

飞机发动机叶片裂纹的交变磁场 非接触原位探测

许占显, 林为干

(电子科技大学, 成都 610054)

摘要: 飞机发动机叶片基体出现裂纹时表面反映不明显, 孔探仪检查表面裂纹实际判别的难度较大, 因此用交变磁场非接触式探测法探测。介绍探伤原理、特点以及与其它无损检测方法的比较, 最后给出了发动机叶片的检测实例。检测结果表明, 该方法检出的大小裂纹的波形与实际裂纹相符甚好, 因此较传统涡流法和孔探仪法更具优越性, 具有实际应用价值。

关键词: 交变磁场测量; 发动机叶片; 表面裂纹

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2005)12-0637-03

On-Site Non-contact Detection of the Cracks in Aeroengine Blades by Alternating Current Field Measurement Technique

XU Zhan-xian, LIN Wei-gan

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Alternating current field measurement (ACFM) technique was applied for non-contact detection of the cracks in aeroengine blades due to the fact that it was difficult to judge surface cracks with hole testing equipment when the cracks were not obvious on blade surface. The principles and characteristics of ACFM and its comparison with other nondestructive testing methods were described. At last, a testing example of engine blade by ACFM was given, showing the good compatibility of the waves obtained with practical cracks. It was concluded that ACFM was superior to traditional eddy current testing method and hole testing equipment in on-site detection of engine blade cracks, and it would be valuable for practical application.

Keywords: Alternating current field measurement; Engine blade; Surface crack

发动机叶片是飞机的关键部件, 由于疲劳裂纹造成突然断裂而失效的现象时有发生。由于发动机结构的特殊性, 常规无损检测技术(如磁粉、渗透、射线和涡流等)因其技术上的局限性在外场应用受到限制。目前技术规范要求除一级压气机叶片外场可使用超声波探伤外, 其它级别的叶片只能使用孔探仪进行原位探伤。应用孔探仪检查表面裂纹, 实际判别的难度较大, 因为为提高飞机发动机上叶片的疲劳寿命, 目前都对叶片进行了喷丸或渗层处理, 叶片基体表面变成了次表面。

从大量试验和失效分析知, 喷丸或渗层处理的叶片裂纹恰恰是在次表面上萌生, 当叶片基体出现

裂纹时, 表面反映不明显; 另外, 原位叶片的表面不可避免地存在污染物, 因结构限制, 不便先期去除。以下介绍采用交变电磁方法对发动机叶片的原位检测。

1 交变磁场非接触探测原理

交变磁场测量(ACFM)法是基于交变电流电磁场裂纹测量原理^[1]。

一个通交变电流的特殊线圈将在导体中感应出交变电流。当导体中无缺陷时, 电流线将彼此平行。因为高频交流信号的集肤效应, 电流将均匀分布在导体表面, 同时也在导体表面及表面以上的空间产生交流电磁场; 当导体中存在缺陷时, 电阻率的变化使电流线在缺陷附近产生偏转, 则电流的均匀分布

受到扰动,裂纹所在表面处电流线变疏,电流密度下降,从而导致其空间电磁场发生变形,导体表面的磁场发生畸变(图1)。Lugg等人系统地研究了材料表面的磁场分布,建立了数学模型,给出了磁场的理论解^[2]。

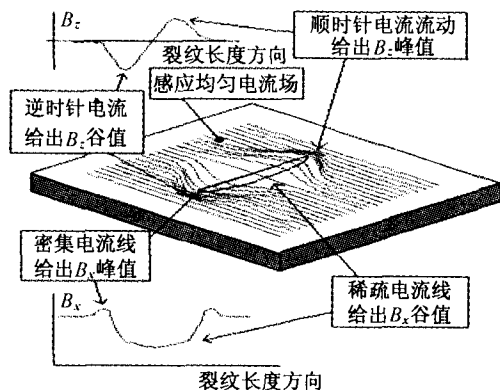


图1 交变磁场非接触探测原理

当感应电场为 Laplace 场时,铁磁性工件的感应磁场由一个给定边界条件的三维 Laplace 方程描述;若工件为非铁磁性材料,则 Born 模型更为合适,可用参数 m 来决定材料表面感应磁场的分布^[2]。有无裂纹存在根据波形是否畸变来判断,然后通过测量平行和垂直于裂纹方向上的磁场分量,以及采用建立在标准试块验证和理论计算基础上的计算机数值模拟技术,综合确定裂纹的长度和深度。

2 裂纹探测

2.1 探测原理

表面裂纹对电流和表面磁场的影响如图2所示。远离裂纹处电流场是均匀的,电流线相互平行。遇到裂纹,由于电阻大,电流线会向裂纹两端和底面偏转,使裂纹处电流密度下降。电流密度的变化会导致工件表面磁场的变化。探测前需先通过一组尺度不同的标准试件进行仪器时基刻度标定。

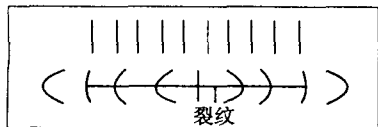


图2 表面裂纹对交变磁场的影响

2.1.1 垂直于工件表面的磁感应强度 B_z 。

裂纹面上电阻较大,使电流向裂纹两端和底面偏转(图1)。在裂纹的右半边,电流的总体趋势是顺时针流动,产生指向工件表面的磁力线;在裂纹的

左半边则刚好相反。通过 B_z 对应的水平刻度确定裂纹的长度。

2.1.2 平行于工件表面和裂纹走向的磁感应强度 B_x

由于电流向裂纹两端和底面偏转,使流经裂纹面的电流强度下降,裂纹中部的电流密度最低, B_x 最小(图1)。所以 B_x 的极小值对应着裂纹的最深处,通过仪器时基刻度标定可测出裂纹的深度。

2.2 信号特征

如上所述,检测中获取的两个信号 B_z 和 B_x 分别决定裂纹的深度和长度,其在时域内的波形如图3所示。因为信号是时域信号,当探头移动速度有变化时,会导致时域波形的扰动,给缺陷判别带来很大影响。

如果当操作者在对图3所示的缺陷进行扫描过程中将探头暂停,且稍有回退时,时域波形就会如图4所示,畸变很大。而在实际探伤工作中,探头的轻微不规则运动是难免的,为克服探头扫描速度对时域波形的影响,可将 B_z 和 B_x 分别作为仪器的水平和垂直坐标输入信号,形成一环形圆。有缺陷时波形图上出现一个明显的 B_z 和 B_x 的蝶形图(缺陷环)^[3](图5a)。探头的扫描速度发生波动时,只会使缺陷环一侧出现缠绕的线条,但缺陷环还是很明显的,从而不会造成误判和漏判。

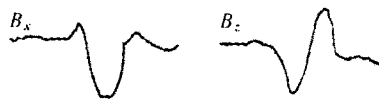


图3 磁场波形示意图

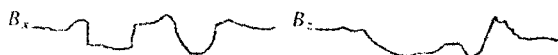
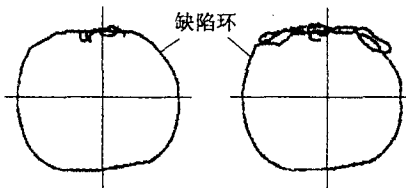


图4 探头抖动磁场波形示意图



(a) 探头平稳 (b) 探头抖动

图5 探头平稳和抖动时的蝶形图

3 ACFM 原位探测的特点

3.1 与涡流检测的比较

和涡流检测相同的是,ACFM 探头不但要能在工件中产生感应电流,同时要测量磁场的扰动,即工

件中的电流是由探头感应产生的,测量磁场扰动的传感器也装在探头上。因此感应线圈须精心设计,使无缺陷时探头下的电磁场是均匀的。ACFM 和传统涡流检测的明显区别是,ACFM 可以测量单向、二维甚至三维的磁场强度,有精确的理论依据和数学模型保障测量的准确性;可测出 25 mm 深的裂纹,而传统涡流检测只适用于深度 ≥ 6 mm 的表面裂纹。

ACFM 法有着无需标定、对表面状态要求较低等特点。传统无损检测方法因为标定试块的人工缺陷通常是机械加工出来的槽和孔等,一般引用当量的概念,不能反映实际缺陷与人工缺陷尺寸的对应关系。而 ACFM 法通过建立数学模型^[2],从理论计算得到缺陷尺寸,且实验证明理论计算和实际尺寸符合较好。

3.2 与交流电压降(ACPD)法的比较^[4]

交流电压降法(ACPD)是基于导体表面两点间的电阻会因存在裂纹而增大的机理,在导体表面通以电流,测量裂纹两侧表面间的电压降,并与无裂纹处同样距离两点间的电压降进行比较,来获得裂纹的深度和长度的方法。因此,ACPD 法不能用来探测是否存在缺陷,只能在用其它方法探明裂纹位置后进行定量。

另外,ACPD 法需要探头和工件之间接触良好,对工件表面状态要求较高。ACFM 法具有 ACPD 法的优点,能对裂纹进行精确定量,但无需和工件接触,对工件表面要求不高,且能透过表面油漆等介质检测,从而可单独完成检测。

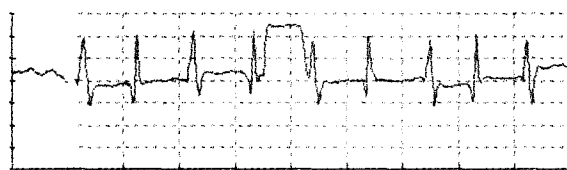
4 探测实例

某军用飞机系列型发动机外场采用孔探仪探测,为方便起见,开有三个检查视窗(图 6)和四个检测孔(孔径 $\geq \phi 13$ mm)。第 1 级和第 9 级压气机叶片部位没有开孔。第 2~7 级叶片长度分别为 20, 90, 70, 60, 53 和 42 mm。相邻叶片间距(如 1~2 级, ..., 6~7 级)分别为 160, 110, 105, 70, 55 和

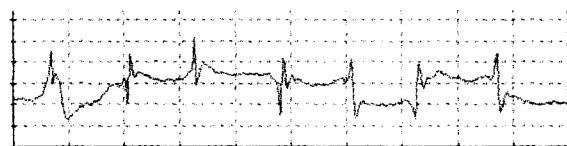
50 mm。1 级叶片之间的距离为 46 mm, 2 级为 20 mm, 7 级为 18 mm。

采用研制的交变磁场非接触式仪器,通过特制小型专用探头,使其能同时测量法向和切向电磁分量。传感器在叶片表面轻轻扫描,两路的输出分别送往 x, y 记录仪或示波器的水平和垂直轴,得到裂纹处电磁的法向和切线分量的轨迹图。轨迹图幅值与电磁信号的强度成比例,通过轨迹图估计裂纹的尺度。

实测 1 级压气机叶片(图 7)的裂纹波形见图 8。所得裂纹的波形与实际裂纹相符甚好,大裂纹约 $0.1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 小裂纹约 $0.1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。



(a) 裂纹 1 波形



(b) 裂纹 2 波形

图 8 叶片裂纹探测波形

5 结论

(1) 交变磁场非接触式探测不同于传统的涡流检测,更便于对裂纹进行度量。

(2) 和孔探仪法相比,交变磁场非接触原位检测具有更大的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 谢 昂,任吉林,高春法. 涡流检测[Z]. 南昌:南昌航空工业学院,1984.
- [2] Lugg MC, Lewis AM, Micheel DH, et al. The non-contacting ACFM technique[A]. Proc of IOP Meeting No12 Electromagnetic Inspection[C]. UK,1988. 41-48.
- [3] Topp D, Jones BA. Operational experience with the ACFM inspection technique for subsea weld inspection[J]. Environmental Engineering,1994,7(1):9-13.
- [4] Ditchburn RJ, Burke SK, Scala CM. NDT of weld: state of the art[J]. NDT&E International, 1996, 29(2):111-117.

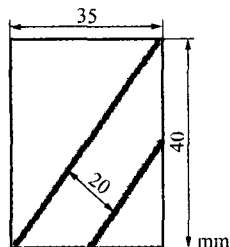


图 6 视窗示意图

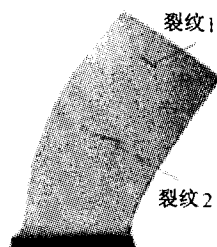


图 7 叶片裂纹示意图