

# 蒸发器叶片失效分析

## Failure Analysis of Evaporator Blade

钟山 刘志刚 向宏辉 顾杨 / 中国燃气涡轮研究院

**摘要:** 针对某设备的真空薄膜蒸发器发生个别叶片失效断裂现象, 对断裂叶片进行了断口金相检验, 从宏观和微观两方面深入分析了失效原因, 探讨裂纹的产生、发展机理。指出叶片失效是加工缺陷和在交变应力的作用下低周疲劳破坏引起的, 激励源为叶片与内壁碰摩时产生的瞬时碰撞力与摩擦力, 使得叶片在振动应力下发生疲劳断裂, 并结合工况给出具体改进措施, 提高了设备可靠性。

**Abstract:** Since vacuum thin-film evaporator in some facility has individual blade failure fracture, metallurgical check is made on fracture surface of the blade and its failure causes are thoroughly analyzed from macro and microcosmic aspects. Crack initiation and growth mechanism is discussed in this paper. It points out that blade failure is caused by processing defects and low-cycle fatigue rupture under alternating stress, and excitation sources were transient impact force and friction occurring when blade and internal wall impacted and rubbed with each other, which brought blade under vibration stress fatigue fracture. Specific modified measures are provided in the paper by virtue of operating conditions and thus reliability of facility is improved.

**关键词:** 蒸发器; 失效分析; 裂纹源; 疲劳断裂; 金相分析

**Keywords:** evaporator; failure analysis; microcrack source; fatigue fracture; metallurgical analytical

### 0 引言

真空薄膜蒸发器(图1)的作用是通过旋转的铰链叶片轴的离心力作用, 把含水量较高的(约78%)混合溶液, 在加热器内壁上离心刮成薄膜, 溶液从顶部向下流动过程中与加热器内圆筒进行热交换, 同时采用真空抽取蒸发除去水, 使最终的固化物浓度达到约98%。叶片材料选用0Cr18Ni9, 厚度0.6mm, 叶片与轴采用氩弧均布点焊法焊接。

针对蒸发器在应用一段时间后发生个别叶片出现裂纹或断裂现象, 采用扫描电子显微镜、金相显微镜、光谱仪等对叶片断口做金相检验, 进行了失效分析, 分析结果对于类似叶片震动断裂故障模式的研究以及故障的治

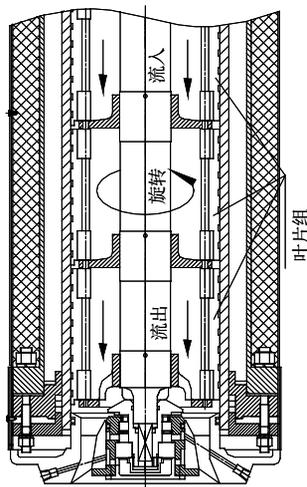


图1 蒸发器结构图

理具有较高的工程价值。

### 1 故障原因分析

依据故障检测确定的故障源区

和损伤情况, 提出了故障可能的因素和排查分析思路, 形成了故障树, 见图2。引发蒸发器叶片断裂的故障模式可能有叶片制造缺陷、叶片设计缺陷、碰磨、工作环境异常、外来物损伤和联结失效等。下面根据故障树确定的六种模式分别进行了排查, 主要对断裂叶片金相作深入的失效分析。

### 2 失效分析

从断裂叶片中选取样本, 对所提供的样本进行了成分定性检查, 表明叶片材料0Cr18Ni9微区成分含量在正常范围内。

叶片焊接点连接薄弱, 并出现小缺口, 表明叶片在非正常状态下工作, 导致应力增大, 焊点脱落, 在缺口处产

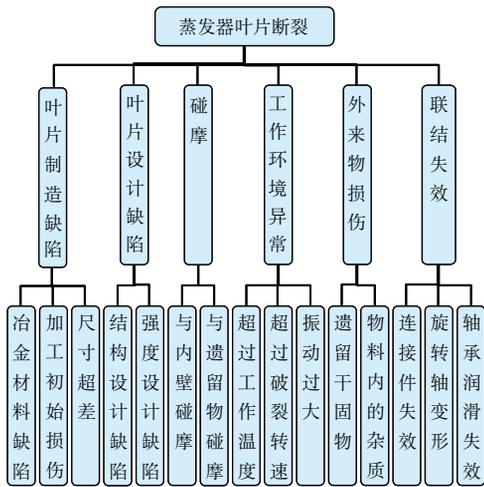


图2 断裂分析故障树

生应力集中引起开裂。观察叶片发现,所有故障叶片中间两焊点已脱落,断裂面成一弧面。断口已有磨损,但能发现贝纹线。用10倍的显微镜观察发现裂纹源在两焊点处。由交变应力引起的疲劳,疲劳断口上常有海滩状花样,疲劳源处光滑细腻。断口附近无明显的塑性变形,是脆性断裂。

图3、图4为试样断裂源区低倍形态。上角为焊点位置,由于开裂后,两裂面相互摩擦,断面磨损较严重,断裂面已磨平。直接观察疲劳断口,可见有明显差异的区域,为光滑的疲劳断裂区和十分粗糙的最终断裂区。能看到休止线,根据弯曲的形状,可判断断裂源;应

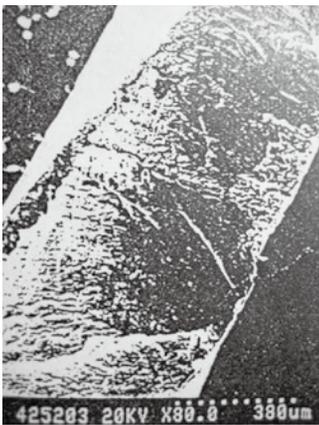


图3 断裂源区低倍形态



图4 断面形态

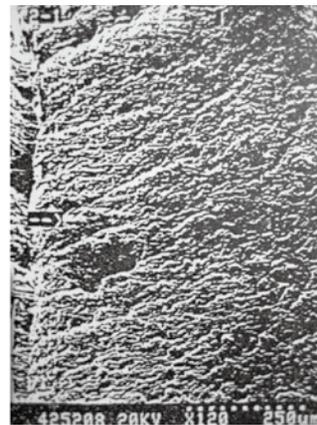


图5 扩展形态

力幅越大处,塑性和脆性疲劳条纹间距也就越宽,裂纹尖端的大部分塑性变形区存在晶体学滑移<sup>[1-2]</sup>。

图5为扩展形态,图中箭头为受力方向,断面呈台阶状,从图中可以发现疲劳台阶。可见,该样件从焊点处起裂,裂纹沿受力表面向叶片内和叶片厚度方向同时扩展,该断面以韧窝为主,裂缝内无其他特异现象。

在电子显微镜下,可见当光轴与试样成适当倾斜角度时,粗糙表面

是由被分割的多个凸台造成的,断口型面上可清楚地看到连接诸多平台的台阶为一些不平滑形状的线段,与解理断口上的河流样式类似,在远离裂纹源处平行于扩展前沿的特征形貌多数存在许多裂纹<sup>[3]</sup>。疲劳过程在不稳定滑移面上引起的快速裂纹扩展,其凸台表面或平坦光滑、或形成条纹。有延性断裂的塑坑,部分地在疲劳裂纹附近呈现脆性断裂。主裂纹前缘扩展的前方,在局部应力集中作用下形成了微裂纹,其围绕夹杂物形成小塑坑。裂纹在夹杂物间逐渐扩展,并且它们在断口上的密度比试件其他截面上要大。

### 2.1 疲劳源

破坏起点位置断口为一个光滑细

洁的扇形小区域(图3),于扇柄处的裂纹萌生和微观裂纹扩展处,裂纹张开位移小,扩展缓慢,经过反复的张开和闭合挤磨形成断口。看到以疲劳核心为中心的贝纹线向外发射、向四周辐射的放射台阶式线痕,延伸到较远的地方,表明裂纹核心是一条锯齿状的微裂纹,沿着一系列具有高度差的宏观平面向四周围扩展,个别核心区有较多疲劳源<sup>[4]</sup>。

### 2.2 疲劳裂纹扩展区

表面比疲劳核心粗糙、发暗,多见贝纹线、蛤壳状或海滩波纹状的条纹(图4),在垂直于裂纹扩展方向以一簇弧形线条形式从核心向四周扩散。在拉应力作用下裂纹张开、尖端钝化,受压或卸载时闭合,尖端重新钝化,再次循环受拉,由于尖端的应力集中,发生亚临界扩展,成为一条不可见的疲劳辉纹。可见的贝纹线是由机器的起动与停止等载荷波动,或运转过程中的偶然因素引起的应力波动等所致。由裂纹发出与贝纹线垂直的多条放射条纹台阶由核心区扩展出来,台阶越发展越大。

### 2.3 瞬断区

为疲劳裂纹扩展到临界尺寸后失稳扩展形成的区域(图5),与静载拉伸

断口中快速断裂的放射区及剪切唇相似,放射区和剪切唇的有无、大小与材料的特性及载荷的历程有关。主要有以下形态:

1) 在交变的接触应力作用下,接触表面的点蚀与相互接触的表面有关,为试样表面形成的破坏方式。表面下不远处的周期应力在循环切应力的周期作用下达到最大值,产生了裂纹,成为接触疲劳。

2) 疲劳源在表面的拉应力、压应力处产生,截面上的应力沿截面高度按线性分布,形成贝纹线,最终在疲劳核心的对侧失稳、断裂,成为弯曲疲劳。

## 2.4 金相分析

沿叶片平面过焊点、沿垂直于叶片平面磨制金相试样进行观察分析,发现有二次裂纹。图6为焊点边缘处裂纹。图7为该样距焊点较远处裂纹。从图6、图7中可看到金相面垂直于叶片平面,裂纹以穿晶为主,局部区有沿晶特征。局部切应力作用萌生裂纹,瞬时破断区的微观特征或呈穿晶解理、或呈微坑型剪切断裂、或呈晶间断裂、或是混合型断裂<sup>[5]</sup>。合成条纹是浅的、波浪形的或明显界限的缺陷障壁,可看到由反向滑移引起的挤压区、滑移带裂纹。

过焊点沿叶片厚度方向磨制金相试样,其金相组织见图8。由此可见其热影响区很小,仅为0.7mm左右。焊接区组织为奥氏体+网状铁素体,其组织为正常状态。图8为焊接过渡区组织,右上角为焊接区,左下角为正常区,其组织正常。图9为焊接区边缘区组织,其中含镍、铝较高相存在,叶片远离焊点区均为奥氏体组织,属正常组织状态。

疲劳应力越大,滑移带的数量越

多、高度越大。在最大切应力的作用下,材料表层的位错移动便会形成细小的高度约为 $10^{-7}$ cm的滑移带,最终将成为萌生疲劳裂纹的区域;在反复载荷的作用下,邻近的滑移平面上将引起反向滑移,疲劳滑移带就会在表面上形成沟槽和隆脊,或为锯齿形、或为光滑的圆形皱折。

### 2.4.1 断口第一阶段

宏观呈均匀的平面形状,有一定的反光现象(图6~图8)。裂纹沿晶粒内某一滑移面一致的扩展成非常光滑的断面,在与晶界相遇处会改变其方向。疲劳纹为2~5个晶粒的长度,与主控件轴成 $45^\circ$ ,扩展以滑移方式为主,或是连续的滑移,或在滑移面上沿滑移方向不连续的伸展<sup>[6]</sup>。

裂纹扩展方向平行于两组面的交线,沿两组互不平行的滑移面扩展而成,接近于空间几何角度的理论计算值。平行片层的位向在晶界将发生改变,可看到擦伤痕迹及疲劳辉纹。

### 2.4.2 断口第二阶段

主要特征是存在疲劳辉纹与轮胎花样(图7~图9),第二阶段与第一阶段、瞬断区的过渡区内的微观形貌特征为疲劳辉纹、疲劳台阶(疲劳沟浅)、二次裂纹。

裂纹在不同的平面上扩展,而后相交形成疲劳台阶,可同时显示出台阶和辉纹。二次裂纹的形态为一些微裂纹,在断口上呈断续分布,在同一方向上时有时无,其深度远大于辉纹在断口上的深度,由断口表面向内部扩展,一般与辉纹保持平衡<sup>[6]</sup>。

环境气体、温度、腐蚀性介质等环境因素会在不同程度上以特有的方式影响疲劳辉纹的有无和形态。真空中与空气中的断口形貌不同,在氧和水蒸气中的气压、环境温度与 $da/dN$ 有关,存在 $da/dN$ 激变的临界压力。

### 2.4.3 疲劳组织演变

蒸发器叶片的疲劳组织演变主要有以下几个过程:

1) 表面的变化:疲劳断裂为缓慢逐渐开裂,裂纹由局部应力集中引起,在没有形状、外貌变化先兆时快速断裂。形变之始可看到在表面滑移带的形成,逐渐增多、加宽形成驻留滑移带。晶体的滑移面、驻留滑移带内可看到滑移线、微裂纹,滑移线方向非滑移带方向但很平直,空洞可在单一显微组织的金属中看到,微裂纹的萌生点源于侵入和空洞。导致局部微裂纹的局部应力集中的条件,是疲劳件中的裂纹、表面缺陷或夹杂物等,加工引起

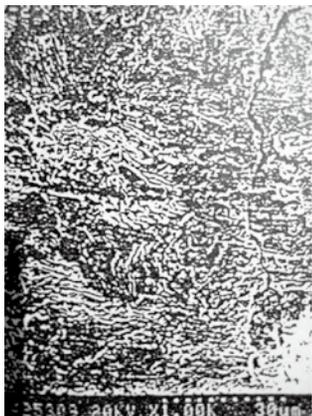


图6 焊点边缘处裂纹

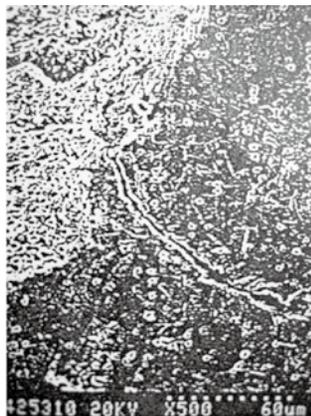


图7 距焊点较远处裂纹



图8 焊接过渡区



图9 焊接边缘区

的显微粗糙对表面的影响比滑移带更明显,距离表面很近的夹杂物会引起非常大的局部应力集中,导致夹杂物与表面之间的金属层迅速断裂,成为微裂纹。

2) 内部扩展:在侵入沟的方向、或沿滑移线的“空洞”形成微裂纹,保持在滑移带上沿滑移面扩展。开裂时裂纹穿晶,沿穿过它前面的形变区扩展,偏离最大切应力平面,在最大拉伸正应力的方向继续扩展,其对应的断口上没有疲劳裂纹存在。非撕裂引起的塑性变形在开裂之前出现,少量的奥氏体能消除应力峰值,通过延续疲劳裂纹的萌生而提高疲劳极限,裂纹前端的塑性变形使奥氏体变成马氏体;疲劳裂纹尖端有塑性变形区,断口和裂纹附近由应变感生的马氏体组成。

3) 组织变化:在周期应力加载试件上可看到初使几次应变循环时位错分布状况的变化,由位错偶极子组成的位错塞积,在较高的应力下开始的数十次循环过程中位错增值。循环应变持续、往复导致形成小的棱柱形位错环、位错偶集子、有割阶的位错线等位错“碎片”,在最高应力下形成温度与应力的影响相反的位错胞,温度越底位错胞尺寸越小<sup>[7]</sup>。堆垛层错能高可看到形成胞状组织,层错能低则通过机械孪生发生范性变形。应力足够大到使材料软化沉淀相重新溶解,则位错切过沉淀且彼此交截,软化了的无沉淀区有利于局部塑性变形和疲劳微裂纹的形成。从平面状位错分布在超过疲劳极限时迅速转变为胞状位错分布,变化是渐进的,惠勒曲线上形成一个缓坡。

4) 位错分布和断口型貌之间的联系:在滑移带下面、垂直于试件外表面切割的金属薄膜上刚好显示出位错

胞,并尺寸与平面的距离成正比。裂纹尖端的形变即裂纹前方金属的有局部的特征,亚稳奥氏体的情况中,开裂前的塑性变形也会引起奥氏体转变为马氏体。

### 3 综合分析

1) 焊接改变了试件表层的机械性能,形成裂纹组并成为缺口导致开裂,尖锐过渡区和截面突变处附近会出现淬火裂纹一般沿奥氏体晶界扩展。点焊降低了材料的疲劳极限,使零件的壁厚减薄成为缺口效应,诱发脆性或部分脆性断裂,孔洞成为疲劳裂纹的萌生点即穿晶断裂。

在可钝化的金属材料中,合金元素在铬—镍不锈钢的晶界可能对耐腐蚀起决定作用的合金元素部位贫化,或可形成显微电池,这种选择性腐蚀即晶间腐蚀,零件表面在晶间溶解时会产生沿晶裂纹和穿晶型应力腐蚀。在张应力或弯曲应力作用下,一些部件能看到许多与断口垂直的二次裂纹—主裂纹的分支裂纹,裂纹断口的形貌和解理的河流花样相似<sup>[8]</sup>。

2) 叶片表面焊点蚀的应力集中部位成为疲劳源,源特征是多源点蚀坑和裂纹萌生。源区长期暴露于工作介质中,经过反复的震动磨损,在不同高度起始的裂纹在扩展中相遇、汇和形成辐射状台阶,裂纹在此萌生速率较慢。源区的氧化颜色较重,断面平坦、光滑、细密,有向外辐射的放射台阶和放射状条纹,形成向外、放射疲劳弧线的中心。

3) 与主应力垂直、介于源区与瞬断去之间的扩展区断面较平坦,以源区为中心扩展呈现出清晰的贝壳线、放射线,和少量不等距的“休止弧线”;在不同受力作用下,由源区初始扩展

出的裂纹前沿会发生扩展方向上的偏离,而后裂纹在各自的平面上继续扩展,各种断裂面相交而形成台阶,并在断口上构成了放射线,呈现出扩展区的二次穿晶裂纹特征<sup>[9]</sup>。

4) 叶片断裂以穿晶为主,局部有沿晶特征的韧性疲劳断裂。叶片所受较大载荷,加之叶片晶界含有少量的铁素体和脆性夹杂物,疲劳裂纹扩展至临界尺寸发生失稳、快速破断而形成了面积为总端口面积一半的瞬断区,裂纹随应力增大逐步扩展张开,随着应变幅度的增加,产生沿晶断裂。

### 4 结论与措施

本文对叶片断口的金相做了多方面的详细分析,明确失效原因为叶片碰摩产生的载荷所致,综合分析后给出改进措施,经验证对此类结构模式故障的治理有一定的推动作用。

#### 4.1 结论

1) 材料中未见异常非金属夹杂物,但金相组织较粗大,它会导致叶片的强度及韧性有所降低。

2) 裂纹源及外来金属是由于焊接时不慎使焊丝与叶片接触所致。

3) 焊点对叶身形成了点状凹坑缺陷,缺陷在所受的交变热应力的作用下逐步形成了低周疲劳开裂,前期裂纹通过疲劳扩展而长大,从裂纹形成到瞬断是一个时间过程。

4) 在叶片旋转过程中,由于加热蒸发使物料逐步失去水分转变为干固体,黏度或硬度增大,使叶片根部刮摩应力水平增高,加之叶片焊接中出现的局部烧灼、缺口等缺陷,大大降低了材料疲劳强度,导致了裂纹出现、扩展以致断裂。

#### 4.2 措施

综合考虑失效造成的多方面原

# 飞机总体设计中的能源管理

## Energy Management in Aircraft Design

王大勇 郑勇峰 张桥梁 / 中航工业成都飞机设计研究所

**摘要:** 提出了飞机总体设计中能源管理的概念,对飞机各能源进行了分类,分析了各能源之间的关系,并从总体设计的角度提出了能源管理的优化设计方法。

**Abstract:** This paper presents the concept of energy management in aircraft design, classifies all aircraft energies, and analyzes the relationship between the energies. From the prospective of aircraft general design, the optimization design method for energy management is proposed.

**关键词:** 能源管理; 优化设计; 综合; 飞机设计

**Keywords:** energy management; optimization design; integrated; aircraft design

### 0 引言

能源包括传统能源和可再生能源。传统能源如煤炭、石油、天然气、核能等,可再生能源如风能、太阳能、生物质能、水电和地热能以及其他新能源。能源问题实际上包括两个方面:能源本身的数

量和能源利用的效率,前者始终是有限的,而后者可以通过优化设计使其得到最大化,这就是能源管理问题。

能源管理在各行业中均受到极大的重视。例如,英国皇家邮递公司在电动货车上装载了微波驱动器能源管理

系统,大大提高了电动车的性能。能源管理策略在天然气管道运行、烟草生产管理等领域中均得到了采用。同样,在飞机设计中也存在能源管理问题。民用飞机的航电系统由于采用了集群计算机、综合化模块和总线等技术,实现了

因,结构设计、材料选择、热处理、机械加工、安装使用、各种腐蚀现象等,提出以下改进措施。

1) 在停机后及时清理蒸发器内的残留物,避免其硬化后对叶片产生冲击力;

2) 对叶片根部危险区,设计做如下改进:增加叶片焊点,保证其有足够的连接强度,使焊点不会因应力增大而断裂脱落;在中部不采取焊接方式,加一片加强块以增加强度;叶片与轴焊接时,改进焊接工艺,确保焊接质量,使叶片没有缺陷。

AST

### 参考文献

[1] 美国金属学会.金属手册:断口

金相与断口图谱[M].第九卷.北京:机械工业出版社.1983:15-32.

[2] 刘正义等.机械装备失效分析图谱[M].第一版.广东:广东科技出版社.1990:22-35.

[3] Henry G, Hanstman D. 宏观断口学及显微断口学[M].第一版.北京:机械工业出版社.1990:10-27.

[4] ManSon S.S. 金属疲劳探伤[M].第一版.北京:国防工业出版社.1976:22-40.

[5] 上海交大金相分析编写组.金相分析[M].第一版.北京:国防工业出版社.1982:5-18.

[6] 崔约贤,王常力.金属断口分析[M].第一版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出

版社.1998:7-12.

[7] 钟群鹏,田永江.失效分析基础[M].第一版.北京:机械工业出版社.1989:3-16.

[8] 洪杰,刘书国,张大义,陈萌.小型短寿命涡扇发动机涡轮叶片疲劳失效分析[J].航空动力学报,2012,27(3):604-609.

[9] 徐燕云,王贵成,刘钢.HSK热缩刀柄一刀具失效分析[J].机械设计与制造,2012,(2):177-179.

### 作者简介

钟山,高级工程师,主要从事航空试验设备、试验件等设计。