

飞机发动机涡轮工作叶片榫头裂纹的原位涡流探伤

石 剑, 吕 健

(中国南方航空工业有限责任公司, 湖南株洲 412002)

In Situ Eddy Current Testing for Cracks on Turbine Blade Rabbet of Airplane Engine

SHI Jian, LV Jian

(National South Aeroengine Co. Ltd, Zhuzhou Hunan 412002, China)

中图分类号: TG115.28

文献标识码: B

文章编号: 1000-6656(2008)06-0383-02

某型号飞机发动机在外场使用过程中, 出现了几起涡轮工作叶片榫头断裂的故障(图 1)。经失效分析, 均为疲劳裂纹所致。为避免该类问题再次出现, 需寻找一种可靠的外场无损探伤方法, 以有效地检出缺陷, 确保发动机的安全运行。

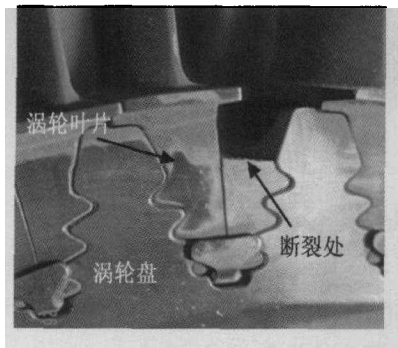


图 1 故障工件

1 故障出现的位置及其特点

根据理化故障分析结论, 该工作叶片榫头断裂是由于疲劳裂纹引起的。裂纹都出现在右叶片榫头的第 1 榫齿处, 其源头为榫齿靠排气边的 R 转接角, 并逐渐向榫齿的排气边和齿根处扩展。

叶片的断裂一般分为五个阶段: 裂纹的产生(叶片在应力集中处产生微小裂纹)、裂纹的亚临界扩展(微小裂纹缓慢扩展)、裂纹失稳(裂纹逐渐扩展到临界尺寸, 突然失稳)、断裂传播(失稳裂纹高速传播)、断裂停止(裂纹贯穿叶片, 导致叶片破坏)。其中裂

纹的产生和亚临界扩展这两个阶段持续时间较长, 从叶片宏观断口(图 2)可见, 裂纹源区呈金黄色, 说明该处的材料已被氧化, 已开裂了较长的时间。

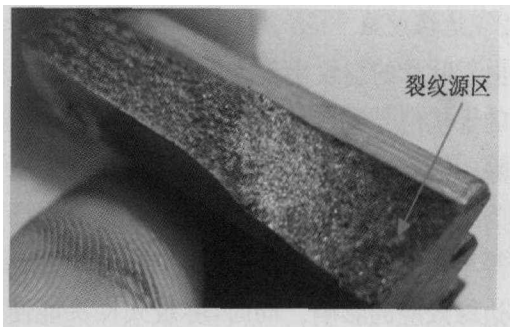


图 2 叶片宏观断口形貌

2 探伤方法的选择

上述故障特点表明, 若能在裂纹缓慢扩展阶段将其检出, 则可避免故障的发生。对于这类表面疲劳裂纹, 常规的无损探伤方法有渗透探伤、磁粉探伤和涡流探伤。由于渗透探伤前后都需清洗, 而在外场进行叶片原位探伤时, 叶片之间或叶片与涡轮盘之间存在许多缝隙, 造成清洗十分困难, 因此不适宜使用; 由于叶片是非铁磁性材料, 也不能采用磁粉探伤; 因而只能考虑采用涡流探伤方法。

3 涡流探伤方法的可行性分析

3.1 信号采集

涡流探伤中信号的准确采集直接影响检测结果的可靠性。由于该类裂纹位于叶片榫齿的排气边, 根据该型号发动机外场的原位状态及被检测区域的

收稿日期: 2007-06-06

作者简介: 石剑(1969—), 女, 无损检测高级工程师。

结构特点,只需拆除发动机尾锥,而不用拆卸延伸段,采用小直径的笔式探头就具有较好的可达性(图3),能确保信号的可靠采集。



图3 叶片的原位探伤

3.2 主要影响因素及其控制

3.2.1 提离效应

笔式探头的阻抗受提离效应的影响比较显著,因此,一方面,探头的防磨损保护膜不能太厚,以减小提离效应造成的检测灵敏度降低;另一方面,操作时应尽可能地使探头与叶片的相对位置及间隙保持稳定,以保证检测灵敏度的一致。

3.2.2 边缘效应

由于叶片的裂纹出现在叶片边缘处,边缘效应带来的干扰信号远远超过需要检出的裂纹信号,必须消除。根据实际经验,非屏蔽式探头的磁场作用范围为线圈直径的2倍,而屏蔽式探头的磁场作用范围等于线圈直径,因此,可通过选择屏蔽式探头来减小边缘效应的影响。同时,屏蔽式探头能使大部分的磁通量集中于探头的下方,因而灵敏度相对较高。

3.2.3 电导率 σ 、磁导率 μ 和工作频率 f

σ 、 μ 和 f 主要影响涡流透入深度 δ 和涡流分布密度。三者越小,则涡流透入深度越大,被检件表面的涡流密度越小。这样,可检出较深的缺陷,但探伤灵敏度也随之降低。

由于涡轮叶片的缺陷都是表面疲劳裂纹,并不需要太大的涡流透入深度,而是希望增大表面的涡流密度,以得到较高的探伤灵敏度。

涡轮叶片为非铁磁性材料,其相对磁导率 $\mu_r=1$,电导率也不高,在相同的磁化强度 H_0 条件下,由计算公式 $J_0=(\pi f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma)^{1/2} H_0$ 可以看到,要增大 J_0 ,只有提高工作频率 f ,但是,工作频率如果太高,表面状态(粗糙度、标记等)将引起噪声信号,干扰缺陷的评判。

因此,根据被检件的电磁特性及其缺陷特性,可

考虑选择500 kHz~2 MHz的工作频率,但最佳频率应根据涡流对人工缺陷的响应情况来确定。综上所述,该型号发动机外场原位检测是可行的。

4 可靠性试验

4.1 仪器的选择

由于外场条件的限制,在选择涡流探伤仪时,应主要考虑设备的稳定性、信号显示的清晰程度、操控的简便性和重量等因素,为此选择US-454 Eddy-View型涡流探伤仪。

4.2 对比试块

对比试块的材料特性应与被检对象相同或相近;且其人工缺陷的形式和大小尺寸应由被检对象最可能产生的自然缺陷的种类、方向、位置等因素确定。

根据上述原则,制作的对比试块为:在与被检对象相同的涡轮工作叶片的榫头第1榫齿处刻槽伤,从榫头排气边看,槽宽0.2 mm,长2 mm(图4)。

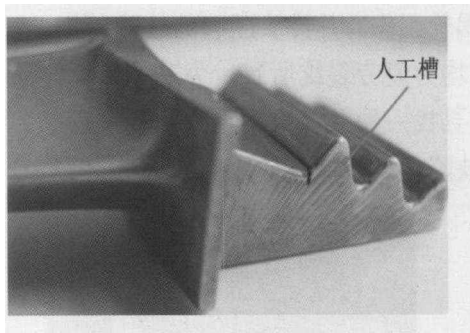
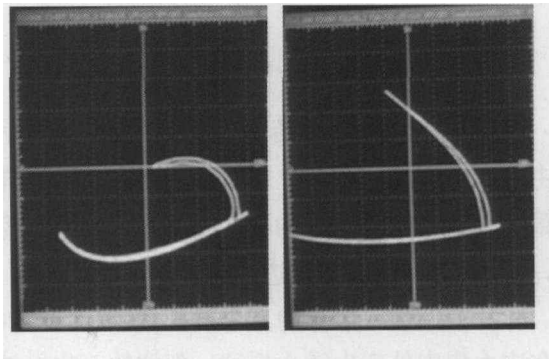


图4 对比试块

4.3 探头的选择

使用500 kHz和2 MHz的屏蔽探头分别对人工缺陷进行对比试验,检测结果见图5。可见,使用2 MHz的探头检测效果更好。



(a) 500 kHz

(b) 2 MHz

图5 不同频率探头的检测信号

4.4 试验工况

模拟外场的探伤条件(只拆除发动机尾锥,不卸发动机延伸段),用手动扫查方式,扫查方向应与裂

(下转第386页)

检区域作两次大致垂直的磁化。相邻的两个被检测区域之间保证不少于 15 mm 的覆盖宽度。在标定的受检段上交替重叠地安放磁轭进行磁化,以检查横向缺陷;将电磁轭跨在焊缝上,使两极的连线与焊缝垂直,依次移动磁极,逐个检查每个被检区域,以检测纵向缺陷。

(4) 检验 磁痕的观察和评定在磁痕形成后立即进行,观察时须从多角度观察,必要时可借助 2~10 倍的放大镜。对可疑部位要反复探伤,缺陷显示部位至少要检查两遍以上,排除伪显示和非相关显示,必要时用砂轮打磨后再进一步探伤。

(5) 磁痕分析 单盘角焊缝在役检测的主要缺陷是疲劳裂纹,磁痕特征明显,裂纹中部粗,两头细,一般纵向出现,有一定的深度和长度。磁痕中部粗密,而两端逐渐细小,显示浓密清晰。磁痕的浓密程度反映了裂纹的深度。焊缝表面的划痕、毛刺和较深的焊纹会产生非相关显示,可用放大镜观察区分。焊缝两侧的咬边也会形成纵向显示,容易区分。

(6) 磁痕记录 根据现场检测情况,进行实物照相,同时绘制缺陷磁痕草图,标出裂纹的数量、大小和位置。

(7) 退磁和后处理 无需退磁,但须将受检面磁悬液等清理干净。

2 裂纹分析及处理

2.1 产生原因

单盘角焊缝的表面裂纹主要是在交变应力作用

下形成的疲劳裂纹。浮顶式原油储罐在使用中,原油的油面是在不断变化的,储罐的浮顶随着油面不断升降,这样和油面直接接触的浮顶单盘就承受着随时间变化的拉应力,单盘角焊缝的应力集中处在交变应力的作用下产生了表面裂纹。

2.2 裂纹特点

单盘角焊缝的表面裂纹通常出现在应力集中部位,主要是内外圈角焊缝之间加强板的对接焊缝,对接焊缝的长度约 100 mm,与两侧角焊缝形成 T 形接头。裂纹一般出现在对接焊缝的中部,沿纵向开裂,有一定的长度,呈曲线状,中部较粗两头尖细,有时成群出现,此为裂纹多发位置。在某输油管理处罐区 5 万 m³ 油罐的大修中,浮顶单盘角焊缝检测出的 33 处裂纹中有近 30 处出现在该位置。

单盘角焊缝(特别是内侧角焊缝)在焊接时产生的咬边、未焊满等成型缺陷也会形成应力集中,在交变应力作用下沿熔合线开裂。

2.3 裂纹的处理

单盘角焊缝的所有表面裂纹必须打磨清理干净,打磨位置必须二次磁粉探伤。打磨深度较大时必须要求修理单位补焊,补焊后再进行磁粉探伤。如加强板的对接焊缝发现裂纹,补焊时可在对接焊缝上加焊方钢板,以增强抗交变应力能力。

浮顶式原油储罐在使用中,浮顶单盘角焊缝易产生表面裂纹,因此在储罐大修时必须重视其磁粉检测,加大检测比例,最大限度地发现存在的缺陷,消除事故隐患,延长储罐的使用寿命。

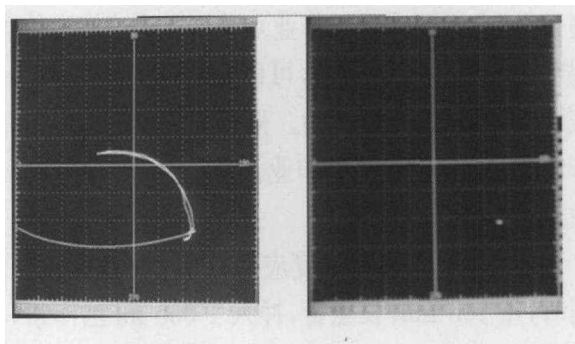
(上接第 384 页)

纹延伸方向垂直,对带裂纹叶片的发动机涡轮叶片榫头第 1 榫齿的延伸段靠排气边一侧的端面进行扫查。

4.5 试验结果

对发动机整盘叶片多次重复扫查,能较准确地检出带裂纹的叶片。图 6 为有缺陷和无缺陷处的典型阻抗图。

通过试验可以总结出① 有裂纹区域会出现明显的裂纹信号。② 由于叶片的边缘效应产生很大的信号,因此应注意将它和裂纹信号区分开来。一般来说,边缘信号的幅度更高;而且使用的屏蔽探头的涡流有效区域为一个线圈直径,因而也能通过探头所处的位置来区分,如果探头离边缘距离超过一个半径,则产生的信号就应该是裂纹信号了。③ 扫查过程的平稳性直接影响检测结果的评定。



(a) 裂纹区域

(b) 无裂纹区域

图 6 有裂纹和无裂纹的典型阻抗图

5 结语

综上所述,利用涡流探伤方法能较可靠地检出涡轮工作叶片榫头的疲劳裂纹。采用上述方法在外场对该型号发动机进行了涡流探伤普查,已成功发现了 13 片存在裂纹的叶片,避免了飞行事故。