

# DZ125 合金涡轮叶片荧光缺陷分析及解决方法

张 鸿, 刘永娜, 刘大钊, 王石磊

(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:** 通过扫描电镜对产生荧光缺陷的叶片铸件的显微形貌和化学成分进行分析, 确定了叶片荧光显示缺陷是由合金及外来碳元素与型壳材料发生反应产生的。通过降低浇注温度和完善型壳焙烧工艺, 消除了铸件表面的冶金缺陷。

**关键词:** 定向叶片; DZ125合金; 荧光缺陷; 型壳反应; 型壳焙烧

DZ125合金是在第一代定向凝固合金René DS125基础上改良得到的定向凝固镍基高温合金, 它具有高温强度高、综合性能好、组织稳定及铸造工艺性能好等优点, 被广泛用于航空发动机空心涡轮叶片铸件的生产<sup>[1-3]</sup>。精密铸造过程中, 陶瓷型壳与合金在高温下长时间接触, 合金熔体与陶瓷材料之间容易发生化学反应, 引起铸件表面冶金缺陷的产生。DZ125合金中加入了Hf元素, Hf能够起到强化晶界、提高合金的抗蠕变强度的作用<sup>[4-5]</sup>。但Hf容易在合金熔体表面富集, 在高温下化学活性很强, 易与陶瓷型壳产生界面反应, 从而引起铸件表面粘砂、脱壳困难, 严重时直接导致铸件报废。本试验以DZ125合金空心定向高涡轮叶片为研究对象, 采用扫描电镜对其表面缺陷进行检测, 分析缺陷的类型、特征及成因, 通过对叶片精铸过程进行改进, 以解决类似的表面缺陷, 提高叶片的成品率。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用合金材料为DZ125, 其化学成分如表1所示。陶瓷型壳为刚玉型壳, 面层耐火粉料为320#电熔白刚玉粉, 粘结剂为JN-30硅溶胶, 撒砂材料为100#电熔白刚玉砂。刚玉粉/砂的化学成分如表2所示, 硅溶胶的技术要求如表3所示。

### 1.2 试验方法

蜡模组树后, 在恒温恒湿间进行型壳的涂制。涂制后模组经脱蜡和950℃(保温1.5 h)的焙烧后, 在真空定向凝固炉内进行DZ125合金定向空心涡轮叶片浇注。定向凝固过程的主要工艺参数为: 浇注温度1 510℃, 上区温度1 500℃, 下区温度1 510℃, 抽拉速度6 mm/min。浇注后的模组经脱壳、切割、脱芯、吹砂后, 进行目视和荧光检测分析。对叶片铸件荧光缺陷部位进行切样, 利用扫描电镜对缺陷位置进行微观形貌和化学成分分析。

## 2 试验结果分析与解决方法

### 2.1 试验结果分析

对不同浇注批次的叶片铸件表面荧光缺陷进行了数据统计, 缺陷主要集中在叶背。图1a为荧光灯下叶背缺陷显示的宏观图片, 图1b是采用扫描电镜观测的缺陷部位显微形貌图, 对白色区域A、黑色区域B和灰色区域C进行能谱分析, 结果如图2所示。图1b白色区域能谱分析结果为HfO<sub>2</sub>(图2a), 这是由于DZ125合金

作者简介:

张 鸿(1985-), 男, 工程师, 主要从事高温合金精密铸造工艺及设计工作。  
E-mail: zhanghongworkmail@163.com

中图分类号: TG132.3  
文献标识码: B  
文章编号: 1001-4977(2020)06-0632-04

收稿日期:

2019-11-04 收到初稿,  
2020-03-10 收到修订稿。

Hf含量较高, Hf具有一定的趋肤效应, 富集于叶片铸件表面, 与型壳粘结剂材料 $\text{SiO}_2$ 发生了置换反应 $\text{Hf}+\text{SiO}_2\rightarrow\text{Si}+\text{HfO}_2$ , 生成物 $\text{HfO}_2$ 聚集在铸件表面。

黑色区域(图2b)和灰色区域(图2c)均检测到O元素, 这是由于叶片铸件在低真空含氧条件下高温浇注, 凝固过程中DZ125合金表面的活泼金属元素易被氧化生成金属氧化物。黑色区域和灰色区域的C和Si的含量明显增加, 其中Si元素的增加是由于合金凝固过程中Hf与 $\text{SiO}_2$ 反应, 生成物Si进入合金熔体, 导致铸件表面局部区域Si含量升高。合金中含有0.07%~0.12%的C元素, 检测的结果C元素均高于7%。考虑到样品在检测过程中可能会受到污染, 多次反复清洗试样, 重新检

测样品, 依然检测到高于合金成分的C元素。同时, 对具有同样荧光显示缺陷的其他叶片进行检测, 同样检测到较高含量的C元素, 可以确定外来C元素进入合金内部。

生产过程中蜡模材料含有大量的C元素, 目视检验多批次焙烧后型壳, 结果发现个别型壳焙烧后浇口杯(图3a)和型壳外表面(图3b)有黑色的碳及碳化物残留。这是由于型壳焙烧过程中氧气量不足, 蜡料未完全烧失。生成的碳在合金浇注过程中容易进入合金熔体, 同时C与型壳中的 $\text{SiO}_2$ 发生下列反应, 导致合金表面Si元素的增加。



表1 DZ125合金成分  
Table 1 Chemical composition of DZ125

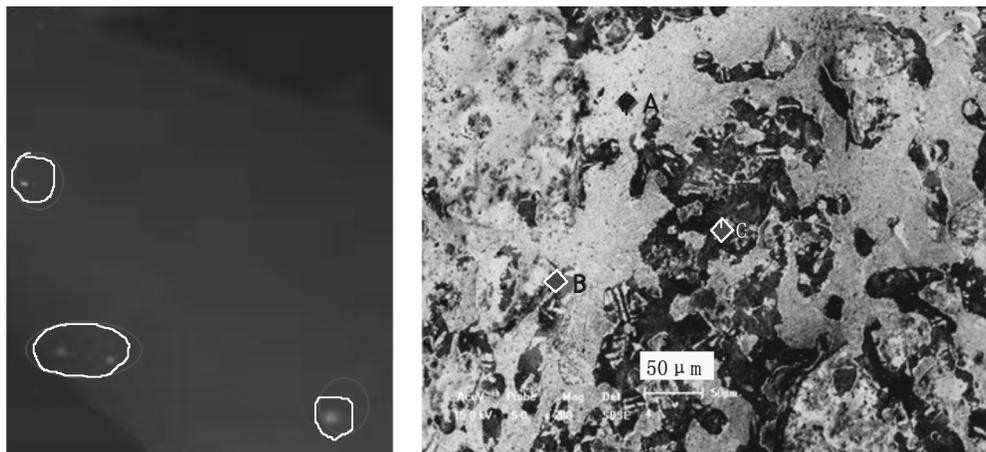
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	B
$w_B/\%$	0.06~0.13	8.0~10.0	9.0~11.0	6.0~8.0	1.4~2.5	4.7~5.6	0.5~1.3	3.5~4.1	1.0~2.0	0.01~0.02

表2 电熔白刚玉粉/砂化学成分  
Table 2 Composition of fused corundum powder/sand

种类	粒度	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$
电熔白刚玉砂	100 <sup>#</sup>	$\geq 99.3$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.3$
电熔白刚玉粉	320 <sup>#</sup>	$\geq 99.1$	$\leq 0.2$	$\leq 0.1$	$\leq 0.4$

表3 硅溶胶技术要求  
Table 3 Technical requirements for silica Sol

型号	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{Na}_2\text{O}/\%$	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	pH(25±2)℃	运动粘度/( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	$\text{SiO}_2$ 平均粒子直径/nm
JN-30	30~31	$\leq 0.3$	1.19~1.21	9~10	$\leq 7\times 10^{-6}$	10~20



(a) 荧光显示图

(b) 显微形貌图

图1 缺陷部位荧光显示图和显微形貌图

Fig. 1 Fluorescent display and micro morphology of defect locations



此外,黑色区域检测到了非合金元素K、Ca、Fe,型壳耐火材料中虽然含有微量的Fe元素,但经过高温焙烧后Fe元素大部分进入莫来石相<sup>[6]</sup>,不易与合金反应,可以确定这些元素为外来引进的杂质元素。考虑到荧光检测前的各工序,仅脱芯过程采用的KOH水溶液涉及上述元素。由于叶片脱芯在高温、高压脱芯釜中进行,荧光显示区域为不规则、微孔洞结构的反应区,脱芯过程中碱液容易因毛细作用残留到反应区,造成外来元素污染。

## 2.2 解决方法

综合上述试验分析结果,产生荧光缺陷的主要原因是合金的Hf元素与型壳中的SiO<sub>2</sub>反应。依据化学反应热力学和动力学原理,温度直接影响反应的Gibbs自由能变化和反应速率。因此,在确保冶金质量的

前提下,降低叶片的浇注温度能减少反应、降低反应速率,进而减少反应性荧光显示。叶片铸件C元素的增加,主要来源于蜡料残留,通过改进型壳的焙烧工艺,使蜡料充分燃烧、释放,可以解决该问题。因此,将型壳焙烧及叶片浇注工艺做如下改进:

(1)型壳焙烧工艺。将型壳的终烧温度提高到1 050 ℃,保温时间延长至2 h。同时,采用带有送风(补充氧气)、排风系统的焙烧炉进行型壳的焙烧,在200 ℃至650 ℃增加送风补氧工艺,使有机蜡料充分燃烧,以CO和CO<sub>2</sub>等形式烧失。

(2)叶片的定向凝固工艺。浇注温度1 490 ℃,上区温度1 490 ℃,下区温度1 490 ℃,抽拉速度6 mm/min。

通过上述工艺过程的改进,叶片的一次荧光合格率由80%提高到95%以上,壳液反应引起的叶片铸件报废率由7.7%降低到1%以下,基本解决了该类问题。

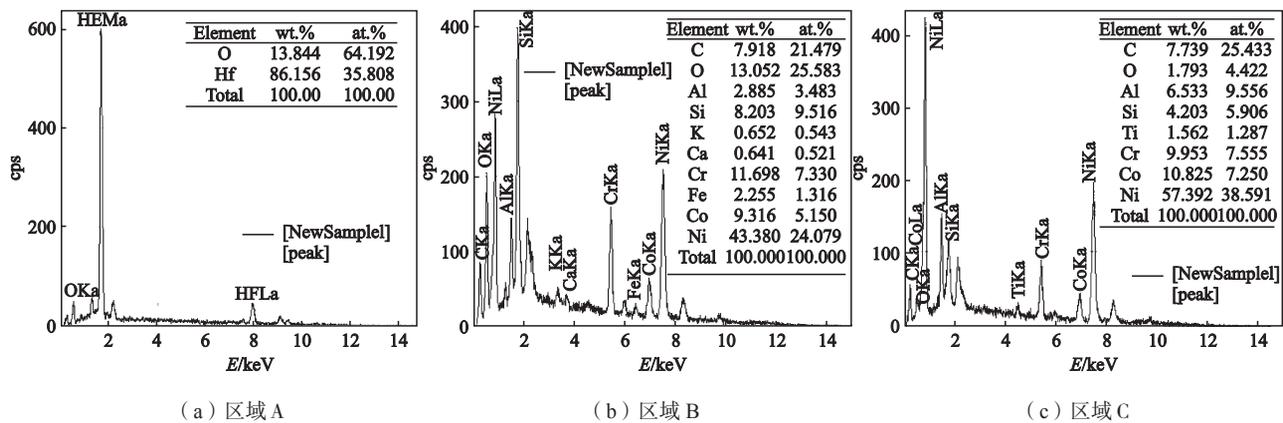
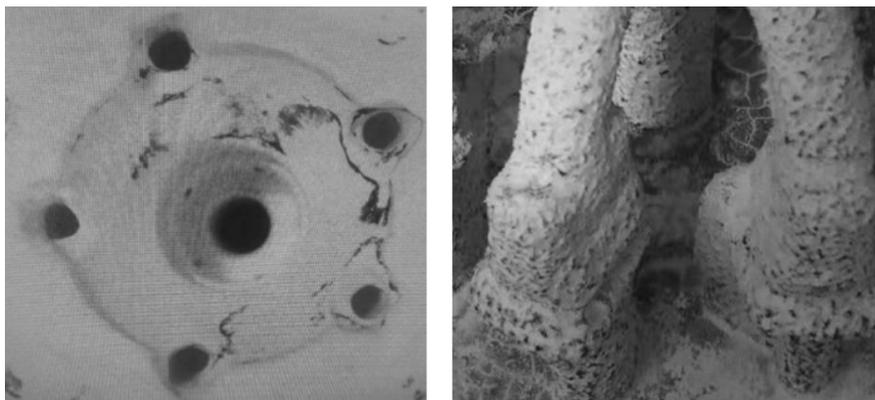


图2 不同区域能谱分析结果  
Fig. 2 Energy spectrum analysis results of different zones



(a) 型壳浇口杯 (b) 型壳外表面

图3 焙烧后的铸件型壳  
Fig. 3 Baked shell mold of casting

### 3 结束语

DZ125合金高涡叶片荧光显示缺陷产生的主要原因是合金中Hf元素与型壳中的SiO<sub>2</sub>反应。同时,部分未完全烧失的C元素进入合金或与型壳中的SiO<sub>2</sub>反应。解决该缺陷的措施一是降低浇注温度,二是完善型壳的焙烧工艺,使蜡料最大限度的烧失。大量的生产试验证明,上述方法能有效减少DZ125合金高涡叶片荧光显示缺陷。

#### 参考文献:

- [1] 陈亚东,郑为为,郑运荣,等. 定向凝固DZ125合金热暴露后显微组织演变及其相应持久性能的研究[J]. 稀有金属, 2018, 42(10): 1009-1017.
- [2] 陈荣章,余力,张宏伟,等. DZ125定向凝固高温合金的研究[J]. 航空材料学报, 2000, 20(4): 14-19.
- [3] 张卫国,刘林,赵新宝,等. 定向凝固高温合金研究进展[J]. 铸造, 2009, 58(1): 1-6.
- [4] 王艳丽,赵希宏,范映伟,等. Hf对IC10高温合金凝固特性的影响[J]. 航空材料学报, 2012, 32(6): 50-55.
- [5] 陈晓燕,肖旅,余建波,等. 熔模铸造高温合金与陶瓷磁力界面反应研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(8): 844-848.
- [6] 张立同,曹腊梅,刘国利,等. 近净形熔模精密铸造理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

---

## Analysis and Solution of Fluorescent Defects in DZ125 Alloy Turbine Blade

ZHANG Hong, LIU Yong-na, LIU Da-zhao, WANG Shi-lei  
(Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang110043, Liaoning, China)

#### Abstract:

The microstructure and chemical composition of DZ125 alloy blade castings with fluorescent defects were analyzed by means of SEM. It is found that the fluorescent defects in blades are caused by the reaction of alloy and carbon element with shell materials. The solutions to the problem are to reduce pouring temperature and improve shell baking process. It has been verified by actual production that the methods can eliminate the fluorescent defects in DZ125 alloy blade castings.

#### Key words:

directional blade; DZ125 alloy; fluorescence defects; shell reaction; shell mold baking

---