DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.002

DS GTD111 合金及 YSZ/CoCrAlY 型热障涂层在 950 ℃的热腐蚀行为

任维鹏[1]，齐　闯[1]，范少敏[1]，梁照森[1]，肖程波[1]，何利民[2]

(1. 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室，北京 100095；2. 北京航空材料研究院航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室，北京 100095)

摘　要：采用 EB-PVD 技术在 DS GTD111 合金表面沉积制备 YSZ/CoCrAlY 热障涂层，研究了 DS GTD111 合金及热障涂层在 950 ℃的热腐蚀行为，进行了腐蚀动力学及腐蚀产物分析。结果表明：950 ℃涂盐条件下热腐蚀 100 h，热障涂层试样粘结层表面氧化物或腐蚀产物层的厚度与试验合金相比有很大程度的减小，施加热障涂层在很大程度上改善了合金抗 950 ℃熔盐热腐蚀能力，热障涂层失效开裂部位为 TGO 与粘结层界面。950 ℃涂盐条件下热腐蚀 100 h，YSZ/CoCrAlY 型热障涂层的热腐蚀行为受合金基体影响作用不显著。

关键词：DS GTD111；高温合金；热障涂层；热腐蚀

中图分类号：TG174.45　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2019)12-1235-07

Hot Corrosion Behavior of DS GTD111 Superalloy and YSZ/CoCrAlY Thermal Barrier Coating at 950 ℃

REN Weipeng[1], QI Chuang[1], FAN Shaomin[1], LIANG Zhaosen[1], XIAO Chengbo[1], HE Limin[2]

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing 100095, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The YSZ/CoCrAlY thermal barrier coating (TBC) was deposited by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) on DS GTD111 superalloy. The hot corrosion behavior of DS GTD111 and its thermal barrier coating was studied. And corrosion kinetics and corrosion products were analyzed. The results show that the thickness of the oxide or corrosion product layer on the surface of the bonding layer of the thermal barrier coating sample decreased significantly compared with that of the test alloy under the condition of salt coating at 950 ℃ for 100 h. Applying thermal barrier coating can greatly improve the alloy's resistance to thermal corrosion of molten salt at 950 ℃, and the failure and cracking of thermal barrier coating is the interface between TGO and bonding layer. The thermal corrosion behavior of YSZ/CoCrAlY thermal barrier coating is not significantly affected by the alloy substrate under the condition of salt coating at 950 ℃ for 100 h.

Key words: DS GTD111; superalloy; thermal barrier coating; hot corrosion

随着地面燃气轮机涡轮前进气口温度的提高，对涡轮叶片材料提出了严峻的考验。一方面要求材料具备良好的力学性能[1]，另一方面，由于低级燃料的使用和外界环境特别是近海地区大气中的腐蚀介质的影响，要求叶片材料及其防护涂层需具备更好的抗高温氧化及耐热腐蚀性能[2,3]。高压涡轮叶片常常采用热障涂层保护其表面[4-7]，特别是在腐蚀性环境中服役的地面燃气轮机叶片，在关注其抗高温氧化能力的同时还应提高其抗热腐蚀的能力。腐蚀性盐类沉积在热端部件上，使其表面被一层处于离子态的薄层熔盐所覆盖，将发生热腐蚀，从而使合金或涂层的使用寿命缩短。叶片表面沉积的熔盐成分虽然以 Na_2SO_4 为主，但常常伴有 NaCl 成分。采用 Na_2SO_4 和 NaCl 混合熔盐模拟叶片腐蚀环境，研究热障涂层在 Na_2SO_4 和 NaCl 混合熔盐中的热腐蚀行为显得极为重要。目前，有较多研究工作报道了热障涂层热腐蚀行为。涉及 CoCrAlY 涂层[8-10]的包括 NiAl 金属间化合物表面采用溅射法制备的 CoCrAlY 涂层热腐蚀行为；GH907 合金表面采用超音速火焰喷涂法制备 CoCrAlYSi 涂层，探讨了 Si 元素对提高 CoCrAlY 涂层性能的影响机制；K444 合金表面采用 EB-PVD 法制备 YSZ/CoCrAlY 型热障

收稿日期：2019-09-11

作者简介：任维鹏(1984-)，山东济南人，博士，工程师. 主要从事高温结构材料研究方面的工作. 电话：010-62498266，E-mail: weipengrxx@126.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

涂层的热腐蚀行为等。研究表明[11-14],基体合金成分对涂层的性能和服役寿命有重要影响,对特定合金–涂层系统的抗热腐蚀性能的研究具有较大的工程应用价值。

DS GTD111 合金为 GE 公司研制的定向凝固高温合金,主要用于制备工业燃气轮机涡轮叶片,课题组研制的 YSZ/CoCrAlY 型热障涂层采用 CoCrAlY 合金作粘结层,期望改善热障涂层的腐蚀抗力,在 DS GTD111 合金试样表面制备 YSZ/CoCrAlY 型热障涂层,组成合金–涂层系统,本文研究了 DS GTD111 合金合金–涂层系统的抗热腐蚀性能,并将研究结果与同种涂层在其它试验合金的热腐蚀行为进行了对比讨论,进一步阐述其影响规律和机制。

1 实验材料与方法

1.1 试样制备

试验所选用的 DS GTD111 合金(GE 公司研制,以下简称试验合金)成分如表 1。按 1210 ℃/2h/AC+1 120 ℃/2 h/AC + 870 ℃/24 h/AC 工艺对合金进行热处理,将热处理后的试验合金加工成 20 mm×10 mm×1.5 mm 的试样。采用 EB-PVD,UE-204B 型电子束物理气相沉积(Electron beam physical vapor deposition)设备制备热障涂层。金属粘结层采用 CoCrAlY 合金,其实际成分如表 1。陶瓷层材料选用 6%~8%Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2,简称 6~8YSZ。在沉积涂层前要对基体合金试样进行前处理:首先对试样进行水吹砂,以去除氧化皮及污染物,然后对试样进行超声波清洗 5 min,再依次在去离子水、无水酒精中清洗试样,获得表面洁净的试样。表面处理完毕后,用 EBPVD 技术在试样表面沉积 CoCrAlY 粘结层。对沉积有 CoCrAlY 粘结层的试样进行喷丸处理和真空热扩散处理,表面吹砂清洁后,用 EBPVD 技术在试样表面沉积 6~8YSZ 陶瓷面层。

1.2 试验方法

将试样放入超声波清洗仪中进行超声波清洗,再依次在去离子水、无水酒精中清洗试样,烘干后称量。根据试样尺寸计算试样表面积,根据试样表面积及单位面积涂盐量计算试样总的涂盐量。所用盐溶液为 75%Na_2SO_4+25%NaCl(质量分数)的饱和溶液。将试样置于干净的钢板上,加热试样到 120~150 ℃,用特制雾化设备将盐溶液充分雾化后,均匀地沉积在试样表面,试样烘干后保证盐的沉积量约为 1 mg/cm^2。所用的饱和混合盐溶液均由分析纯的药品和一次蒸馏水配置而成。

涂盐热腐蚀试验在普通电阻炉中进行,试验温度为 950 ℃,总时间为 100 h,分为 5 个周期,采用不连续称重法称量,每隔 20 h 取出试样,在静态空气中冷却,待试样冷却后,检查试样外观并作记录。然后,将试样放在沸水中,煮掉多余盐分,再依次在去离子水、无水酒精中清洗试样,烘干后称量。重复上述涂盐步骤进行下一周期的腐蚀试验。

在观察试样表面产物微观形貌时,需要将试样表面进行喷金处理,在观察试样截面形貌、成分分布情况以及涂层的相组成时,需要对各种涂层试样的横截面进行金相制样。为了防止金相制样过程中涂层及涂层表面氧化膜脱落,金相制样前需将试样表面镀一层 3~5 μm 厚的纯镍层。

采用 Hitachi S-4800, FEI Nano SEM 型扫描电子显微镜(SEM)、Oxford X-Max 型能谱仪(EDS)和 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)对试样表面或截面进行形貌和成分分析。

2 实验结果与分析

2.1 热腐蚀动力学

由图 1 可以看出:涂盐条件下,试验合金热腐蚀初期(0~20 h)有较明显的质量增加,而热障涂层的质量增加较小。试验合金 0~60 h 出现最大质量增加,约为 15 mg/cm^2,热腐蚀 60 h 后,质量增加逐渐减小。对于热障涂层,涂盐条件下,热腐蚀前 20 h 内涂层出现较明显增重,约为 0.6 mg/cm^2。热腐蚀 20~100 h,最大质量增加约为 0.7 mg/cm^2,约为合金最大增重量的 1/20,远小于合金试样的,而且,至热腐蚀 100 h,热障涂层质量增加变化较小,未出现因剥落导致的质量显著减小的现象,表明合金表面施加热障涂层后,在很大程度上改善了其抗 950 ℃熔盐热腐蚀能力。

2.2 试验合金的热腐蚀行为

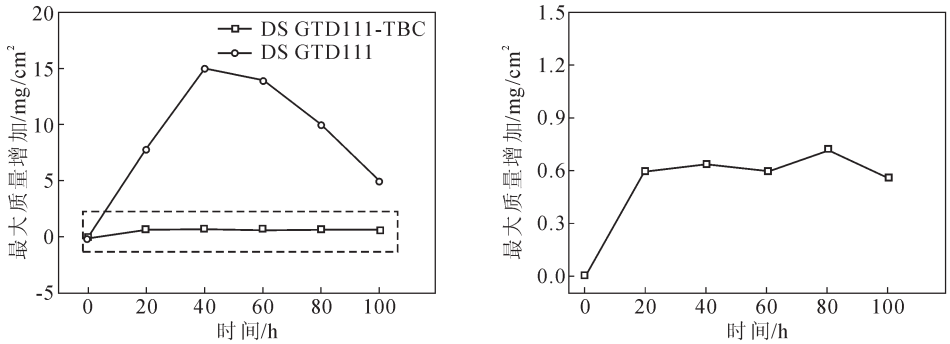
由图 2 可以看出,950 ℃热腐蚀 20 h 后,合金试样未出现明显的腐蚀产物剥落现象;热腐蚀 100 h 后,合金表面形成了大量氧化物或腐蚀产物,并出现了剥落现象,表面大部分区域呈黑色,其中有少量的

表1 试验合金的化学成分 w(%)

Tab. 1 Nominal chemical compositions of CoCrAlY alloy

合金	Ni	Co	Cr	Al	Mo	W	Ti	Hf	Ta	Y
DS GTD111	Bal.	9.4	13.98	2.97	1.48	3.84	5.0	—	2.95	—
CoCrAlY	—	Bal.	21-30	9-17	—	—	—	—	—	0.4-1.0

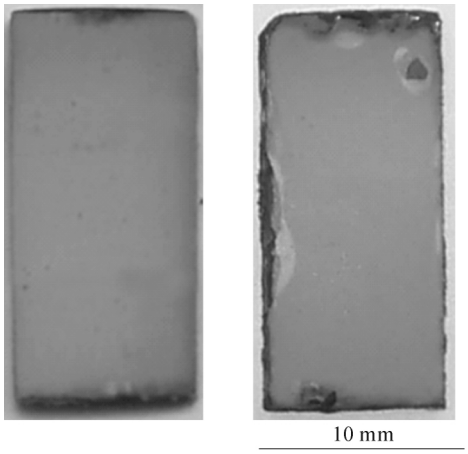
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)动力学曲线总图　　(b)热障涂层试样动力学曲线(a中方框区域放大图)

图 1 涂盐条件下试验合金及热障涂层试样在 950 ℃的热腐蚀动力学曲线

Fig.1 Kinetic curve of weight increase of DS GTD111 alloy and thermal barrier coating samples by hot corrosion at 950 ℃ under salt coating conditions



(a)20 h　　(b)100 h

图 2 试验合金在涂盐条件 950 ℃下热腐蚀不同时间后的表面宏观形貌

Fig.2 Macroscopic photographs of DS GTD111 alloy of 20 h and 100h hot corrosion at 950 ℃ under salt-coated conditions

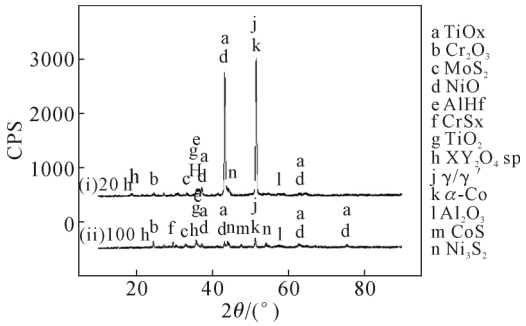


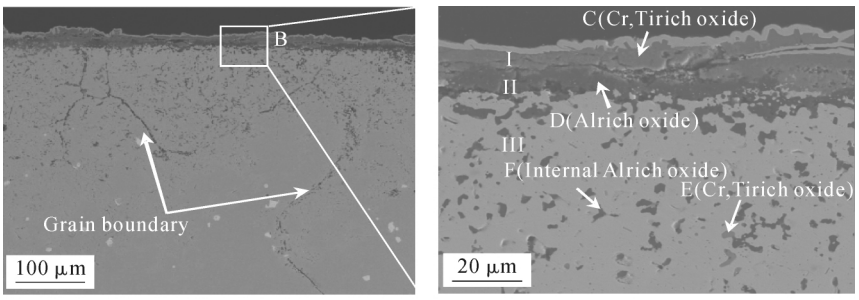
图 3 950 ℃热腐蚀不同时间后试验合金腐蚀产物的 XRD 谱

Fig.3 XRD spectrum of DS GTD111 alloy specimens during hot corrosion at 950 ℃

黄绿色产物。与 20 h 的相比,表面氧化物或腐蚀产物有很大程度的增加,但未出现明显的剥落现象。

由图 3 中可知,950 ℃热腐蚀 20 h 后,试验合金表面形成较大数量的 γ/γ 相、Ti 的氧化物和尖晶石类氧化物,同时发现 Ni_3S_2 和 MoS_2 等硫化物。出现较强的 γ/γ' 衍射峰,可能是由于 950 ℃热腐蚀 20 h 时,合金表面形成的氧化物层厚度较小,X 射线透过氧化层导致出现基体的衍射峰。另外,发现 α-Co 的衍射峰。热腐蚀 100 h 后,合金表面 Cr,Ti 氧化物及尖晶石类氧化物衍射峰增强,Ni,Ti 的氧化物及基体 γ/γ' 衍射峰强度相对减弱,新出现 Cr、Co 的硫化物衍射峰。

由图 4 看出,950 ℃热腐蚀 100 h 后,试验合金表面腐蚀层主要分为 3 层:①I 区灰色衬度氧化层,主要为 Cr,Ti 的氧化物混合区;②II 区黑色衬度层,主要成分为 Al 的氧化物;③III 区为在基体上的内腐蚀层,其中 E 处灰色相主要为含 Cr,Ti 等的硫化物,F 处黑色相主要为 Al 的氧化物。内腐蚀层中的腐蚀区主要沿晶界分布,主要是因为 S 具有沿晶界扩散现象[15]。试验合金表面腐蚀产物层连续性相对较好,这主要是由于合金中含有较多的 Cr 和 Ti 元



(a)低倍　　(b)高倍

图 4 涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h 后试验合金的截面 SEM 形貌

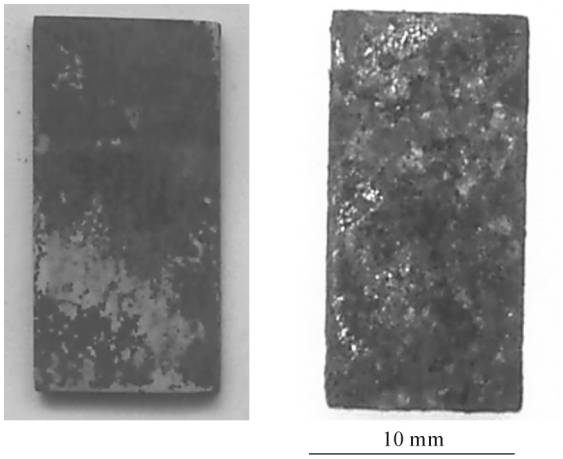
Fig.4 SEM images of cross section of 100h hot corrosion at 950℃ under salt-coated conditions

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

素，其氧化物表层生成连续致密的 Cr，Ti 氧化物层。虽然表面存在连续致密的氧化物层，但熔盐仍可扩散至基体内部，形成厚度约为 200 μm 的内腐蚀层，部分区域沿晶界形成深度更大的内腐蚀层。

2.3 热障涂层的热腐蚀行为

图 5 为热障涂层试样在涂盐条件下 950 ℃热腐蚀后的表面 SEM 照片。可以看出，950 ℃热腐蚀 20 h 后，试样表面未出现剥落现象（见图 5(a)）；950 ℃热腐蚀 100 h 后，热障涂层试样边缘处出现一定程度的涂层剥落现象(见图 5(b))。



(a)20 h　　(b)100 h

图 5 热障涂层试样在涂盐条件下 950 ℃热腐蚀后的表面宏观照片

Fig.5 Macroscopic photographs of thermal barrier coatings at 950 ℃ under salt-coated conditions

沉积态及在涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h后热障涂层表面 X 射线衍射谱图如图 6 所示，腐蚀前后，热障涂层表面陶瓷层均为四方相 t-ZrO_2，未见陶瓷面层在热腐蚀过程中发生失稳相转变。

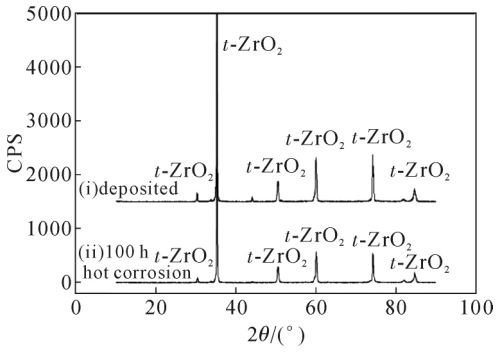


图 6 沉积态及在涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h 后热障涂层表面 XRD 谱

Fig.6 XRD spectrum of thermal barrier coating surface under salt-coated conditions

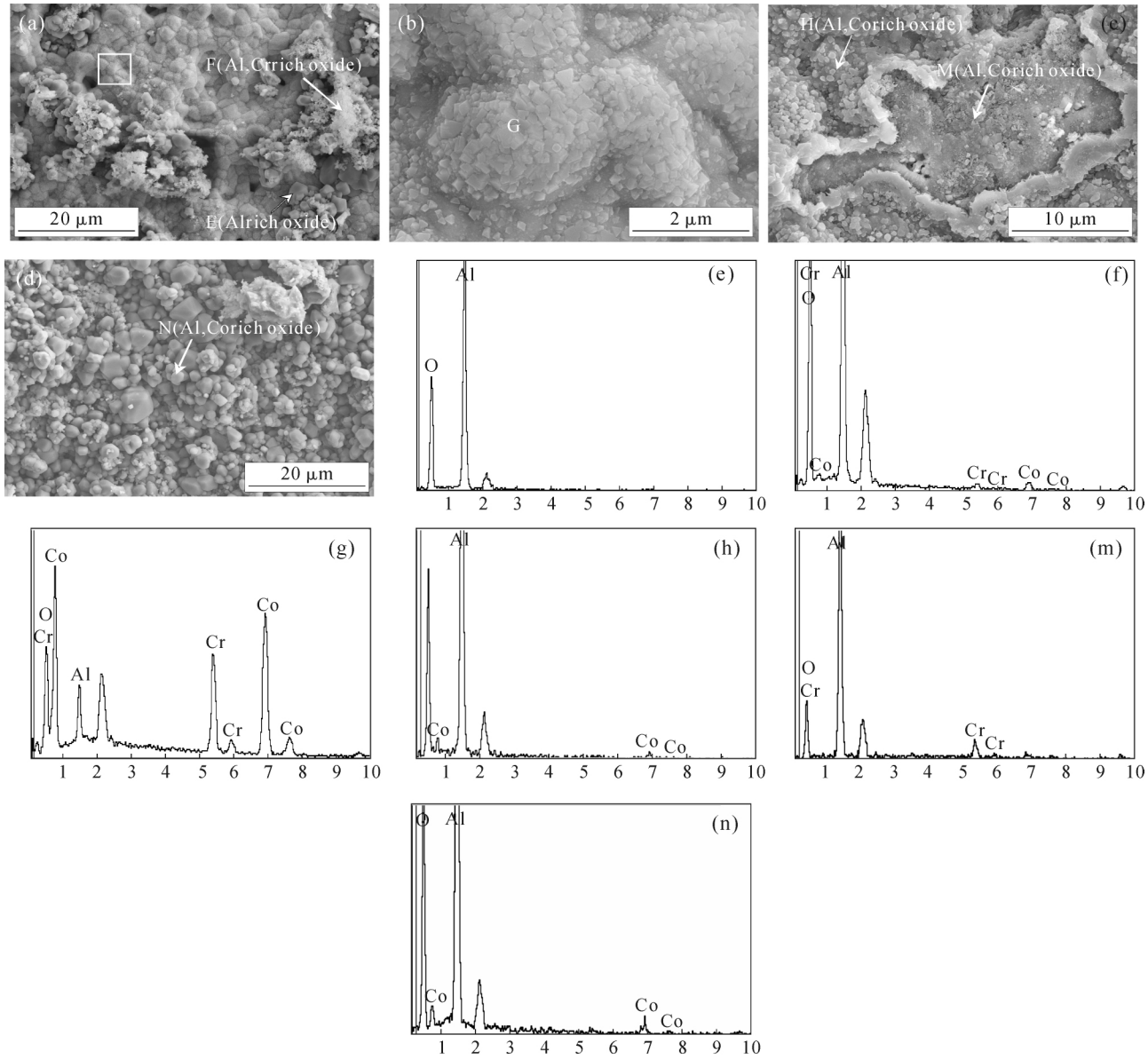
图 7(a)为涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h 后热障涂层试样表面陶瓷层剥落处 SEM 照片，图 7(b)为图 7(a)中白色方框区域的高倍扫描电镜照片。根据 G 处的能谱结果（图 7(g)），可知该处为粘结层，其表面存在许多尺寸大小不等的凹坑，并且其上散布着许多絮状或块状物，主要成分为 Al 的氧化物（能谱结果见图 7(e)和(f)）。粘结层表面的凹坑可能是氧化物向粘结层内部生长造成的，表面其它区域较为平整，属于“新鲜”的粘结层表面。图 7(c)和(d)为涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h 后热障涂层试样剥落陶瓷层内表面显微组织，根据其表面形貌和相应的能谱结果（图 7(h) (m) (n)）可知，陶瓷层内表面主要为 Al，Co，Cr 的氧化物，未检出 Zr 元素，综合基体表面及剥落陶瓷层内表面两处形貌和成分分析结果，可知涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h 后热障涂层试样开裂部位为 TGO 与粘结层界面。

图 8 为沉积态及涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h 后热障涂层试样截面 SEM 照片，由图 8(a)可见，沉积态热障涂层试样陶瓷层与粘结层界面除了少量的孔洞外，大范围结合紧密。图 8(b)显示，950 ℃热腐蚀 100 h 后，在陶瓷层与粘结层之间形成一定厚度的腐蚀产物层，其层次清晰明显，为双层结构。与陶瓷层毗邻的为灰色的 Cr_2O_3、CoO 氧化物层，其厚度相对较为均匀，未见明显开裂或空洞形貌。紧接着为 Al_2O_3 层，其厚度不一，部分区域厚度均匀，部分区域 Al_2O_3 层厚度增大明显，其中夹杂着灰白色相。另外，观察到一定数量的孔洞状结构和沿粘结层界面处的裂纹形貌，Al_2O_3 层的致密度比最外层的 Cr_2O_3、CoO 氧化物层的差。试验中观察到的灰白色相主要成分为 Co，根据 X 射线衍射结果（见图 3），该处 TGO 中出现的灰色相可能为 α-Co。部分区域 TGO 向粘结层内部凸出生长，其凸出生长区主要成分为 Al_2O_3。热障涂层试样热腐蚀后截面组织未发现内腐蚀层，可能是由于陶瓷层对高温熔盐的隔离作用，减缓了腐蚀或高温氧化。与相同条件下 DS GTD111（图 4）合金的热腐蚀后截面组织相比，热障涂层试样粘结层表面氧化物或腐蚀产物层的厚度有很大程度的减小，表明热障涂层在很大程度上改善了基体合金的抗高温热腐蚀能力。本课题组前期研究 DZ466 合金作为基体的热障涂层试样热腐蚀行为[16]，其在 950 ℃热腐蚀 100 h 后截面微观组织照片见图 9，对比看出，同种腐蚀条件下，DS GTD111 和 DZ466 两种基体合金热障涂层试样腐蚀产物种类和厚度相近。且从两个实验结果来看，两种基体合金热障涂层试样腐蚀动力学相近。

2.4 分析

合金表面高温环境下会形成保护性氧化膜，保护合金基体避免发生进一步的氧化。根据 Ni-Cr-Al 合金系统氧化物生成图[17]，DS GTD111 合金成分属

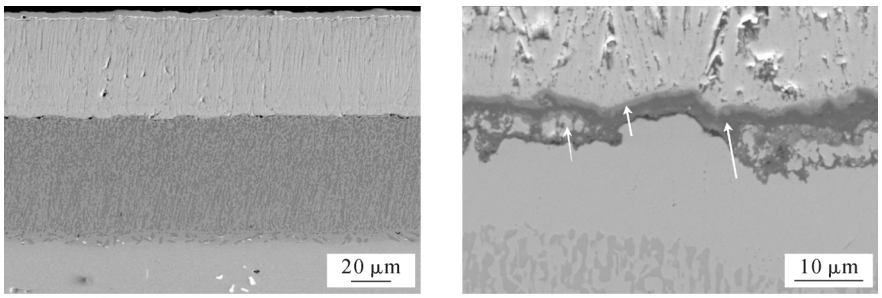
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a, b, e, f, g): 陶瓷层剥落处；(c，d，h，m，n)：剥落陶瓷层内表面

图 7　涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h 后热障涂层试样 SEM 照片及能谱

Fig.7　SEM images and EDS of thermal barrier coating sample after 100 h hot corrosion at 950 ℃



(a)沉积态　　(b)950 ℃热腐蚀100 h

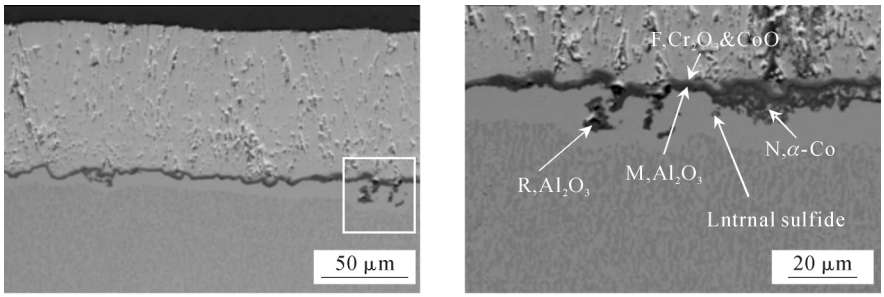
图 8　热障涂层试样截面 SEM 照片

Fig.8　Cross sectional SEM images of thermal barrier coatings

于 Cr_2O_3 形成区，其表面倾向于生成 Cr_2O_3 类保护膜，保护合金基体，阻止其进一步氧化。但当表面有沉积硫酸盐或混合盐存在时，Cr_2O_3 等氧化物会与熔盐发生反应而遭到破坏，使基体产生加速氧化，即产生热腐蚀。

图 4 显示，DS GTD111 合金表面的腐蚀产物层较为致密，其中最外层含有大量 Cr 的氧化物（主要为 Cr_2O_3），内层为 Al 的氧化物（主要为 Al_2O_3）。虽然

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) (b)

图 9 DZ466 合金表面热障涂层试样 950 ℃热腐蚀 100 h 后截面微观组织，其中(b)为(a)中方框区域放大图[16]

Fig.9 Microstructure and EDX results for DZ466-TBC corrosion at 950 ℃ for 100 h, figure (b) is the enlarged view for square aera in (a)

其氧化膜下方合金内部存在内氧化或内硫化区，但并未出现严重腐蚀的情况。主要是由于 DS GTD111 合金 Cr 含量较高，在熔盐中腐蚀时表面可形成连续的 Cr_2O_3 氧化膜。在 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 同时存在时，两者在 Na_2SO_4 融体中发生碱性熔融的先后次序不同。Cr_2O_3 将比 Al_2O_3 先与 Na_2SO_4 反应，形成 $Cr_2(SO_4)_3$ 和较稳定的 Na_2SO_4 [18]，降低了熔融盐中的氧离子活度，即 Cr_2O_3 膜在较小碱度下就可产生碱性熔融，这样，Al_2O_3 膜的碱性熔融就被抑制。由于 CrO_{2-4} 离子可阻止熔盐的碱度向高酸度偏转，故 Cr_2O_3 与熔盐的反应又不至于导致酸性熔融腐蚀反应 [19]。因此，Cr_2O_3 保护膜有效阻止热腐蚀的进行，合金不会发生灾难性的腐蚀[20]。再者，如图 4 所示，Al_2O_3 膜处于 Cr_2O_3 膜下方，由于 Cr_2O_3 保护膜的屏蔽作用，Al_2O_3 膜避免被熔盐腐蚀破坏而得以保存完整，这样连续致密的 Al_2O_3 膜的存在可减缓氧离子和硫离子向合金基体以及金属离子透过氧化膜向熔盐的扩散，阻止进一步的加速腐蚀，有效保护合金基体[21]。

图 8 显示，热障涂层 TGO 层为两层结构，靠近陶瓷层侧为 Cr_2O_3 和 CoO，靠近粘结层侧为 Al_2O_3。高温条件下，熔融盐扩散至 TGO 界面处，首先遇到连续致密的 Cr_2O_3，CoO 氧化物层，Cr_2O_3 与 Na_2SO_4 反应形成 $Cr_2(SO_4)_3$ 和较稳定的 Na_2CrO_4，可有效阻止热腐蚀的进行，保护其下方的氧化物层（主要为 Al_2O_3）不容易被熔盐腐蚀破坏，仍然起到良好的抗氧化作用，从而更好的保护合金基体。Cr 元素除了形成抗热腐蚀性能优异的 Cr_2O_3 保护膜外，还可促进 $A1_2O_3$ 保护膜的生成[19]，有效保护粘结层及合金基体。虽然热障涂层中陶瓷层的柱状结构中存在间隙，存在着直通粘结层的“通道”，该种结构不能完全阻止熔盐的渗入，但陶瓷层的存在仍然在一定程度上减少了熔盐与粘结层的接触，另一方面，可以阻止粘结层外部区域的 Cr 以 CrO_3 的形式挥发，加强 Cr_2O_3 对抗热腐蚀的作用效果[3, 22]。

结合课题组前期研究工作[16]可知，分别以 DS GTD111 和 DZ466 合金作为基体，采用相同工艺施加相同类型的 YSZ/CoCrAlY 热障涂层，涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h，热障涂层腐蚀动力学相近，产物类型和成分相近。由此表明，在 950 ℃热腐蚀 100 h 条件下，基体合金对其表面 YSZ/CoCrAlY 热障涂层的热腐蚀行为影响不显著。出现该现象可能的原因是该温度条件下，涂层与基体合元素金互扩散进行的相对较为缓慢，短期内对涂层热腐蚀行产生的影响不明显。延长腐蚀作用时间，两种基体合金表面的热障涂层热腐蚀行为可能会出现一定程度的差异。

3 结论

(1)950 ℃热腐蚀动力学曲线表明，在 DS GTD111 合金施加 YSZ/CoCrAlY 热障涂层后可显著降低 DS GTD111 合金腐蚀质量增加速率。

(2)涂盐条件下 950 ℃热腐蚀 100 h，热障涂层试样粘结层表面氧化物或腐蚀产物层的厚度与试验合金相比有很大程度的减小，热障涂层在很大程度上改善了合金抗 950 ℃熔盐热腐蚀能力。

(3)950 ℃涂盐腐蚀条件下，热障涂层失效开裂部位为 TGO 与粘结层界面。

(4)950 ℃涂盐条件下热腐蚀 100 h，YSZ/CoCrAlY 型热障涂层的热腐蚀行受基体合金影响作用不显著。

参考文献：

[1] Zhao Y S, Liu C G, Guo Y Y, et al. Influence of minor boron on the microstructures of a second generation Ni-based single crystal superalloy[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(4): 483-488.

[2] Zhu W, Wang J W, Yang L, et al. Modeling and simulation of the temperature and stress fields in a 3D turbine blade coated with thermal barrier coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 315: 443-453.

[3] 付倩倩，通雁鹏，杨玉璋. 航空发动机涡轮叶片热障涂层失效分

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

析研究[J]. 失效分析与预防，2017，12(6): 376-380.

[4] 董建民，李嘉荣，牟仁德，等. 热暴露对带热障涂层 DD6 单晶高温合金组织的影响[J]. 航空材料学报，2016，36(5):38-43.

[5] 张而耕，陈强，黄彪，等. 热障涂层材料制备及失效机理的研究进展[J]. 陶瓷学报，2016，37(1): 5-10.

[6] 吕艳红，张启富. 新型热障涂层研究现状及发展趋势[J]. 粉末冶金工业，2015，25(1): 8-13.

[7] Nath S, Manna I, Majumdar D J. Nanomechanical behavior of yttria stabilized zirconia (YSZ) based thermal barrier coating[J]. Ceramics International, 2015, 4l(4): 5247-5256.

[8] 曾潮流，张鉴清，吴维韬. 溅射 CoCrAlY 涂层对 NiAl 金属间化合物热腐蚀性能的影响[J]. 材料工程，1993(4): 1-3.

[9] 苗小锋，李正秋，汪云程. Si 元素对 CoCrAlY 涂层组织及性能的影响[J]. 热喷涂技术，2018，10(3): 23-27

[10] 董自超. K444 合金热障涂层抗高温腐蚀及热震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学，2013.

[11] Chen Z, Wun Q, Singh J, Mao S X. Effect of Al2O3 overlay on hot-corrosion behavior of yttria-stabilized zirconia coating in molten sulfate-vanadate salt [J]. Thin Solid Films, 2003, 443: 46-52.

[12] Li M H, Zhang Z Y, Sun X F, et al. Oxidation behavior of sputter deposited NiCrAlY coating [J]. Surf Coat Technol, 2003, 165: 241-247.

[13] 董刚，严彪，邓琦林，等. 合金成分对镍基合金激光熔覆涂层组织与性能的影响 [J]. 材料科学与工程学报，2011，29(2): 167-172.

[14] 任维鹏，李青，黄强，等. 定向凝固镍基高温合金 DZ466 表面 CoAl 涂层的氧化及组织演变 [J]. 金属学报，2018，54(4): 566-574.

[15] Zhu R Z, Guo M J, Zuo Y. A study of the mechanism of internal sulfidation-internal oxidation during hot corrosion of Ni-base alloys [J]. Oxid met, 1987, 27: 253-265.

[16] 任维鹏，李青，李相辉，等. 定向镍基高温合金 DZ466 及热障涂层的抗热腐蚀性能[J]. 金属热处理，2018，43(3): 233-240.

[17] Wallwork G R, Hed A Z. Mapping of the oxidation products in the ternary Co-Cr-Al system [J]. Oxid Met, 1971, 3: 213-227.

[18] Rapp Robert A. Chemistry and electrochemistry of hot corrosion of metals [J]. Mater Sci Eng, 1987, 87: 31-45.

[19] 黄乾尧, 李汉康, 陈国良. 高温合金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.

[20] Fryourg G, Kohl F, Stearns C. Chemical reactions involved in the initiation of hot corrosion of IN-738 [J]. J Electrochem Soc, 1984, 131(12): 2985-2997.

[21] Rapp Robert A. Chemistry and electrochemistry of hot corrosion of metals [J]. Mater Sci Eng, 1987, 87: 319-327.

[22] 张而耕, 陈强, 黄彪, 等. 热障涂层材料制备及失效机理的研究进展[J]. 陶瓷学报，2016, 37(1): 5-10.

2020年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造以及熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：陕西省西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学凝固楼301室

联系人：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail：zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net