

涡喷发动机压气机叶轮断裂分析

苏锡九 张守勇

一、故障情况

1983年4月1日,飞机在地面试车时发生压气机叶轮爆裂事故,爆裂叶轮对合后的外观照片见图1。可以看出叶轮基本沿直径裂成三块,一大块从机身上部穿出,另一大块从机身下部穿出,另外两个螺栓孔中间的一小块也飞出,叶轮前端面八个钢螺栓,后端面七个钢螺栓全被剪断,飞机起火。

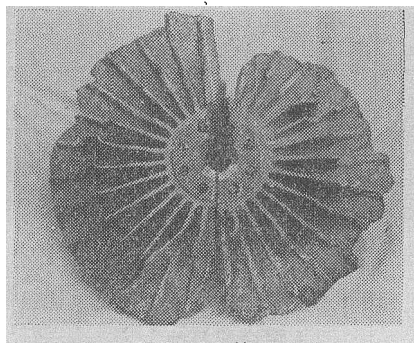


图1 爆裂叶轮的外观

叶轮零件为LD6铝合金模锻件,经固溶和人工时效热处理。使用规定叶轮总寿命为1000小时,每使用200小时要返厂分解检修,本叶轮随发动机共返修过三次,共使用了799小时,未经第四次检修,即装机使用,飞行到943.37小时突然发生这次爆裂事故。

我们对叶轮断裂性质、原因等作了如下分析。

二、断口宏观分析

整个叶轮断口表面可分为六个区域(图2

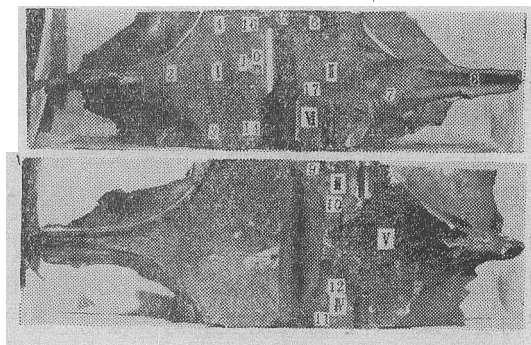


图2 叶轮断口表面低倍形貌及扫描
电镜观察取样位置
(编号0,1,2,3,...;区I,II...)

中I~VI区),I区为以半椭圆白色弧形区为中心的放射状断裂区,白色弧形区内有一棕黄色区域,面积约为 $7 \times 10 \text{ mm}^2$,棕黄色区内又有一黑色长条区,其面积约为 $3 \times 9 \text{ mm}^2$,界限分明,这是零件开始断裂的最早区域(图3)。II、III、IV区为起始于两端面中心凸台转角处



图3 主断裂源放大

的断裂面。Ⅱ区面积较大，Ⅲ、Ⅳ区为与分模面对称的扇形扩展区，扇形半径为80~85mm，可以看出Ⅲ、Ⅳ区的裂纹成核和扩展基本上是同时发生和终止的。Ⅴ、Ⅵ区断裂面最粗糙，撕裂棱方向很明显，分别是Ⅲ、Ⅳ区的外延。

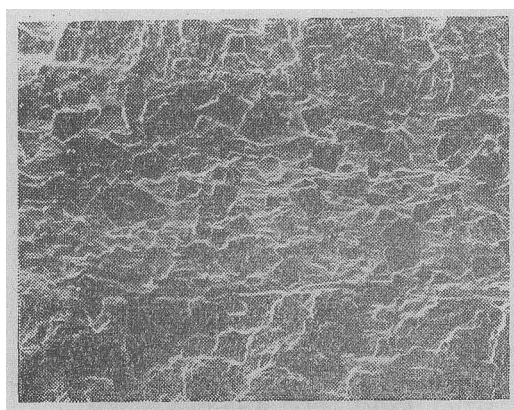
三、断口微观分析

用扫描电镜对断口各区微观断裂特征进行了观察分析（取样位置如图2）。

1. 主断裂源区

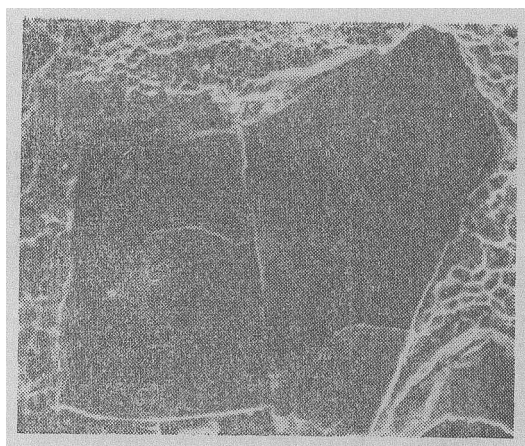
观察发现白色半椭圆区内的黑长条带实际上是由很多棱角，边界清楚的呈脆性断裂特征的块状物组成（图4）。断口棕色区内有腐蚀产物及泥纹花样，超声波清洗后仍有残余的腐蚀产物及泥纹花样，并可明显看到块状物之间为韧窝型花样（图5）。可以推断此黑长条区裂纹是在零件使用过程中形成的（电子探针测定，这个区域明显地含有铬元素，显然这是由于零件在返修重新阳极化处理时蚀洗液及铬酐溶液渗入裂纹的腐蚀产物和铬酐液痕）。

从垂直于黑长条带断裂表面磨制的试样可以看出那些脆性断裂物有片状的，有块状的并与合金基体界限清楚，界面间致密无裂纹用混合酸严重浸蚀磨片，夹杂物不受腐蚀，呈浮雕状凸出磨面（图6）。电子探针半定量分析结果证



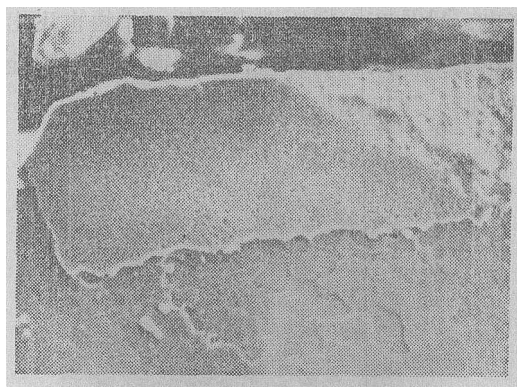
20×

图4 主断裂源区黑长条带放大形貌
（照片右边为零件内孔表面）



150×

图5 黑长条带中夹杂物放大形貌
（照片右边为零件内孔表面）



470×

图6 夹杂物带横截面扫描电镜照片
（混合酸浸蚀）

明夹杂物主要含 27.4% MgO, 72.2% Al₂O₃, 0.6% SO₂, 0.7% CuO, 0.2% MnO。测量夹杂物显微硬度值为 2185 kg/mm² (六个点平均值)。基体为 132 kg/mm² (三点平均值)。

根据以上对黑长条带内脆性夹杂物的扫描、电子探针、显微硬度分析结果，可以判断此夹杂物可能属于镁铝尖晶石耐火材料一类的物质，在熔铸过程中卷入合金中的。

2. 各裂纹扩展区

扫描电镜观察可见黑长条带的外围为典型的疲劳断裂特征，有疲劳条带、疲劳台阶及二次裂纹（图7）。这种典型的疲劳断裂特征在半

椭圆区内只占很小一部分,这个小区域为疲劳裂纹的缓慢扩展区,当疲劳裂纹在半椭圆区内扩展至一定距离后,除了疲劳条带外,还有大量的韧窝花样,说明疲劳裂纹扩展速率已经变得较快。



800X

图 7 疲劳条带
(0*试样夹杂物带附近的疲劳特征)

半椭圆弧形区外的 I、II、III、IV 区的断口主要为韧窝花样(图8),有时可看到二次裂纹相平行和一排排韧窝相平行的特征。



500X

图 8 2*试样的断口微观形貌

四、讨 论

综合叶轮断口的宏、微观分析结果可知,叶轮的爆裂是由于在叶轮中心孔内表面处有一

层非常硬脆的夹杂物带。它略偏离分模面位置且垂直于分模面,它破坏了基体金属的连续性而成为材料的薄弱部位,加之叶轮高速旋转,在孔的内表面切向应力也是最大,因此零件在交变应力作用下首先在此薄弱地区产生裂纹(夹杂物的脆断和基体的韧断)(图4,5)。以后以此裂纹为疲劳源不断扩展长大,这时作用于零件截面上应力也不断加大,当疲劳裂纹扩展至一定尺寸时,即达到半椭圆弧形区尺寸时,则在叶轮两端面转弯处由于应力集中,出现新的疲劳裂纹源,并不断扩展长大,这就导致II、III、IV区断裂面的形成。比较三个区域的面积和细腻程度可以看出,II区的形核和扩展比III、IV区早些。

由扫描电镜观察可知,II、III、IV区均为韧窝型断裂特征,似乎这些区域应是瞬时撕裂断口,但我们根据零件断口几个区域的粗糙程度,放射棱的明显程度,面积大小及断裂区的轮廓形状可以认为,II、III、IV区不是瞬断区而应当是疲劳裂纹扩展区,只是其扩展速率相当高,以致在微观断裂机制上由初期的疲劳条纹扩展机制改变为韧窝型扩展机制。V、VI区为最后瞬断区,与十五个钢螺栓的剪断基本上是同时发生的。

由断口微观分析可知,此零件第二阶段以疲劳条带方式扩展在半椭圆弧形区内仅占很小一部分面积,半椭圆内大部分和其余疲劳扩展区是韧窝型扩展机制,因此可以断定叶轮零件的断裂基本上是属于高应力低循环应变疲劳断裂。从叶轮上与半椭圆断裂区相似的位置上取样作带缺口的低周疲劳试验,结果也证明这种判断是正确的。

1970年曾发生过与这次完全相似的叶轮爆裂一等事故,裂纹源也是最先起始于中心孔内表面分模面附近位置。那次事故后,虽采取了一些措施,主要是增加了800小时后的超声波探伤检查,但是从这次事故分析来看,仅仅是超声波探伤还是不够的,因为超声波探伤对于与探头面相垂直的断裂面或夹杂物就发现不了,而且

叶轮两端面中心孔的外缘有一环形凸台(图9中B位置), 无法进行超声波检查, 因此对凸台下面的圆环体里的裂纹缺陷就发现不了, 而这个区域又恰恰是切向应力最大的危险区, 也是这两次叶轮爆裂的起源区。这样超声探伤对于A、B区这两个环形体内的垂直裂纹或夹杂物就漏检了, 这两次事故中疲劳裂纹在弧形区内稳定扩展期间, 其断面都是垂直于探头面的, 因此对于叶轮进行返修检查的规定应当改进。一方面是用超声波探伤方法如何发现垂直于分模面方向的裂纹, 另一方面应当补充零件外表面, 特别是内孔表面检查的规定。由本次事故分析可知, 在叶轮中心孔内表面轴向裂纹长度已达25mm, 在这以前已扩展相当长的时间, 经过三~四次返修, 如果规定作内孔表面检查是可以发现的, 可以避免灾难性事故的发生。但是据我们了解, 叶轮零件返修时, 对表面检查没有规定要求, 有可能漏检。另外铝合金零件表面裂纹检查方法规定必须在阳极化处理24小时后才能检查, 这时有表面裂纹处就有阳极化溶液渗出, 如果在不到24小时之前就检查, 这时有不太明显的裂纹就不易发现或根本发现不了。

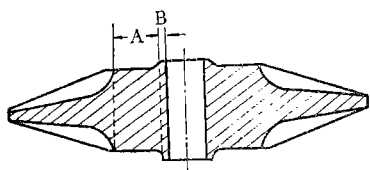


图9 叶轮纵剖面示意图

五、结 论

1. 压气机叶轮爆裂属于低循环应变疲劳断裂。

2. 疲劳源起始于叶轮中心孔内表面靠近分模面位置的一个脆性夹杂物带。分析表明, 这些夹杂物属于镁铝尖晶石型的化合物, 很可能是在熔铸过程中卷入的。

六、建 议

1. 压气机叶轮属重要受力构件, 应针对零件结构特点研究出能够发现零件内各个方向裂纹的超声波检查方法。

2. 增加叶轮零件表面裂纹特别是内孔表面层异常状态检查这一道工序, 并制订出相应的检查方法及报废标准。

× × × ×

中国航空学会工程塑料 应用技术交流会在安徽召开

中国航空学会工程塑料应用技术交流会于1984年10月10日至17日在安徽歙县汤泉宾馆召开。到会代表88名, 收到论文47篇, 大会交流10篇, 小会交流7篇, 还分组讨论了《塑料注射模具结构设计图册》。

这次技术交流会的主要任务是: (1) 交流与各单位在工程塑料应用技术方面近年来的研究成果和生产经验; (2) 讨论部委托三〇一所编辑的《塑料注射模具结构设计图册》; (3) 提出我部今后工程塑料应用技术开发领域的深度和广度; (4) 讨论工程塑料专业的今后活动计划。

与会代表在讨论中, 一致感到, 我部在工程塑料应用领域中远远跟不上国内兄弟部门(如电子工业部、轻工业部、广播电视系统……等), 而我部从事此专业的工程技术人员并不少。因而代表们迫切希望各级领导和部门能大力支持并推动部属企业搞好工程塑料应用工作。代表们要求今后进一步加强学术交流, 开展多种形式的学术活动, 以促进我部工程塑料应用技术迅速提高, 并建议开展下列活动: (1) 建立材料、工艺、模具咨询中心; (2) 开办各类培训班; (3) 在各地区进行技术介绍和经验交流; (4) 承接和组织研究或技术攻关项目

(三五一厂凌松林)