

渗铝工艺对涡轮叶片表面冶金缺陷荧光显示的影响分析

张传明, 赵帅军, 李 凡, 杨克杰, 孙晓雪

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 涡轮叶片是航空发动机热端转动部件, 在制造过程中可以通过渗铝工艺来提高叶片表面抗氧化能力。渗铝工艺是一个热过程, 通常会促进涡轮叶片原带缺陷的暴露, 因此对渗铝后叶片进行荧光渗透检测可发现更多的不合格品。渗铝工艺还会在叶片表面形成一薄层保护膜, 是否会掩盖缺陷至今没有研究。本研究对带有缺陷的涡轮叶片在渗铝前后进行了荧光渗透检测、理化分析等试验。结果表明, 渗铝工艺对叶片表面缺陷还具有掩盖作用, 建议在涡轮叶片渗铝工序前增加一道荧光渗透检测以剔除原带缺陷。

关键词: 涡轮叶片; 渗铝; 荧光渗透检测; 理化检测

镍基高温合金具有较高的高温强度及良好的塑性, 被广泛应用于航空发动机热端部件, 特别是制造涡轮叶片和导向叶片^[1]。20世纪70年代, 研制的K417镍基高温合金9小孔空心涡轮工作叶片, 该涡轮叶片采用真空熔铸工艺进行毛料铸造, 取代镍基高温合金实心锻造涡轮工作叶片。在我国第一次成功地完成了一项以铸代锻的科研任务, 将精铸涡轮工作叶片应用到航空发动机上, 涡轮前温度提高100 ℃, 使某系列发动机的性能登上了一个新的台阶。荧光渗透检测能够在叶片研制、制造以及修理的各个阶段发现表面存在的冶金缺陷, 是涡轮叶片质量控制中的重要一环^[2-4]。由于涡轮叶片制造工艺复杂, 荧光渗透检测工序合理安排对表面缺陷的发现尤为关键。

1 涡轮叶片渗铝工艺

K417镍基高温合金作为航空发动机叶片材料, 如果使用温度超过900 ℃, 其抗氧化能力较差, 1 000 ℃以上时, 氧化皮严重剥落, 有时肿胀开裂, 甚至完全破坏, 因此需要增加防护层以提高其抗“热腐蚀”能力。镍基高温合金防护层多用铝、铬、硅系统, 一般镍基合金经渗铝、铬、硅防护层后, 在1 200 ℃氧化100 h, 增重只有0.3 mg/cm², 而其持久强度和疲劳性能还有改善。渗铝硅层由于有着良好的抗高温氧化、抗腐蚀和耐磨性能, 广泛用于涡轮叶片的高温防腐^[5]。某发动机涡轮叶片表面采用固体渗铝的方法, 其原理为: 将被渗叶片埋入具有活性的铝铁合金粉末中, 在高温和催化剂的作用下使铝原子渗入涡轮叶片表面, 提高抗氧化和燃气腐蚀能力。

2 渗铝工艺对荧光检测工序安排的影响分析

原涡轮叶片在整个工艺阶段经过2次X光和3次荧光渗透检测, 由此可见该涡轮叶片质量控制非常严格。X光检查叶片内部缺陷, 荧光渗透检查叶片表面开口缺陷。通常认为渗铝工艺为热过程(900 ℃), 会促使涡轮叶片原始冶金缺陷的充分暴露, 因此成品叶片荧光渗透检测工序一般安排在渗铝工艺之后。但渗铝工艺是在叶片表面形成一层10~20 μm的保护层, 该渗铝层是否会对原始冶金缺陷产生掩盖作用没有进

作者简介:

张传明(1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为航空发动机无损检测。E-mail:suolong0928@163.com

通讯作者:

赵帅军, 男, 高级工程师。
E-mail:yingzi09163@163.com

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)09-0958-05

收稿日期:

2020-02-10 收到初稿,
2020-06-01 收到修订稿。

行过试验研究。本文通过试验验证了渗铝工艺对涡轮叶片表面缺陷影响的结果，因此建议在渗铝工艺前增加一次荧光渗透检测，避免原带冶金缺陷被渗铝层掩盖后无法检出。

3 试验与结果分析

选取10片带有表面冶金缺陷的报废品叶片进行表面渗铝，分别对渗铝前和渗铝后的叶片进行荧光渗透检测，测量缺陷大小，检测结果见表1。渗铝后叶片表面缺陷主要产生以下三种变化：被掩盖的有4件，变小的有3件，无变化的有3件。

3.1 缺陷被渗层掩盖

编号为H1I539-7的叶片渗铝前后荧光渗透显示见图1，渗铝前叶片进气边发现一条1.2 mm的断续线性缺陷（如图1a所示），渗铝后该缺陷显示消失（如图1b

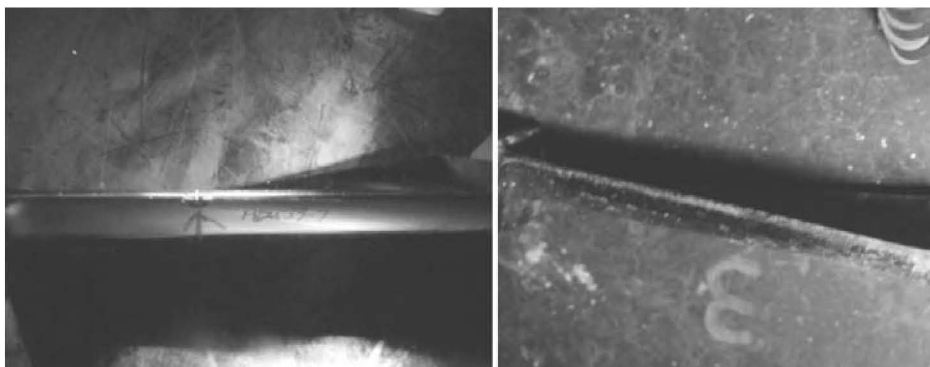
所示），而且渗铝后的叶片表面荧光背景较重，表明渗铝后叶片表面较粗糙。对渗铝前后叶片缺陷处分别采用扫描电镜观察，结果见图2，发现渗铝前的荧光显示为多条线性缺陷（如图2a所示），而渗铝后叶片表面被渗铝层掩盖，未发现该缺陷（如图2b所示），而且可以看出渗铝后叶片表面较粗糙，这是引起荧光检测背景变差的主要原因。之后，对渗铝后叶片对应的缺陷位置处进行抛磨，在扫描电镜下观测，重新发现了该位置的缺陷，见图3。

3.2 缺陷被渗层部分掩盖

编号为H1I613-7的叶片渗铝前后荧光显示见图4，缺陷的荧光显示在渗铝后变小（如图4b所示）。对渗铝前后的叶片缺陷处采用扫描电镜进行观察，结果见图5，可以看出渗铝前缺陷具有明显的锐角（如图5a所示），而渗铝后缺陷边角被渗铝层掩盖，从而引起缺

表1 渗铝前后叶片表面缺陷荧光显示情况
Table 1 Fluorescence display of leaf surface defects before and after aluminizing

序号	叶片编号	缺陷位置	渗铝前荧光显示	渗铝后荧光显示	变化结果
1	H1I470-3	排气边上，距叶冠47 mm	1 mm，线性	无显示	掩盖
2	H1I617-5	排气边上，距叶冠59 mm	0.4 mm，点状	0.4 mm，点状	无变化
3	H1I604-7	叶背距排气边1mm，距叶冠50 mm	1.5 mm，线性	1.5 mm，线性	无变化
4	H1I385-3	排气边上，距叶冠57 mm	1 mm，断续线性	无显示	掩盖
5	H1I613-7	排气边上，距叶冠44 mm	1.2 mm，断续线性	0.9 mm，线性	变小
6	H1I539-7	排气边上，距叶冠31 mm	1.2 mm，断续线性	无显示	掩盖
7	H1I614-8	排气边上，距叶冠58 mm	0.5 mm，点状	0.2 mm，点状	变小
8	H1I617-3	叶背距进气边1 mm，距叶冠82 mm	1 mm，点状	1 mm，点状	无变化
9	H1I618-3	叶盆距进气边14.5 mm，距叶冠90 mm	1.2 mm，线性	1 mm，线性	变小
10	H1I618-6	排气边上，距叶冠36 mm	0.5 mm，线性	无显示	掩盖



(a) 渗铝前

(b) 渗铝后

图1 H1I539-7号叶片渗铝前后荧光显示

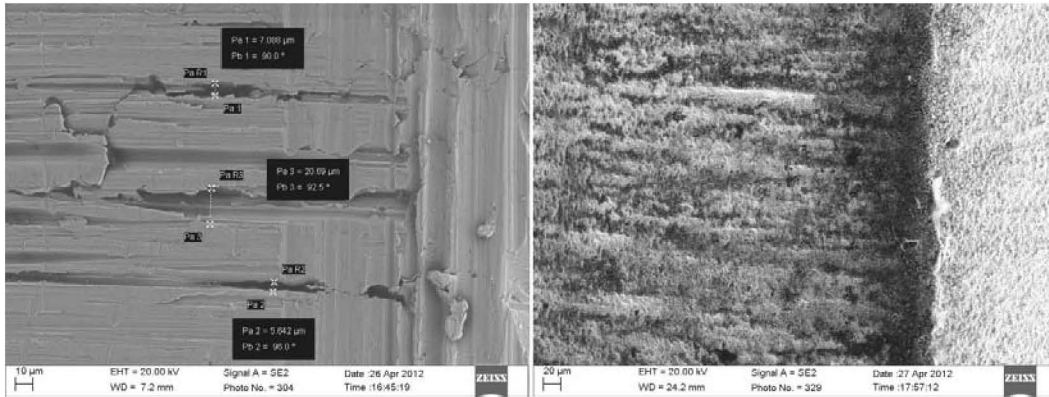
Fig. 1 Fluorescence display of H1I539-7 blade before and after aluminizing

陷的荧光显示变小（如图5b所示）。

3.3 缺陷未被渗层掩盖

编号为H1I604-7的叶片渗铝前后荧光显示见图6，

荧光显示大小没有变化。对渗铝前后叶片缺陷处采用扫描电镜进行观测（如图7所示），可以看出缺陷圆形部位的锐角由于渗铝变得圆滑，而线性部分的尺寸基本没有变化。



(a) 渗铝前

(b) 渗铝后

图2 H1I539-7号叶片渗铝前后扫描电镜观测结果

Fig. 2 Scanning electron microscopy observation results of of H1I539-7 blade before and after aluminizing

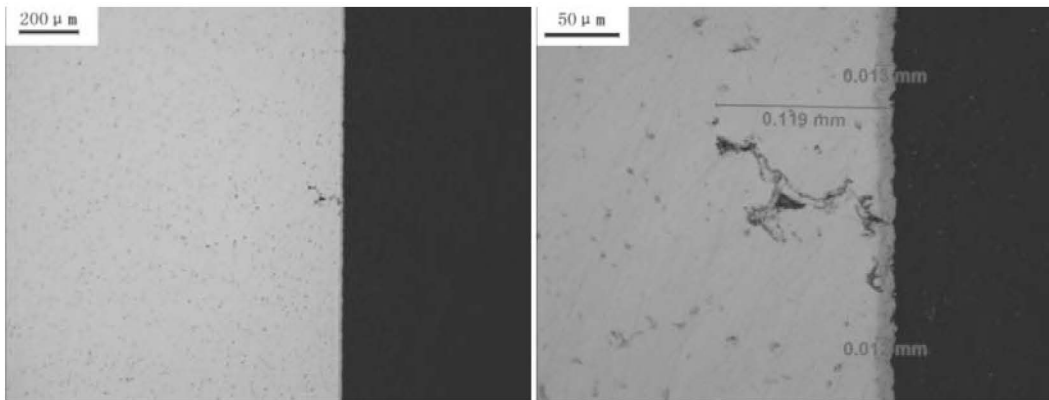
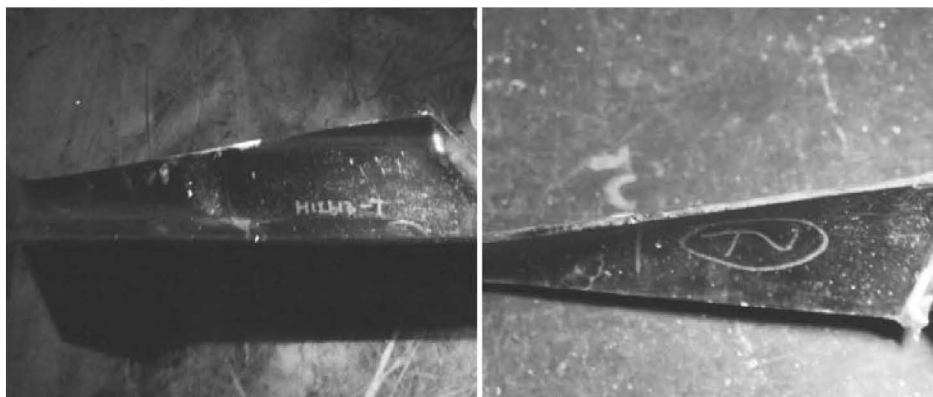


图3 H1I539-7号渗铝叶片抛磨后的扫描电镜观测结果

Fig. 3 Scanning electron microscope observation results of H1I539-7 aluminized blade after polishing



(a) 渗铝前

(b) 渗铝后

图4 H1I613-7号叶片渗铝前后荧光显示

Fig. 4 Fluorescence display of H1I613-7 blade before and after aluminizing

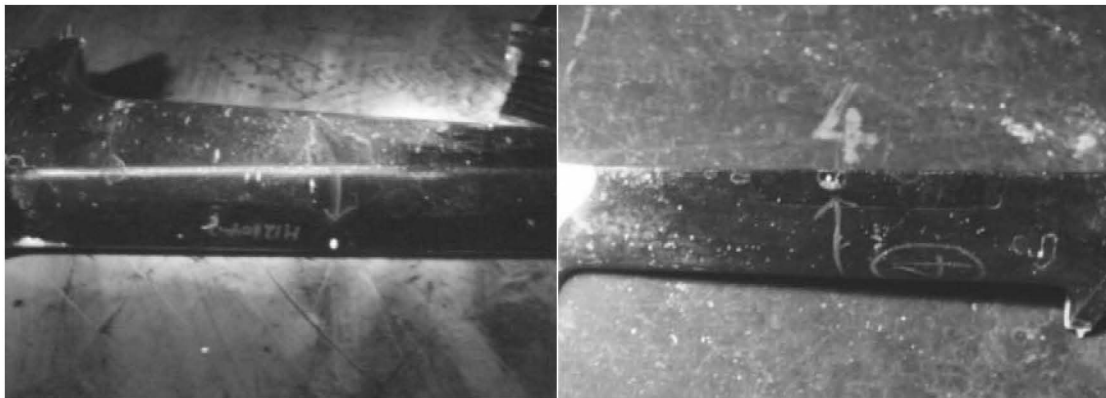


(a) 渗铝前

(b) 渗铝后

图5 H11613-7号叶片渗铝前后扫描电镜观测结果

Fig. 5 Scanning electron microscopy observation results of H11613-7 blade before and after aluminizing

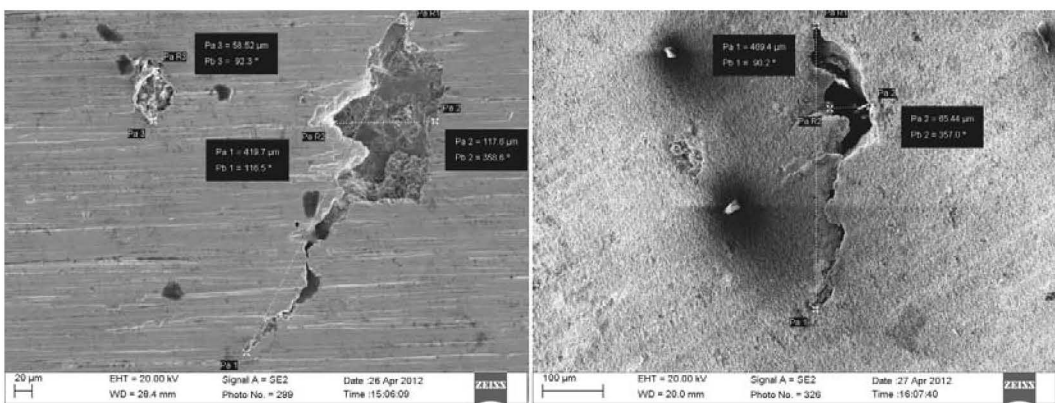


(a) 渗铝前

(b) 渗铝后

图6 H11604-7号叶片渗铝前后荧光显示

Fig. 6 Fluorescence display of H11604-7 blade before and after aluminizing



(a) 渗铝前

(b) 渗铝后

图7 H11604-7号叶片渗铝前后扫描电镜观测结果

Fig. 7 Scanning electron microscopy observation results of H11604-7 blade before and after aluminizing

4 结论

(1) 渗铝工艺对涡轮叶片原带表面的开口缺陷产生如下三种影响：缺陷被渗层掩盖、缺陷被渗层部分掩盖、缺陷未被渗层掩盖。

(2) 鉴于渗铝工艺对缺陷掩盖事实，建议在叶片渗铝工艺前增加荧光渗透检测工序，提高检出缺陷概率。

参考文献:

- [1] 王晓轩, 国振兴, 于兴福, 等. 浇注温度对K417G合金组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (9) : 924-928.
- [2] 徐亚亚, 李泽, 刘兴勇. 某机高压涡轮叶片荧光渗透检测工艺改进 [J]. 无损检测, 2015, 37 (9) : 69-71.
- [3] 戴雪梅, 苏清风, 朱晓星. 荧光渗透检测在航空发动机研制阶段的应用 [J]. 铸造, 2011, 60 (10) : 994-997.
- [4] 孙宝才, 鲁悦, 林中天, 等. K417G合金铸件荧光显示问题研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (10) : 915-917.
- [5] 熊瑛, 张海军, 赵秀梅, 等. 热电法在表征涡轮叶片渗铝硅层厚度中的应用 [J]. 航空制造技术, 2016 (12) : 105-109.

Analysis on Influence of Aluminizing Technology on Fluorescence Display of Metallurgical Defects on Turbine Blade Surface

ZHANG Chuan-ming, ZHAO Shuai-jun, LI Fan, YANG Ke-jie, SUN Xiao-xue
(AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract:

The turbine blade is the rotating part of the hot end of the aeroengine. During the manufacturing process, the surface oxidation resistance of the blade can be improved by aluminizing process. Aluminizing process is a thermal process, which usually promotes the exposure of turbine blade defects. Therefore, more unqualified products can be found after aluminizing by fluorescent penetrant inspection. The aluminizing process can also form a thin protective film on the blade surface, whether it can cover up the defects has not been studied. In the present study, the turbine blades with defects were tested by fluorescent penetrant test and physical and chemical analysis before and after aluminizing. The results show that the aluminizing process can also cover the surface defects of turbine blades. It is suggested to add a fluorescent penetrant inspection before the aluminizing process of turbine blades to eliminate the original defects.

Key words:

turbine blade; aluminizing; fluorescence penetrant inspection; physics and chemistry test
