

试验研究

汽轮机转子中心孔涡流探伤

林俊明 林发炳 林春景

陈开惠 方松利 陈国平

(爱德森(厦门)电子有限公司, 厦门 361001) (广东核电合营有限公司, 深圳 518081)

摘要 通过制作人工试样模拟中心孔的常见缺陷,对汽轮机转子中心孔缺陷程度和涡流信号响应特征之间的关系进行了定性分析和研究,为汽轮机大轴中心孔的涡流探伤提供了一种确实可行的方法。

关键词 汽轮机 转子 中心孔 试件 涡流检验

EDDY CURRENT INSPECTION OF THE CENTRE HOLES IN TURBINE ROTORS

Lin Junming Lin Fabing Lin Chunjing Chen Kaihui Fang Songli Chen Guoping

(Eddysun (Xiamen) Electronic Co., Ltd.) (Guangdong Nuclear Power J. V. Co.)

Abstract The relationship between the sizes of the defects in the centre holes of turbine rotors and the characteristics of eddy current signals has been analysed and studied on the basis of different artificial defects made on a specimen for the simulation of common defects in the holes. It has provided a feasible method for the inspection of turbine rotors.

Keywords Turbine Rotor Centre hole Specimen Eddy current inspection

1 前言

汽轮机转子的结构有整锻、套锻和焊锻三种,通常采用的是整锻式转子。因大型钢坯中心部位常不可避免地存在着偏析、疏松和微孔性缺陷,转子锻件中心部位便成为最薄弱的地方。为了去除这些缺陷,一般采用中心孔掏挖工艺,掏挖中心孔后虽除去该部位的潜在缺陷,为转子的在役检测提供了方便,但同时也出现了新的问题。由于汽轮机转子的高速运转,在中心孔表面产生了较大的切向应力。该区域若因工艺问题残存少量微小铸锻缺陷,这些潜在的残余缺陷受交变应力的作用易于扩展,形成疲劳裂纹而造成危害。

转子中心孔结构的完整性、可靠性是保证汽轮机安全运行的关键部件之一。汽轮机在役定期检修时,必须对大轴中心孔进行探伤。大轴中心孔的常见缺陷为疲劳裂纹,裂纹多位于表面或亚表面。大轴中心孔的检测方法很多,常用的方法有目视、超声、内窥镜和涡流检测等,其中,目视检测作为中心孔检测方法之一,仅能辨认较大的浅表缺陷;超声波探伤法对深层和亚表面缺陷较敏感,但需要耦合剂,且对表面疲劳裂纹不甚敏感,因此较适合于检测制造汽

轮机大轴生产中的缺陷;内窥镜方法靠人工观察,缺陷的检出率与检测人员的经验和主观因素密切相关,容易造成漏检和误检,并且一旦发现缺陷亦不能估算出疲劳裂纹的相对深度;而涡流法属于表面检测法,其检测灵敏度和可靠性愈来愈高。因此,为确保汽轮机安全运行,在役中心孔的涡流检测应作为主导方法,必要时辅以超声和内窥镜方法加以验证,把误检和漏检降到最低的程度。现根据笔者1993年来与湖南中试所等多个单位共同试验研究的经验,就涡流法对大轴中心孔的检测作一简介。

在选用涡流方法试验时,需从有裂纹的大轴中心孔故障件中选取已知裂纹尺寸的试验件。但目前没有大量的故障件可选,故选择与大轴中心孔同样的材料,用线切割制作模拟裂缝。虽然它与自然疲劳裂纹的阻抗信号在响应上会有所不同,但这种人工缺陷更便于对裂纹程度和信号响应之间的关系进行定量研究,从而能确定和实际应用相近的试验参数模式。

2 转子材料和检测方法

2.1 大轴中心孔标准样件的选材和加工

汽轮机转子多为铁磁性整锻、套锻或焊锻制成,

其常用材质为 30Cr1MoV, 34CrNi3Mo 或者 27Cr2MoV。为了使标准试块的材质与原位部件尽量一致, 我们选择 27Cr2MoV 材料作为标样的材质, 它的相对导磁率 $\mu_r \gg 1$, 电导率也比较低。如图 1 所示, 标准试件外形是直径为 $\phi 150\text{mm}$, 壁厚为 25mm 的管状结构, 将其切为两半, 试块上的人工缺陷用线切割加工, A, B, C, D (另一块为 a, b, c, d) 的深度分别为 0.3, 0.5, 1.0 和 2.0mm (另一块的加工深度分别为 2.5, 3.0, 4.0 和 5.0) 四个等级, 两块共八个等级, 加工时采用 $\phi 0.1\text{mm}$ 钨钼丝线切割, 加工要求表面粗糙度 R_a 为 $0.6 \sim 1.25\mu\text{m}$; 在如图 1 所示的 e, f, g 等间距位置分别用电火花加工 0.5, 1.0 和 2.0mm 三个周向缺陷 (长 5.0mm、宽 $< 0.12\text{mm}$)。该标样的电火花加工人工缺陷是根据以往汽轮机转子中心孔检测的常见裂纹设计的, 在应用过程中, 可根据具体情况增加其他人工缺陷, 如果转子的材质与标样材质不同, 检测时仅需对涡流检测仪器的参数稍作调整即可。

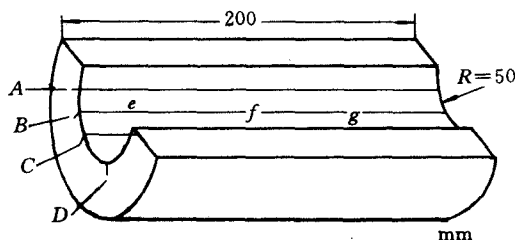


图1 大轴中心孔标准试块

2.2 检测仪器和探头

仪器选择爱德森(厦门)电子有限公司引进生产的 EEC-39 智能数字式四频八通道涡流检测仪器, 该仪器具有先进的技术性能。

探头为中心孔专用探头, 其型号为 EPZK. JO. 00, 频率范围为 $50 \sim 500\text{kHz}$ 。中心孔专用探头有多种型号, 用户可根据需要选择单探头、双探头、三探头或四探头。采用 C 扫描模式时, 一般选用单探头。探头的多寡主要考虑检测的效率。探头越多, 一次扫查的面积越大, 扫查速度越快。

仪器工作时可采用四频四阻抗平面显示模式, 为克服探头扫描时的跳动、材质缓变及表面状况的影响, 仪器的某些通道 (EEC-39 共八个检测通道) 可设定于连续平衡状态, 该状态等效于信号经过一个高通滤波器, 将非裂纹的缓变信号滤除。使用时需要根据手动或自动扫描的速度, 选取合适的平衡速度因子 ($0 \sim 1.024$), 同时, 仪器选择了多个混频抑制, 以便综合处理拾取的各种涡流检测信号, 进一步去除检测时探头跳动引发的噪声信号, 发挥多频检测

的优势, 以利于不同深度缺陷的检出。

2.3 检测频率的选择

检测频率的选择通常与试样的相对磁导率、电阻率(或电导率)有关, 汽轮机转子中心孔材料的相对磁导率根据材料相似原理, 经测量其值约为 10, 34CrNi3Mo 和 30Cr1Mo1V 的电阻率为 $28.9\mu\Omega \cdot \text{cm}$, 27Cr2MoV 的电阻率为 $27.5\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。对于渗透深度 δ , 由于涡流法主要用于检测转子中心孔的表面或亚表面疲劳裂纹, 要求仪器对工件浅层有较高的灵敏度, 因此不必渗透太深。但若渗透深度太浅, 由于大轴中心孔的表面噪声大, 会使信噪比降低, 因此选择频率参数时应注意两者兼顾。由于理论计算与实际检测往往存在距离, 确定检测频率时必须理论与实际结合, 即根据材料特性通过理论计算得出所选频率的值, 以此值为中值, 于中值前后几十赫兹通过反复试验摸索, 确定最佳频率范围, 一般认为频率设定在 $50 \sim 200\text{kHz}$ 范围比较合适。

2.4 信号相位和其它参数选择

我们在选择渗透深度 δ 时(涡流的渗透深度与所选频率值的平方根成反比), 必须兼顾仪器对微小裂纹的相对分辨力。由于涡流信号的相位滞后角^[1]

$$\theta = \frac{h}{\delta} \quad (\text{弧度})$$

式中 h —— 缺陷深度

δ —— 标准渗透深度

由上式可知, 对同样的裂纹深度, 如果渗透深度 δ 值小, 则可得到较大相位角 θ 涡流响应信号, 有利于把小缺陷信号从背景噪声中分离出来。

EEC-39 多频多通道仪器可同时抑制多个干扰因素, 检测中可通过混频有效地抑制探头晃动和大轴中心孔表面曲率不规则变化等引起的噪声, 有效地提高检测信噪比。为了使微小缺陷信号在阻抗平面中具有清晰的相位区分, 我们可调节仪器的增益比, 使涡流信号垂直分量与水平分量的放大倍数发生改变, 加大微小缺陷与干扰信号间和两个易混缺陷涡流信号间的相位角。该可调增益比功能有着特别实用的意义, 能有效减少仪器对检测噪声引发的误报警, 提高检测可靠性。

仪器的系统增益、相位、平衡速度因子以及滤波方式等可在测试中选定。

2.5 检测过程

仪器调定参数后, 将特制专用探头放于大轴中心孔内的适当位置, 使探头旋转, 扫查一周后, 以探头的灵敏检测宽度步进, 然后再扫查一周, 依此方法反复进行, 直至确认检测全面为止。为了加快大

轴中心孔的检测速度,可选择多探头、多通道检测,以机械化自动检测替代人工手动检测。手动检测时应避免剧烈晃动,尽量使探头保持匀速运动,一般地说,自动检测步进较均匀,扫查图形较清晰直观。

3 结果和讨论

EEC-39系统试验参数设置后,按上述检测方法对汽轮机转子中心孔标准试块进行全面检测。各部位模拟缺陷的检测信号如图2~4所示,从检测结果可得出如下几点:

(1) 探头对中心孔标样扫描未经过缺陷时,由于手动探头不稳定,如晃动、标样表面曲率不规则变化、材质不均或探头敏感区滑到标样边缘等,可形成各种干扰信号,这些干扰信号通过相位旋转将其调整到阻抗平面图的X轴(或称水平轴)上,与有效涡

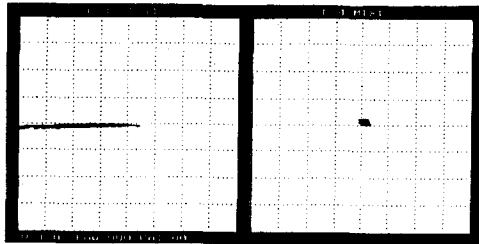


图2 EEC-39多频抑制探头晃动信号
(左方框内为抑制前的情况,右方框内为混频抑制后的阻抗平面图)

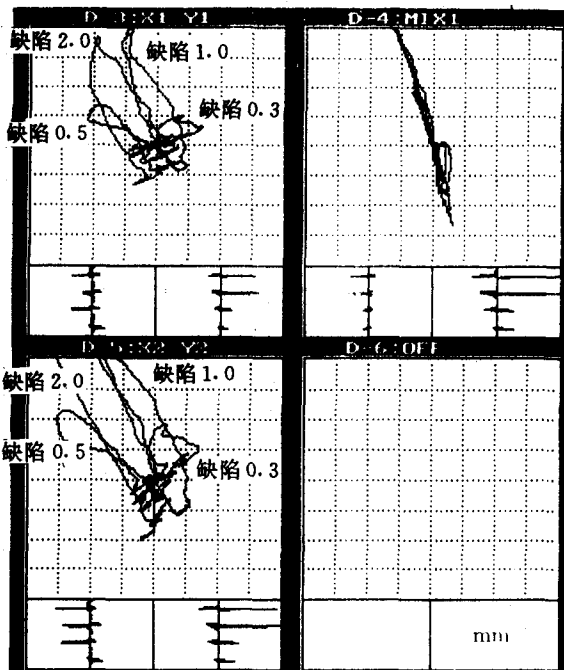


图3 多频抑制材质缓变信号
(左上及左下方框内为单频检测时,四个标准缺陷的涡流阻抗平面图;右上方框内为混频抑制后的涡流阻抗平面图)

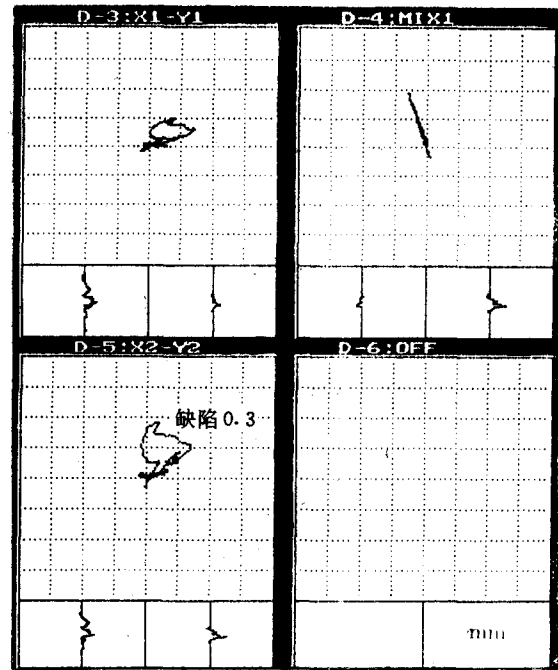


图4 EEC-39检测 $\phi 0.3\text{mm}$ 人工缺陷时的阻抗平面图

流信号分离出来。并可进一步通过仪器的混频功能,有效地抑制上述干扰信号。同时采用 EEC 系列产品特有的增益比(Y/X)功能,进一步提高对缺陷检测的分辨能力。

(2) 由于混频功能的作用,仪器对标样中最浅的缺陷(0.3mm 深),无论在幅值或相位的响应上,都是很清晰的。这表明 EEC-39与 EPZKX. JO 探头组成的检测系统信噪比很高(图4)。

(3) 四频四阻抗平面显示中,频率分别设置为 200,150,100和 50kHz,目的在于能有效地除去检测中的各种干扰因素,和敏感可靠地拾取标样中不同缺陷深度的涡流信号。从重复试验结果看,上述频率选择合适(见图2~4)。

(4) 仪器对标样中最小的缺陷,即深度为 0.3 mm,宽度 $>0.1\text{mm}$ 的人工裂纹已有很好的信噪比。一般地说,人工模拟裂纹的宽度较大,信噪比相对要低一些。自然缺陷中同深度的疲劳裂纹,其宽度较人工裂纹小得多。由于涡流仪器对工件的突变性缺陷更为敏感,因此检测系统对自然缺陷将具有比人工缺陷更高的信噪比。在良好的现场检测条件下,实际可检出 $<0.3\text{mm}$ 深度的裂纹。

(5) 试验表明用探头手动扫描寻觅缺陷时,可以约 10mm/s 的速度连续扫查,在设定了自动平衡速度因子后,探头扫描速度过慢会使缺陷信号响应幅值减小,反之,又会使干扰信号进入。有条件时,可选用 EEC 涡流-超声自动扫描成象系统检测,使检

(下转第183页)

一侧的焊缝为检测焊缝,象质计放在射源侧,横向裂纹的检出率通过 $K \geq 1.1$ 时的 L_3 来保证。

对检测已存档的1 440个 YSP-15型液化石油气钢瓶焊缝图象统计,象质指数达14的为438个,占总图象的30.4%,象质指数达13的为1 002个,占图象总数的69.6%,检测灵敏度完全达到或高于 JB4730-94标准中 AB 级的要求。

3 焊接缺陷的检出能力

对含有气孔、夹渣、未熔合、未焊透和裂纹等缺陷的 YSP-5, YSP-15和 YSP-50型 LPG 钢瓶和401丙烷等130个气瓶的650张 X 射线底片及对应的1 950幅实时成象图象对比统计见附表。

附表 拍片法和实时成象法对不同种类缺陷检出数量的对比

钢瓶型号	气孔		条状夹渣		裂纹		未熔合		未焊透	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
YSP-5	5	5	4	4	—	—	—	—	—	—
YSP-15	71	68	21	21	1	1	8	8	9	9
YSP-50	3	3	2	2	1	1	—	—	2	2
401丙烷	2	2	5	5	3	3	—	—	2	2

A——拍片法 B——实时成象法

从上表可见,对各种线性缺陷的检出能力,拍片法与实时成象法相当,结果吻合;而对气孔和夹渣等体积型缺陷,由于投影角度不同,量值上有一定误差,实时成象对极少数 $\phi 0.5\text{mm}$ 以下的气孔有分辨

(上接第167页)

测结果更加直观准确。

EEC 汽轮机转子中心孔涡流检测系统已应用于多个电厂的大修工作中,并取得了显著的经济效益。笔者认为,随着涡流技术水平提高及人们对涡流法认识程度的加深,必将推动涡流 NDT 事业的蓬勃发展。

参 考 文 献

- 1 吴前驱等. 表面无损检测. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- 2 任吉林. 电磁无损检测. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- 3 林俊明等. 多频涡流在电力系统中的应用. 电力建设, 1996(1)
- 4 林俊明, 林春景. 智能多用途全数字式涡流频谱分析检测仪. 无损检测, 1993, 15(12): 334
- 5 林俊明. 钢管涡流探伤仪的改进. 无损探伤, 1992(1)

收稿日期: 1998-12-10

不清的现象,但对焊缝的评级影响不大。

4 经济性

以 YSP-15型液化石油气钢瓶为例,用实时成象检测,按一个钢瓶15幅图象计算,一张128MB 光盘可存1 536幅,约102个钢瓶,每个钢瓶的检测费用为5元。光盘还具有图象信号无损失,可读可写,能重复使用的特点,这样成本还能降低。如采用拍片法检测,每个钢瓶以拍5张片计算,同样用102个钢瓶统计,胶片加上其它的辅助材料,每个钢瓶的检测费用高达15元,是实时成象检测费用的3倍,因此,采用实时成象法至少可节省65%以上的费用。

5 结束语

通过以上的分析,对计算机 X 射线实时成象在钢瓶探伤中的应用可作如下评价:

(1) 灵敏度满足 JB4730-94《压力容器无损检测》标准 AB 级的要求,图象质量与 X 射线底片相当,对焊接缺陷检测结果与底片吻合,能代替 X 射线照相法。

(2) 该技术直观、准确、查询快捷、检测速度快、成本低、图象清晰、可长期保存和便于现代化管理。

(3) 这是一项很有发展前途、应大力推广应用的检测技术,也是今后钢瓶行业,特别是大批量流水线生产企业的钢瓶主焊缝无损探伤发展方向。

收稿日期: 1998-03-22

(上接第175页)

类型航空发动机叶片出现的缺陷和损伤程度的评估,随着分析评估的计算机化,内窥检测人员还要掌握计算机及电子通讯等知识,以适应工作需要。

6 结束语

内窥检测设备从检查者用内窥镜直接对物体内部进行检测,发展到利用视频接收转换系统将观测图象转换成视频信号并通过监视器将观测到的图象显示出来的视频显示系统,以及近年来利用计算机系统开发的电脑分析系统和远距离图象传输系统。现代的内窥设备正朝着多功能方面发展,故障分析、经验共享已成为现实。当发动机检测有不明之处时,可通过图象传输功能与航空发动机制造厂家进行远距离同步检测,在同一时间内解决问题,这样,飞行安全有了保证,同时也节省了时间和费用。

收稿日期: 1997-05-14