

膜层材料与技术

温度梯度热循环下纳米 7YSZ 陶瓷层结构演变

陈焕涛^{1,2}, 张小锋^{1,2,3}, 周克崧^{1,2,3}, 刘敏^{1,2}, 邓春明^{1,2}, 邓畅光^{1,2}(1.广东省新材料研究所, 广州 510650; 2.现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广州 510650;
3.华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640)

摘要:目的 采用低温超音速等离子喷涂 (LT-HVOF) 在镍基高温合金基体 (K417) 上制备了 NiCoCrAlYTa 粘结层, 使用大气等离子喷涂 (APS) 在粘结层上制备了纳米 7%Y₂O₃-ZrO₂ (7YSZ) 陶瓷涂层, 以获得温度梯度热循环下纳米陶瓷层的结构演变机制。**方法** 通过燃气热冲击实验仪对热障涂层模拟真实服役条件下温度梯度热循环的工作环境, 采用一维稳态热传导模型计算了热障涂层中各涂层界面的温度, 探讨了在热驱动作用下等径晶粒和非等径晶粒的扩散长大机制。**结果** 热循环次数为 40 次时, 涂层近表面出现了烧结致密化现象, 而陶瓷层底部涂层保持原来的结构。热循环次数增加到 460 次时, 整个陶瓷层断面都发生了烧结致密化现象。**结论** 温度是涂层烧结致密化的主导因素。涂层中当等大晶粒接触形成弯曲颈时, 由于弯曲颈只受水平方向静压力作用, 晶粒中原子扩散速率慢, 导致晶粒长大速率较慢; 而当非等大晶粒接触形成弯曲颈时, 在晶粒接触弯曲颈处存在一偏大晶粒方向的剪切力, 其导致晶粒向弯曲颈扩散速率增加, 晶粒长大速率较快。

关键词: 热障涂层; 热循环; 温度梯度; 烧结机制**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0256-07**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.041

Structure Evolution of Nano-7YSZ Ceramic Coating During Gradient Thermal Cycle

CHEN Huan-tao^{1,2}, ZHANG Xiao-feng^{1,2,3}, ZHOU Ke-song^{1,2,3}, LIU Min^{1,2}, DENG Chun-ming^{1,2},
DENG Chang-guang^{1,2}

(1.Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510650, China;

2.National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China;

3.School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT: The work aims to get the structure evolution mechanism of nano ceramic coating during gradient thermal cycle by preparing NiCoCrAlYTa bonding layer on nickel-based superalloy (K417) by low temperature-high velocity oxygen flame (HVOF) and nano-7YSZ ceramic coating on the bonding layer by air plasma spraying. Gradient thermal cycle test was carried out on nano-7YSZ TBC with a flame tester to simulate service condition of thermal barrier coating (TBC) in turbine engine. Interface temperatures in TBC were calculated based on one-dimensional model of steady heat conduction. Provided with 40

收稿日期: 2017-01-15; 修订日期: 2017-03-03

Received: 2017-01-15; Revised: 2017-03-03

基金项目: 国家“973”计划 (2012CB625100)

Fund: National Basic Research Program of China (2012CB625100)

作者简介: 陈焕涛 (1989—), 男, 助理工程师, 主要研究方向: 热喷涂技术。

Biography: CHEN Huan-tao (1989—), Male, Assistant engineer, Research focus: thermal spraying technology.

通讯作者: 张小锋 (1986—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向: 热喷涂技术。

Corresponding author: ZHANG Xiao-feng (1986—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: thermal spraying technology.

thermal cycles, the coating subsurface was subject to sintering densification, while base coating of the ceramic layer reserved the original structure. As the thermal cycle number increased to 460 times, entire section of the ceramic layer was subject to sintering densification. The coating sintering densification is mainly affected by temperature. When isometrical grains in the coating contact and form crooked neck, the grains grow slowly since the neck bears static stress in horizontal direction only and diffusion rate of atoms in the grains is slow. However, when non-isometrical grains in the coating contact and form crooked neck, the grains grow quickly since shear force in direction of large grain is present on the neck and the diffusion rate of grains is accelerated.

KEY WORDS: thermal barrier coating; thermal cycle; temperature gradient; sintering mechanism

热障涂层作为与高温合金材料、高效气冷技术并重的发动机涡轮叶片三大关键技术,其性能的改善有助于航空发动机寿命和效率的提高^[1-2]。在我国即将启动的“两机专项”(航空发动机和地面燃机)中均把热障涂层作为重点研究课题之一。热障涂层制备技术众多,其中大气等离子喷涂技术因其操作灵活、成本低等优点而得到广泛应用。随着涂层技术的发展,大气等离子喷涂(APS)纳米 YSZ 热障涂层因具有比传统微米 YSZ 热障涂层更好的力学、热学等性能而广受关注,其特点概括如下^[3-5]: 1) 具有更低的热导率; 2) 具有更好的耐磨性能; 3) 具有良好的断裂韧性; 4) 具有更优的热循环性能。

涡轮发动机工作时,其中的热障涂层服役环境极为苛刻,其失效因素可大致归纳如下^[6-7]: 1) 陶瓷层在高温热冲击作用下引起的烧结; 2) 陶瓷-金属层诱发的界面应力包括 TGO 生长应力和热不匹配性应力; 3) 环境 CMAS 腐蚀和粒子冲刷。热障涂层服役过程中在高温燃气冲击下,涂层由表及里存在一定的温度梯度,导致由温度引起的扩散驱动力不同,因此涂层面临着不同程度的烧结。为模拟真实工况下热障涂层的服役环境,人们普遍采用燃气热冲击实验来研究热障涂层在温度梯度作用下陶瓷层内部的结构演变,包括晶粒长大、烧结。微米 YSZ 热障涂层在等温作用下的结构变化已得到深入的研究^[8-9],而纳米涂层因其自身的特殊性在温度梯度下的结构演变仍需进一步探究。本研究主要从纳米涂层中晶粒尺度出发,讨论涂层在热温度梯度作用下的结构演变机制。

1 实验

1.1 试样制备

实验中以 $\phi 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的镍基高温合金 K417 为基体。首先依次使用汽油、酒精对其超声清洗,然后采用 120# 刚玉砂砾在空气压力 0.2 MPa 下对其进行喷砂粗化,再通过高压气体吹洗喷砂表面,去除表面的残余砂砾。采用低温超音速火焰喷涂(LT-HVOF,

Low Temperature-High Velocity Oxygen Flame, K2, GTV), 以 NiCoCrAlYTa 粉末(Amdry 997, Oerlikon-Metco)为原料在喷砂过的基体表面制备 $\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 的粘结层。再以纳米团聚粉末 $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$ (7YSZ, SY-133, 北京桑尧)为原料,采用大气等离子喷涂(APS, MF-P1000, GTV)在粘结层上制备 $\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ 的陶瓷面层,其中纳米团聚粉末的宏观形貌如图 1 所示,其团聚粉末粒径为 $15 \sim 45\text{ }\mu\text{m}$ 。

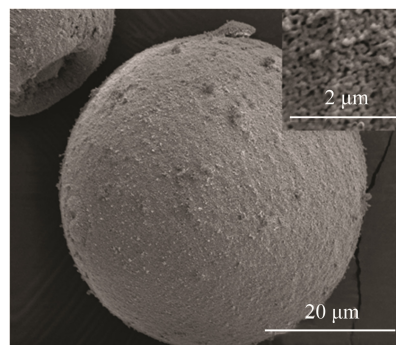


图 1 纳米团聚粉末

Fig.1 Agglomerated 7YSZ nano-powder

1.2 实验与表征

把制备好的 7YSZ 热障涂层试样放置在燃气冲击实验仪夹具上进行温度梯度热循环实验。实验时,热障涂层表面温度通过红外仪测量,背面温度采用热电偶测量。实验条件设置为:涂层表面温度 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保温 5 min,升温 13 s, 0.2 MPa 压缩空气下急速冷却 30 s。以上实验步骤为一次热循环。燃气热冲击实验仪安装有四个工位,喷枪采用丙烷和氧气燃烧加热,并通过导轨依次对四个工位样品进行循环实验。实验时,采用 0.2 MPa 的压缩空气对样品背面进行强制冷却以实现涂层的温度梯度。此外,喷枪采用室温水进行冷却以确保长时间工作,整个实验采用计算机控制,并实时记录实验数据,燃气热冲击设备如图 2 所示。采用场发射-扫描电子显微镜(FE-SEM, Nova-Nano-430, FEI)对温度梯度热循环前后热障涂层形貌进行观察和分析。

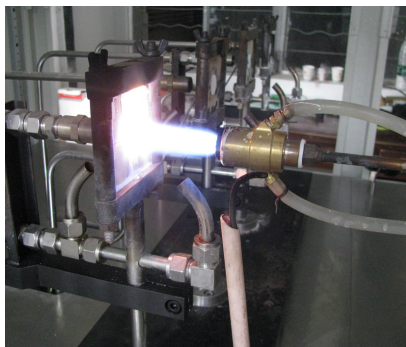


图 2 氧-丙烷燃气热冲击实验仪

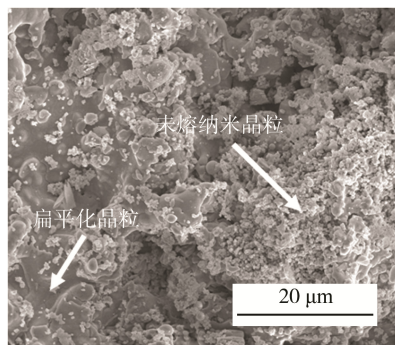
Fig.2 Flame tester with oxygen and propane

2 结果与讨论

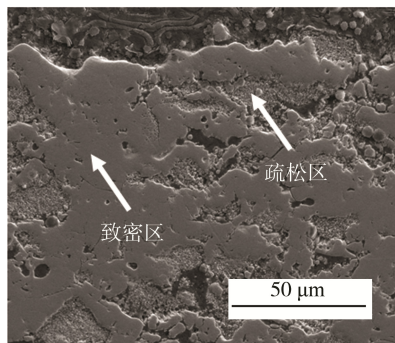
2.1 纳米 7YSZ 热障涂层制备

以纳米团聚粉末为原料, 采用 APS 在粘结层 NiCoCrAlYTa 上制备了 7YSZ 纳米陶瓷层, 其微观形貌如图 3 所示。图中显示纳米热障涂层并不是全部由纳米晶粒组成, 其还包含有部分与传统微米涂层类似的板条状非纳米结构。涂层表面也存在着熔融充分的扁平化晶粒, 形成致密的结构^[10]。纳米涂层与传统微米涂层最大的区别在于涂层中存在大量细晶堆积的疏松结构。图 3b 为涂层的断面结构, 涂层主要由熔融区和未熔融区组成。喷涂过程中, 纳米团聚粉末在高温等离子焰流加热下, 依粉末粒子的飞行轨迹不同, 表面发生熔融或微熔, 内部则出现熔融、微熔和未熔状态^[11-12]。在涂层断面存在致密的熔融区是因为这一区域同时存在熔融的粒子, 熔融粒子高速撞击基体发生扁平化, 形成致密堆积的层状板条结构, 而未熔融的纳米晶粒、微熔的亚微米或微米晶粒犹如镶嵌在熔融的涂层中, 形成疏松的堆积结构。图 3c 为纳米涂层断面熔融-未熔融区域的放大图, 从涂层整个粉末粒径分析看出, 涂层的平均粒径比原始的纳米粉末粒径有所增加, 其主要是由于粉末中纳米晶粒的长大, 因此纳米涂层中的纳米结构比例取决于原始粉末的熔融程度^[13]。在熔融区, 存在扁平板条状微米晶粒, 但也存在方向性很强的柱状晶。柱状晶基本与基体平面垂直, 它是由完全熔融的纳米晶粒经过重新结晶而形成并在喷涂过程的热梯度影响下发生取向性长大。事实上, 等离子喷涂过程中, 纳米晶粒的熔融、形核、长大是一个相对复杂的过程, 容易受较多因素的影响, 因此在熔融区也可观察到亚微米、微米尺度的等轴晶存在^[13-14]。

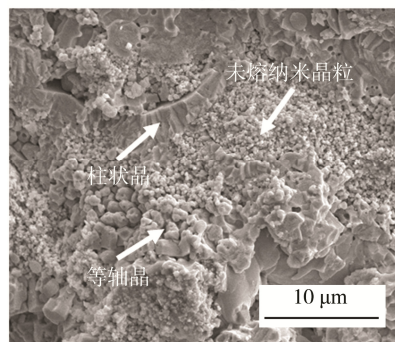
以上分析表明, 纳米团聚粉末通过大气等离子喷涂形成的涂层中存在熔融区和未熔融区, 粉末熔融部分将形成非纳米结构的致密涂层组织, 未熔融部分则保持原来的纳米结构, 并与微熔部分的亚微米或微米晶粒一起形成具有细晶结构的疏松涂层组织。



a 表面



b 断面



c 断面放大

图 3 纳米 7YSZ 涂层微观形貌

Fig.3 SEM morphologies of 7YSZ nano-coating: a) surface, b) cross section, c) magnified cross section

2.2 纳米 7YSZ 热障涂层结构演变

通过燃气热冲击实验仪对纳米 7YSZ 热障涂层进行温度梯度热循环实验, 涂层表面温度 1250 °C, 基体背面温度 247 °C。纳米涂层断面从喷涂态到热循环 40 次以及 460 次的结构演变如图 4 所示。图 4a 为喷涂态的断面形貌, 纳米晶粒都均匀镶嵌在整个涂层中, 整个涂层断面较为疏松。图 4b 为涂层近表面熔融-微熔区域的形貌, 熔融区为纳米晶粒熔融长大形成的微米级的大晶粒, 微熔区为在等离子体热驱动下部分纳米晶粒长大形成的亚微米或微米晶粒和未熔纳米晶粒。

当热循环次数为 40 次时, 涂层断面形貌如图 4c 所示。在温度梯度作用下, 涂层顶部温度较高, 晶粒中原子扩散速率快, 烧结驱动力较大, 因此涂层

近表面出现了烧结致密化现象; 而陶瓷层底部由于温度较低, 烧结驱动力小, 涂层依然保持着较为疏松的结构^[15]。图 4d 为涂层近表面熔融-微熔区的形貌, 对比喷涂态的形貌 (图 4b), 发现熔融区大尺度晶粒间的晶界消失了, 且亚微米及微米晶粒逐渐向大尺度晶粒靠近, 其中纳米晶粒也相互接触形成弯曲颈。在微熔区, 亚微米和微米晶粒的数量逐渐增多,

而纳米晶粒的数量逐渐减少。

当热循环次数增加到 460 次时, 涂层断面如图 4e 所示, 相比于图 4a 和图 4c, 整个陶瓷层断面都发生了烧结致密化现象。图 4f 为涂层近表面微熔区域的形貌, 明显发现在微熔区纳米晶粒已近消失, 亚微米、微米晶粒已是其主要组成部分且都已烧结团聚在一起, 部分已形成大的烧结块体。

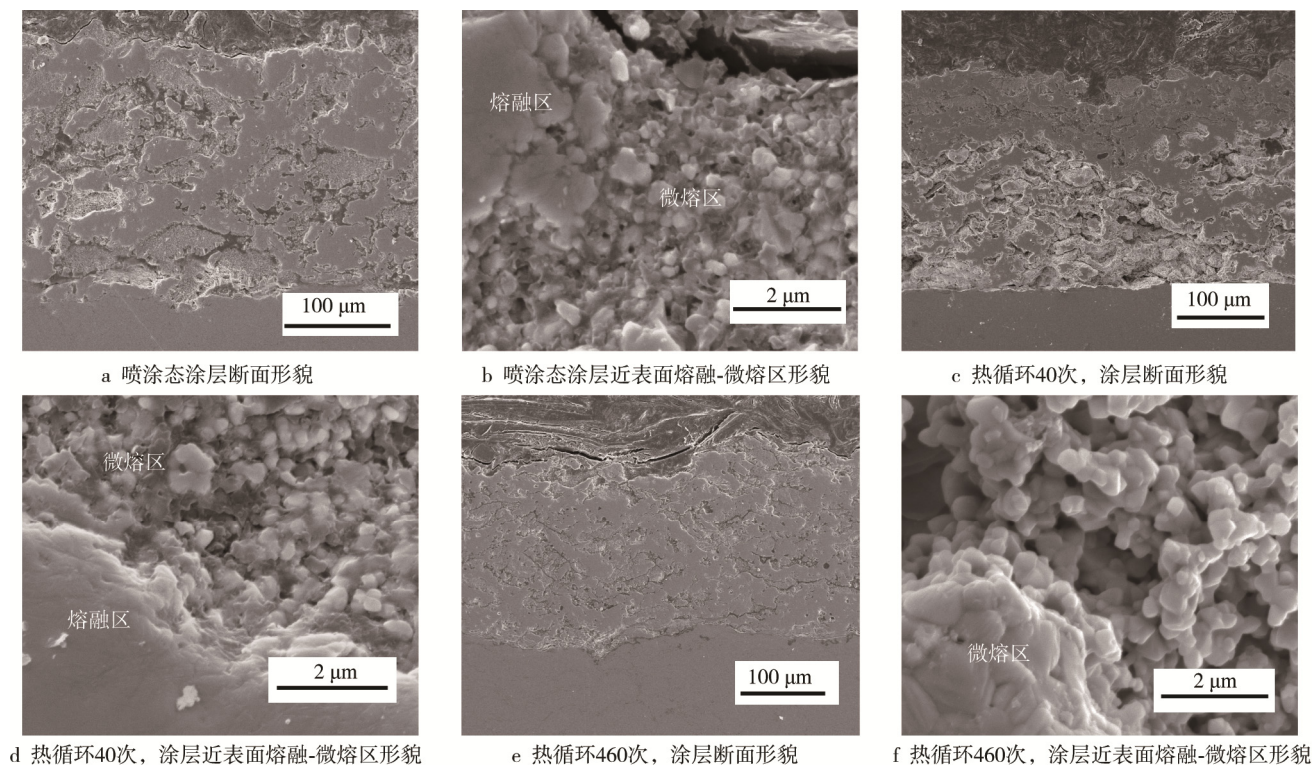


图 4 7YSZ 纳米涂层断面微观形貌

Fig.4 Cross-sectional morphologies of 7YSZ nano-coating: a) cross-section of sprayed coating, b) molten/semi-molten micrograph of cross-sectional coating near-surface, c) cross-section after thermal cycle 40 times, d) molten/semi-molten micrograph near-surface after thermal cycle 40 times, e) cross-section after thermal cycle 460 times, f) molten/semi-molten micrograph near-surface after thermal cycle 460 times

2.3 涂层的一维稳态热传导计算

通过图 4 显示的温度梯度热循环过程中涂层结构演变过程, 发现纳米涂层的烧结与温度梯度相关。一般而言, 热量传递方式主要有对流、热传导、热辐射三种^[16]。纳米涂层中的热量传递以热传导和热辐射为主。热辐射是在热的作用下, 物体原子中的电子排列发生变化而引起的辐射, 辐射场的能量是靠电磁波 (光子) 来传递的。

在燃气热冲击实验中, 涂层表面温度为 1250 °C, 所以涂层中热量传递主要通过热传导进行, 并在涂层内出现温度梯度, 其传热过程可采用一维稳态热传导模型进行计算^[17]。假设热量只在垂直涂层方向存在温度梯度, 并且热传导只在这个方向上进行, 可建立图 5 所示的等效热传导模型。热传导与电荷迁移类似, 电阻与导电相关, 热阻则与热传导相关, 根据傅立叶

定律, 热障涂层样品中的热传导可用式 (1) 表示。

$$q_x = -KA \frac{dT}{dx} = \frac{KA}{L} (T_n - T_{n+1}) \quad (1)$$

式中, q_x 为热流密度, 它是与传热距离 x 无关的常量, K 为涂层中各材料的热导率, A 为涂层面积,

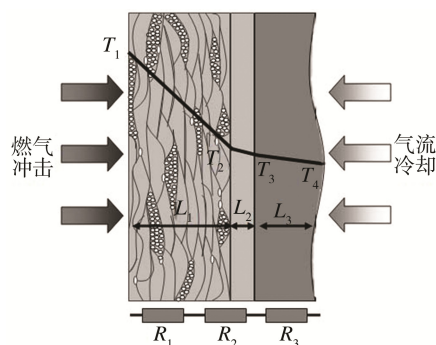


图 5 热障涂层的等效热传导模型

Fig.5 Heat flow model of TBC

L 为涂层样品中涂层和基体的厚度, T_n 和 T_{n+1} 为样品中传热方向上涂层表面和界面的温度。

根据电路模拟法, 可等效模拟热导电路, 定义热障涂层样品中陶瓷层、粘结层、基体分别为热导电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 , 则热导电阻的定义为温度梯度差除以热流密度, 如式 (2) 所示。

$$R_1 = \frac{T_1 - T_2}{q_x}, R_2 = \frac{T_2 - T_3}{q_x}, R_3 = \frac{T_3 - T_4}{q_x} \quad (2)$$

式中, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为陶瓷层表面、陶瓷-粘结层界面、粘结层-基体界面、基体背面的温度。 T_1 为 1250 °C, T_4 为 247 °C。根据涂层结构可定义传导热阻为串联, 因此根据式 (1) 可得出式 (3)。

$$q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{(L_1 / K_1 A)} = \frac{(T_2 - T_3)}{(L_2 / K_2 A)} = \frac{(T_3 - T_4)}{(L_3 / K_3 A)} \quad (3)$$

式中, L_1 、 L_2 、 L_3 分别为陶瓷层、粘结层和基体的厚度, 数值为 250、100、5000 μm ; K_1 、 K_2 、 K_3 分别为陶瓷层、粘结层和基体的热导率, 数值为 1.8、12.3、19.6 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})^{[17-20]}$ 。因此可求出陶瓷-金属界面 (T_2) 和金属-金属界面 (T_3) 的温度分别为 904、883 °C。

2.4 涂层的烧结机制

图 4 表明在温度梯度热循环作用下, 纳米涂层内部逐渐出现烧结并导致涂层致密化。晶粒的烧结是一个热力学不可逆过程, 表面能降低是该过程的驱动力。粉末粒径越小, 比表面越大, 则本征烧结驱动力越大, 因此纳米晶粒更易于烧结。

根据库津斯基 (Kuczynski) 烧结理论^[13], 涂层中晶粒烧结依次按照以下阶段进行: 接触的晶粒颈部长大; 连通孔洞闭合; 孔洞圆化; 孔洞收缩和致密化; 晶粒长大。按照该理论可建立如图 6 所示的等大晶粒和不等大晶粒烧结机理模型图。如图 6a 所示, 两等大晶粒接触形成弯曲颈, 在弯曲颈取一弯曲基元 $ABCD$, r_1 、 r_2 、 r_3 分别为弯曲颈和两个球形晶粒的半径 ($r_1=r_2=r_3$), θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为基元在弯曲颈和两个晶粒的夹角 ($\theta_1=\theta_2=\theta_3$), γ 为基元的表面张力, 则作用在弯曲基元上的表面张力可以通过以下表面张力的定义计算: $\overline{F_{AD}} = \gamma \overline{AD} = \overline{F_{BC}} = \gamma \overline{BC}$, $\overline{F_{AB}} = \gamma \overline{AB} = \overline{F_{DC}} = \gamma \overline{DC}$, 其中, $\overline{AD} = \overline{BC} = 2(r_1 \sin \frac{\theta_1}{2}) = 2r_1 \frac{\theta_1}{2} = r_1 \theta_1$, 同理 $\overline{AB} = \overline{DC} = r_2 \theta_2 = r_3 \theta_3$ 。由于 θ 很小, 则 $\sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$ 。因此作用在弯曲基元 $ABCD$ 上 X 轴方向的合力如式 (4) 所示。作用在弯曲基元上 Y 轴方向的合力如公

$$\begin{aligned} \overline{F_x} &= \overline{F_{AB}} \sin \frac{\theta_2}{2} + \overline{F_{CD}} \sin \frac{\theta_3}{2} - \overline{F_{AD}} \sin \frac{\theta_1}{2} - \\ &\overline{F_{BC}} \sin \frac{\theta_1}{2} = \gamma(r_2 \frac{\theta_2^2}{2} + r_3 \frac{\theta_3^2}{2} - r_1 \theta_1^2) \end{aligned} \quad (4)$$

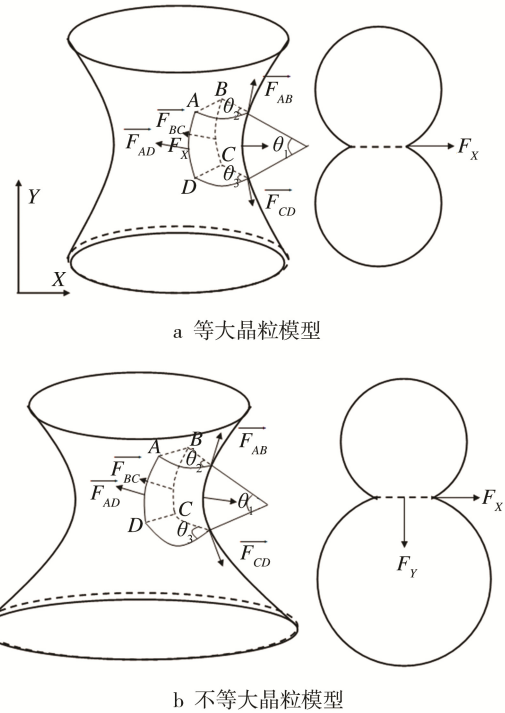


图 6 弯曲颈部的受力分析

Fig.6 Force analysis of crook neck: a) model for particles with same diameter, b) model for particles with different diameter

式 (5) 所示。

$$\begin{aligned} \overline{F_y} &= \overline{F_{AB}} \cos \frac{\theta_2}{2} - \overline{F_{CD}} \cos \frac{\theta_3}{2} = \\ &\gamma(r_3 \theta_3 \cos \frac{\theta_3}{2} - r_2 \theta_2 \cos \frac{\theta_2}{2}) \end{aligned} \quad (5)$$

当同径晶粒颈部接触时, 由于 $\theta_1=\theta_2=\theta_3$ 和 $r_1=r_2=r_3$, $\overline{F_y} = 0$, 即在 Y 轴方向上合力为零, 因此弯曲颈只存在 X 轴方向的静压力。而当两晶粒大小不一时, $\overline{F_y} \neq 0$, 因此通过与 X 轴方向受力复合, 在弯曲颈部界面处存在一大颗粒方向的剪切力, 该剪切力将导致小晶粒沿晶界剪切滑移。根据计算, 接触的两晶粒直径相差越大, 接触界面处剪切力越大。在烧结开始时, 这种局部的剪切力会使原子快速向弯曲颈扩散, 最终导致晶粒快速长大。相反, 当接触晶粒直径等大时, 由于只存在 X 轴方向的静压力, 原子扩散速率慢, 晶粒长大速率也慢。

温度梯度热循环下, 纳米涂层中的晶粒长大如图 7 所示。图 7a 为喷涂态的微熔和未熔区的形貌, 其中含有近似等大的纳米或亚微米晶粒, 此外还含有微米柱状晶粒。当热循环 40 次时, 微米柱状晶沿着温度梯度方向迅速长大, 而纳米或亚微米晶粒变化不大。这是由于大尺度微米柱状晶与小尺度亚微米或纳米晶粒接触时, 接触界面存在较大剪切力, 导致晶界快速向小晶粒方向推移, 小尺寸晶粒逐渐消失, 大尺

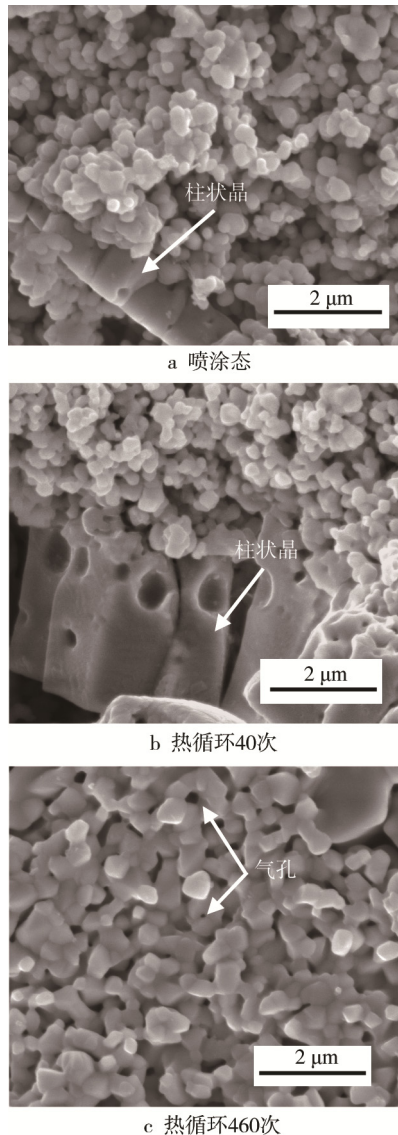


图 7 7YSZ 纳米涂层断面形貌

Fig.7 Cross-sectional morphologies of 7YSZ nano-coating: a) as-sprayed, b) 40 cycles, c) 460 cycles

度晶粒迅速长大, 如图 7b 中所示的大尺度柱状晶。因此接触晶粒尺寸相差越大, 晶界移动速率越快, 晶粒长大速率也越快^[21]。另外, 纳米涂层中存在温度梯度, 在温度梯度方向上由于扩散速率快, 导致晶粒在该方向上快速生长。通过对比图 7a 和图 7b 中亚微米和纳米晶粒, 发现它们的晶粒尺寸并没有发生明显的变化, 这是由于等大晶粒相互接触时, 在接触弯曲颈处只存在静压力, 其晶界移动速率慢, 晶粒长大速率也慢。图 7c 为热循环 460 次时的微熔和未熔区形貌, 通过对比图 7a 和图 7b 微熔和未熔区的形貌, 发现其中的纳米和亚微米晶粒已得到明显的长大, 尽管等大晶粒接触界面扩散速率低, 但在高温长时间驱动下, 晶粒亦会逐渐长大。通过图 7c 发现, 晶粒相互接触烧结时, 气孔往往在晶粒交汇点聚集, 这是由于接触晶界存在气孔, 随着烧结的进行, 几个晶粒相互粘结,

直至气孔封闭。当气孔封闭时, 气孔内存在一定的负压, 在此压力作用下会使原子向气孔内扩散, 导致封闭气孔逐渐减小直至消失^[13, 21—22], 因此在图中可发现大量晶界无气孔的多晶粒烧结现象, 气孔逐渐消失进而导致涂层慢慢致密化。

3 结论

1) 在喷涂态涂层中存在纳米喷涂粉末完全熔融后的扁平晶和柱状晶构成的致密区, 同时又存在微熔亚微米晶和未熔纳米晶构成的疏松区, 两区域相互交叠在一起构成了整个 APS 纳米涂层。

2) 在温度梯度作用下, 纳米涂层顶部烧结速率大于底部, 通过一维热传导模型分析, 温度的高低是涂层烧结速率的主控因素。随着热循环次数的增加即烧结时间的累积, 整个涂层将逐渐致密化。

3) 涂层中烧结机制存在两种模型: 等大晶粒烧结模型和不等大晶粒烧结模型。当等大晶粒接触形成弯曲颈, 在弯曲晶界只存在静压力, 晶界移动速率慢导致晶粒长大速率较低。相反, 当不等大晶粒接触形成弯曲颈, 则在弯曲颈形成一较大剪切力, 这将加速原子向晶界扩散, 导致大晶粒快速长大。

参考文献:

- [1] XU H B, GONG S G, LIU F S. Recent Development in Materials Design of Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7—12.
- [2] GUO H B, GONG S K, XU H B. Progress in Thermal Barrier Coatings for Advanced Aeroengines[J]. Materials China, 2009(9—10): 18—26.
- [3] ZHANG Y J, SUN X F, JIN T, et al. Microstructure of Air Plasma Sprayed YSZ Nanostructured Thermal Barrier Coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(4): 395—398.
- [4] NEJATI M, RAHIMIPOUR M R, MOBASHERPOUR I, et al. Evaluation of Hot Corrosion Behavior of CSZ, CSZ/Micro Al_2O_3 and CSZ/Nano Al_2O_3 Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings[J]. Ceramics International, 2014, 40: 4579—4590.
- [5] DAROONPARVAR M, YAJID M A M, YUSOF N M, et al. Formation of a Dense and Continuous Al_2O_3 Layer in Nano Thermal Barrier Coating Systems for the Suppression of Spinel Growth on the Al_2O_3 Oxide Scale During Oxidation[J]. Journal of Alloys&Compounds, 2013, 57(18): 205—220.
- [6] 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.
- [7] SCHLICHTING K W, PADTURE N P, JORDAN E H, et

- al. Failure Modes in Plasma-sprayed Thermal Barrier Coating[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 342(1—2):120—130.
- [8] FROMMHERZ M, SCHOLZ A, OECHSNER M, et al. Gadolinium Zirconate/YSZ Thermal Barrier Coatings: Mixed-mode Interfacial Fracture Toughness and Sintering Behavior[J]. *Surf Coat Technol*, 2016, 286: 119—128.
- [9] WANG X, XIAO P. Residual Stress and Constrained Sintering of YSZ/ Al_2O_3 Composite Coating[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 2591—2603.
- [10] KUMAR V, BALASUBRAMANIAN K. Progress Update on Failure Mechanisms of Advanced Thermal Barrier Coatings: A Review[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2016, 90: 54—82.
- [11] CARPIO P, BORRELL A, SALVADOR M D, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Plasma Spraying Coatings from YSZ Feedstocks Comprising Nano- and Submicro-sized Particle[J]. *Ceramics International*, 2015, 41: 4108—4117.
- [12] SAREMI M, VALEFI Z. Thermal and Mechanical Properties of Nano-YSZ-Alumina Functionally Graded Coatings Deposited by Nano-agglomerated Powder Plasma Spraying[J]. *Ceramics International*, 2014, 40: 13453—13459.
- [13] WANG Y, BAI Y, LIU K, et al. Microstructural Evolution of Plasma Sprayed Submicro-nano-zirconia-based Thermal Barrier Coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 363: 101—112.
- [14] WANG L, WANG Y, SUN X G, et al. Microstructure and Indentation Mechanical Properties of Plasma Sprayed Nano-bimodal and Conventional ZrO_2 -8wt% Y_2O_3 Thermal Barrier Coatings[J]. *Vacuum*, 2012, 86: 1174—1185.
- [15] LIMA R S, MARPLE B R. Nanostructured YSZ Thermal Barrier Coatings Engineered to Counteract Sintering Effects[J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, 485: 182—193.
- [16] INCROPERA F P, DEWITT D P, LU D Y. *Fundamentals of Heat Transfer*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1987.
- [17] 宫文彪. 等离子喷涂三元纳米 ZrO_2 - Y_2O_3 /CeO₂ 热障涂层的组织与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- GONG W B. Study on Microstructures and Properties of Plasma Sprayed Ternary Nanometer ZrO_2 - Y_2O_3 /CeO₂ Thermal Barrier Coatings[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [18] MIURA S, TERADA Y, SUZUKI T, et al. Thermal Conductivity of Ni-Al Powder Compacts for Reaction Synthesis[J]. *Intermetallics*, 2000, 8: 151—155.
- [19] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 84—92.
- Academic Committee of the Superalloys, CSM. *Superalloy Handbook of China*[M]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 84—92.
- [20] 潘金生, 仝健民, 田民波. 材料科学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- PAN J S, TONG J M, TIAN M B. *Fundamentals of Material Science*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [21] LU X J, XIAO P. Constrained Sintering of YSZ/ Al_2O_3 Compositing Coatings on Metal Substrates Produced from Electrophoretic Deposition[J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2007, 27: 2613—2621.
- [22] TIKKANEN H, SUCIU C, WAERNHUS I, et al. Examination of the Co-sintering Process of Thin 8YSZ Films Obtained by Dip-coating on in-house Produced NiO-YSZ[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31: 1733—1739.