

涡轮叶片疲劳断口的宏微观分析

熊 晔

(产业处)

摘 要 用常规方法把对叶片的宏观和微观断口形貌的研究结合起来,确定叶片疲劳断裂的性质、裂纹的萌生、裂纹的扩展以及最终的断裂。

关键词 断口形貌;疲劳裂纹的萌生及扩展;最终断裂

分类号 V215.55

0 引言

涡轮叶片是喷气式发动机重要零件,它由镍基合金 GH32, GH33, GH36 制成. 发动机正常工作时,叶片处在 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 燃气中,涡轮的转速高达 10000 多转,叶片承受着巨大的离心应力和循环热应力。

在使用中和台架试车后,拆卸涡轮转子进行检查时,叶片是出现缺陷和故障较多的零件。如图 1. 有些缺陷能及时发现,有些却未能发现,使发动机在工作中失稳,造成不同等级事故,严重的影响飞行的安全. 为此,我们对它进行较长时的研究和探索。

众所周知,耐热合金的高温强度随着其 Ti+Al 含量的增大而成比例地增加. 然而这些元素与基体形成金属化合物,在基体中通过热处理后又析出和分散, Ti+Al 含量的增加给锻造带来困难,想进一步提高强度就不太可能. 故只有依赖铸造合金,但它在冷却过程中有粗大的析出物,又使高温强度降低。

在 70 年代末 80 年代初 Duquette 等人,对镍基耐热合金的疲劳行为,特别是裂缝的扩展,作了大量研究,但对铸造耐热合金的实际使用温度范围的疲劳破坏机理却未曾研究. 本文通过对常规缺陷引起裂纹的萌生入手,对断口宏微观形貌进行试验研究. 因为宏观只能确定断裂源及裂纹扩展方向,不能提供断口的形貌的更多细节. 因此,无法了解断裂机制的本质。

对断口同时进行宏微观分析,可以克服在不同应力作用下断裂时仅宏观断口不同而显微

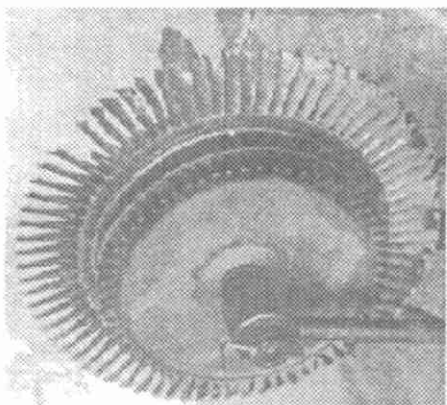


图 1 涡轮转子

断口的形貌却是相似的毛病.断口的形貌不单是与材料及热处理状态有关,外力的性质、零件的形状以及断裂的环境条件等均对断口的形貌有重要的影响.

1 试验方法

利用现有条件,对叶片的故障进行了以下的试验工作.

(1)低倍检查 腐蚀剂配方: HCl , 500ml; H_2SO_4 , 25ml; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 100g; H_2O , 325ml; 温度, 室温.

(2)断口宏观分析 用肉眼或放大镜检查断裂性质及特征,找出断裂方向和断裂源.此外,分析断口的表面光泽与颜色、晶粒大小,断口表面存在的各种花纹、边缘情况和冶金缺陷.

(3)显微组织的观察 腐蚀剂配方: HCl , 100ml; H_2SO_4 , 5ml; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 20g; H_2O , 80ml; 腐蚀时间, 0.5~3min. 主要观察裂纹是沿晶、穿晶或混合性质; 裂纹内腔两侧夹杂物性质; 形态与分布; 裂纹两侧以及其显微组织和显微硬度等.

(4)复膜金相法: 用光学显微镜对破断样品进行直接观察与分析. 主要观察断口的形态特征, 周边情况, 分析断裂性质及其产生的原因. 而光学显微镜景深小, 只限于平坦表面, 要想对样品进行直接观察, 在无扫描电镜情况下只好使用复膜金相法.

2 试验结果与分析

2.1 叶片叶身的裂纹

这类故障产生的部位大都是从排气边缘开始, 在距叶根 28~49mm 长度范围内产生裂纹如图 2 所示. 此范围恰好是叶片的高温区, 裂纹方向垂直于离心应力作用的方向.

叶片的前后缘都比中心薄, 在发动机启动或停车时急速加热或冷却, 因此, 承受热应力的循环作用, 这往往是成为裂纹萌生的主要原因.

这种裂纹可以是多条或单条, 而且多半产生在叶身长度的中部. 从离心应力和温度等几个方面综合起来看, 中部工作条件最恶劣. 此外, 燃气的腐蚀也对裂纹萌生起一定作用. 同时也发现过裂纹多数产生在有发纹、腐蚀、掉晶等表面以及晶粒不均处. 如图 3, 4 所示.

2.2 涡轮叶片榫槽的裂纹

该裂纹的大多数产生在第一道榫槽, 其他榫槽也发现过, 但不多, 如图 5. 裂纹多数产生在叶片榫槽的凹凸面处, 裂纹长度在 5~12mm 内, 深 0.5~1.5mm 不等. 裂纹产生在第一道榫槽的原因是该处在振动节上, 因喷嘴不良, 振动一旦发生就会使叶片锁外应力急增, 其次是在检修中使用氟氢酸溶液腐蚀, 造成过腐蚀现象导致疲劳裂纹的产生.

从某厂对 4000 台三型发动机涡轮叶片进行的统计分析表明裂纹产生的比率与使用时间和返修次数成正比.

一般说来, 疲劳裂纹常常萌生在构件的表面, 因为表面应力最大, 且表面不受约束, 易于塑性变形, 就为裂纹萌生提供了优于内部的条件. 故裂纹在表面出现. 引起光滑表面开裂有三个因素: 滑移带引起表面粗糙; 晶界上应变严重失调; 表面夹杂物和不均匀性. 从上述图片中可以看出, 表面存在腐蚀斑点, 这就是应力集中区, 裂纹也产生在平面应变比率高, 体积应变大的地

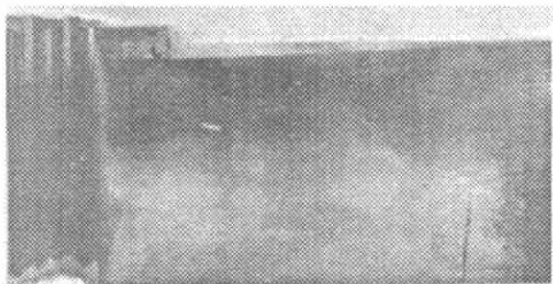


图2 叶片叶身裂纹

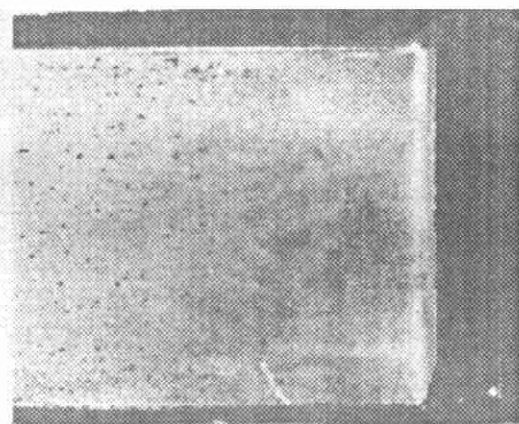


图3 叶片燃气腐蚀裂纹

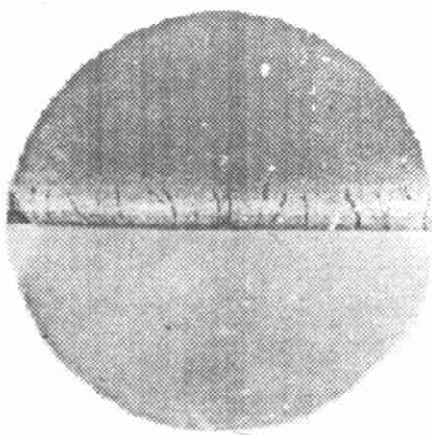


图4 叶片叶身裂纹

方.

2.3 宏观断口的特点

(1)根据断口的形貌和表面状况,可以看出有两个不同的区域,即疲劳断裂和瞬时拉断两个明显的区域如图6,断裂源呈黑色,且被磨平.

(2)瞬时拉断面面积占断裂面积的 $4/7$ (约 57%) 左右,大于疲劳断口的面积.

(3)断口为灰色,并有锈斑.

2.4 疲劳断裂区的特征

断口没有塑性变形;断口平面与主应力垂直;断口表面平整光滑;断口表面呈瓷状的“细晶粒”;有疲劳条带;疲劳源只有一个.如图6,7,8.

图7是叶片边缘上的疲劳源,源从晶界起,由内向

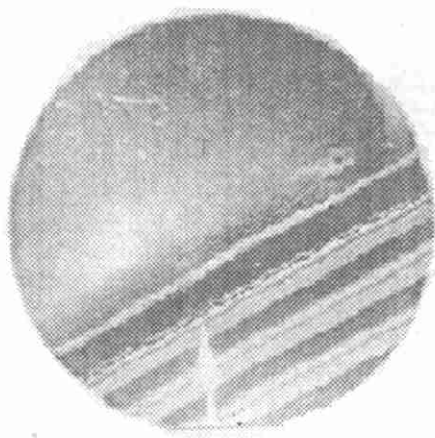
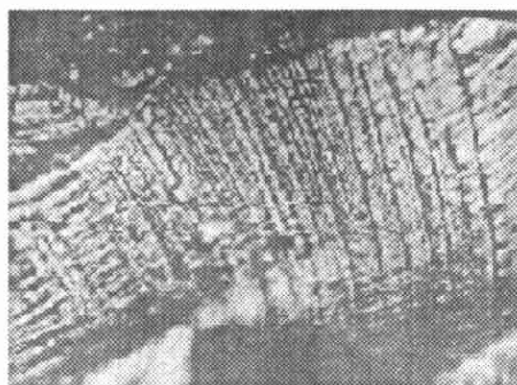


图5 涡轮叶片榫槽裂纹

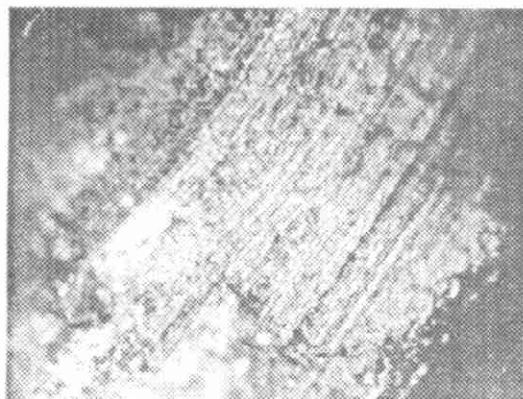
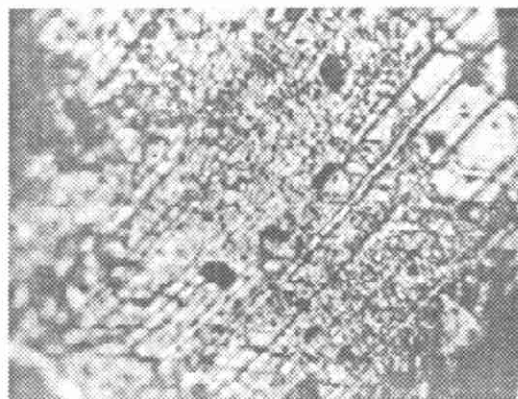


图6 二级叶片(箭头指疲劳源)

外扩展,放射线清晰地与垂直相交的曲线群组成放射状集中点,该点为破坏的起点,即为疲劳源.从图8,9,10中可看出疲劳断口上有局部区域疲劳条带,有间隔均匀的和不均匀的两种.此条带又称为海滩花样或贝壳花样.这是疲劳扩展区的重要特征.在裂纹扩展期间这种贝壳标记代表裂纹连续扩展的前沿.由于循环加载的变化,断口氧化或腐蚀程度不同或裂纹尖端塑性变形不同,会在断口表面形成不同的海滩标记.通过此标记的间隔和粗细均匀程度,可以判断载

图7 $\times 200$ 一级叶片图8 $\times 600$ 二级叶片

荷条件的变化和构件循环次数以及裂纹扩展速度. 疲劳裂纹在高应力表面发展比心部快, 所以标记曲线背着裂纹源的方向发展. 这些条带记录着每次循环中裂纹前进的痕迹. 它们是垂直于或几乎垂直于裂纹扩展方向, 条带之间的间距是随着应力和裂纹成长速率而改变的. 如图 9, 10 所示.

图9 $\times 600$ 一级叶片图10 $\times 600$ 二级叶片

由于疲劳破坏是一种长时间持续缓慢进行的破坏, 在交变加载时, 开裂一会儿进行一会儿停止, 所以出现如图 8, 9, 10 的海滩标记. 它们是在裂纹扩展的局部垂直方向上平行排列的条带, 当交变应力振幅增大时, 其间距也变化, 图 10 则是随着振幅变化的不均匀条带, 条纹数与加载循环相等为其主要特征.

2.5 瞬时断裂区域

疲劳裂纹的发展由慢变快, 直至剩余面积承受不了巨大的离心应力以及弯曲应力的作用而断裂. 最后的断裂区不是正对断裂源而是沿着与旋转方向相反方向偏向断裂源, 从图 6 可知. 最后断裂区面积比疲劳区大, 说明断裂瞬间主应力大于疲劳强度.

瞬时断裂区有以下特点:

(1) 断口呈蓝黑色, 表面粗糙, 且有高温颜色.

(2) 断口有 45° 的剪切唇边和塑性变形. 即进气叶背与叶盆约呈 45° 夹角, 叶盆高叶背低, 在倾斜面叶背和叶盆均可见到拉伸的橘皮现象.

(3)断口凹凸不平,表面粗糙,呈“粗晶”状.

(4)瞬时断裂面积大于疲劳断口面积,约大 7%,说明断裂时的应力高.

2.6 疲劳裂纹的显微形状与特征

疲劳裂纹的显微形态有锯齿状和阶梯状两种,既有沿晶也有穿晶发展.如图 11,12 所示.

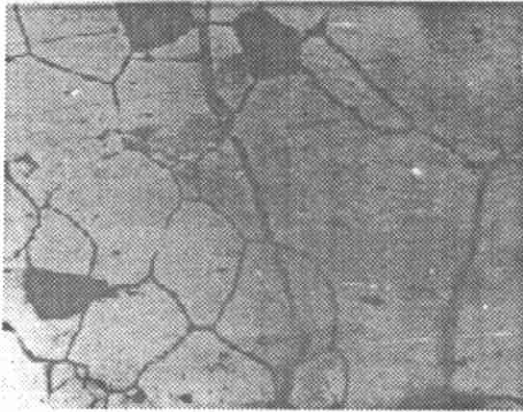


图 11 $\times 115$ (沿晶产生穿晶发展)

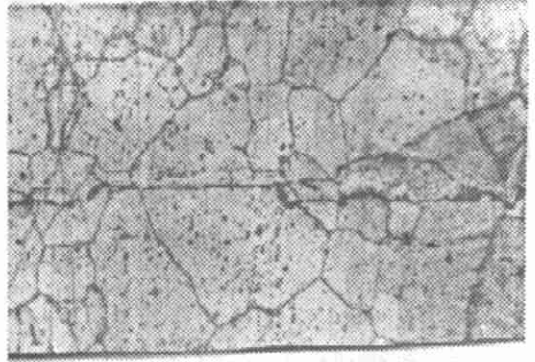


图 12 $\times 115$ (穿晶发展)

经统计分析,裂纹长度不超过 11mm,深度不大于 1.5mm,纵向裂纹不超过 7mm,未发现裂透如图 2, 13 所示.对于叶片厚度减薄,长度增加并有缩颈现象的故障,经检查发现化合物析出较多并聚集在晶界上如图 14,这是由于发动机工作不正常,多数是超温超速引起强度降低而伸长.通过超温至 900℃的试验,即使是短时间的,对材料组织也有较大的影响.如图 15 所示晶界上有呈锯齿状的析出物而且晶粒也园化了,强度、硬度、高温持久强度均降低,不能使用,否则会造成等级事故.

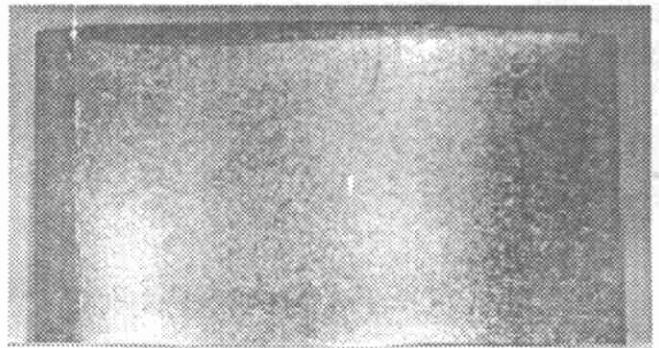


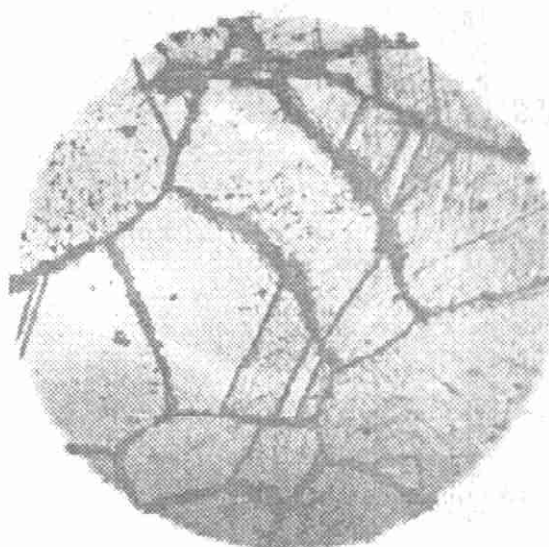
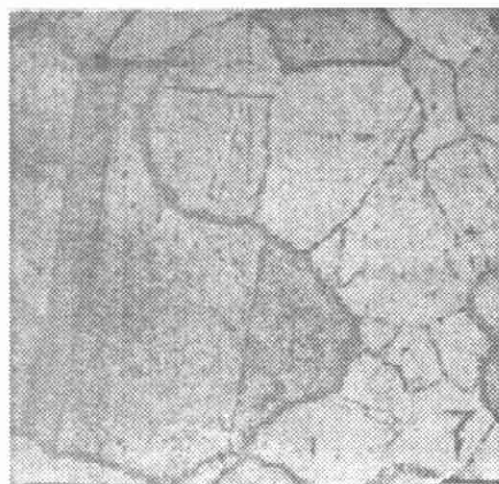
图 13 纵向裂纹外貌(裂纹长 6.5mm,深 1.5mm)

3 结束语

(1)上述试验与分析表明涡轮叶片的故障均属疲劳性质的破坏.引起疲劳因素是多方面的,其中最主要是叶片受巨大的离心应力、循环热应力以及气动弯曲应力.但也有制造、使用以及修理工艺等方面的因素.

(2)疲劳断口的宏观形貌是由疲劳断裂区和瞬时断裂区两部分组成.瞬时断裂区是叶片不能承受外应力而形成的静断区.

(3)疲劳源及其扩展区,其形貌通常是光亮的并有细晶粒状,粗糙度极小.这是裂纹扩展速率和应力符号改变在裂纹表面引起摩擦所造成的.随着循环次数的增加和燃气的腐蚀,裂纹向叶片内部扩展越来越深,就形成了如图 6 所示的实际疲劳断裂区.它是平滑的,作用的离心应

图 14 $\times 340$ (析出物聚集在晶界上)图 15 $\times 200$ (超温晶粒园化)

力越低,主裂纹扩展的时间就愈长,光滑度就愈大.该区的表面具有疲劳条带或叶海滩花样如图 8,9,10 所示.这些硬化线亦称休止线,是疲劳断裂的宏观标志.它们有规律的排列表明加载条件的改变是周期性和有规律的,图 10 所示的不均匀性的间距,表明在发动机运转中以不同方式重复变化载荷的结果.

如上所述,由于裂纹的进一步扩展,使叶片的承受载荷能力进一步降低以致于不能承受外应力,结果产生了瞬时断裂.这最后断裂部分称为瞬时断裂区,断裂表面类似于单纯的断裂亦称为静断区,它不是在一个循环下发生的,最终的断裂形貌取决于断裂处材料的状态及其经历.因 GH36 等材料是塑性材料,所以断口形貌呈纤维状组织,表面粗糙度大,呈蓝黑色,并带有高温氧化的颜色.

(4)从上述试验与分析中,表明超温超转会使用叶片在晶界上有析出物,晶粒园化粗化,强度、硬度低,高温持久强度也低.如图 14,15 所示.

(5)建议采用低温固体渗铝和对零件表面进行喷丸处理,使裂纹萌生在表面,即渗层与基体之间,以提高和延长发动机的使用寿命.

参 考 文 献

- 1 国外航空材料编辑组. 金属材料的断口分析. 1974
- 2 林吉忠,刘淑华. 金属材料的断裂与疲劳. 北京:中国铁道出版社,1989
- 3 S. 戈康达著. 颜鸣皋,刘才穆译. 金属的疲劳与断裂. 上海:上海科技出版社,1983
- 4 中国金属学会《断裂》编辑部编. 断裂分析与断裂韧性测试研究. 长沙:湖南科技出版社,1980
- 5 《高温合金手册》编写组编. 高温合金手册. 北京:冶金工业出版社(内部发行),1972

Macro and Micro Analysis on the Turbogenerator's Fatigue Failure

Xiong Chao
(Industrial Office)

Abstract Combined the macro and micro results of studying the shape of turbogenerator's fatigue failure, the common methods can be applied to determine the characteristics of fatigue failure, crackle sprouting or extending, and complete failure.

key words Shape of failure; Fatigue crackle sprouting and its extending; Complete failure

(上接第 12 页)

参 考 文 献

- 1 李胜涛,刘启文.动态数据交换(DDE)协议及应用.中国计算机用户,1994,(5)
- 2 袁益汉,张启华.FoxPro for Windows DDE 特性及应用.微型机与应用,1995,(2)
- 3 巴特尔.利用 DDEML API 实现 DDE 服务程序.中国计算机用户,1994,(11)
- 4 严新平.从第七届国际工况监测与诊断工程会议看设备监测与诊断技术发展动向.设备管理与维修,1995,(5)
- 5 张国峰.Windows 应用程序设计.北京:电子工业出版社,1994
- 6 林晓,宋京伟等.电力机车牵引电机滚动轴承的故障诊断.机车电传动,1995,(3)

DDE in the MIS of Condition Monitoring and Diagnosis

Lin Xiao

Zhong Yue Song Jingwei Liu Zhengping

(Scientific Research Office)

(Department of Mechanical Engineering)

Abstract This article discussed the characteristics of DDE applying to management information system of equipment condition monitoring and diagnosis for Windows, analysed the designing of DDE channel and illustrated the method of programming DDE in such system with examples.

Key words DDE; Condition monitoring; MIS