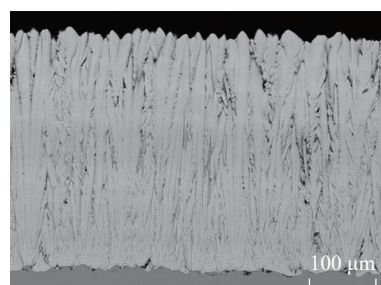
图1 GYbZ 涂层结构示意图
Fig.1 Schematic representation of GYbZ coating



(a) 0.8 A



(b) 1.2 A



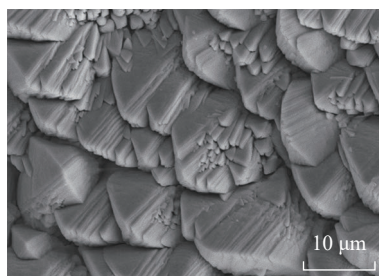
(c) 1.3 A

图2 不同靶材蒸发电流下 GYbZ 涂层截面显微形貌
Fig.2 Cross-sectional images of GYbZ coatings prepared by different currents of EB-PVD

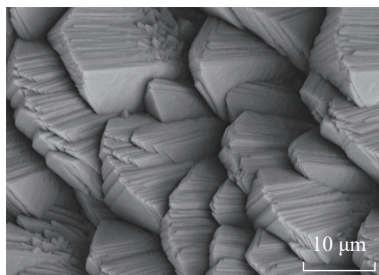
高靶材蒸发电流下沉积速率过快也会造成颗粒间结合不良,更容易出现孔隙缺陷。

2.2 沉积温度对 GYbZ 涂层结构的影响

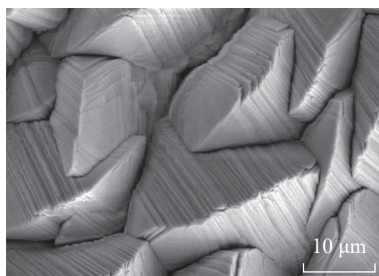
图3所示为不同沉积温度条件下制备的GYbZ涂层表面形貌,可以看出涂层表面由小晶粒构成,柱状晶头部之间存在较小缝隙。沉积温



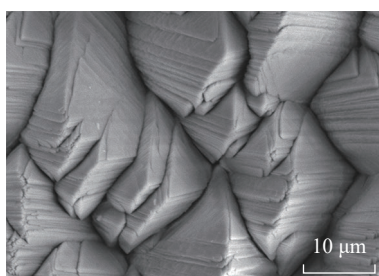
(a) 500 °C



(b) 700 °C



(c) 900 °C



(d) 1000 °C

图3 不同沉积温度的条件下制备的 GYbZ 涂层的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of GYbZ coatings prepared under different deposition temperatures

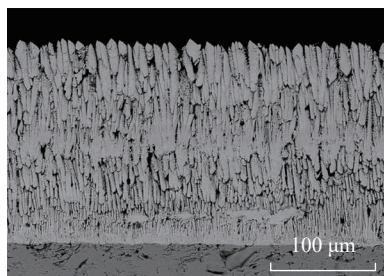
度500 °C时GYbZ涂层表面柱状晶呈现倒棱锥形(图3(a)),柱头表面存在较多细小的颗粒,说明柱状晶尺寸分布不均。随着沉积温度增加至700 °C,晶粒尺寸增大(图3(b))。当沉积温度为900 °C时,GYbZ涂层表面主要呈现“金字塔”状(图3(c)),此时枝晶之间尺寸差异较小,分布均匀。当基体温度为1000 °C时,柱状晶尺寸相比于900 °C时并无明显的增大(图3(d)),但晶粒尺寸差异明显增大,说明此时沉积速率过快,部分颗粒来不及遵循热力学规律生长。

图4为不同沉积温度条件下制备的GYbZ涂层截面形貌,随着沉积温度增加,涂层柱状晶尺寸随之增大,同时观察到涂层中的孔隙缺陷明显减少。这是因为沉积温度升高使蒸发颗粒在基板表面的扩散能力增强,促进了柱状晶的侧向扩展,形成较粗的柱状晶。同时高温促进柱状晶的横向扩展,使得柱状晶之间的缝隙尺寸减小,有助于形成分布均匀的纳米枝晶。而沉积温度较低时(500 °C)限制了颗粒的表面扩散,柱状晶尺寸更加细小密集。枝晶的形成被限制,柱状晶之间的缝隙增大,枝晶分布稀疏。

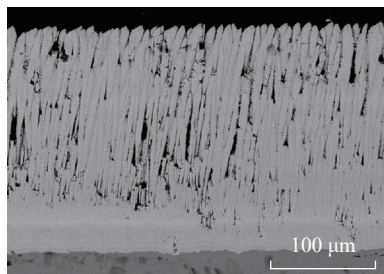
EB-PVD工艺过程中柱状晶显微组织受基体预热温度和蒸发源材料的熔点(T_m)所调控^[26-27], Movchan等^[28]针对沉积温度(T_s)对涂层微观结构的影响建立了结构区域模型(图5),该模型将涂层的微观结构随沉积温度的变化划分为3个区域。

(1)当 $T_s=500$ °C时, $T_s/T_m<0.3$,涂层的结构处于1区,由于沉积原子在基板表面扩散不充分,导致涂层为圆顶柱状晶结构,晶界处有较多孔隙;从I区到2区之间为过渡区域,由密排的纤维状晶粒组成。

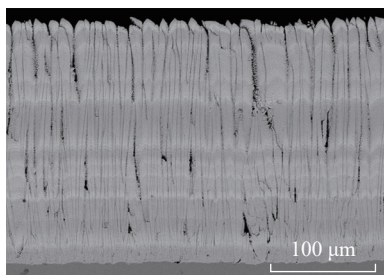
(2)当 T_s 为700~1000 °C时, $0.3<T_s/T_m<0.5$,形成2区所示的致密的柱状晶结构,这种涂层结构是由表面扩散控制的凝结形成。在这一范围



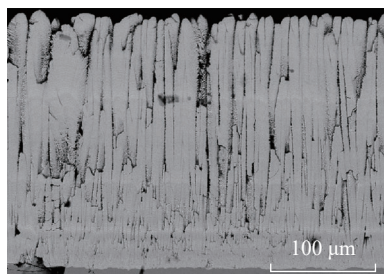
(a) 500 °C



(b) 700 °C



(c) 900 °C



(d) 1000 °C

图4 不同沉积温度的条件下制备的 GYbZ 涂层的截面微观结构

Fig.4 Cross-sectional morphologies of GYbZ coatings prepared under different deposition temperatures

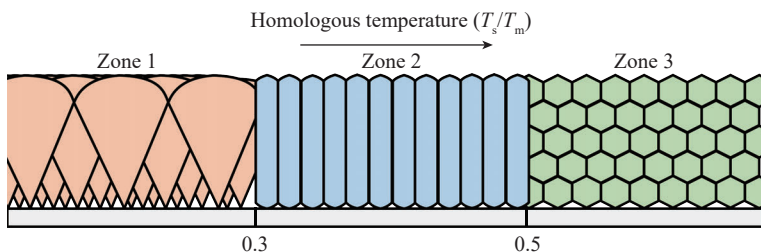


图5 Movchan 涂层区域结构模型

Fig.5 Illustration of Movchan coating regional structure model

内,随着 T_s 的增大,柱状晶尺寸也会增大。

(3) 当 $0.5 < T_s/T_m < 1$ 时,涂层的结构处于 3 区,涂层微观结构受到体扩散控制,晶粒呈等轴晶结构。

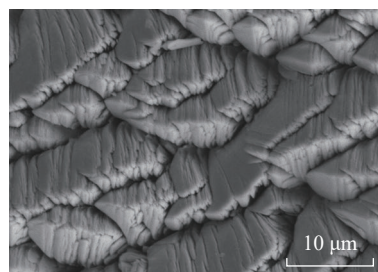
2.3 旋转速度对 GYbZ 涂层结构的影响

图 6 为不同转速下得到的 GYbZ 涂层表面形貌。当旋转速度较慢时, GYbZ 涂层柱状晶的顶部为不规则的锥状结构,如图 6 (a) 所示,对应的旋转速度为 5 r/min。随着旋转速度增大, GYbZ 涂层柱状晶的顶部发生变化,成为越来越规则的四棱锥状乃至金字塔状,如图 6 (b)~(d) 所示。转速较低时,样品旋转速度慢,蒸气颗粒(涂层材料的气态原子/分子)有更多时间堆积在柱状晶顶部,由于沉积不均匀,柱状晶生长时容易“乱长”,顶部形状不规则,像凹凸不平的山峰;转速提高时,蒸气颗粒在每根柱状晶上的沉积量减少,晶体生长更均匀;柱状晶之间的间距变小,减少了“生长畸形”的机会,顶部变得更规则,像四棱锥或金字塔,因为转速快,晶格(原子排列)有更短的时间去调整,所以不容易出现不规则的晶体结构。转速过高时,涂层沉积速率增加,但晶粒没有足够时间按热力学稳定方式生长,某些地方长得快,某些地方长得慢,导致柱状晶的尺寸和形状变得不一致,由于“遮蔽效应”(某些地方被挡住,蒸气颗粒无法均匀到达),涂层表面会出现细小的孔洞,结构变得像羽毛状,比较松散。

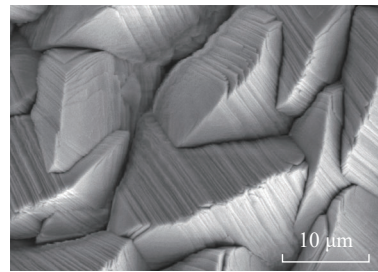
图 7 为不同旋转速度下制备的

GYbZ 涂层截面形貌,如图 7 (a) 所示,当转速为 5 r/min 时,柱状晶细小,随着转速增大至 10 r/min (图 7 (b)) 和 20 r/min (图 7 (c)),柱状晶尺寸逐渐增大。原因在于旋转速度较大时,蒸气流能够以更多角度覆盖在基板表面,蒸气颗粒分布更加均匀,减少了柱状晶之间的竞争,促进单个柱状晶的优先生长,致使晶粒尺寸变大。

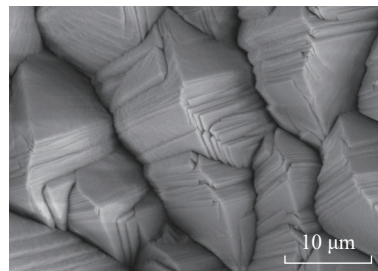
图 8 为旋转速度逐渐提升时 EB-



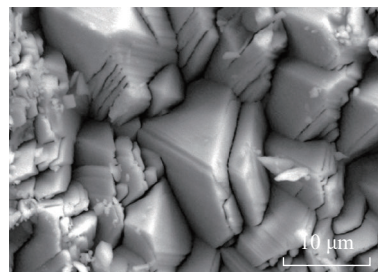
(a) 5 r/min



(b) 10 r/min



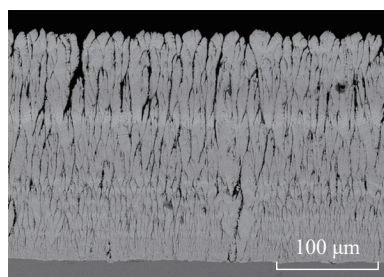
(c) 20 r/min



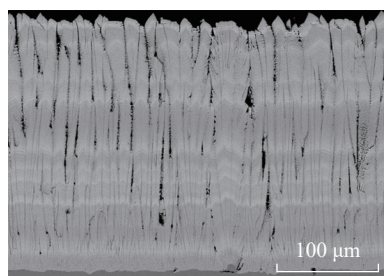
(d) 30 r/min

图6 不同旋转速度下制备的 GYbZ 涂层表面形貌

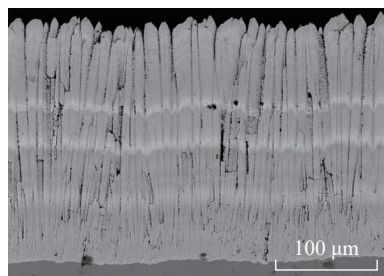
Fig.6 Surface microstructure of GYbZ coatings prepared at different rotation speeds



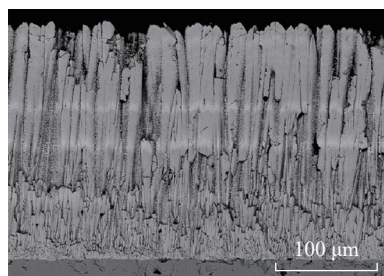
(a) 5 r/min



(b) 10 r/min



(c) 20 r/min



(d) 30 r/min

图7 不同旋转速度下制备的GYbZ涂层的截面形貌

Fig.7 Cross-sectional morphologies of GYbZ coatings prepared at different rotation speeds

PVD柱状晶演变过程示意图, 旋转速度较低时, 柱状晶垂直于基板表面生长, 柱状晶的快速生长会“遮挡”周围区域的蒸气流, 限制蒸气颗粒沉积到被遮挡的区域。颗粒在表面沉积的方向较为固定, 导致更多颗粒沉积在同一区域, 晶粒的成核密度较高, 柱状晶之间竞争激烈, 晶粒数量

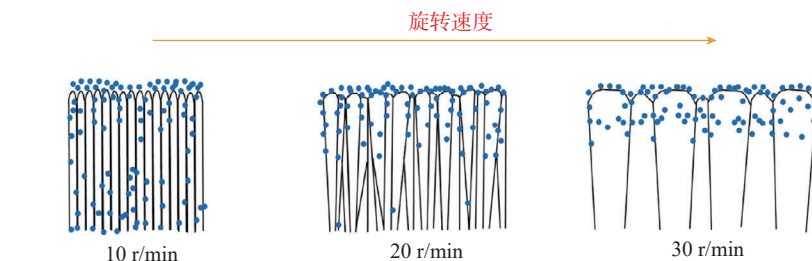


图8 EB-PVD 旋转速度由小到大过程中GYbZ涂层柱状晶形貌演变示意图

Fig.8 Schematic representation of the effect of the rotation speed on columnar microstructure evolution of EB-PVD GYbZ coatings

较多且尺寸较小。旋转速度升高, 基板表面蒸气流覆盖角度增大。蒸气颗粒分布在柱状晶的侧面和其他角度, 柱状晶之间的竞争减少, 晶粒生长更自由, 柱状晶尺寸明显增大, 晶粒更粗壮, 数量相对减少。旋转速度达到最高时, 如图7(d)所示, 蒸气流对基板的覆盖进一步均匀化, 颗粒以多角度沉积在柱状晶表面, 此时成核点进一步减少, 现有柱状晶可以吸附更多颗粒进行横向和纵向生长, 柱状晶尺寸达到最大值。

3 结论

本文系统研究了靶材蒸发电流、沉积温度、基体旋转速度3类关键EB-PVD参数对GYbZ热障涂层微观形貌与柱状晶生长的影响规律, 揭示了沉积参数-组织-生长机制的内在关联, 得出以下主要结论。

(1) 靶材蒸发电流通过控制涂层沉积速率和原子扩散速度影响涂层柱状晶直径与枝晶形态。蒸发电流较低时, 靶材蒸发速率减慢, 涂层在基材表面扩散充分, 柱状晶主干粗大、枝晶细密; 随着蒸发电流升高, 沉积速率加快, 形核占优, 柱状晶尺寸减小、枝晶缩短, 孔隙增多。

(2) 沉积温度通过控制原子扩散能力决定柱状晶晶粒尺寸与致密性。沉积温度升高基材表面原子扩散增强, 柱状晶侧向粗化与均匀化得到促进, 涂层中缺陷减少。沉积温度较低可导致原子扩散不足, 晶粒细小密集、分布不均。

(3) 不同基体旋转速度可以改变靶材蒸气入射角度与涂层沉积均匀性调控柱状晶生长和形貌。随着转速提高, 靶材蒸气覆盖均匀, 遮蔽效应减弱, 柱状晶尺寸增大、顶部趋于规则金字塔形。转速降低时生长竞争激烈, 柱状晶晶粒细小且形貌不规则。

最终确定GYbZ热障涂层最优沉积参数为靶材蒸发电流1.3 A、沉积温度900℃、基体旋转速度20 r/min。此时涂层组织致密均匀、形貌规整, 可满足超高温热障涂层的结构与性能要求。

参考文献

- [1] 田伟, 郭会明, 刘砚飞. 新型热障涂层在先进航空发动机中的应用研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 68-80.
- TIAN Wei, GUO Huiming, LIU Yanfei. Research progress on application of new thermal barrier coatings in advanced aero-engines[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 68-80.
- [2] VASSEN R, BAKAN E, MACK D, et al. Performance of YSZ and $Gd_2Zr_2O_7$ /YSZ double layer thermal barrier coatings in burner rig tests[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(2): 480-490.
- [3] GUO L, XIN H, ZHANG Z, et al. Preparation of $(Gd_{0.9}Sc_{0.1})_2Zr_2O_7$ /YSZ thermal barrier coatings and their corrosion resistance to V_2O_5 molten salt[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 389: 125677.
- [4] TABESHFAR M, SALEHI M, DINI G, et al. Hot corrosion of $Gd_2Zr_2O_7$, $Gd_2Zr_2O_7$ /YbSZ, YSZ + $Gd_2Zr_2O_7$ /YbSZ, and YSZ thermal

barrier coatings exposed to $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 409: 126718.

[5] 赵泓旭, 邓春明, 付朗, 等. 用于热障涂层的钆酸钪材料研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 116–128.

ZHAO Hongxu, DENG Chunming, FU Lang, et al. Research progress on gadolinium zirconate materials for thermal barrier coatings[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 116–128.

[6] ZHEN Z, WANG X, SHEN Z Y, et al. Phase stability, thermo-physical property and thermal cycling durability of Yb_2O_3 doped $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ novel thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(2): 2585–2594.

[7] FROMMHERZ M, SCHOLZ A, OECHSNER M, et al. Gadolinium zirconate/YSZ thermal barrier coatings: Mixed-mode interfacial fracture toughness and sintering behavior[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 286: 119–128.

[8] HUANG Z Y, QI J Q, ZHOU M, et al. A facile solvothermal method for high-quality $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ nanopowder preparation[J]. Ceramics International, 2018, 44(2): 1334–1342.

[9] OZGURLUK Y, KARAOGLANLI A C, AHLATCI H. Comparison of calcium–magnesium–alumina–silicate (CMAS) resistance behavior of produced with electron beam physical vapor deposition (EB–PVD) method YSZ and $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /YSZ thermal barrier coatings systems[J]. Vacuum, 2021, 194: 110576.

[10] ZHAO F A, XIAO H Y, BAI X M, et al. Effects of doping Yb^{3+} , La^{3+} , Ti^{4+} , Hf^{4+} , Ce^{4+} cations on the mechanical properties, thermal conductivity, and electronic structures of $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 776: 306–318.

[11] BAHAMIRIAN M, HADAVI S M M, FARVIZI M, et al. Enhancement of hot corrosion resistance of thermal barrier coatings by using nanostructured $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 360: 1–12.

[12] DOLEKER K M, KARAOGLANLI A C. Comparison of oxidation behavior of YSZ and $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ thermal barrier coatings (TBCs)[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 318: 198–207.

[13] MAHADE S, CURRY N,

BJÖRKLUND S, et al. Functional performance of $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /YSZ multi-layered thermal barrier coatings deposited by suspension plasma spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 318: 208–216.

[14] 高栋, 刘懿栋, 张国栋, 等. 电子束物理气相沉积 Yb 掺杂 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /8YSZ 双陶瓷层热障涂层性能研究[J]. 表面技术, 2025, 54(6): 134–142.

GAO Dong, LIU Yidong, ZHANG Guodong, et al. Investigation to the properties of Yb doped $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /8YSZ double ceramic layered thermal barrier coatings prepared by electron beam-physical vapor deposition[J]. Surface Technology, 2025, 54(6): 134–142.

[15] GUO Y Q, HE W T, GUO H B. Thermo-physical and mechanical properties of Yb_2O_3 and Sc_2O_3 Co-doped $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ceramics[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 18888–18894.

[16] 张宝鹏, 朱申, 王宇, 等. 热障涂层典型制备技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(13): 36–44.

ZHANG Baopeng, ZHU Shen, WANG Yu, et al. Research progress on typical preparation technology of thermal barrier coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(13): 36–44.

[17] SEZAVAR A, SAJJADI S A. A review on the performance and lifetime improvement of thermal barrier coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(8): 117274.

[18] 王世兴, 董金全, 李建超, 等. 燃气涡轮发动机 EB–PVD 热障涂层应用技术研究进展[J]. 热喷涂技术, 2025, 17(4): 71–81.

WANG Shixing, DONG Jinqun, LI Jianchao, et al. Research progress on the application technology of EB–PVD thermal barrier coatings for gas turbine engines[J]. Thermal Spray Technology, 2025, 17(4): 71–81.

[19] MOVCHAN B A, DEMCHISHIN A V. Study of the structure and properties of thick vacuum condensates of nickel, titanium, tungsten, aluminium oxide and zirconium dioxide[J]. Physics of Metals and Metallography, 1969, 28: 83–91.

[20] THORNTON J A. High rate thick film growth[J]. Annual Review of Materials Science, 1977, 7: 239–260.

[21] 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.

[22] SCHULZ U, MIINZER J, KACLEN U. Influence of deposition conditions on density and microstructure of EB–PVD TBCs[C]//26th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: B. Ceramic Engineering and Science Proceedings. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008: 353–360.

[23] SCHULZ U, RÄTZER-SCHEIBE H J, SARUHAN B, et al. Thermal conductivity issues of EB–PVD thermal barrier coatings[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2007, 38(9): 659–666.

[24] 徐惠彬, 宫声凯, 刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 7–12.

XU Huibin, GONG Shengkai, LIU Fushun. Recent development in materials design of thermal barrier coatings for gas turbine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7–12.

[25] 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 Rende, DING Ning, LIU Guanxi, 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.

[26] CLARKE D R, OECHSNER M, PADTURE N P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines[J]. MRS Bulletin, 2012, 37(10): 891–898.

[27] ZHEN Z, WANG X, SHEN Z Y, et al. Thermal cycling behavior of EB–PVD rare earth oxides co-doping ZrO_2 -based thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2021, 47(16): 23101–23109.

[28] MOVCHAN B A, DEMCHISHIN A V. Study of structure and properties of bulk vacuum condensates of nickel, tungsten, aluminum oxide, and zirconium dioxide[J]. Fizika Metallovi Metallovedenie, 1969, 28: 653.

Effect of Deposition Parameters on Microstructure of GYbZ Thermal Barrier Coatings Prepared by Electron Beam Physical Vapor Deposition

WANG Bo^{1,2}, LI Shan³, ZHANG Kai¹, WANG Fude⁴

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Suzhou National Laboratory, Suzhou 215006, China;

4. Chinese People's Liberation Army Unit 93156, Shenyang 110042, China)

[ABSTRACT] $(\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GYbZ) exhibits superior high-temperature phase stability and low thermal conductivity, qualifying it as an ideal material for ultra-high-temperature thermal barrier coatings for aeroengine turbine blades operating above 1300 °C. Electron-beam physical vapor deposition (EB-PVD) is the mainstream fabrication method for such thermal barrier coatings. The investigation examines the impact of target-evaporation current, deposition temperature, and sample rotation speed on GYbZ coating morphology. At 0.8 A evaporation current, GYbZ coatings form coarsened columnar grains with dense secondary dendrites. At 1.2 A, grain size decreases and dendrites shorten. Low deposition temperature or slow rotation speed induces fine, dense, and uneven columnar grains, while higher temperature or faster rotation speed increase grain size and reduces size variation.

Keywords: Electron beam physical vapor deposition (EB-PVD); $(\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$; Thermal barrier coatings; Deposition parameters; Microstructure

(黄编 晓月)