

文章编号:1000-6893(2003)04-0377-05

# 定向凝固合金叶片的再结晶与疲劳失效

张卫方<sup>1</sup>, 高威<sup>1</sup>, 赵爱国<sup>1</sup>, 陶春虎<sup>1</sup>, 田继丰<sup>2</sup>, 姚戈<sup>2</sup>

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110035)

## Recrystallization and Fatigue Failure of Blades Made of a Directionally Solidified Alloy

ZHANG Wei-fang<sup>1</sup>, GAO Wei<sup>1</sup>, ZHAO Ai-guo<sup>1</sup>, TAO Chun-hu<sup>1</sup>, TIAN Ji-feng<sup>2</sup>, YAO Ge<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Metal Institute of Academic, Shenyang 110035, China)

**摘要:** 对定向凝固合金叶片的裂纹与断裂进行了分析,在断口观察与金相组织分析的基础上,对叶片的失效模式与失效原因进行了研究,并提出了预防该类故障发生的措施。研究表明,定向凝固合金叶片的裂纹与断裂为同一失效模式,均为叶片表面的再结晶而导致的疲劳失效。叶片表面的再结晶在叶片使用之前就已存在,是由于固溶热处理前叶片的表面存在塑性变形,在固溶热处理过程中形成的。

**关键词:** 定向凝固合金; 叶片; 再结晶; 疲劳失效

**中图分类号:** V252; TG132.3<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A

**Abstract:** The crack and fracture of blades made of a directionally solidified superalloy were analyzed. The failure mode and cause were studied in virtue of fracture observation and metallographic structure analysis. The results show that the crack and fracture on the superalloy blades have the same failure mode resulting from surface recrystallization. Owing to the plastic deformation at the blade surface, recrystallization formed during the solid solution heat treatment. Before blade application, the recrystallization zone is already exist on its two sides and surface.

**Key words:** directionally solidified superalloy; blade; recrystallization; fatigue failure

定向凝固合金由于采用顺序定向凝固,在受力方向不存在晶界,具有很高的热疲劳强度、持久蠕变强度、塑性以及良好的振动阻尼效果,在航空、航天、舰船等领域的应用愈来愈广泛<sup>[1,2]</sup>。

DZ4 合金是我国研制成功的定向凝固高温合金材料,它不仅具有其它定向凝固合金的众多优点,而且具有良好的横向性能(DZ4 合金的横向持久强度与纵向持久强度的比值  $K$  为 0.84 ~ 0.90)和薄壁性能。目前,DZ4 合金已大量应用于制造航空发动机涡轮叶片。随着定向凝固 DZ4 合金在航空领域的大量使用和应用范围的不断扩大,其构件的失效已在所难免,尤其是近年来,已连续出现了十余起性质基本相同的二级涡轮叶片裂纹与断裂故障。有关定向凝固合金的凝固工艺、微观组织特征及力学性能之间的关系已有较多报道<sup>[3~6]</sup>,然而对于该类合金在工程应用中的损伤与断裂行为则研究的很少<sup>[7]</sup>。因此,对连续发生的十余起性质基本相同的二级涡轮叶片裂纹与断裂故障的深入细致研究就显得尤为重要。本

文对定向凝固 DZ4 合金叶片的裂纹与断裂失效进行了分析,对其失效原因进行了研究,并提出了预防该类故障发生的措施。

## 1 试验方法

叶片采用 DZ4 合金定向凝固,经固溶时效等工艺处理后使用。

裂纹与断裂故障叶片的断口在扫描电镜下进行观察。低倍金相组织采用  $H_2O_2 + HCl$  腐蚀剂浸蚀,高倍金相组织采用  $HNO_3 + HF +$  甘油腐蚀剂浸蚀,浸蚀后在光学显微镜与扫描电镜下进行观察与分析。

## 2 试验结果

### 2.1 叶片裂纹故障

DZ4 合金叶片在使用过程中发现多起裂纹故障,这些裂纹有些位于进气边,有些位于排气边。图 1 示出了 4 个叶片进气边裂纹的位置(箭头所指),其中 4 # 叶片箭头所指为裂纹断口位置,为

收稿日期:2002-09-05; 修订日期:2003-01-12

文章网址:<http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/04/0377/>

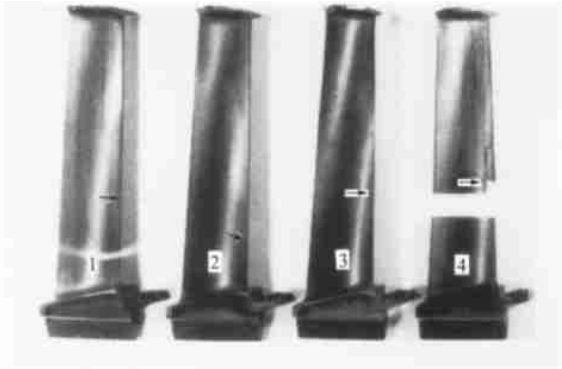


图1 叶片进气边裂纹位置图

Fig. 1 Crack location on the air intake side of blade

一折线,该折线的横向部分为人工打断部分,而进气边处很小的倾斜部分对应裂纹断口部分。从图中可以看出,出现裂纹的位置范围是从距榫头底面40mm至90mm,其它叶片上出现的裂纹的位置也在这个范围内。

由于出现的裂纹较短,且叶片表面氧化呈黑色,肉眼难以清晰分辨裂纹,因此,将叶片置于丙酮中经超声波清洗后在扫描电镜下进行观察。图2和图3分别是1#叶片和2#叶片裂纹的形貌。可以看出,裂纹多呈弯曲状延伸。1#叶片上仅发现一条裂纹,而2#叶片上除箭头处所示的裂纹外,在扫描电镜下观察时又在箭头所示附近发现多条尺寸较小的裂纹,如图3(b)所示。对多个叶片的裂纹进行观察后发现,裂纹长度多在0.1~10mm之间,个别裂纹很短,长度小于0.1mm。

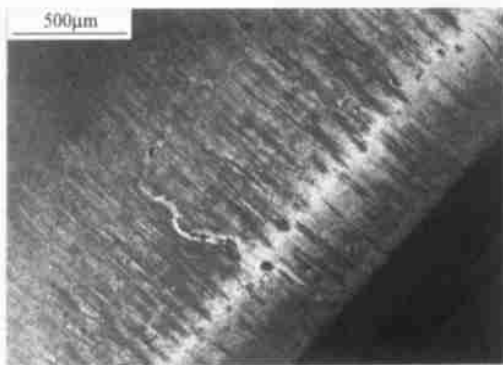
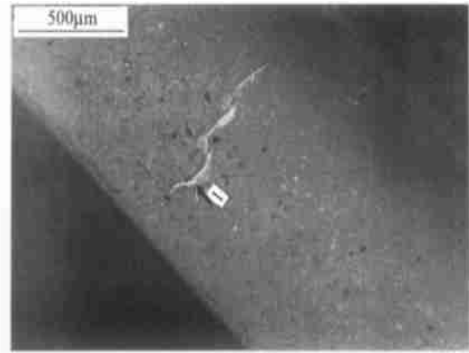


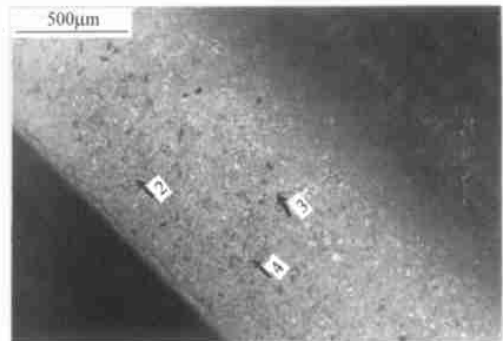
图2 1#叶片的裂纹形貌

Fig. 2 Crack morphology of 1# blade

为了查找叶片裂纹与其表面组织的关系,将腐蚀后的叶片放入扫描电镜观察,发现在叶片进气边和排气边均存在一定程度的再结晶,如图4所示,再结晶晶粒尺寸为 $10 \sim 10^2 \mu\text{m}$ 数量级,比铸态晶粒小得多。图4中箭头1所指为图2中所示裂纹(1#叶片),在该裂纹附近的再结晶区域内则可见更短的沿晶裂纹。



(a) 主裂纹



(b) 其它小裂纹

图3 2#叶片裂纹形貌

Fig. 3 Cracks morphology of 2# blade

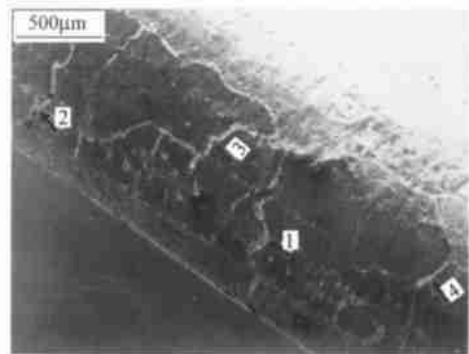


图4 叶片的再结晶组织

Fig. 4 Recrystallization structure on the side of blade

对裂纹人工打断后的断口进行观察,发现整个断口由三部分组成,如图5所示。部分A和部分B为裂纹断口,部分C为人工打断断口。其中部分A与部分C大致平行,为横断口,部分B与横断口斜交,为斜断口。根据一般断口的扩展方向,且由于叶片表面所受的应力最大,裂纹断口A的形成应先于部分B,即部分A为起始开裂部分,部分B为裂纹扩展部分。对部分A进行放大,可以看出该处断口由取向不同的一些小面组成,为韧窝+沿晶(或沿枝晶)断裂特征,如图6所示,小面尺寸 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ ,与表面再结晶晶粒尺寸相当。对部分B放大后进行观察,可见细密的疲劳条带。

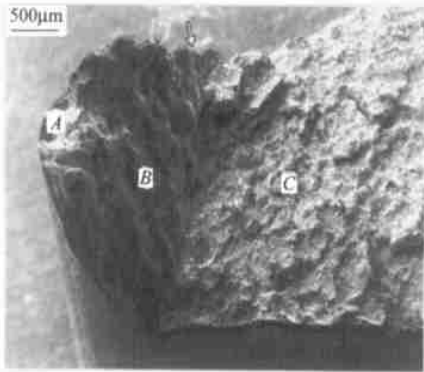


图 5 叶片裂纹断口形貌

Fig. 5 Fracture surface morphology of blade crack

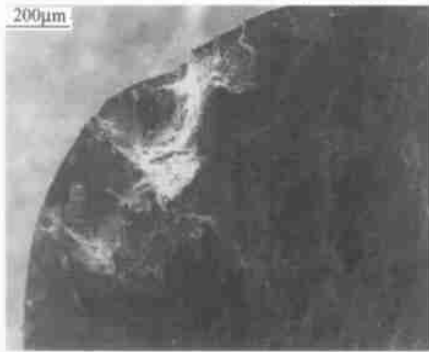


图 6 图 5 中源区放大

Fig. 6 Magnification of origin zone on Fig. 5

### 2.2 叶片断裂故障

DZ4 合金叶片在使用过程中已出现了几起断裂故障,这几起断裂故障的失效模式均为疲劳断裂,疲劳裂纹萌生的部位到榫头底面的距离也在 40~90mm 范围内。疲劳裂纹有些从排气边萌生向进气边扩展,有些则从进气边萌生向排气边扩展。发生疲劳断裂的断口宏观上均可分为 3 个特征区,即源区、扩展区和瞬断区,其中源区均较粗糙,而扩展区则较平坦。

某叶片发生疲劳断裂,叶片断裂在距榫头底部约 62mm 处。对断口进行宏观观察,叶片从进气边萌生裂纹,源区呈黑色,且较粗糙,粗糙区大小约 1mm<sup>2</sup>,为一宏观疲劳断裂源。扩展区从与粗糙区交界处开始呈兰色,平坦,向排气边扩展。源区与扩展区基本上在一个平面上,均与叶片纵向垂直,为横断口。将其置于扫描电镜下进行观察,可以看出,粗糙区由取向不同的一些小面组成,为韧窝+沿晶(或沿枝晶)断裂特征,局部可见二次开裂特征,如图 7 所示,扩展区则可见明显的疲劳条带。

某叶片疲劳断裂,叶片断裂在距榫头底部约

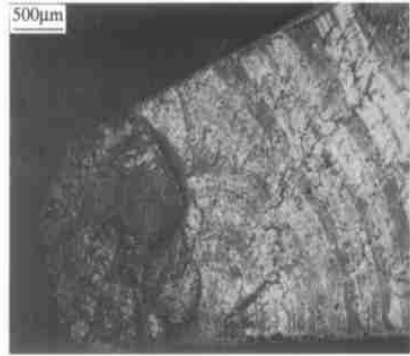


图 7 断裂叶片源区与扩展区形貌

Fig. 7 Morphology of origin and propagated zone of blade fracture surface

44mm 处,如图 8 所示,断口从排气边起源,向进气边扩展。疲劳区长约 14mm,呈深兰色,基本与叶片纵向垂直。源区有一高约 1.5mm、宽约 0.8mm 的凸台,凸台断面粗糙,底部有开裂特征,疲劳区从凸台底部起始,向进气边扩展,凸台成为一宏观疲劳断裂源。凸台的微观形貌如图 9 所示,与图 7 中的粗糙区形貌特征类似,也为韧窝+沿晶(或沿枝晶)断裂形貌,局部可见二次开裂。

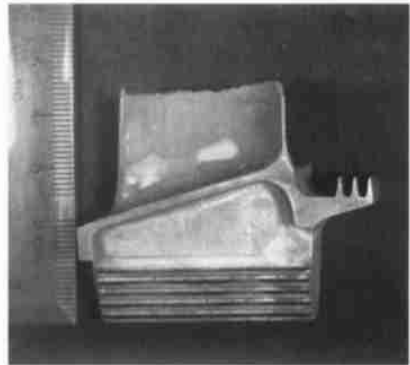


图 8 叶片断裂位置

Fig. 8 Fracture location of blade

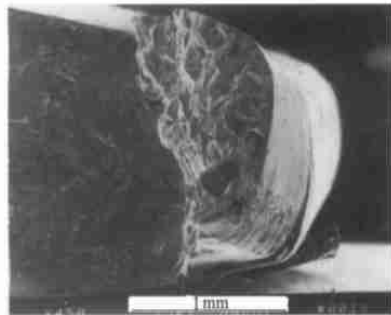


图 9 叶片断裂源区凸台形貌

Fig. 9 Convexity morphology on blade fracture origin zone

对叶片进气边或排气边疲劳断裂的源区粗糙区域进行断口金相和微观组织观察,发现粗糙区均为再结晶组织,如图 10 所示,再结晶范围与源

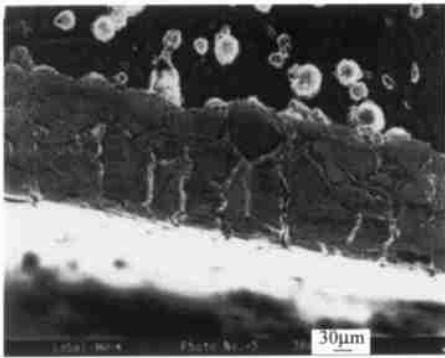


图10 断裂叶片的表面再结晶

Fig. 10 Surface recrystallization on fracture blade

区粗糙区域的大小一致,且再结晶晶粒尺寸与粗糙区域沿晶断裂的晶粒尺寸相当。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 叶片失效模式

叶片出现的裂纹故障与叶片发生疲劳断裂故障的源区均较粗糙,均可见沿晶断裂特征,而源区的组织均为再结晶组织,且再结晶的区域范围与粗糙区的大小对应,再结晶的晶粒尺寸与粗糙区沿晶断裂的晶粒尺寸也很一致,因此叶片出现的裂纹故障与疲劳断裂故障应为同一失效模式。根据文献[8]的研究结果,试样表面发生再结晶区域的持久强度几乎等于零,因此,叶片进气边或排气边的再结晶区在纵向上的强度远低于定向柱状晶组织在该方向上的强度,加上再结晶区与定向柱状晶界面存在一定的“缺口”应力集中,使得叶片在服役过程中,在温度和应力的联合作用下,在再结晶区(即最终成为粗糙区)的边缘产生疲劳开裂,进而形成叶片裂纹或进一步疲劳扩展而断裂。

#### 3.2 再结晶产生的过程分析

由于叶片出现裂纹和发生疲劳断裂的根本原因是叶片进气边或排气边存在再结晶组织,因此需对再结晶组织产生的过程与原因进行分析。由文献[9]可知,金属材料出现再结晶组织有2个途径:(1)金属材料经过一定的冷变形(塑性变形),在高温下(超过再结晶温度)可发生再结晶;(2)金属材料在再结晶温度以上在慢速拉伸条件下产生动态再结晶。对于定向凝固DZ4合金叶片而言,叶片进气边或排气边出现再结晶组织可能由以下3个途径所致:(1)叶片固溶热处理前在排气边或进气边存在一定的塑性变形,在固溶热处

理过程中形成再结晶组织,也就是说,叶片在使用之前其进气边或排气边就已存在再结晶组织;(2)叶片在固溶热处理之后使用之前发生一定的冷变形(塑性变形),在使用温度下发生了再结晶;(3)叶片在使用过程中发生了动态再结晶。

对于定向凝固镍基高温合金的再结晶,由文献[10]的研究结果可知,相的溶解是再结晶晶粒形成的重要条件;文献[11]的研究结果也表明,再结晶晶粒中的相的位向与母体中的相的位向不同,再结晶晶粒与母体之间的界面是大角度晶界,再结晶晶粒界面处母体中的相的溶解是再结晶速率的控制因素;而根据文献[12]的研究结果,相的溶解则是再结晶晶粒形核的必要条件。对于DZ4合金,其相的溶解温度约1170,而DZ4合金叶片的使用温度低于850。因此,DZ4合金在工作温度下应不会发生动态再结晶。

若DZ4合金叶片在固溶热处理之后使用之前遭受了较大的冷变形(塑性变形),由于叶片表面的渗层较脆,且根据前面金相组织观察,叶片出现的再结晶区域又较大,则叶片表面的渗层必然出现较大面积的表面开裂或脱落,这种情况下叶片使用之前就很容易发现。另外,即使叶片在固溶热处理之后使用之前遭受了较大的冷变形(塑性变形)而并未发现,由于DZ4合金叶片的使用温度较低,在使用温度下也不会发生再结晶。

由于定向凝固合金在细观上属各向异性材料,屈服应力范围较宽,表现为屈服强度 $\sigma_{0.01}$ 远低于 $\sigma_{0.2}$ 。而DZ4合金叶片在固溶热处理之前,不可避免地要进行一些吹砂、抛光和校形等工序,在这些工序中,若不严加控制变形量,叶片进气边或排气边则易承受较大的冷变形,出现塑性变形量较大的区域。在此区域内,出现过负荷机械损伤甚至微裂纹而不产生宏观开裂是完全可能的。之后在进行高温固溶处理过程中,叶片进气边或排气边的塑性区则可形成再结晶组织。

综上所述,定向凝固DZ4合金叶片的再结晶是由于在固溶热处理前叶片的排气边或进气边存在塑性变形,在固溶热处理过程中形成的再结晶组织,即叶片在使用之前其进气边或排气边就已存在再结晶。这一点已通过未使用叶片进气边与排气边的金相组织检查所证实,发现部分未使用叶片的进气边或排气边确实存在再结晶组织,如图11所示。

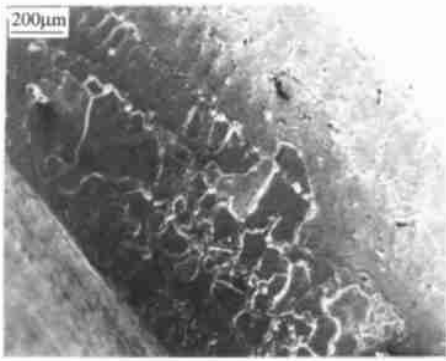


图 11 未使用叶片表面的再结晶

Fig. 11 Surface recrystallization on unused blade

### 3.3 再结晶的预防

预防再结晶应从制造工艺入手,主要措施有:

- (1) 在铸造模具上进行反变形设计;
- (2) 尽可能实行精密铸造,使后续的加工量尽可能小;
- (3) 在加工过程中严格控制变形量;
- (4) 工序控制合理,尽可能将冷变形控制在固溶热处理之后;
- (5) 进行再结晶检查,对再结晶厚度按标准严格控制。

## 4 结 论

(1) 定向凝固合金叶片的裂纹与断裂的失效模式相同,均为叶片表面的再结晶而导致的疲劳失效。

(2) 叶片表面的再结晶在叶片使用之前就已存在,是由于固溶热处理前叶片的表面存在塑性变形,在固溶热处理过程中形成的。

(3) 定向凝固叶片的再结晶预防应从制造工艺入手,如严格控制变形量等。

## 参 考 文 献

- [1] 陈荣章. 北京航空材料研究院铸造高温合金及工艺发展[J]. 材料工程, 1998(10): 3.  
(Chen R Z. Beijing institute of aeronautical materials development of cast superalloys and craftwork[J]. Journal of Materials Engineering, 1998(10): 3.)
- [2] 孙传棋, 吴昌新, 陈荣章, 等. 定向凝固 DZ3 合金的可铸性研究[J]. 航空材料学报, 1984, 4(2): 1.  
(Sun C Q, Wu C X, Chen R Z, et al. Study of casting properties of DS DZ3 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials,

1984, 4(2): 1.)

- [3] 卫平, 李嘉荣, 钟振纲. 一种镍基单晶高温合金的表面再结晶研究[J]. 材料工程, 2001(10): 5.  
(Wei P, Li J R, Zhong Z G. Study on the surface recrystallization of a Ni-based single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2001(10): 5.)
- [4] 吴昌新, 谢济洲, 李其娟, 等. 定向凝固高温合金低周疲劳性能的研究[A]. 铸造高温合金论文集[C]. 北京: 中国科学出版社, 1993. 76.  
(Wu C X, Xie J Z, Li Q J, et al. Study on LCF properties of DS superalloy[A]. Proceeding on Cast Superalloys[C]. Beijing: Chinese Science Press, 1993. 76.)
- [5] 张宏伟, 陈荣章. 表面再结晶对 DZ25G 合金薄壁性能的影响[J]. 材料工程, 1996(Suppl): 98.  
(Zhang H W, Chen R Z. Influence of surface recrystallization on thin cliff properties of DZ25G alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 1996(Suppl): 98.)
- [6] Khan T, Caron D, Nakagawa Y G. Mechanical behavior and processing of DS and single crystal superalloy[J]. J Metal, 1986, 38(7): 16.
- [7] 孙传棋, 陶春虎, 习年生, 等. 无钎定向凝固高温合金及其过载机械损伤[J]. 机械工程材料, 2001, 25(8): 4.  
(Sun C Q, Tao C H, Xi N S, et al. DS superalloy without hafnium and its over loading mechanical damages[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2001, 25(8): 4.)
- [8] 郑运荣, 阮中慈, 王顺才. DZ22 合金的表层再结晶及其对持久性能的影响[J]. 金属学报, 1995, 31(Suppl): 325.  
(Zheng Y R, Ruan Z C, Wang S C. Influence of surface recrystallization and its stress-rupture properties of DZ22 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(Suppl): 325.)
- [9] 宋余九. 金属材料的设计选材与预测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 175.  
(Song Y J. Design selection and prevention of metal materials[M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 1998. 175.)
- [10] Kusunoki K, Sumino K, Kawasaki Y. Effect of the amount of and oxide content on the secondary recrystallization temperature of Ni-base superalloy[J]. Metal Trans, 1990, 21A(3): 547.
- [11] Bond S D, Martin J W. Surface recrystallization in a single crystal Ni-base superalloy[J]. J Mater Sci, 1984, 19: 3867.
- [12] Porter A, Ralph B. The recrystallization of Ni-base superalloy[J]. J Mater Sci, 1981, 16: 707.

作者简介:



张卫方(1971-) 男,博士,高工。主要从事的领域有复合材料、断裂物理与失效分析,发表学术论文 40 余篇。联系电话:010-62456622-5046, 13911291326。Email: weifangzhang831@sohu.com

(责任编辑:蔡斐)