

DD5 单晶叶片用热障涂层高温防护性能研究

董志宏¹, 张超^{2,3}, 李洋², 鲍泽斌¹

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;

3. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:为了提高燃气轮机热端部件的服役寿命,拓展热端部件的高温防护方法及应用,在某燃气轮机涡轮叶片用DD5镍基单晶高温合金表面制备了CoCrAlY+YSZ,(Ni,Pt)Al+YSZ和Zr改性(Ni,Pt)Al+YSZ3种热障涂层,对比研究了这3种热障涂层的1100℃循环氧化行为和900℃混合盐热腐蚀行为。结果表明:CoCrAlY+YSZ涂层在循环氧化和热腐蚀过程中均发生严重的YSZ陶瓷面层剥落现象,而铝化物+YSZ涂层的陶瓷面层则完好或仅局部极少量剥落;(Ni,Pt)Al涂层经活性元素Zr改性后抗氧化和耐热腐蚀性能均进一步提高,表现为氧化和腐蚀增重降低,内氧化和内硫化现象明显减轻;(Ni,Pt)Al+YSZ涂层和Zr改性(Ni,Pt)Al+YSZ涂层对DD5镍基单晶高温合金叶片均有较好的适用性。

关键词:DD5; 热障涂层; 钛铝涂层; 循环氧化; 热腐蚀

中图分类号:TK221 **文献标识码:**A **DOI:**10.16146/j.cnki.rndlge.2024.01.022

[引用本文格式]董志宏,张超,李洋,等. DD5 单晶叶片用热障涂层高温防护性能研究[J]. 热能动力工程,2024,39(1):198-204. DONG Zhi-hong, ZHANG Chao, LI Yang, et al. Study on high temperature protection performance of thermal barrier coating for DD5 single crystal blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(1):198-204.

Study on High Temperature Protection Performance of Thermal Barrier Coating for DD5 Single Crystal Blade

DONG Zhi-hong¹, ZHANG Chao^{2,3}, LI Yang², BAO Ze-bin¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, Post Code:110016;

2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code:150078; 3. National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Harbin, China, Post Code:150078)

Abstract: In order to improve the service life of hot-end components of gas turbines and expand the high-temperature protection methods and applications of the hot-end components, three kinds of thermal barrier coatings (TBC), such as CoCrAlY + YSZ, (Ni, Pt) Al + YSZ and Zr-modified (Ni, Pt) Al + YSZ, were prepared on the surface of DD5 nickel-based single crystal superalloy for turbine blades of a gas turbine. The cyclic oxidation behavior at 1100 °C and the hot corrosion behavior in mixed salt at 900 °C of the above three TBCs were studied in comparison. The results show that the YSZ ceramic layer of the Co-CrAlY + YSZ coating seriously peels off during the process of cyclic oxidation and hot corrosion, while the

收稿日期:2023-03-15; 修订日期:2023-04-13

基金项目:国家自然科学基金“叶企孙”科学基金(U2241251); 中船集团自立科技项目(202109Z); 创新工程项目(211-XXXX-N106-01-04);

国家自然科学基金面上项目(51671202); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2021-2-2)

Fund-supported Project:Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (“Ye Qisun” Science Funds, Grant No. U2241251);

Self-supporting Technology Project of CSSC (202109Z); Innovation Engineering Project (211-XXXX-N106-01-04); National Natural Science Foundation of China (51671202); Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (ZDRW-CN-2021-2-2)

作者简介:董志宏(1978-),男,中国科学院金属研究所副研究员。

通讯作者:鲍泽斌(1980-),男,中国科学院金属研究所研究员。

YSZ ceramic layer of the aluminide + YSZ coating is intact or only slightly peels off; the modification of active element Zr further improves both cyclic oxidation resistance and hot corrosion resistance of the (Ni, Pt) Al coating, as shown by the reduction of weight gain during the oxidation and corrosion process, and the significant reduction of internal oxidation and sulphidation; (Ni, Pt) Al + YSZ coating and Zr modified (Ni, Pt) Al + YSZ coating have good applicability for DD5 nickel-based single crystal superalloy blades.

Key words: DD5, thermal barrier coatings, PtAl coating, cyclic oxidation, hot corrosion

引言

涡轮叶片是燃气轮机和航空发动机的关键热端部件,其工作温度决定了发动机的性能。进口温度高可使发动机产生高的推重比,同时降低能耗,但这会导致涡轮叶片需经受严苛的高温氧化过程。如果气氛中含腐蚀性介质(如海洋性气氛中的氯盐等),涡轮叶片还会经历热腐蚀过程^[1-5]。通常,用于制造叶片的镍基单晶高温合金中Al,Cr等抗氧化元素含量较低,裸露的叶片无法长时间使用,需在其表面施加高温防护涂层。

热障涂层(Thermal Barrier Coating, TBC)是目前用于叶片高温防护的主要涂层,可显著提高发动机使用寿命及效率^[6-7]。TBC 主要由氧化钇部分稳定的氧化锆(YSZ)陶瓷面层和金属粘结层组成,YSZ陶瓷面层起隔热和抗腐蚀作用。金属粘结层主要用于提高基体合金的抗氧化和耐腐蚀性能,缓解基体合金与YSZ陶瓷面层热膨胀不匹配的问题。常见的金属粘结层有铝化物涂层(扩散涂层)^[8] 和MCrAlY(M代表Ni,Co或二者组合)包覆涂层^[9]。目前,铝化物粘结层和电子束物理气相沉积(EB-PVD)技术制备的YSZ陶瓷面层的涂层组合是防护效果最佳的TBC体系。在铝化物粘结层的保护下高温合金表面会形成一层致密且薄的氧化铝层,防止/抑制氧化介质直接腐蚀基体合金。但简单的铝化物涂层在长期服役时常发生氧化膜开裂和剥落现象,造成涂层失效^[10]。同时,铝化物粘结层与基体之间会发生元素互扩散,使粘结层过早退化为低Al含量涂层。为了克服上述不足,研究人员尝试引入贵金属元素或活性元素对铝化物涂层进行改性处理,以提高氧化铝膜的粘附性。

本文采用电镀方法将Pt和Zr引入到铝化物涂层中。与EB-PVD引入方法相比,电镀方法更简单且更适用于复杂形状零件。通过参数优化,在燃气轮机涡轮叶片表面采用DD5镍基单晶高温合金制备了Pt改性的NiAl+YSZ热障涂层和Zr改性的(Ni,Pt)Al+YSZ热障涂层,作为对比还制备了Co-CrAlY+YSZ热障涂层,通过考察上述热障涂层的1100℃循环氧化和900℃混合盐热腐蚀性能,评估其对DD5镍基单晶高温合金的防护效果,以期为实际工业应用提供参考依据和技术支持。

1 试验方法

1.1 基体材料

试验用DD5镍基单晶高温合金基材质量分数如表1所示。采用线切割机将DD5合金切割成φ15 mm×2 mm圆片和30 mm×10 mm×2 mm的长方形片试样,待制备涂层后分别用于测试高温氧化性能和热腐蚀性能。合金试样表面依次采用120,240和400目砂纸打磨,再进行刚玉(240目)喷砂处理,然后在丙酮中超声清洗10 min后烘干待用。

表1 DD5合金中各元素的质量分数(%)

Tab. 1 Mass fraction of each element in DD5 superalloy (%)

Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Hf	Re	C	Ni
7.0	8.0	2.0	5.0	7.0	6.2	0.2	3.0	微量	余量

1.2 涂层制备

本研究制备了3种金属粘结层进行对比,分别为CoCrAlY涂层、(Ni,Pt)Al涂层和Zr改性(Ni,Pt)Al涂层。CoCrAlY涂层采用EB-PVD技术制备,成分为Co-23Cr-12Al-1Y,厚度为100~110 μm。(Ni,Pt)Al涂层的制备是在基体合金表面电镀5 μm厚的Pt镀层,然后试样在1050℃下真空退火2 h

以降低样品表面的 Pt 浓度,退火后的试样在 1 080 ℃下气相渗铝 6 h,渗铝剂为铁铝合金粉,其中铝的质量分数为 49%, NH_4Cl 的质量分数为 1%。Zr 改性(Ni,Pt)Al 涂层的制备方法与(Ni,Pt)Al 涂层相似,Zr 元素通过在镀 Pt 溶液中添加 Zr 粉(颗粒尺寸为 1~10 μm ,加入量为 5~10 g/L)的方式引入。最后,采用 EB-PVD 方法在上述涂层试样表面制备 YSZ 陶瓷层,厚度为 90~110 μm 。

1.3 高温防护性能测试及分析

采用可自动升降的循环氧化炉测试涂层试样的循环氧化性能,测试温度 1 100 ℃,测试环境为静态空气。每个循环保温 50 min,强制空冷 10 min,测试 800 个循环。通过精度为 0.01 mg 的分析天平测试样品重量,剥落氧化膜或陶瓷层不计入重量变化。

采用马弗炉测试涂层试样的热腐蚀性能,测试温度为 900 ℃,腐蚀盐为 75% Na_2SO_4 + 25% NaCl,测试 300 h。涂盐方法如下:将混合盐制成饱和溶液,再将涂层试样置于预热铁板上,然后用喷枪将混合盐溶液喷涂在试样表面,涂盐量 1.5~2 mg/cm^2 ,待表面形成盐膜后将其放入马弗炉内。当炉温升到预设温度开始计时,每隔固定时间取出,在空气中冷却后,放入沸腾蒸馏水中反复煮洗 2~3 次以彻底溶解残留盐。待样品干燥后用精确度为 0.01 mg 的电子天平称重,然后重复上述过程。

采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)分析高温测试前后涂层的显微组织和相结构。

2 试验结果与分析

2.1 原始涂层

图 1 为 (Ni,Pt)Al + YSZ 热障涂层、Zr 改性(Ni,Pt)Al + YSZ 热障涂层和 CoCrAlY + YSZ 热障涂层的截面形貌。由图 1 可知,3 种涂层均符合热障涂层的典型组织形貌,YSZ 陶瓷面层为柱状晶结构。涂层的相结构分别为:(Ni,Pt)Al 涂层和 Zr 改性(Ni,Pt)Al 涂层为单一的 β -(Ni,PtAl) 相,CoCrAlY 涂层主要为 γ/γ' 相和少量的 β 相。3 种粘结层表面的 YSZ 陶瓷面层相结构相同,均为 t' 相。

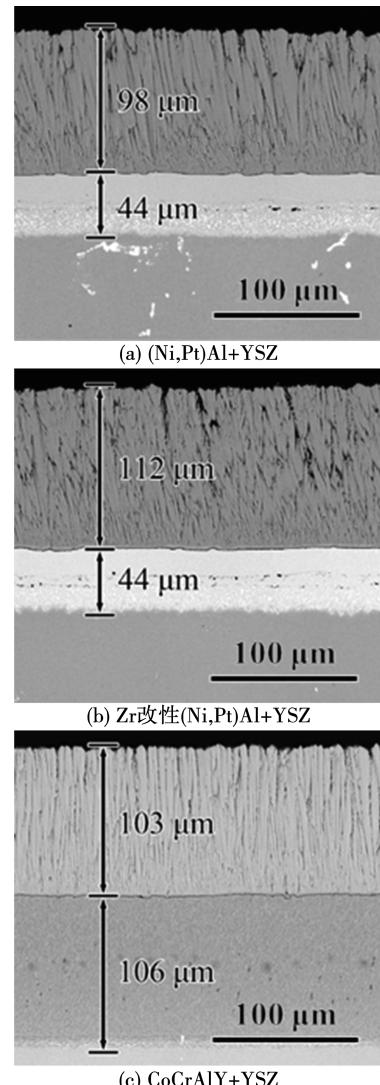


图 1 原始涂层的截面形貌

Fig. 1 Cross-sectional morphologies of original coating specimens

2.2 循环氧化性能

图 2(a)为 3 种热障涂层在 1 100 ℃循环氧化过程中的重量变化曲线。由图 2(a)可知,以(Ni,Pt)Al 和 Zr 改性(Ni,Pt)Al 为粘结层的热障涂层试样在 800 次循环氧化过程中缓慢增重;而以 CoCrAlY 为粘结层的热障涂层试样在初始的 50 次循环过程中重量快速增加,然后增重减缓,当循环氧化 300 次后试样开始大幅失重,说明涂层发生了剥落。图 2(b)为(Ni,Pt)Al + YSZ 和 Zr 改性(Ni,Pt)Al + YSZ 两种热障涂层的重量变化对比。由图 2(b)可知,800 次循环内两种热障涂层的氧化动力学曲线基本符合抛物线规律。 $(\text{Ni},\text{Pt})\text{Al} + \text{YSZ}$ 热障涂层经

800 次循环后综增重约为 0.36 mg/cm^2 , 而 Zr 改性 (Ni, Pt) Al 涂层 + YSZ 热障涂层的增重减小, 约为 0.32 mg/cm^2 。

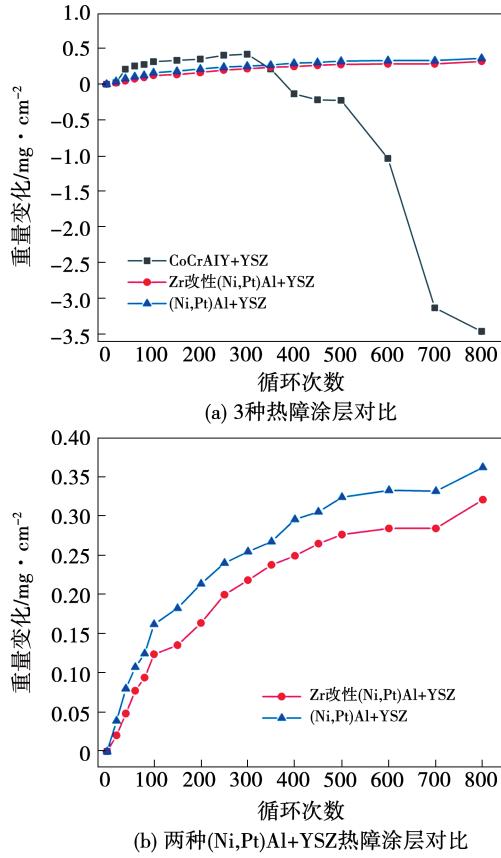


图2 热障涂层在1100 °C循环氧化的重量变化曲线

Fig. 2 Weight change curves of thermal barrier coatings during cyclic oxidation at 1100 °C

图3给出了3种热障涂层在1100 °C循环氧化不同次数后的宏观形貌照片。每种热障涂层测试3个平行试样,其中1~3号试样为CoCrAlY+YSZ,4~6号试样为Zr改性(Ni,Pt)Al+YSZ,7~9号试样为(Ni,Pt)Al+YSZ。300次循环后,3种热障涂层的YSZ面层均完好无剥落。400次循环后,CoCrAlY+YSZ涂层的3个平行样均可观察到YSZ面层剥落,尤其在试样边缘及倒角处,其他两种涂层的YSZ面层均完好无剥落,这与重量变化曲线结果一致。800次循环后,CoCrAlY+YSZ涂层的剥落区域明显增大,其中1号试样的YSZ面层发生了大面积剥落,Zr改性(Ni,Pt)Al+YSZ涂层的6号试样边缘处观察到少量YSZ剥落,(Ni,Pt)Al+YSZ涂层的YSZ均完好无剥落。从宏观形貌照片来看,800

次热循环过程中,(Ni,Pt)Al+YSZ涂层的表现稍好于Zr改性(Ni,Pt)Al+YSZ涂层。

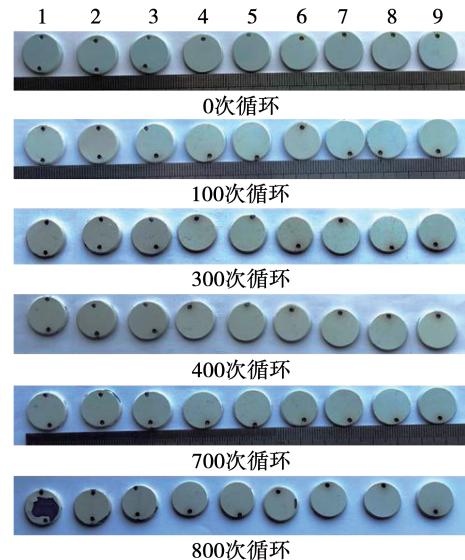


图3 3种热障涂层经1100 °C循环氧化不同次数后的宏观形貌照片

Fig. 3 Macroscopic photos of three TBCs after different cycles of cyclic oxidation at 1100 °C

2.3 热腐蚀性能

2.3.1 未涂覆 YSZ

图4为DD5基体、CoCrAlY、(Ni,Pt)Al和Zr改性(Ni,Pt)Al涂层(无YSZ)在900°C混合盐中热腐蚀的重量变化曲线。由图4可知,DD5基体试样的重量在最初的60 h持续快速增长,随后发生非稳态重量变化。CoCrAlY涂层在20~40 h发生失重,在40~140 h重量保持稳定增长,随后重量逐渐减小。CoCrAlY涂层在测试时间内同样呈现非稳态重量变化。(Ni,Pt)Al和Zr改性(Ni,Pt)Al涂层试样的重量在整个热腐蚀过程中始终保持稳定增长。热腐蚀300 h后,两种涂层样品的总质量分别增长1.80和1.52 mg/cm²。热腐蚀过程中的重量变化是生成氧化膜引起增重及混合盐侵蚀氧化膜或者氧化膜剥落引起减重的综合表现。缓慢和稳定的重量变化和更小的增重表明,Zr改性(Ni,Pt)Al涂层的耐热腐蚀性能更加优异。

图5为DD5基体和CoCrAlY涂层热腐蚀100 h后的宏观和微观截面形貌。由宏观照片可以明显看出,DD5基体和CoCrAlY涂层在热腐蚀100 h之后发生明显的氧化膜剥落现象。微观截面形貌显示,

DD5 基体表面生成的氧化膜非常厚且其内部有许多孔洞和裂缝, 合金内部已经出现严重的内氧化和内硫化, 腐蚀深度超过 200 μm 。CoCrAlY 涂层的氧化膜则较薄, 涂层内部出现少量内腐蚀现象。可见, 当 DD5 合金表面施加 CoCrAlY 涂层后, 热腐蚀会明显被减缓和抑制, 但由于氧化膜过早剥落, 导致 CoCrAlY 涂层的使用寿命较短。

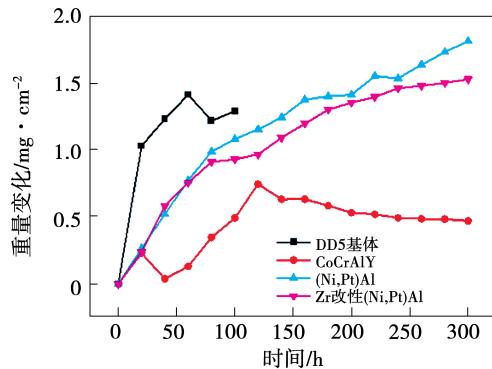


图 4 DD5 基体及不同粘结层在 900 $^{\circ}\text{C}$ 热腐蚀过程中的重量变化曲线

Fig. 4 Weight change curves of DD5 substrate and bond coatings during hot corrosion at 900 $^{\circ}\text{C}$

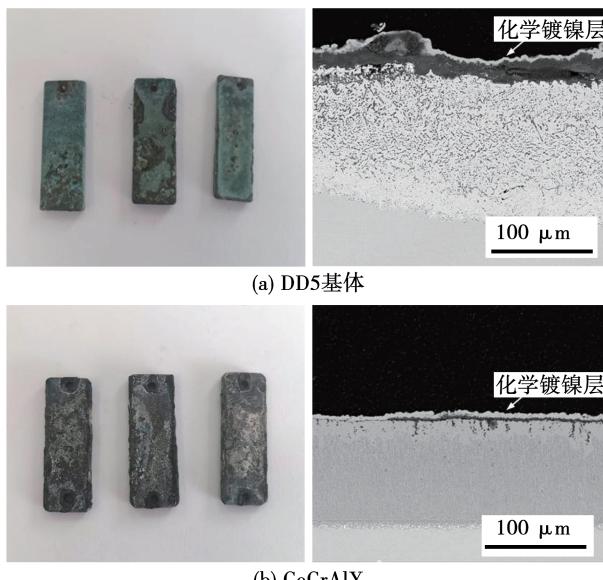


图 5 DD5 基体和 CoCrAlY 涂层经热腐蚀 100 h 后的宏观形貌和截面形貌

Fig. 5 Macroscopic photos and cross-sectional morphologies of DD5 substrate and CoCrAlY coating after hot corrosion for 100 h

图 6 为 (Ni,Pt)Al 和 Zr 改性 (Ni,Pt)Al 涂层经

热腐蚀 300 h 后的宏观和微观截面形貌。由图 6 可知, 两种涂层表面氧化膜均完整未剥落。相比之下, (Ni,Pt)Al 涂层内部的氧化和硫化较为严重, 内硫化区域已经穿过涂层到达互扩散区。Zr 改性 (Ni,Pt)Al 涂层的氧化膜厚度与 (Ni,Pt)Al 涂层的接近, 这与动力学结果一致, 但发生内氧化和内硫化的区域面积明显减小, 腐蚀深度更浅。结合图 5 的结果可知, 相比 CoCrAlY 涂层, (Ni,Pt)Al 和 Zr 改性 (Ni,Pt)Al 涂层表现出更优异的抗热腐蚀性能, 而 Zr 改性后 (Ni,Pt)Al 涂层的抗热腐蚀性能进一步提高。

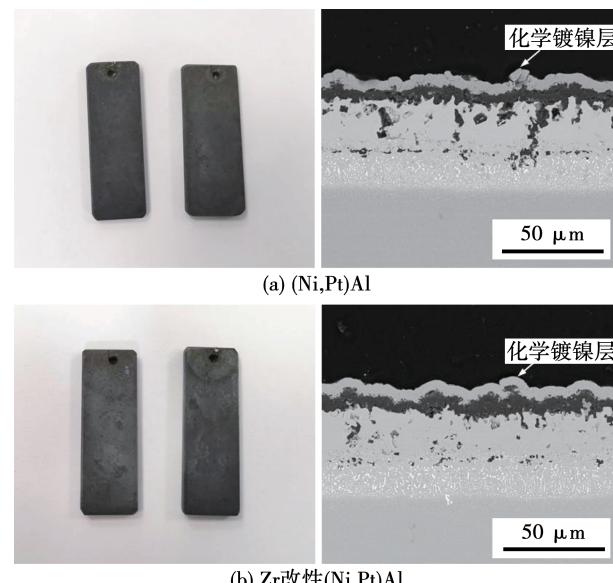


图 6 (Ni,Pt)Al 和 Zr 改性 (Ni,Pt)Al 涂层经热腐蚀 300 h 后的宏观形貌和截面形貌

Fig. 6 Macroscopic photos and cross-sectional morphologies of (Ni,Pt)Al and Zr-modified (Ni,Pt)Al coatings after hot corrosion for 300 h

2.3.2 涂覆 YSZ

以上述 3 种涂层作为粘结层沉积 YSZ 陶瓷面层, 然后进行相同热腐蚀测试, 涂层的重量变化如图 7 所示。由图 7 可知, CoCrAlY + YSZ 涂层从 60 h 开始发生大幅失重, 应为 YSZ 陶瓷层剥落导致。而 (Ni,Pt)Al + YSZ 涂层和 Zr 改性 (Ni,Pt)Al + YSZ 涂层在热腐蚀 100 h 之后开始发生失重, 这同样是 YSZ 陶瓷层剥落导致, 但失重量明显减少。相比之下, (Ni,Pt)Al + YSZ 涂层的重量变化较小, 说明此热障涂层具有更好的抗热腐蚀性能。

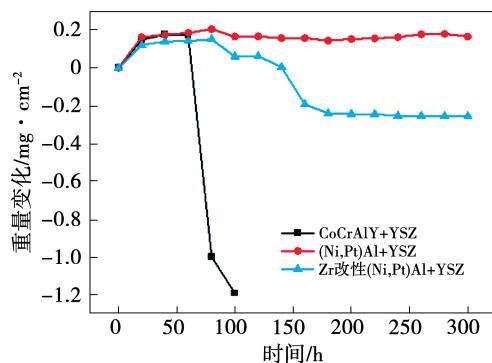
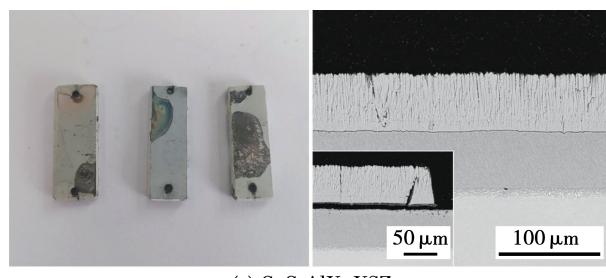


图 7 3 种热障涂层在 900 °C 热腐蚀过程中的重量变化曲线

Fig. 7 Weight change curves of three TBCs during hot corrosion at 900 °C

图 8 给出了 3 种热障涂层热腐蚀 100 h 后的宏观形貌和微观截面形貌。由图 8 可知,经 100 h 热腐蚀后,YSZ 外层发生大量剥落,这与图 7 中 CoCrAlY + YSZ 涂层从 60 h 开始失重相对应。从截面形貌来看,未剥落的 YSZ 陶瓷层与内部 CoCrAlY 涂层均完好,说明外层 YSZ 陶瓷层可起到良好的抗热腐蚀作用。图 8(a)为 YSZ 剥落区域的形貌。由图 8(a)可知,YSZ 的剥离发生在其与 CoCrAlY 粘结层的界面处,同时粘结层也发生明显内腐蚀。(Ni,Pt)Al + YSZ 涂层和 Zr 改性(Ni,Pt)Al + YSZ 涂层在 100 h 热腐蚀后涂层均完整无剥落。



(a) CoCrAlY+YSZ



(b) (Ni,Pt)Al+YSZ

(c) Zr改性(Ni,Pt)Al+YSZ

图 8 3 种热障涂层热腐蚀 100 h 后的宏观形貌和截面形貌

Fig. 8 Macroscopic photos and cross-sectional morphologies of three TBCs after hot corrosion for 100 h

两种热障涂层腐蚀 300 h 后的宏观形貌和截面形貌如图 9 所示。由图 9 可知,经 300 h 热腐蚀之后,(Ni,Pt) Al + YSZ 涂层和 Zr 改性(Ni,Pt) Al + YSZ 涂层的 YSZ 陶瓷面层均可观察到少量剥落,这与动力学结果一致。从截面形貌来看,未剥落的 YSZ 陶瓷面层与内部粘结层涂层均完好。

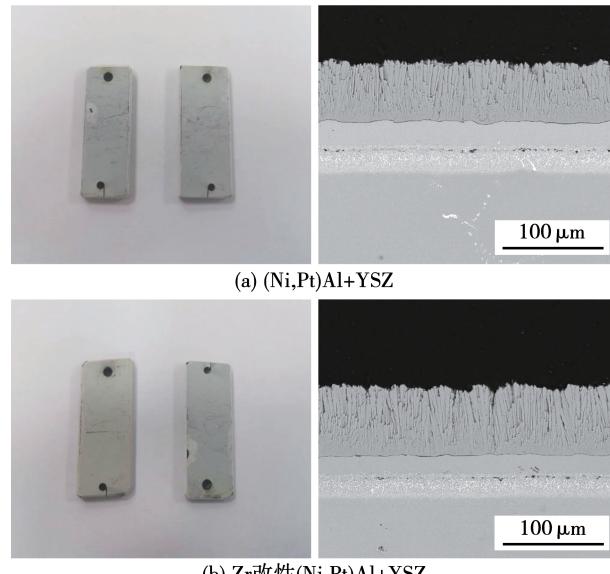


图 9 两种热障涂层热腐蚀 300 h 后的宏观形貌和截面形貌

Fig. 9 Macroscopic photos and cross-sectional morphologies of two TBCs after hot corrosion for 300 h

由上述结果可知,扩散铝化物涂层 + YSZ 组成的 TBC 具有更好的抗循环氧化和耐热腐蚀性能。主要原因是本研究制备的铝化物涂层为单一的 β 相,Al 源充足,高温下能更快速地形成 $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ 保护膜。而加入适量 Pt 可以抑制 β 相中 Al 元素的活性,延迟 β 向 γ' 相的转变,减少贫铝区的出现^[11]。同时, Pt 能够抑制 S 的偏析,减少 Kirkendall 孔洞的生成^[12]。因此,扩散铝化物涂层生成的热生长氧化物(TGO)更致密、连续,黏附性更好,YSZ 陶瓷面层不易剥落。适量添加活性元素 Zr 可以进一步提高(Ni,Pt)Al 涂层的抗循环氧化和耐热腐蚀性能。主要原因是:Zr 元素会在氧化膜/涂层界面处偏聚,进一步抑制 Kirkendall 孔洞的形成,减少裂纹源^[13],使氧化膜的粘附性进一步提高;Zr 元素对 S 和 Cl 的亲和力更高,能优先与其反应,大幅减少这些元素渗入涂层内部,进而提高涂层的

耐混合盐热腐蚀性能^[14]。Zr 改性(Ni,Pt)Al + YSZ 涂层的耐混合盐热腐蚀性能略低于(Ni,Pt)Al + YSZ 涂层,可能是由于混合盐通过个别较宽的柱状晶间隙渗入 YSZ 涂层,过早引起 YSZ 涂层的剥落。实际上,经 300 h 热腐蚀后,两种热障涂层的 YSZ 均有局部少量剥落现象(见图 9)。综合来看,(Ni,Pt)Al + YSZ 和 Zr 改性(Ni,Pt)Al + YSZ 热障涂层对 DD5 镍基单晶高温合金叶片均有较好的适用性。

3 结 论

(1) CoCrAlY + YSZ 热障涂层在循环氧化 300 次后,YSZ 陶瓷面层开始大面积剥落;(Ni,Pt)Al + YSZ 和 Zr 改性(Ni,Pt)Al + YSZ 热障涂层循环氧化 800 次后涂层均基本保持完整。

(2) CoCrAlY 涂层在热腐蚀 300 h 过程中呈现非稳态重量变化,导致 YSZ 陶瓷面层大量剥落;(Ni,Pt)Al 和 Zr 改性(Ni,Pt)Al 涂层的重量则保持缓慢且稳定的增加,其与 YSZ 组成的热障涂层具有较好的耐热腐蚀性能。

(3) Zr 改性后,(Ni,Pt)Al 涂层的氧化和腐蚀增重降低,内氧化和内硫化现象明显减轻。

(4) (Ni,Pt)Al + YSZ 和 Zr 改性(Ni,Pt)Al + YSZ 热障涂层对 DD5 镍基单晶高温合金叶片均有较好的适用性。

参考文献:

- [1] BENABDERRAZIK G, MOULIN G, HUNTZ A M, et al. Influence of impurities, such as carbon and sulphur, on the high temperature oxidation behaviour of Fe72Cr23Al5 alloys [J]. Journal of Materials Science, 1984, 19(10): 3173–3184.
- [2] DEB D, IYER S R, RADHAKRISHNAN V M. A comparative study of oxidation and hot corrosion of a cast nickel base superalloy in different corrosive environments [J]. Materials Letters, 1996, 29(1/3): 19–23.
- [3] RAPP R A. Chemistry and electrochemistry of hot corrosion of metals [J]. Materials Science and Engineering, 1987, 87(3): 319–327.
- [4] KOSIENIAK E, BIESIADA K, KACZOROWSKI J, et al. Corrosion failures in gas turbine hot components [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12(3): 330–337.
- [5] ELIAZ N, SHEMESH G, LATANISION R M. Hot corrosion in gas turbine components [J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(1): 31–43.
- [6] SCHULZ U, MENZEBACH M, LEYENS C, et al. Influence of substrate material on oxidation behavior and cyclic lifetime of EB-PVD TBC systems [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 146–147: 117–123.
- [7] 陈琛, 郭洪波, 宫声凯. 横向梯度温度场下热障涂层的失效分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5): 400–406.
CHEN Chen, GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai. Failure analysis of thermal barrier coating being subjected to lateral thermal gradient on surface [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(5): 400–406.
- [8] PATNAIK P C. Intermetallic coatings for high temperature applications – A review [J]. Material and Manufacturing Process, 1989, 4(1): 133–152.
- [9] ZHANG G, ZHANG H, ZHANG H, et al. Progress in preparation and application of corrosive resistance coating for aerospace superalloys [J]. Materials Review, 2006, 20(5): 59–62.
- [10] KOHLSCHEEN J, STOCK H R. Deposition of silicon enriched nickel aluminide coatings on internally cooled airfoils [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 203(5/7): 476–479.
- [11] XU Z H, WANG Z K, NIU J, et al. Phase structure, morphology evolution and protective behaviors of chemical vapor deposited (Ni,Pt)Al coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 676: 231–238.
- [12] YANG Y F, JIANG C Y, BAO Z B, et al. Effect of aluminisation characteristics on the microstructure of single phase β -(Ni,Pt)Al coating and the isothermal oxidation behaviour [J]. Corrosion Science, 2016, 106: 43–54.
- [13] JIANG C Y, QIAN L Y, FENG M, et al. Benefits of Zr addition to oxidation resistance of a single-phase (Ni,Pt)Al coating at 1 373 K [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(7): 1334–1344.
- [14] JIANG C Y, YANG Y F, ZHANG Z Y, et al. A Zr-doped single-phase Pt-modified aluminide coating and the enhanced hot corrosion resistance [J]. Corrosion Science, 2018, 133: 406–416.

(刘颖 编辑)