

空气压缩机叶片断裂失效分析

Failure Analysis of Air Compressor Blade

有移亮^{1,2}, 董 键^{1,2}, 张 峥^{1,2}, 钟群鹏^{1,2}

(1 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191;

2 北京航空航天大学 空天先进材料与服役教育部重点实验室, 北京 100191)

YOU Yi-liang^{1,2}, DONG Jian^{1,2}, ZHANG Zheng^{1,2}, ZHONG Qun-peng^{1,2}

(1 School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191,

China; 2 Key Laboratory of Advanced Aerospace Materials and Performance

(Ministry of Education), Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要: 采用扫描电子显微镜、能谱分析仪和金相显微镜对空气压缩机叶片的宏微观形貌、断口表面成分、金相组织及硬度进行了观察和分析。结果表明: 断裂叶片的硬度低于其他叶片, 导致其抗高周疲劳性能下降, 在近表面夹杂物处萌生疲劳裂纹, 最终发生断裂。

关键词: 空气压缩机; 叶片; 沉淀硬化不锈钢; 高周疲劳

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.08.008

中图分类号: TG142.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)08-0050-05

Abstract: The macro and micro feature of failure blade, chemical composition of fracture surface, metallography and hardness were analyzed by SEM, EDS and optical microscope. The results revealed that lower hardness of failure blade resulted in decreased resistance to high cycle fatigue properties. The fatigue crack which caused final rupture initiated from the inclusion near surface.

Key words: air compressor; blade; precipitation hardening stainless steel; high cycle fatigue

空气压缩机广泛应用于航空、石化、冶金等领域, 压缩机叶片的断裂事故时有发生^[1-4]。作为高速转动部件, 叶片的失效模式以高周疲劳断裂为主, 然而, 引起高周疲劳断裂的原因却不尽相同^[5-7]。

本工作针对已服役 2 年的空气压缩机转子叶片的断裂情况, 通过观察断口的宏微观形貌, 结合断口表面成分分析、叶片金相组织和硬度分析结果, 对叶片的断裂模式进行了分析, 并对叶片断裂原因进行了探讨。

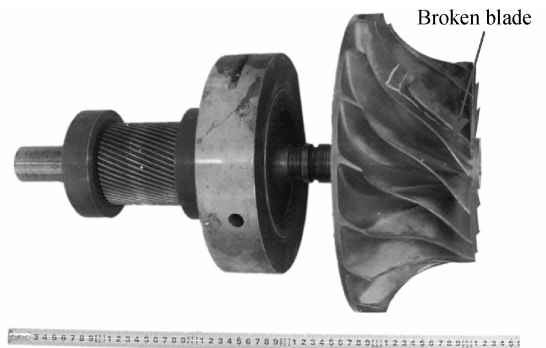


图 1 叶片断裂宏观照片

Fig. 1 Fracture picture of blade

1 实验

1.1 失效件

某化工厂一台空气压缩机于 2002 年投入使用, 2007~2008 年间进行了一次检修, 更换了一级转子, 在工作约 2 年之后, 一级转子叶片发生断裂, 断裂位置距离叶顶约 1cm, 如图 1 所示。该转子叶片所用材料为 PH15-5 不锈钢, 三级转子出口压力为 0.7MPa, 转子转速为 30000r/min。

1.2 实验方法

(1) 宏观观察。对转子叶片的断裂、变形情况进行

宏观观察, 对转子轴的磨损情况进行检查。

(2) 渗透检查。利用着色渗透检测法对整个压缩机转子进行渗透检查, 检查压缩机转子其他部位有无裂纹产生。利用水洗型着色渗透液进行检查, 检查步骤为前处理、渗透、排液、洗净、干燥、显像。

(3) 取样。为进行分析, 按图 2 所示位置切割断口和金相试样。断口试样切下后置于扫描电镜下进行断口形貌观察。为对比分析, 分别从已断叶片和未断叶片上切取 1#, 2# 试样用于叶片金相组织和硬度分析。

(4)断口分析。扫描电镜下观察断口形貌、裂纹的起源位置、裂纹扩展模式。对裂纹源处进行细致观察,判断是否存在缺陷。

(5)能谱分析。对断口表面裂纹源处的成分进行能谱分析,判断是否存在杂质。

(6)材质分析。按照图 2 的取样方法,对叶片材料进行金相组织和硬度分析。

位于叶盆表面。裂纹从裂纹源向两侧扩展,扩展区长度约50mm。瞬断区位于断口的两端,长度为 10~20mm。

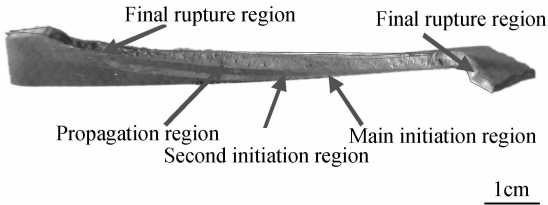


图 4 断口宏观照片

Fig. 4 Micro picture of fracture surface

2.2 断口形貌

扫描电镜下观察断口组织,发现主裂纹起源于距叶片表面 100 μ m 处,如图 5 所示。且源区有夹杂物,夹杂物最大直径约为 50 μ m,经能谱分析为氧化物。次裂纹起源于叶片表面,起源位置无夹杂物。

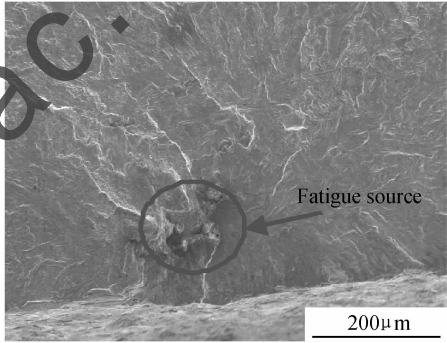


图 5 断口源区形貌

Fig. 5 Microscopic morphology of original region

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

对整个压缩机一级转子进行检查,除 1 片断裂叶片外,其他叶片没有发生断裂,与断裂叶片相邻的 1 片叶片出现明显的塑性变形,应为断裂叶片残片撞击所致。其他部分叶片出现磨痕,应为叶片断裂后转子发生偏磨所致。检查转子轴,未发现明显的变形现象。图 3 所示为一级转子宏观形貌。通过着色后观察,未发现压缩机转子其他叶片存在裂纹。

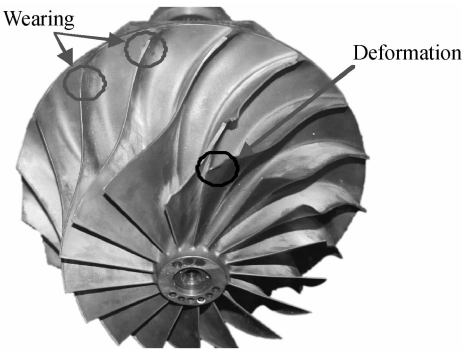


图 3 一级转子宏观照片

Fig. 3 Macro picture of first stage rotor

图 4 为断口宏观形貌,可以看出,断口表面大部分区域比较平整,较高一侧有比较明显的塑性变形,断口表面有一定程度的氧化。该断口存在两个裂纹源,且均

对断口的扩展区形貌进行观察,可以发现明显的疲劳弧线和疲劳条带特征,如图 6 所示,疲劳弧线由裂纹源向瞬断区扩展。说明叶片在交变载荷的作用下发生了疲劳断裂。此外,在断口的瞬断区发现了明显的韧窝特征,如图 7 所示。

为进一步对叶片裂纹萌生的原因进行分析,采用能谱仪对疲劳源区进行成分分析(图 8)。从能谱分析结果可以看出,源区位置断口表面发生了氧化。

为进行对比,用能谱仪对断裂叶片上所取的 1 $^{\#}$ 试样和未断裂叶片上所取的 2 $^{\#}$ 试样进行成分分析,结果如图 9 所示。可以看出,未断裂叶片和断裂叶片的成分基本一致。

2.3 金相组织

在时效温度下,PH15-5 沉淀硬化不锈钢中的马氏体组织会转变为稳定的奥氏体组织。图 10 为 1 $^{\#}$ 试样和 2 $^{\#}$ 试样的微观组织。可知,组织为马氏体+奥氏体,材料中未发现明显夹杂。

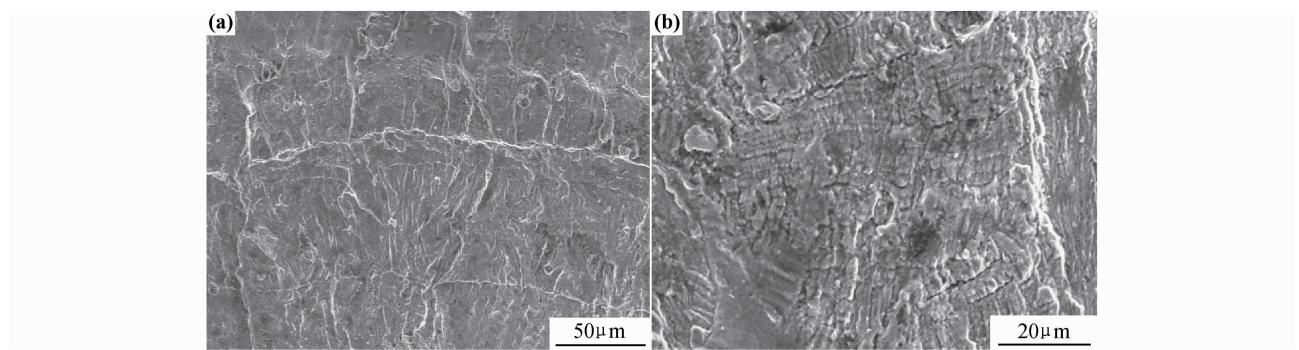


图 6 扩展区形貌 (a)疲劳弧线;(b)疲劳条带

Fig. 6 Microscopic morphologies of propagation region (a)fatigue curve;(b)fatigue striation

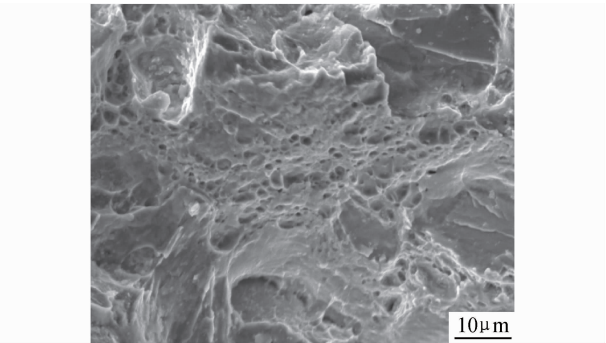


图 7 瞬断区韧窝特征

Fig. 7 Dimples in final rupture region

2.4 硬度测试

PH15-5 不锈钢通过在时效过程中 Cu 在 马氏体中的连续析出来而达到强化的目的。在时效强化过程中,时效温度和时效时间将决定析出物的数量和大小,从而对材料强度产生影响。分别对 1# 试样和 2# 试样进行维氏硬度测试,结果如表 1 所示。对比测试结果可以发现,1# 试样硬度偏低。

3 讨论

3.1 断裂模式分析

在扫描电镜下可以观察到断口处有明显的疲劳弧

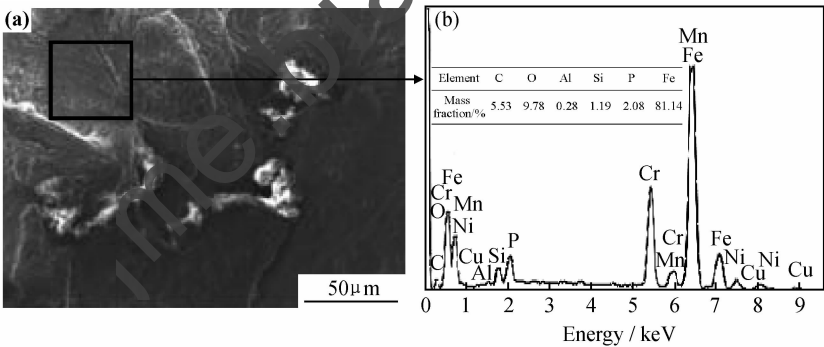


图 8 疲劳源区能谱分析结果 (a)SEM 形貌;(b)能谱分析

Fig. 8 EDS results of fatigue source (a)SEM image;(b)EDS spectrum

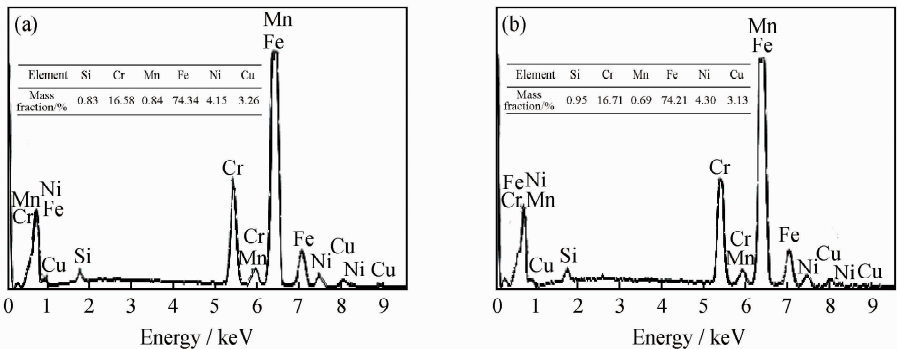


图 9 1# 试样(a)和 2# 试样(b)能谱分析结果

Fig. 9 EDS results of 1# sample(a) and 2# sample(b)

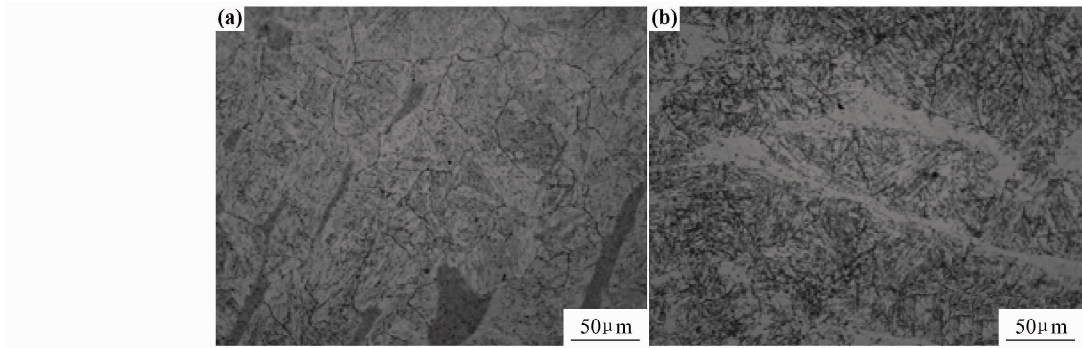


图 10 1# 试样(a)和 2# 试样(b)金相组织照片
Fig. 10 The metallographic structure of 1# sample(a) and 2# sample(b)

表 1 1# 和 2# 试样硬度测试结果

Table 1 Hardness test results of 1# and 2# sample

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
1#	289	289	280	268	290	259	298	277	264	282	280
2#	309	338	338	326	356	341	333	346	342	326	335

线和疲劳条带特征,说明空气压缩机叶片的断裂模式为疲劳断裂。断口表面大部分区域比较平整,瞬断区和疲劳条带间距较小,说明叶片的断裂模式为高周疲劳断裂^[9-11]。

3.2 断裂原因分析

压缩机入口处设有保护罩,以防止外物的进入,叶片发生断裂时,保护罩完好无破损。压缩机叶片宏观观察可以发现,大部分叶片保持完好,因此可以排除外来物撞击造成叶片断裂的可能。转子轴表面无明显的变形痕迹,说明在叶片断裂之前,该压缩机转子未发生偏振现象。

材料的强度和材料中夹杂物的尺寸将对材料的超高周疲劳性能产生影响。对于从表面起裂的疲劳裂纹来说, $S-N$ 曲线的位置取决于裂纹长度的函数——裂纹扩展门槛值。裂纹扩展门槛值分为表面疲劳极限门槛值(微结构门槛值)和长裂纹扩展门槛值(机械门槛值)。对于从内部起裂的疲劳裂纹来说, $S-N$ 曲线的位置取决于夹杂物的类型和尺寸,以及夹杂物周围的拉伸残余应力、材料中的含氢量以及纯疲劳裂纹扩展门槛值等^[12-15]。

M. D. Chapetti^[16-19] 等的研究表明,对于起源于材料内部缺陷的超高周疲劳来说,

$$\sigma_{int} = 256 \frac{\Delta K_{th}}{\sqrt{R_{max}}} \tag{1}$$

式中: σ_{int} 为疲劳强度极限; R_{max} 为内部缺陷的最大直径(μm); ΔK_{th} 为疲劳裂纹扩展门槛值。当 $\Delta K_{th} \leq 10 MPa \cdot m^{1/2}$ 时,其值可由式(2)进行计算

$$\Delta K_{th} = 4 \times 10^{-3} (H_V/10 + 120) (3R_{max})^{1/3} \tag{2}$$

式中 H_V 为材料的维氏硬度(MPa)。

将式(2)代入(1)有

$$\sigma_{int} = 1.48 \times \frac{(H_V/10 + 120)}{\sqrt[6]{R_{max}}} \tag{3}$$

从式(3)可以看出,材料的超高周疲劳极限随材料硬度的增大而增大,随材料内部缺陷的增大而减小。

分析结果表明,对于发生断裂的叶片,其维氏硬度为 280(换算成强度为 942MPa),低于其他叶片的维氏硬度 335(换算成强度为 1109MPa)。将上述数值代入式(3),若要保持相同的疲劳极限,失效叶片中的缺陷尺寸 R_{1max} 应小于其他叶片中的缺陷尺寸 R_{2max} 的 1/2。众所周知,材料中不可避免存在大小不一的缺陷,缺陷尺寸越小,其数量就会越多。因此,失效叶片的硬度偏低,导致其发生疲劳断裂的可能性高于其他叶片,进而降低材料的抗高周疲劳性能。空气压缩机叶片在服役过程中受到振动及交变载荷的作用,疲劳裂纹在叶片内部夹杂物处萌生,夹杂物最大直径约为 50 μm 。随着空气压缩机服役时间的增加,裂纹扩展到临界尺寸后发生失稳扩展,最终产生疲劳断裂^[20-23]。

3.3 断裂叶片硬度偏低原因分析

叶片所用材料 PH15-5 为沉淀硬化型不锈钢,通过在时效过程中 Cu 在体心立方马氏体中的连续析出来达到强化的目的。在时效强化过程中,时效温度和时效时间将决定析出物的数量和大小,从而对材料强度产生重要影响。在较低的时效温度下,由于扩散速率低,材料硬化速率较慢。此外,由于析出物尺寸小且较密集,因此材料硬度高。而在较高的时效温度下,由于临界形核尺寸大,晶核长大速率较快,因此材料的硬度较低。在一定的时效温度下,随着时效时间的增加,由于位错与析出相应力场之间的交互作用,材料在达

到最大值之后,硬度会逐渐降低^[24-26]。

因此,断裂叶片的强度偏低可能由时效过程处理不当引起。

4 结论

(1)失效空气压缩机叶片的断裂模式为高周疲劳断裂,裂纹起源于近表面的夹杂物。

(2)失效叶片的强度较其他叶片的强度低,导致该叶片的抗疲劳性能下降,在交变载荷作用下发生了疲劳断裂。

参考文献

- [1] LEE BOK-WON, SUH JUNGJUN, HONGCHUL LEE, et al. Investigations on fretting fatigue in aircraft engine compressor blade[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(7): 1900—1908.
- [2] FARRAHIG H, TIREHDAST M, MASOUMI KHALIL ABAD E, et al. Failure analysis of a gas turbine compressor[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(1): 474—484.
- [3] 马小明, 胡林星. 高速离心式压缩机叶片断裂失效分析[J]. *理化检验-物理分册*, 2011, (8): 527—533.
MA Xiao-ming, HU Lin-xing. Failure analysis on fracture of impeller blades of high-speed centrifugal aircompressor [J]. *Part A: Phys Test*, 2011, (8): 527—533.
- [4] 支金花, 张海存, 卢正欣, 等. 轴流压缩机叶片断裂分析[J]. *流体机械*, 2011, (2): 47—51.
ZHI Jin-hua, ZHANG Hai-cun, LU Zheng-xin, et al. Failure analysis on blades in axial compressor[J]. *Fluid Machinery*, 2011, (2): 47—51.
- [5] LUCJAN WITEK. Crack propagation analysis of mechanically damaged compressor blades subjected to high cycle fatigue[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(4): 1223—1232.
- [6] TROSHCHENKO V T, PROKOPENKO A V. Fatigue strength of gas turbine compressor blades[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2000, (7): 209—220.
- [7] XI N S, ZHONG P D, HUANG H B, et al. Failure investigation of blade and disk in first stage compressor[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2000, (7): 385—392.
- [8] SIVAPRASAD S, NARASIAH N, DAS S K, et al. Investigation on the failure of air compressor [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2010, 17(1): 150—157.
- [9] INFANTE V, SILVA J M, FREITAS DE M. Failures analysis of compressor blades of aeroengines due to service[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(4): 1118—1125.
- [10] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] BERGER C, KAISER B. Results of very high cycle fatigue tests on helical compression springs[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28 (11): 1658—1663.
- [12] CHAPETTI M D, TAGAWA T, MIYATA T. Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels part I: review and analysis of the mechanism of failure[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 356(1—2): 227—235.
- [13] HSU KUEI-CHANG, LIN CHIH-KUANG. Effects of *R*-ratio on high-temperature fatigue crack growth behavior of a precipitation-hardening stainless steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(12): 2147—2155.
- [14] YOSHIYUKI FURUYA. Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high-strength steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(15): 5234—5240.
- [15] WANG Q Y, BATHIAS C, KAWAGOISHI N, et al. Effect of inclusion on subsurface crack initiation and gigacycle fatigue strength[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24 (12): 1269—1274.
- [16] CHAPETTI M D, TAGAWA T, MIYATA T. Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels part II: estimation of fatigue limit for failure from internal inclusions[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 356(1—2): 236—244.
- [17] CHAPETTI M D. Prediction of threshold for very high cycle fatigue ($N > 10^7$ cycles)[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 257—264.
- [18] ZHANG J M, LI S X, YANG Z G, et al. Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime [J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29 (4): 765—771.
- [19] TAIZO MAKINO. The effect of inclusion geometry according to forging ratio and metal flow direction on very high-cycle fatigue properties of steel bars[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(8): 1409—1418.
- [20] 刘昆鹏, 有移亮, 张珊, 等. 50CrVA 扭杆断裂原因分析[J]. *材料工程*, 2010, (8): 5—7.
LIU Kun-peng, YOU Yi-liang, ZHANG Shan, et al. Fracture analysis of 50CrVA torsion bar[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010, (8): 5—7.
- [21] 邓忠, 孔凡亚. 1Cr18Ni10Ti 不锈钢疲劳性能研究[J]. *飞机设计*, 2002, (2): 66—72.
DENG Zhong, KONG Fan-ya. Study of characteristic of 1Cr18Ni10Ti stainless steel and pipe[J]. *Aircraft Design*, 2002, (2): 66—72.
- [22] LUCJAN WITEK. Crack propagation analysis of mechanically damaged compressor blades subjected to high cycle fatigue[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(4): 1223—1232.
- [23] ZHANG Da-yi, HONG Jie, MA Yan-hong, et al. A probability method for prediction on high cycle fatigue of blades caused by aerodynamic loads [J]. *Advances in Engineering Software*, 2011, 42(12): 1059—1073.
- [24] OZBAYSAL K, INAL O T. Age-hardening kinetics and microstructure of PH15-5 stainless steel after laser melting and solution treating [J]. *Journal of Materials Science*, 1994, 29(6): 1471—1480.
- [25] MIRZADEH H, NAJAFIZADEH A. Aging kinetics of 17-4 PH stainless steel[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 116 (1): 119—124.
- [26] HABIBI BAJGUIRANI H R, SERVANT C, CIZERON G. TEM investigation of precipitation phenomena occurring in PH 15-5 alloy[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1993, 41 (5): 1613—1623.

基金项目: 质检公益性行业科研专项资助项目(200810411)

收稿日期: 2012-03-25; 修订日期: 2012-09-27

作者简介: 有移亮(1979—), 男, 博士研究生, 从事失效分析预测预防方面的研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学材料科学与工程学院(100191), E-mail: yyl@buaa.edu.cn