

等离子喷涂热障涂层高温 TGO 的形成与生长研究

刘小菊, 王腾, 李偲偲, 李强

(福州大学 材料科学与工程学院, 福州 350116)

摘要: 目的 研究热障涂层(TBC)和纯粘结层(BC)在1100℃下的氧化动力学,探讨热障涂层中热生长氧化物(TGO)组织结构的演化规律。方法 运用大气等离子喷涂技术(APS)制备涂层,对比分析热障涂层和纯粘结层涂层在1100℃下等温氧化2,5,10,20,50,100,200,350 h后TGO的厚度变化,并对粘结层表面和热障涂层截面分别进行XRD和SEM分析。结果 热障涂层和纯粘结层在1100℃下的氧化动力学均遵循抛物线规律,其氧化速率常数分别为0.344,0.354 $\mu\text{m}/\text{h}^{0.5}$ 。等温氧化5 h后,TGO的主要成分为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$;随氧化时间的增加,生成 Cr_2O_3 、尖晶石、CoO和NiO的混合氧化物;等温氧化100 h后,CoO消失,NiO的含量减少, Cr_2O_3 和尖晶石氧化物的含量增加;等温氧化350 h后,TGO中出现了裂纹,但涂层仍未剥落,TGO最终由顶层多孔的混合氧化物层和底层具有柱状晶结构的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 层组成。结论 顶层陶瓷层(TC)对热障涂层氧化速率常数的影响很小。TGO中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 首先形成并以柱状结晶的方式生长,混合氧化物在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上形成,TGO生长速度逐渐变缓。

关键词: APS; 热障涂层; 等温氧化; 热生长氧化物; 生长动力学; 微观结构

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)11-0091-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.015

Formation and Growth Behavior of TGO in Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings at High Temperature

LIU Xiao-ju, WANG Teng, LI Cai-cai, LI Qiang

(School of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate growth kinetics of TBCs and pure BC as well as microstructure evolution of TGO in TBCs. **Methods** Variations in TGO thickness of APS-TBCs and pure BCs after isothermal oxidation at 1100℃ for 2,5,10,20,50,100,200,350 h were comparatively analyzed. XRD and SEM were used to characterize the surface and cross-section of TBCs. **Results** TGO growth kinetics for both samples followed parabolic laws, and the oxidation rate constants of TBCs and pure BC were 0.344 $\mu\text{m}/\text{h}^{0.5}$ and 0.354 $\mu\text{m}/\text{h}^{0.5}$, respectively. TGO mainly consisted of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ after isothermal oxidation for 5 h. CoO, NiO, Cr_2O_3 and spinel oxides appeared with the increase of oxidation time. CoO disappeared, and content of NiO reduced while contents of Cr_2O_3 and spinel oxides increased after isothermal oxidation for 100 h. Cracks appeared but failure of TBCs did not occur after isothermal oxidation at 1100℃ for 350 h. TGO eventually consisted of a sub- Al_2O_3 layer with columnar microstructure and the upper

收稿日期: 2015-08-20; 修订日期: 2015-09-17

Received: 2015-08-20; Revised: 2015-09-17

作者简介: 刘小菊(1988—),女,甘肃人,硕士生,主要研究方向为材料加工工程。

Biography: LIU Xiao-ju (1988—), Female, from Gansu, Master graduate student, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 李强(1962—),男,甘肃人,博士,教授,主要研究方向为金属材料工程。

Corresponding author: LI Qiang (1962—), Male, from Gansu, Ph. D., Professor, Research focus: metallic materials engineering.

porous mixture. **Conclusion** TCs had little effect on the oxidation rate constant of BCs. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ was firstly formed in TGO and grew in form of columnar crystals, then mixed oxides appeared on $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and the growth rate of TGO became slow.

KEY WORDS: APS; TBCs; isothermal oxidation; TGO; growth kinetics; microstructure

等离子喷涂热障涂层已广泛应用于航空发动机和燃气轮机的热端部件,以达到延长热机械零件寿命、提高热机械效率的目的^[1-2]。典型的热障涂层大多由陶瓷顶层(TC)和金属粘结层(BC)组成,陶瓷层一般为7%~8%(质量分数) $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (YSZ),粘结层主要为MCrAlY(M为Ni或Co)合金^[3-5]。高温服役环境下,粘结层中的各元素会发生氧化,在陶瓷层和粘层的界面处生成一层热生长氧化层,简称TGO^[6]。TGO的形成和生长对热障涂层的寿命有很大的影响^[7]。

TGO主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 组成。MCrAlY粘结层中,形成 Al_2O_3 所需的Al元素来自于粘结层中的 $\beta\text{-NiAl}$ 或 $\beta\text{-CoAl}$ 相^[8]。连续而致密的 Al_2O_3 膜对涂层有利,一方面可以降低TGO的生长速率^[9-10],另一方面可以降低陶瓷层和粘结层之间的热膨胀不匹配系数。随着粘结层中Al元素含量的降低,TGO中还会形成NiO、 Cr_2O_3 和尖晶石等混合氧化物^[8,11-14],这些混合氧化物的生长速度快,对热障涂层有害。Nath等^[14]研究了用APS制备的NiCrAlY粘结层在900℃和1000℃下的氧化行为,结果表明,混合氧化产物包括 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、CoO和尖晶石等,但无NiO。有学者对热障涂层的生长动力学进行了探究^[15-19]。Chen等^[17]认为:氧化初期,APS-CoNiCrAlY粘结层在1050

℃下的氧化规律符合抛物线规律。Poza等^[18]的研究表明:APS-NiCoCrAlY粘结层在950℃和1050℃下的氧化动力学均符合三次方定律,但1050℃下氧化前后的拟合公式不一样。

虽然一些学者致力于研究热障涂层的氧化行为,但对TGO的形成及生长过程的研究仍然不够系统,且对涂层微观结构演化的分析不够详细。因此,本文在前人研究的基础上,结合SEM、EDS及XRD技术研究TGO组织结构演化及生长方式,为理解TGO的生长机制和热障涂层在实际应用中的寿命预测提供帮助。

1 试验

Inconel 718合金基体经喷砂处理后,采用大气等离子喷涂设备(APS-2000)沉积了厚约100 μm的CoNiCrAlY粘结层和300 μm的8YSZ陶瓷层。粘结层喷涂粉末牌号为Amdry 995C,其成分(以质量分数计)如下: Ni 31.58%, Cr 20.72%, Al 7.94%, Y 0.52%, C 0.013%, T. A. O 0.20%, Co 余量。陶瓷层喷涂粉末牌号为204B-NS,其成分(以质量分数计)如下: Y_2O_3 7.46%, HfO_2 1.64%, T. A. O 0.11%, TiO_2 0.10%, 水分 0.04%, MgO 0.02%, ZrO_2 余量。采用同样的方法制备了纯粘结层试样。喷涂工艺参数见表1。

表1 喷涂工艺参数

Tab. 1 Deposition parameters for air plasma sprayed coating

涂层	电压/V	电流/A	主气(Ar)流量 /(L·min ⁻¹)	次气(H ₂)流量 /(L·min ⁻¹)	喷涂距离 /mm	送粉率 /(g·min ⁻¹)
陶瓷层	65	600	45	9	100	30
粘结层	65	500	45	9	100	60

将两种喷涂态试样各取一部分置于高温箱式炉内,以8℃/min的速度升温至1100℃进行恒温氧化实验,选取氧化2,5,10,20,50,100,200,350 h的试样,将试样切割成10 mm×10 mm×4 mm的尺寸。切割后的横截面经打磨、抛光和超声清洗后,用倒置式高级金相显微镜(M-41X)观察其横截面的抛光程度,并对不同保温时间下的两种试样各选取10个不

同的区域,用金相分析软件(MIAS-3000)测量并计算出TGO的平均厚度,进而获得两种涂层中TGO的生长动力学公式。粘结层的物相分析是由X射线衍射仪(Cu靶, K α 辐射)的D/tex ultra探头实现的。最后,利用场发射扫描电子显微镜(Carl ZEISS SUPRA 55)和自带的能谱(Oxford X-Max)技术对热障涂层的截面和断面进行微观形貌和成分分析。

2 结果与讨论

2.1 TGO 生长动力学分析

图 1a—h 分别为热障涂层在不同氧化时间下的 SEM 横截面图。可以看出,TGO 的形貌极不规则,故直接测量 TGO 的厚度存在较大误差,本文采用面积法计算 TGO 的平均厚度(δ_{eq}),计算公式如下:

$$\delta_{eq} = \frac{\sum \text{TGO 的总面积}}{\sum \text{TGO 的总长度}} \quad (1)$$

为了评估顶部陶瓷层对热障涂层高温氧化速率的影响,可将热障涂层和纯粘结层在 1100 °C 下的氧化动力学进行对比分析,如图 2 所示。TGO 的生长速

度随氧化时间的增加逐渐减小,氧化初期粘结层中充足的富铝 β 相能使 α - Al_2O_3 连续形成。一旦完整而致密的 Al_2O_3 膜形成,就会阻止外界的氧向 BC/TGO 的界面进一步扩散,从而使反应界面处的氧分压降低^[14],导致氧化后期 TGO 的生长速率变慢。经拟合分析,两种涂层中 TGO 的生长均满足如下的抛物线规律:

$$\delta_{eq} = K_p t^{1/2} + c \quad (2)$$

式中: t 为氧化时间, K_p 为氧化速率常数, c 为常数。经计算可知,热障涂层在 1100 °C 下的 $K_p = 0.344 \mu\text{m}/\text{h}^{0.5}$,介于 1050 °C 和 1150 °C 的氧化速率常数之间^[19]。相同条件下,纯粘结层的 $K_p = 0.354 \mu\text{m}/\text{h}^{0.5}$ 。可认为,TC/TGO 界面处的氧含量与 TC 表面的氧含量基本相等,与文献[20]中的假设一致。

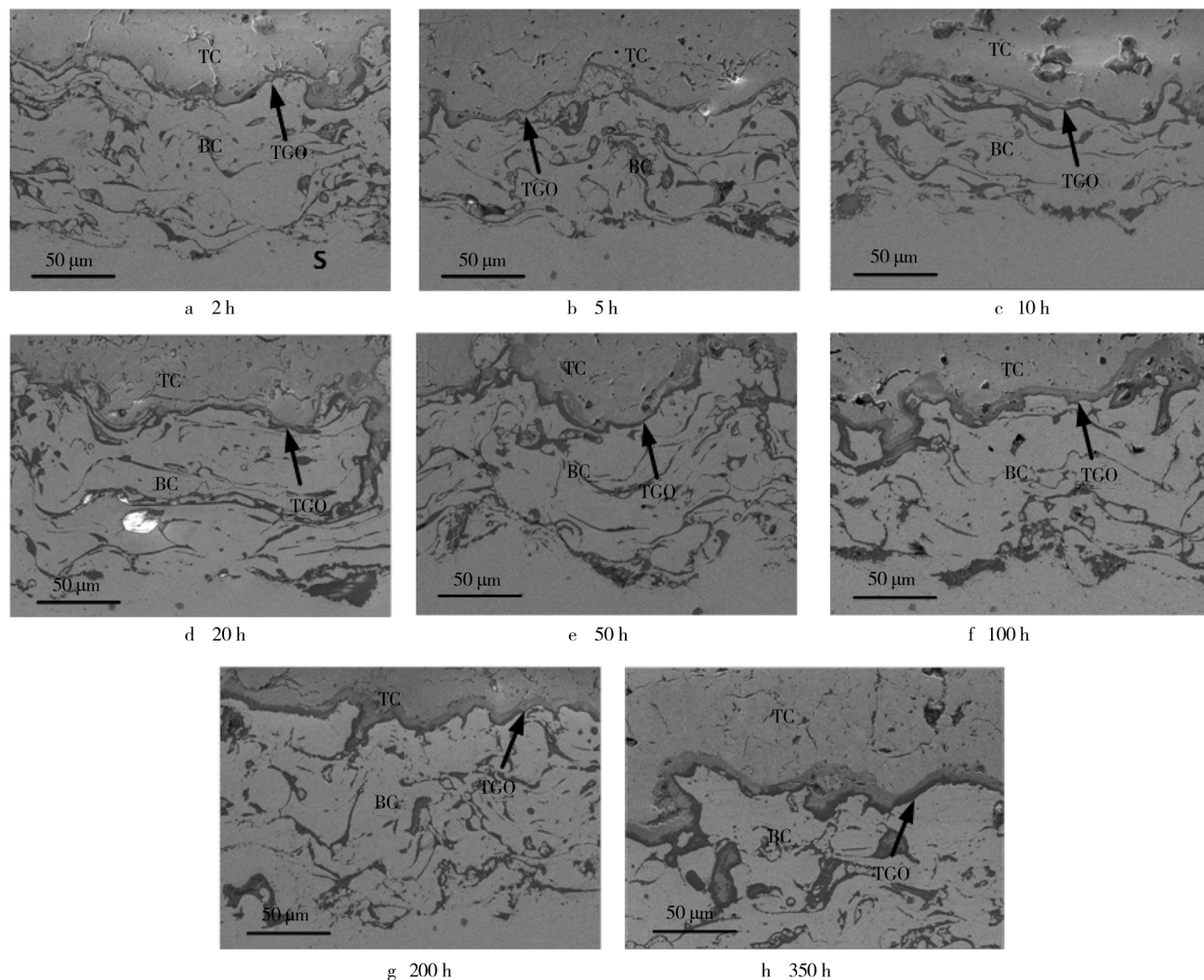


图 1 试样在 1100 °C 下氧化不同时间后的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of samples after different oxidation time at 1100 °C

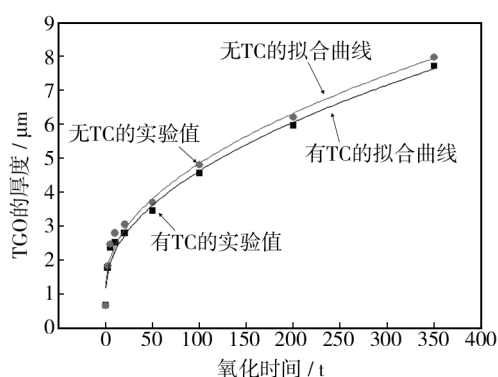


图2 有陶瓷层和无陶瓷层涂层在 1100 °C 下氧化过程中 TGO 厚度与保温时间的函数关系

Fig. 2 Relationship between TGO thickness and incubation time during the oxidation of APS-TBCs and bare bond coating at 1100 °C

2.2 粘结层在高温氧化过程中的相演化分析

文中采用纯粘结层的相变来说明热障涂层中粘结层的相变问题。图 3 为 CoNiCrAlY 粉末、喷涂态和 1100 °C 下分别保温 5, 10, 100, 350 h 后粘结层的 XRD 图。由图 3 可知, CoNiCrAlY 粉末主要由 γ (Co-Ni-Cr 固溶体)/ γ' (Ni_3Al) 和 β (CoAl) 相组成; 相对于粉末, 喷涂态粘结层的 γ/γ' 相出现了峰型宽化的现象, 主要是由于喷涂过程中的晶粒细化和微应力的产生所致, β 相减少是因喷涂过程中粒子局部受热而被氧化导致的。氧化前期, 除了生成 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 外, 还有少量 Cr_2O_3 , NiO, CoO 和尖晶石氧化物 (NiCr_2O_4 , NiAl_2O_4 , CoAl_2O_4 , CoCr_2O_4 , NiCo_2O_4 或 $(\text{Ni}, \text{Co})(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$ 的混合物)。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在热力学上会优先形成, Cr_2O_3 因

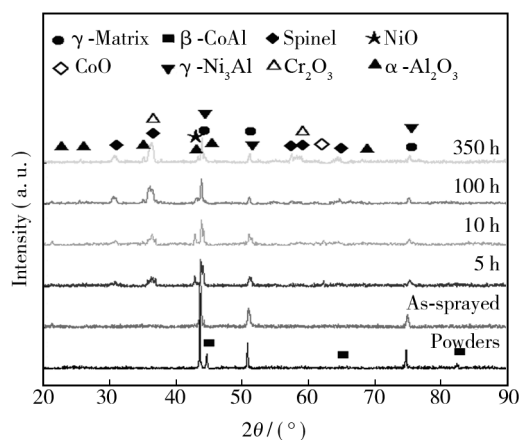


图3 CoNiCrAlY 粉末、喷涂态及 1100 °C 下不同氧化时间的粘结层表面 XRD 图

Fig. 3 XRD spectra of the CoNiCrAlY powder, as-sprayed and bond coats oxidized at 1100 °C for different time

具有同 Al_2O_3 相同的晶体结构, 更易在 Al_2O_3 的基础上形核; 对比文献^[14]可知, NiO 的生成所需的活化能很大; 尖晶石是由其它氧化物进一步反应生成的。等温氧化 100 h 后, 因粘结层中富铝 β 相的大量消耗, 使 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的含量不再增加; CoO 基本消失, 因 CoO 结构中存在缺陷和阳离子空位^[21], 不稳定的 CoO 极易与 Cr_2O_3 或 Al_2O_3 反应生成尖晶石; 尖晶石氧化物和 Cr_2O_3 逐渐增多。氧化 350 h 后, Cr_2O_3 和尖晶石氧化物 (简称 CS) 明显增多, NiO 减少, 因部分 NiO 会进一步转化为尖晶石。

2.3 TGO 的组织结构与生长方式分析

图 4 分别为热障涂层在 1100 °C 下等温氧化 5, 100, 350 h 后的 SEM 横截面图, 以及其各自对应的线扫描图。由横截面图可知, 同一氧化时间下, 不同位置的 TGO 厚度有所差异, 这是由于涂层在高温下的变形所致^[22]。随着氧化时间的增加, TGO 的波动性更明显, 且 TGO 由均匀的深灰色结构演化为上层为浅灰色、下层为深灰色的双层结构。等温氧化 350 h 后, TGO 中出现了裂纹, 但涂层仍未剥落。

结合对图 3 与图 4a 的分析可知, 氧化 5 h 后, TGO 的主要成分为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。一般认为, Al_2O_3 的形成主要以 O^{2-} 通过 TGO 晶界向内扩散为主, 当 TGO 晶粒较小时, Al^{3+} 也会以晶格扩散或体扩散的方式向外扩散, 从而与 TC/TGO 界面处的氧离子结合生成 Al_2O_3 ^[14]。氧化 100 h 后, Al_2O_3 含量基本不变, 同时出现了大量的 Cr_2O_3 。氧化 350 h 后, Al_2O_3 的含量稍有减少, 这与粘结层中富铝 β 相的大量消耗和部分 Al_2O_3 向尖晶石的转变有关; 另外, Cr_2O_3 和尖晶石氧化物不断增多。最后, TGO 主要由下层的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和上层的 CSN 组成。

热障涂层氧化 350 h 后的断口形貌如图 5a 所示, 图 5b—图 5d 分别为图 5a 中对应 1, 2, 3 点的点扫描结果。由图可知, TGO 分为明显的上下两层结构, 靠近陶瓷层的 TGO 呈现出多孔的等轴晶结构, 结合前文和图 5b 分析可知, 此区为 NiO, Cr_2O_3 和尖晶石的混合氧化物, 是由粘结层中金属阳离子向外扩散形成的, 孔状形貌除了由排列混乱的尖晶石等引起外, 还与 Cr_2O_3 转变为挥发性气体 CrO_3 有关; 靠近粘结层的 TGO 呈六方形的柱状晶结构。图 5c 表明, 此区为 Al_2O_3 , 该结构是由 O^{2-} 沿着 TGO 的晶界向内扩散从而使 TGO 出现竞争性生长所致。图 5d 表明, 区域“3”为金属粘结层。

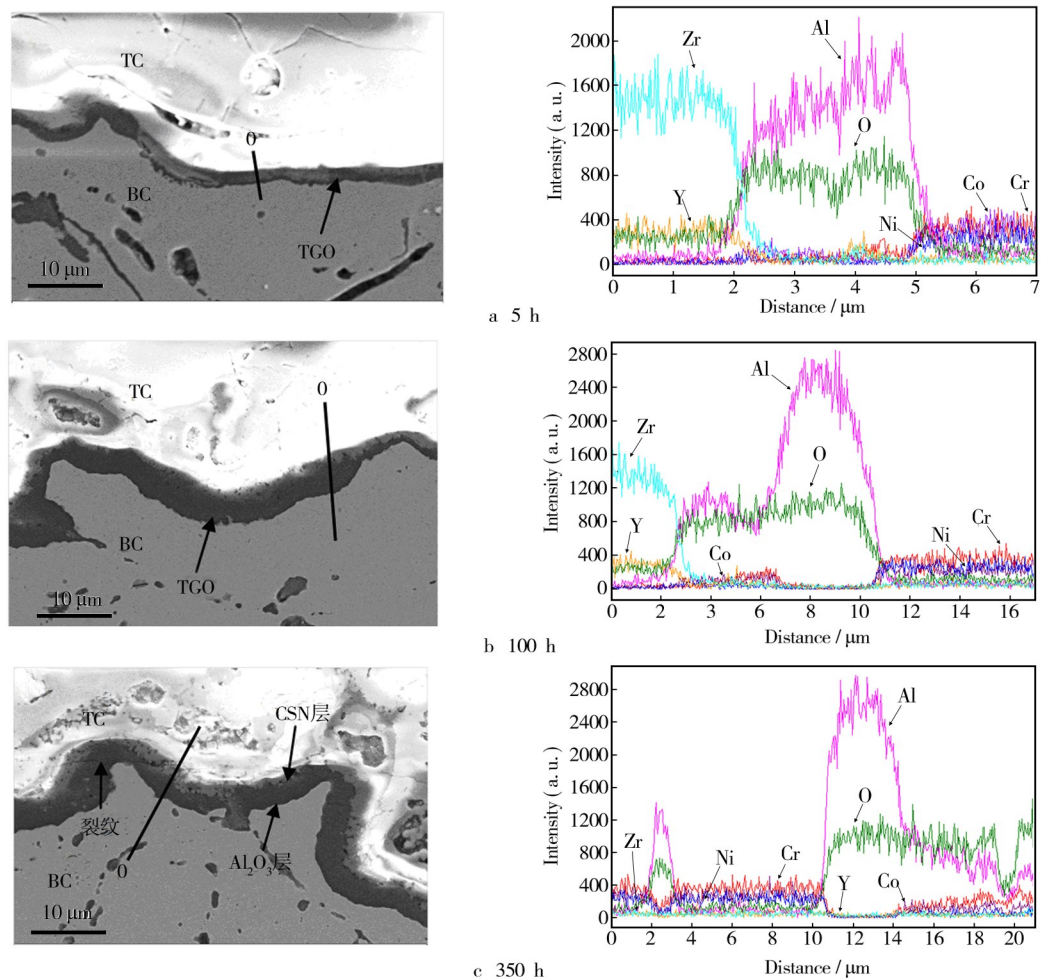


图 4 试样在 1100 °C 下氧化 5 h,100 h 和 350 h 后的 SEM 截面图及其线扫描图

Fig.4 Cross-sectional SEM images of samples after oxidation at 1100 °C for 5 h(a) , 100 h(c) ,350 h(e) and their corresponding EDS line scan

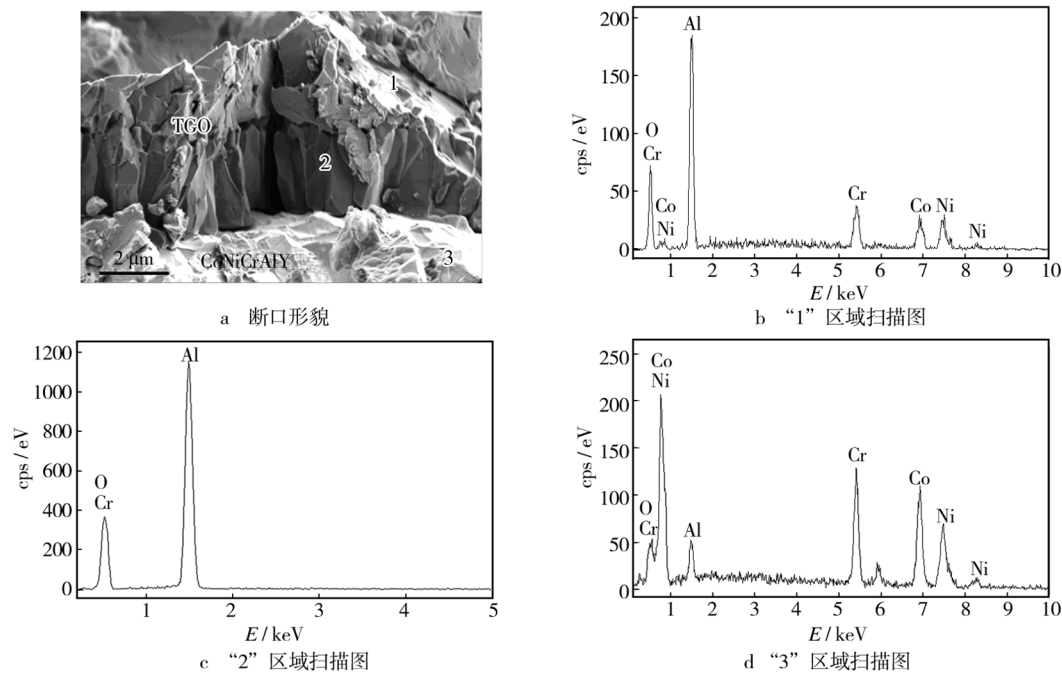


图 5 热障涂层在 1100 °C 下氧化 350 h 的 SEM 断面图和不同区域的点扫描图

Fig.5 SEM images of the fractured cross-section of TBC oxidized at 1100 °C for 350 h and the corresponding point scanning of different areas

3 结论

1) 热障涂层在 1100 ℃ 下的氧化动力学规律遵循抛物线规律,其氧化速率常数为 $0.344 \mu\text{m}/\text{h}^{0.5}$ 。热障涂层中粘结层的氧化速率常数基本不受 8YSZ 陶瓷层的影响。

2) 喷涂态粘结层除了 γ/γ' 和 β 相外,还有少量 Al_2O_3 存在。等温氧化 5 h 后,TGO 的主要成分为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,当富铝 β 相被大量消耗后,会形成 Cr_2O_3 、尖晶石、CoO 和 NiO 的混合氧化物,随着氧化时间的增加,CoO 消失,NiO 的含量减少, Cr_2O_3 、尖晶石的含量增加,TGO 最终由靠近陶瓷层的混合氧化物层和靠近粘结层的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 层组成。

3) 同一氧化时间下,波状 TGO 的厚度在不同的位置有所差异,且随着氧化时间的增加,TGO 的波动周期变短。等温氧化 350 h 后,TGO 中出现了裂纹,但涂层整体未剥落。

4) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 主要以柱状晶的方式生长,混合氧化物层呈现出多孔的等轴状形貌。

参考文献

- [1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal Barrier Coatings for Gas-turbine Engine Applications[J]. Science, 2002, 5566(296): 280—284.
- [2] 王世兴,袁涛,詹华,等. 不同结构等离子喷涂热障涂层的性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 21—28.
WANG Shi-xing, YUAN Tao, ZHAN Hua, et al. Research on Properties of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings with Different Microstructure[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 21—28.
- [3] DAROLIA R. Thermal Barrier Coatings Technology: Critical Review, Progress Update, Remaining Challenges and Prospects[J]. International Materials Reviews, 2013, 58(6): 315—345.
- [4] EVANS A G, MUMM D R, HUTCHINSON J W, et al. Mechanisms Controlling the Durability of Thermal Barrier Coating[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(5): 505—553.
- [5] DAVIS J R. Handbook of Thermal Spray Technology[M]. USA: ASM international, 2004.
- [6] RICO A, GÓMEZ-GARCÍA J, MÚÑEZ C J, et al. Mechanical Properties of Thermal Barrier Coatings after Isothermal Oxidation: Depth Sensing Indentation Analysis[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(16): 2307—2314.
- [7] WRIGHT P K, EVANS A G. Mechanisms Governing the Performance of Thermal Barrier Coatings[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 1999, 4(3): 255—265.
- [8] RICHER P, YANDOUZI M, BEAUVAIS L, et al. Oxidation Behaviour of CoNiCrAlY Bond Coats Produced by Plasma, HVOF and Cold Gas Dynamic Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 3962—3974.
- [9] BUSO E P, EVANS H E, QIAN Z Q, et al. Effects of Breakaway Oxidation on Local Stresses in Thermal Barrier Coatings[J]. Acta Materialia, 2010, 58(4): 1242—1251.
- [10] ZHU C, JAVED A, LI P, et al. A Study of the Microstructure and Oxidation Behavior of Alumina/Yttria-stabilized Zirconia ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$) Thermal Barrier Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 212: 214—222.
- [11] NUSAIR KHAN A, LU J. Behavior of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings, Subject to Intense Thermal Cycling[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 166(1): 37—43.
- [12] 王爽,等. 等离子喷涂热障涂层的氧化行为[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
WANG Shuang. Oxidation Behavior of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [13] WEI Q, YIN Z Y, LI H. Oxidation Control in Plasma Spraying NiCrCoAlY Coating [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(12): 5094—5099.
- [14] NATH S, MANNA I, MAJUMDAR J D. Kinetics and Mechanism of Isothermal Oxidation of Compositionally Graded Yttria Stabilized Zirconia (YSZ) Based Thermal Barrier Coating [J]. Corrosion Science, 2014, 88: 10—22.
- [15] AHMADIAN S, JORDAN E. Explanation of the Effect of Rapid Cycling on Oxidation, Rumpling, Microcracking and Lifetime of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 244(15): 109—116.
- [16] CHEN W R, WU X, MARPLE B R, et al. The Growth and Influence of Thermally Grown Oxide in a Thermal Barrier Coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 1074—1079.
- [17] CHEN W R, WU X, DUDZINSKI D. Influence of Thermal Cycle Frequency on the TGO Growth and Cracking Behaviors of an APS-TBC[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(6): 1294—1299.
- [18] POZA P, GÓMEZ-GARCLA J, MÚÑEZ C J. TEM Analysis of the Microstructure of Thermal Barrier Coatings after Isothermal Oxidation [J]. Acta Materialia, 2012, 60(20): 7197—7206.

(下转第 103 页)

- TAO Zhi-hua. Adsorption Properties and Inhibition of Mild Steel Corrosion in Acid Solution by Some Phenyl-triazol Derivatives[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [12] KHALED K F, HAMMOUTI B. Some Benzotriazole Derivatives as Corrosion Inhibitors for Copper in Acidic Medium; Experimental and Quantum Chemical Molecular Dynamics Approach[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 117(1): 148—155.
- [13] CAVALLARO L, FELLONI L F, TRABANELLI G, et al. The Anodic Dissolution of Iron and the Behavior of Some Corrosion Inhibitors Investigated by the Potentiodynamic Method[J]. Electrochimica Acta, 1964, 9(5): 485—494.
- [14] FERREIRA E S, GIACOMELLI C, GIACOMELLI F C. Evaluation of the Inhibitor Effect of Lascorbic Acid on the Corrosion of Mild Steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 83(1): 129—134.
- [15] LI X, DENG S, FU H. Benzyl Trimethyl Ammonium Iodide as a Corrosion Inhibitor for Steel in Phosphoric Acid Produced by Dihydrate Wet Method Process[J]. Corrosion Science, 2011, 53(2): 664—670.
- [16] BENTISS F, LEBRINI M, LAGRENEE M. Thermodynamic Characterization of Metal Dissolution and Inhibitor Adsorption Processes in Mild Steel/2,5-bis (n-thienyl)-1,3,4-thiadiazoles/Hydrochloric Acid System[J]. Corrosion Science, 2005, 47(12): 2915—2931.
- [17] 李敏娅, 王海人, 屈钧娥. 430 不锈钢表面 PFDS 硅烷膜的自组装及缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 66—69.
- LI Min-ya, WANG Hai-ren, QU Jun-e. Self-assembling of PFDS on the Surface of 430 Stainless Steel and Its Corrosion Inhibition Performance[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 66—69.
- [18] SINAPI F, FORGET L, DELHALLE J, et al. Self-assembly of (3-mercaptopropyl) Trimethoxysilane on Polycrystalline Zinc Substrates towards Corrosion Protection[J]. Thin Solid Films, 2002, 405(112): 186—193.

(上接第 90 页)

- [11] 袁森, 周好斌, 徐伟东. 智能化油井套管脉冲电源系统设计[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2015, 32(1): 8—12.
- YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Wei-dong. The Design of Intelligent Power Supply System for Oil Well Casing Cathodic Protection with Pulse Current[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2015, 32(1): 8—12.
- [12] 袁森, 周好斌, 徐兴龙. 油井套管脉冲电流阴极保护监控系统设计[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 133—137.
- YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Xing-long. Design of Pulse Current Cathodic Protection Monitoring System for Oil Well Casing[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 133—137.
- [13] 夏泽中, 刘婷. 阴极保护电源远程监控系统设计与实现[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(1): 4—8.
- XIA Ze-zhong, LIU Ting. Design and Realization of Remote Monitoring of Cathodic Power Supply System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(1): 4—8.
- [14] 增敏, 陈小红, 曹彪, 等. 一种微弧氧化逆变焊接电源控制制系统[J]. 华南理工大学学报, 2012, 34(1): 4—7.
- ZENG Min, CHEN Xiao-hong, CAO Biao, et al. Control System of Micro-arc Oxidation Inverter Power Supply[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37(2): 40—43.
- [15] 杨骏. 基于中颖双核芯片 SH99F100 在无卡旋切机变频器中的应用[J]. 变频器世界, 2012: 85—87.
- YANG Jun. Application of SH99F100 Dual-core Chips with Sinowalth in Non-center Rotary Cutter Inverter[J]. The World of Inverters, 2012: 85—87.
- [16] 马菊莲, 马军鹏, 周好斌. 具有自学习功能的智能抽油机变频控制系统研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(4): 77—79.
- MA Ju-lian, MA Jun-peng, ZHOU Hao-bin. Study on Variable Frequency Control System of Smart Pumping Unit With The Function of Self-learning[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(4): 77—79.

(上接第 96 页)

- [19] JACKSON R D, TOYLOR M P, EVANS H E, et al. Oxidation Study of an EB-PVD MCrAlY Thermal Barrier Coating System[J]. Oxidation of Metals, 2011, 76(3/4): 259—271.
- [20] HILLE T S, TURTELTAUB S, SUIKER A S J. Oxide Growth and Damage Evolution in Thermal Barrier Coatings[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(10): 2139—2152.
- [21] KORB L J, OLSON D L. Metals Handbook[M]. USA: ASM International, 1987.
- [22] 韩志勇, 王晓梅, 王志平. 热障涂层高温 TGO 生长变化[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 5—8.
- HAN Zhi-yong, WANG Xiao-mei, WANG Zhi-ping. Change of TGO Growth in Thermal Barrier Coatings at High Temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 5—8.