

涡轮叶片 NiCoCrAlYTa 涂层抗高温氧化和 腐蚀性能测试研究

刘德林, 牟仁德, 陆峰

(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: **目的** 保障涡轮叶片的安全可靠应用, 研究 NiCoCrAlYTa 涂层的高温氧化和燃气热腐蚀行为。**方法** 针对有无涂层的涡轮叶片试样, 分别进行 1050 °C/100 h 的抗氧化试验和 950 °C/100 h 的燃气热腐蚀试验, 同时分析试验后合金基体和涂层的微观形貌。**结果** 抗氧化试验后, 无涂层试样的平均氧化皮脱落量和平均氧化速率分别是带涂层试样的 10 倍和 3 倍左右, 无涂层试样叶身表面可见大量氧化皮脱落形成的凹坑, 带涂层试样的涂层完好, 基体未见氧化特征。燃气热腐蚀试验后, 无涂层试样的腐蚀速率是带涂层试样的 3 倍, 无涂层试样叶身表面可见较多腐蚀坑, 有涂层试样的涂层未被明显腐蚀。**结论** NiCoCrAlYTa 涂层在经过长时间高温氧化和腐蚀后仍能形成完整的 Al₂O₃ 膜, 从而起到较好的保护作用。Ta、Y 等元素对 Al₂O₃ 氧化膜的形成及质量具有促进作用。

关键词: NiCoCrAlYTa 涂层; 高温氧化; 燃气热腐蚀; Al₂O₃ 膜

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.11.010

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)11-0054-06

High Temperature Oxidation and Corrosion Property Test of NiCoCrAlYTa Coating on Turbine Blade

LIU De-lin, MU Ren-de, LU Feng

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material,
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: Objective To insure security application of turbine blade and study temperature oxidation and corrosion behaviors of NiCoCrAlYTa coating. **Methods** For turbine blades with coating and without coating, the anti-oxidation test at 1050 °C for 100 hours and gas hot-corrosion test at 950 °C for 100 hours were carried out. After tests, microscopic features of substrate and coating were observed and analyzed. **Results** The average amount of oxide peeling and average oxidation rate of uncoated samples were 10 times and 3 times that of coated samples after anti-oxidation test. There were pits on the surface of the uncoated samples. The coating of the coated samples was intact and the substrate had no oxidation characteristics. After gas hot-corrosion test, the corrosion rate of uncoated samples was 3 times that of coated samples; and there were a large number of corrosion pits on the surface of uncoated samples. The coating of the coated samples was significantly corroded. **Conclusion** After a long period of high temperature oxidation and corrosion, the NiCoCrAlYTa coating can still form a complete Al₂O₃ oxide film, which can play a good protective role. Tantalum and yttrium elements can promote the formation and quality of the Al₂O₃ oxide film.

收稿日期: 2018-07-28; 修订日期: 2018-08-25

作者简介: 刘德林 (1980—), 男, 湖南人, 博士, 主要研究方向为涂层高温性能测试与评价。

通讯作者: 牟仁德 (1975—), 男, 湖北人, 博士, 研究员, 主要研究方向为热障涂层技术研究。

KEY WORDS: NiCoCrAlYTa coating, high temperature oxidation, gas hot-corrosion, Al₂O₃ oxide film

NiCrAlY 涂层的抗氧化和腐蚀作用, 是基于在涂层的表面形成致密的 Al₂O₃ 或 Cr₂O₃ 氧化膜, 这些氧化膜作为氧的障碍层(屏蔽层)而阻止基体进一步氧化或腐蚀^[1]。NiCoCrAlYTa 涂层是在 NiCrAlY 的基础上改性而成, 通过添加 Co、Ta 等元素, 提高 NiCrAlY 涂层的抗氧化和抗热腐蚀性能。该涂层塑性极好, 具有很强的抗氧化性、抗腐蚀性, 适用于海洋环境服役的涡轮机构件^[2-4]。文中针对海洋环境服役的某型发动机涡轮叶片, NiCoCrAlYTa 涂层的高温氧化和燃气热腐蚀行为进行研究, 以保障叶片的安全可靠应用。

1 试验

1.1 材料

涡轮工作叶片基体材料采用 DZ22B 高温合金, 其主要化学成分(质量分数)为: Cr 8.0%~10.0%, Co 9.0%~11.0%, W 11.5%~12.5%, Al 4.75%~5.25%, Ti 1.75%~2.25%, Fe ≤ 0.25%, Nb 0.75%~1.25%, Hf 0.8%~1.1%, B 0.01~0.02%, Ni 余量。

由于叶片仅叶身涂覆有 NiCoCrAlYTa 涂层, 为考察涂层的抗高温氧化和抗燃气热腐蚀性能, 需切除无涂层的部分, 仅对叶身进行试验。切后的工作叶片试样如图 1 所示。工作叶片切完后从进气边至排气边四个位置测量高度分别为: 38.15、38.12、38.17、38.14 mm, 平均值为 38.15 mm。计算出叶身(不含切口端面)面积理论值为 1868 mm²。

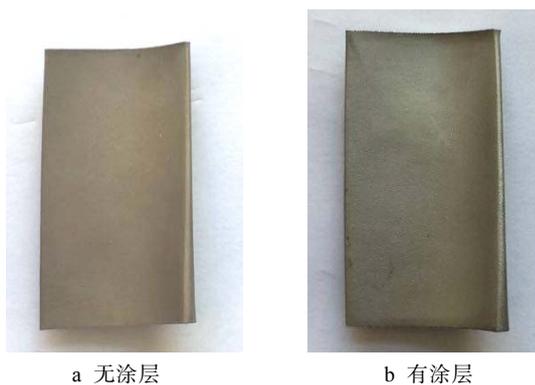


图 1 工作叶片试样

1.2 试验方法与过程

高温氧化试验按 HB 5258—2000《钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法》规定进行, 试验温度为 1050 ℃。将瓷杯在高温箱式炉中焙烧至恒重为止, 叶片试样清洗干净、烘干并置入瓷杯, 然后放入 DC-B8/11 型智能箱式高温炉中进行氧化试验。试验总时间为 100 h, 分为四个周期, 每隔 25 h 取出试样

称量一次。

燃气热腐蚀试验采用 RFL-1 型腐蚀试验装置, 按 HB 7740—2004《燃气热腐蚀试验方法》规定进行。试验温度为 950 ℃, 燃油种类 RP-5 号, 燃油流量为 0.2 L/h, 油气比为 1:45, 海水浓度 20 mg/L。试验总时间为 100 h, 分为 100 个循环周期, 每个循环周期加热 55 min, 冷却 5 min。每 25 个周期取出试样进行外观检查和质量称量, 并记录。

称量采用 BSA224S-CW 型电子天平进行, 精度为 0.0001 g。试验结束后, 沿试样叶身横截面截取金相试样, 磨制抛光后采用 OLYMPUS PME3 型金相显微镜进行观察。

2 结果及分析

2.1 高温氧化试验

经 100 h 高温氧化试验后, 无涂层试样由原始的灰色氧化成蓝灰色, 氧化皮分散剥落成斑点状, 如图 2a 所示。带涂层试样由原始的灰色变成灰蓝色, 涂层表面未见明显氧化皮剥落, 如图 2b 所示。

叶片试样的氧化试验数据见表 1, 可见无涂层试样的平均氧化皮剥落量是带涂层试样的 10 倍左右, 且前者的平均氧化速率是后者的近 3 倍。

100 h 氧化试验后, 叶片无涂层试样表面可见大量氧化皮剥落形成的凹坑, 凹坑最大深度为 55 μm 左右, 且可见形成的氧化物, 如图 3a 所示。在扫描电镜下可观察到大量块状氧化物, 如图 3b 所示。能谱分析结果表明, 氧化物主要为 Al、Cr、W、Ni、Ti 的氧化物, 如图 3c 所示。带涂层试样的涂层基本完好, 基体未见氧化特征, 涂层表面可见一层致密的氧化膜, 如图 4a 所示。能谱分析结果表明, 氧化膜为 Al₂O₃ 膜, 如图 4b 所示。

2.2 燃气热腐蚀试验

经 100 h 燃气热腐蚀试验后, 无涂层试样叶身表面腐蚀相对较重, 如图 5 所示。燃气热腐蚀试验数据见表 2, 无涂层叶片试样的腐蚀速率是带涂层试样的 3 倍。

100 h 燃气热腐蚀试验后, 无涂层试样叶身表面可见较多腐蚀坑, 其最大深度为 35 μm 左右, 如图 6a 所示, 在扫描电镜下可观察到表面存在一层几微米厚的腐蚀产物, 如图 6b 所示。能谱分析表明, 腐蚀产物主要为 Cr、Ni、Ti、Al 的氧化物, 如图 6c 所示。带涂层试样的涂层未见剥落, 表面可见一层致密的氧化膜, 如图 7a 所示。能谱分析结果表明, 氧化膜为 Al₂O₃ 膜, 如图 7b 所示。

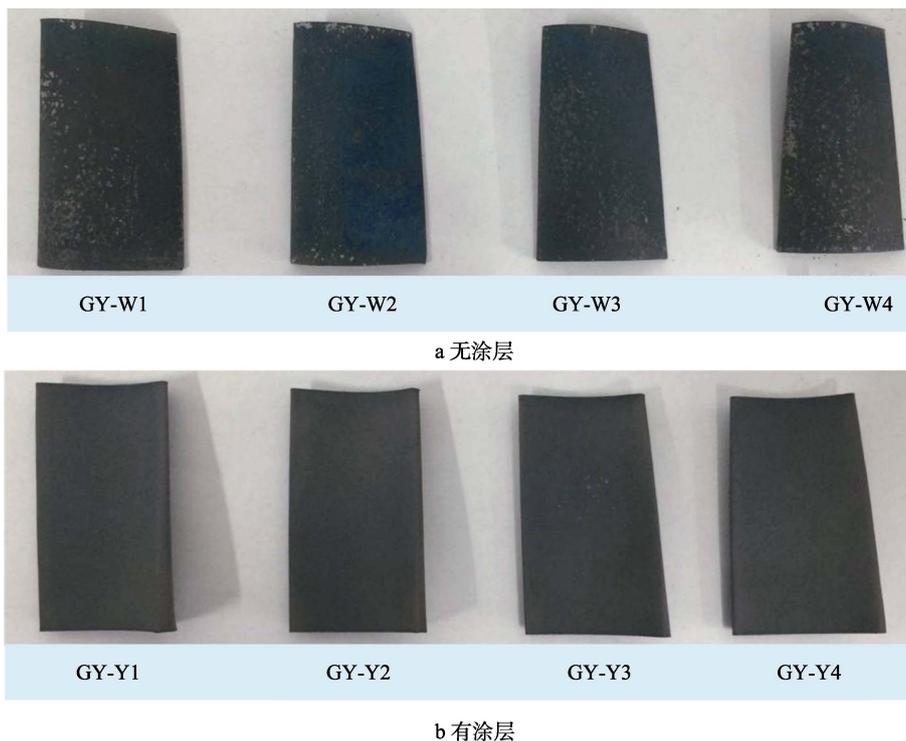


图 2 100 h 抗氧化试验后工作叶片试样外观

表 1 叶片氧化试验数据

| 试样类别 | 试样编号 | 平均氧化皮剥落量/(g·m ⁻²) | 平均氧化速率/(g·m ⁻² ·h ⁻¹) |
|------|-------|-------------------------------|--|
| 无涂层 | GY-W1 | 28.1050 | 0.2082 |
| | GY-W2 | 15.0960 | 0.0113 |
| | GY-W3 | 17.9900 | 0.0372 |
| | GY-W4 | 32.1200 | 0.0281 |
| | 平均值 | 23.3270 | 0.0713 |
| 有涂层 | GY-Y1 | 1.6595 | 0.0220 |
| | GY-Y2 | 2.2484 | 0.0241 |
| | GY-Y3 | 2.4625 | 0.0282 |
| | GY-Y4 | 2.5161 | 0.0321 |
| | 平均值 | 2.2220 | 0.0261 |

表 2 叶片燃气热腐蚀试验数据

| 试样类别 | 试样编号 | 质量损失/(g·m ⁻²) | 腐蚀速率/(g·m ⁻² ·h ⁻¹) |
|------|-------|---------------------------|--|
| 无涂层 | GY-W5 | 12.26 | 0.12 |
| | GY-W6 | 12.09 | 0.12 |
| | GY-W7 | 12.04 | 0.12 |
| | 平均值 | 12.13 | 0.12 |
| 有涂层 | GY-Y5 | 3.64 | 0.04 |
| | GY-Y6 | 3.85 | 0.04 |
| | GY-Y7 | 4.12 | 0.04 |
| | GY-Y8 | 4.97 | 0.05 |
| | 平均值 | 4.15 | 0.04 |

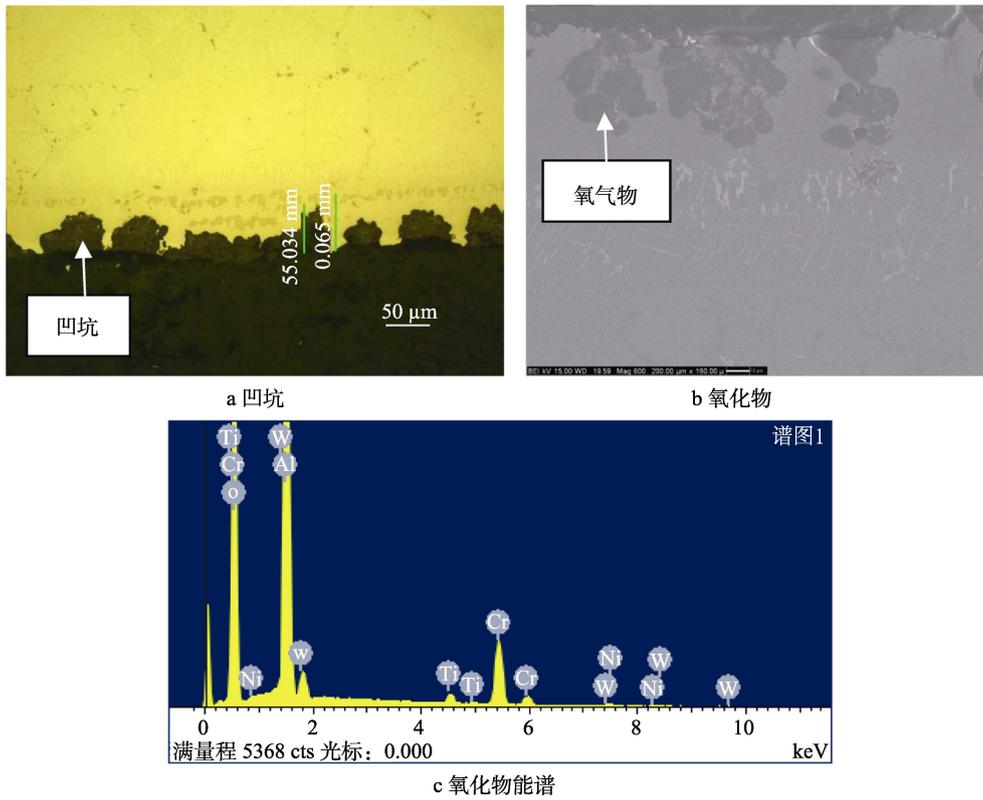


图 3 100 h 抗氧化试验后无涂层试样表面形貌及氧化物能谱分析结果

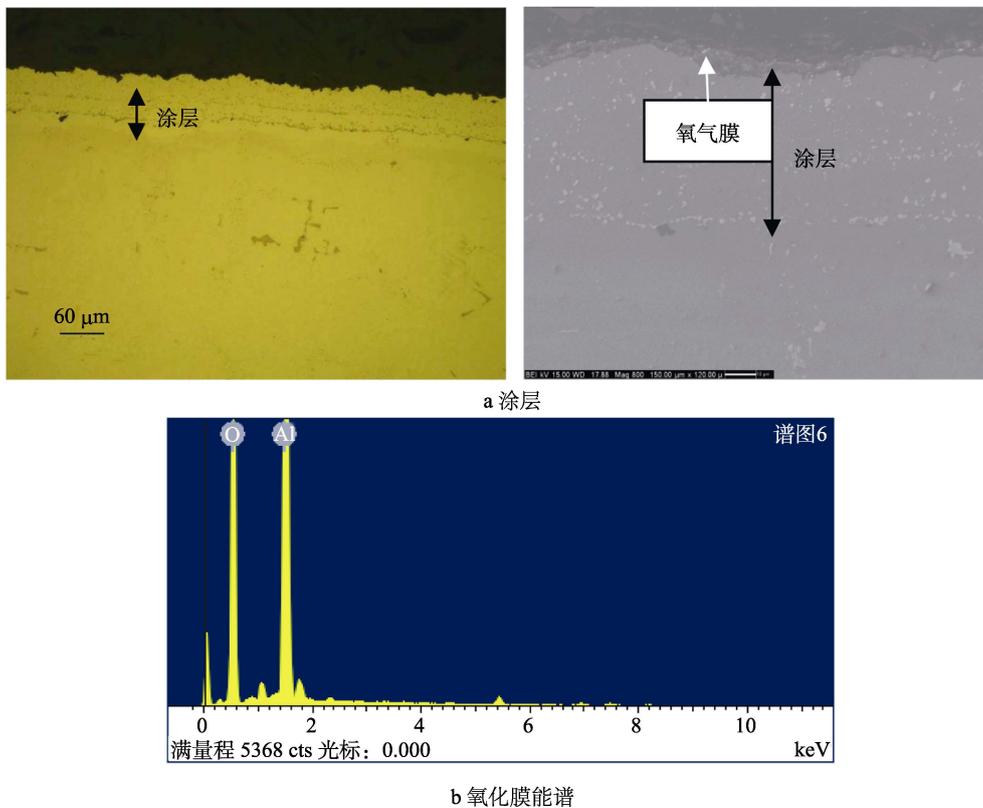


图 4 100 h 抗氧化试验后涂层表面氧化膜及能谱分析结果

从上述结果可以看出，有 NiCoCrAlYTa 涂层的叶片在高温氧化和燃气热腐蚀条件下，由于较高的氧分压和 Al 元素的选择性优先氧化，使涂层表面迅

速形成一层保护性的、以 Al_2O_3 为主的氧化膜^[5-7]。涂层中的 Ta 主要是起提高 Al 的活度，促进 Al_2O_3 氧化膜形成，使氧化膜细腻和致密的作用^[8]。涂层

中加入微量 Y 可以钉扎氧化物提高涂层性能^[9-10]。综合这些因素，涂层在经过长时间高温氧化和燃气

热腐蚀后仍能形成完整的 Al₂O₃ 膜，从而起到较好的保护作用。

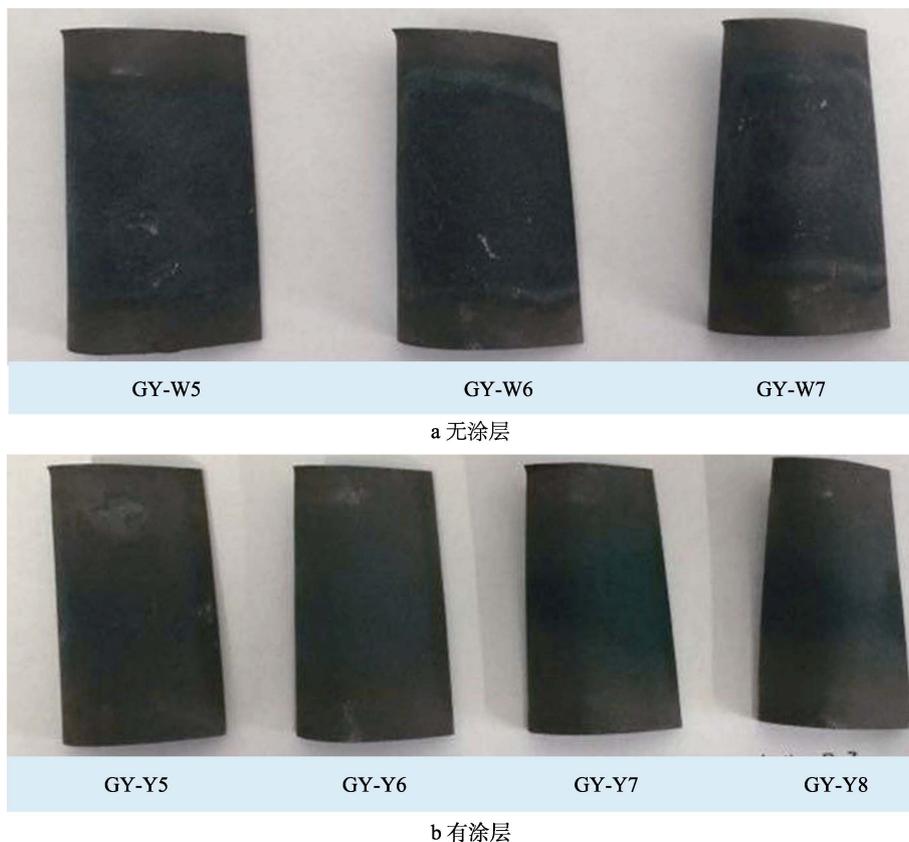


图 5 100 h 燃气热腐蚀试验后叶片试样外观

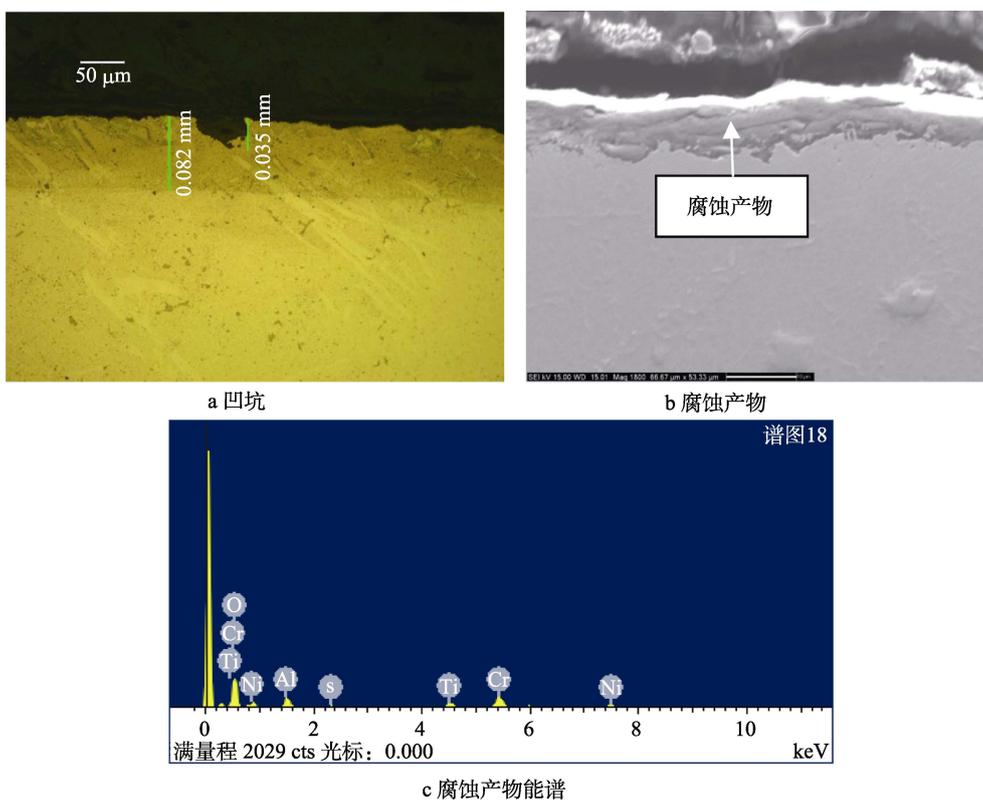


图 6 100 h 燃气热腐蚀试验后无涂层试样表面的腐蚀产物及能谱分析结果

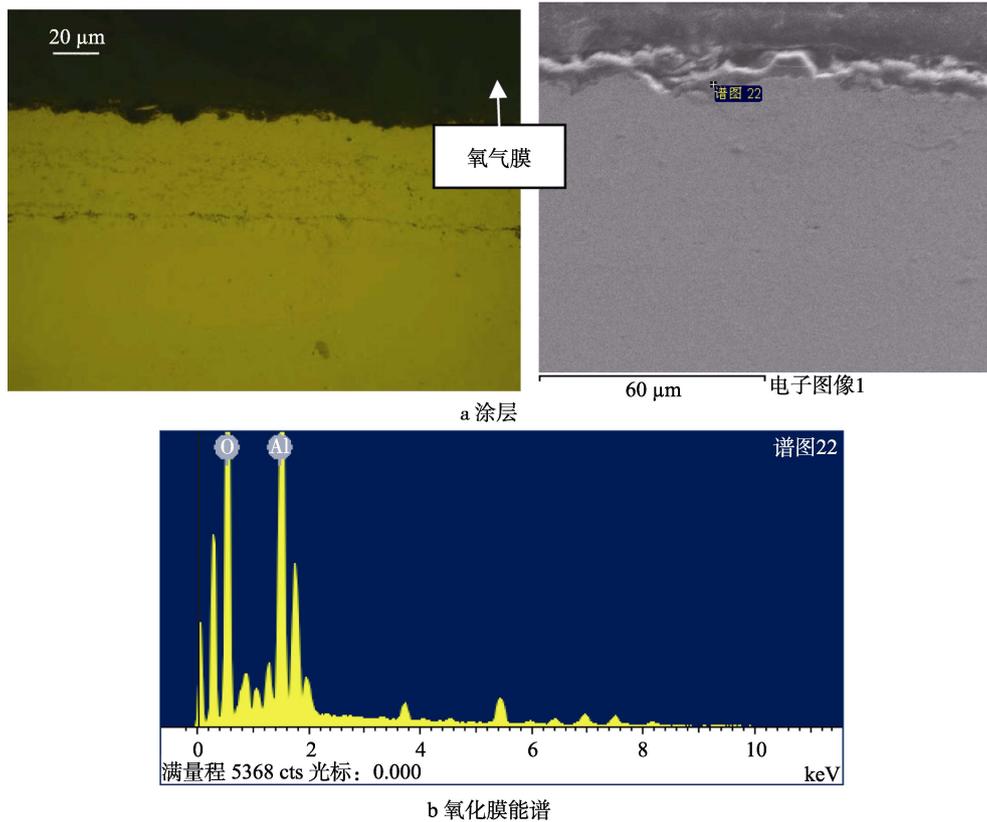


图 7 100 h 燃气热腐蚀试验后涂层表面的氧化膜及能谱分析结果

3 结论

1) DZ22B 高温合金叶片在高温氧化和燃气热腐蚀条件下分别遭受严重的氧化和腐蚀，带 NiCoCrAlYTa 涂层的叶片相同条件下试验后涂层完好。

2) NiCoCrAlYTa 涂层在经过长时间高温氧化和燃气热腐蚀后仍能形成完整的 Al_2O_3 膜，从而起到较好的保护作用。Ta、Y 等元素对 Al_2O_3 氧化膜的形成及质量具有促进作用。

参考文献：

- [1] 刘蓓薇, 黄进峰. 抗氧化腐蚀高温合金的最近发展和前景展望[J]. 重庆工学院学报, 2000, 14(1): 48-52.
- [2] SUNG P K, POIRIER D R. Estimation of Densities and Coefficients of Thermal Expansion of Solid Ni-base Superalloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 245(1): 135-141.
- [3] COWARD G W. Progress in Coatings for Gas Turbine Airfoils[J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 108(1): 73-79.
- [4] PADTURE N P, Cell M, Jordan E H. Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Engine Application[J]. Science, 2002, 296(12): 280-284.
- [5] 蔡妍, 陆峰, 李建平. HY3 包覆型涂层修复对 DD3 合金性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(1): 152-155.
- [6] 楼翰一. 几种镍基高温合金铝、铬涂层的抗热腐蚀性[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1985, 5(4): 291-297.
- [7] 孙恭宽, 马进, 张素萍, 等. 燃气涡轮高温腐蚀及其防护渗层[M]. 北京: 国外航空编辑部, 1979: 45-47.
- [8] 吴凤筠, 李建平, 李伟光. 含 Ta 高温防护涂层初步研究[J]. 材料工程, 1998, 43(12): 8-10.
- [9] 王冰, 宫俊, 黄美东, 等. 合金元素在 MCrAlY 涂层中的行为[J]. 材料保护, 2001, 34(4): 1-3.
- [10] 罗顺, 陈和兴. 高温镍基单晶合金 NiCoCrAlYTa 涂层的抗热腐蚀性能[J]. 材料保护, 2010, 43(3): 17-20.