

小径管自动 X 射线实时数字成像检测系统设计

孙忠诚¹, 吴根华², 靳树永¹, 孙茂林¹

(1. 兰州瑞奇戈德测控技术有限公司, 兰州 730010; 2. 上海锅炉厂有限公司, 上海 200240)

摘要: 比较和分析了各种小径管对接焊缝 X 射线实时成像技术, 开发出一种性价比极高的自动 X 射线实时数字成像检测方法和设备。实际应用的结果表明, 系统具有检测速度快、灵敏度和分辨率高的特点, 成像质量优于 JB 4730—2005 标准中规定的 AB 级。

关键词: 射线检测; 小径管; X 射线数字成像; 焊缝检测

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2009)02-0138-06

Design of Tube Weld Inspection System with Automatic Real-Time Digital Radioscopy

SUN Zhong-Cheng¹, WU Gen-Hua², JIN Shu-Yong¹, SUN Mao-Lin¹

(1. Lanzhou Rich-golden Test & Control Co., Ltd. Lanzhou 730010, China;

2. Shanghai Boiler Co., Ltd. Shanghai 200240, China)

Abstract: The automatic real-time X-ray imaging inspecting method and equipment with a certain high cost-effective performance have been developed on the basis of comparing and analyzing the available technologies of X-ray real-time imaging for tube butt weld. The practical application of production shows that the system contains the characteristic of high speed inspecting and high sensitivity and resolution, whose image quality is above the JB 4730—2005 AB claim.

Keywords: Radiography testing; Tube; Digital radioscopy; Weld inspection

在锅炉生产行业, 小径管对接环焊缝的 X 射线实时成像检测是一个必不可少的质量控制手段, 历来受到业主、生产厂和无损检测人员的普遍关注。我国锅炉生产企业采用了多种检测技术, 但就小径管对接焊缝而言, 由于探伤工作量大, 而其它检测方法难以满足生产节拍的要求, 因此 X 射线实时成像技术实际上已经作为唯一的检测方法被广泛采用^[1], 可在行业内却缺乏明确的 X 射线验收方法和相应的图像质量标准^[2—5], 从而导致许多检测设备都不同程度地存在一些技术问题, 产生安全隐患。因此, 有必要从选择 X 射线实时成像设备出发, 通过规范小径管对接环焊缝质量检测的技术和方法, 达到规范产品质量检测的目的。

收稿日期: 2008-02-21

作者简介: 孙忠诚(1963—), 男, 副教授, 硕士。长期从事射线数字影像技术研究和设备开发。

1 现有小径管 X 射线成像检测技术概况

随着技术的不断发展, 小径管 X 射线非胶片成像检测已经从传统的单一的 X 射线电视成像技术逐渐向多样化的数字成像技术过渡。

X 射线数字成像技术依据探测器种类可分为图像增强器式、线阵列式、平板式和荧光板式; 依据检测区域可分为线成像和面成像两种方式; 依据成像速度可以分为实时成像、近实时成像和数字照相三种。不同的成像技术具有各自的特点和应用领域, 必须从实际需要出发, 做出正确的选择。

众所周知, X 射线对于有方向的缺陷(如裂纹、未融合等)的检出能力取决于射线透照方向与缺陷方向的夹角。动态实时成像由于可连续观察到内部缺陷在较大角度范围的透照影像, 因此可实现方位的最佳化, 有助于提高该类缺陷的检出能力。因为小径管对接焊缝内可能含有方向性的缺陷, 所以是

否具有实时成像能力应该作为该类在线检测设备的一个重要考核指标。

1.1 X射线电视成像技术

自20世纪70年代开始,X射线电视成像技术逐渐走向工业应用,是到目前为止小径管环向对接焊缝检测应用最为广泛的设备。系统的核心部件是X射线图像增强器、电视摄像机和图像显示器,信息传递模式是:X射线→可见光→电信号→模拟图像。

图像增强器完成X射线到可见光的转换和亮度增强,经过数代产品更新,目前分辨率可以达到9.0 Lp/mm,并具有抗老化能力。摄像机虽然从最初的电子管相机发展到目前的CCD模拟相机,从隔行扫描发展到逐行扫描,性能有所提高,但没有实质性的进步。图像显示器也只是从隔行显示过渡为逐行显示,减小了图像闪烁。

虽然图像增强器技术得到了快速发展,但由于相机分辨率低(一般为768像素×576像素)和系统噪声较大,因此X射线电视成像系统的检测灵敏度和系统分辨率较低。

1.2 X射线慢扫描成像技术

该技术在X射线探测器的前端安装了与图像增强器类似的碘化铯或其它材料的荧光屏,后端配接模拟或数字相机,信息传递模式是:X射线→可见光→电信号→数字信号→数字图像。由于荧光屏的发光亮度不高,因此相机的曝光时间较长,只有通过时间延迟积分来获得较亮的降噪图像。该方法类似于胶片照相方法,只是曝光时间可以从几分钟降低到几秒钟。

慢扫描成像技术可以看作一种模拟胶片照相的技术,不具有实时成像功能,小径管旋转时没有动态图像显示,不能在不同角度观察焊接缺陷,对危害性大的裂纹和未融合的检出能力很低。该系统的分辨率取决于相机的分辨率和实际检测区域的大小。

1.3 X射线线阵扫描成像技术

线阵列探测器一般采用Gd₂O₂S或CdWO₄作为荧光转换材料,利用光电二极管或者CMOS阵列作为图像探测器,信息传递模式是:X射线→可见光→电信号→数字信号→数字图像。线阵列探测器每个瞬时只能对很小的区域进行检测,通过与被检测物体的相对运动来完成整个检测过程。线阵列探测器需要比其它成像技术更高的射线能量且检测速度较慢,尤其是对壁厚较大的小径管,检测时效率更低。另外,线阵列探测器要求非常稳定的射线剂量

输出,微小的剂量变化将产生严重的横向图像干扰条纹,所以需要采用高稳定性的X射线系统。

1.4 X射线平板成像技术

平板探测器采用Gd₂O₂S或CdWO₄作为荧光转换材料,利用 α -Si TFT阵列作为图像探测器,信息传递模式是:X射线→可见光→电信号→数字信号→数字图像。平板探测器的空间分辨率相对固定,影像几何畸变小,高分辨率时成像速度慢,无法实现实时成像且造价昂贵,在小径管检测时很少采用。

2 小径管对接焊缝检测依据的技术标准

国民经济飞速发展引起的产品标准落后于产品制造的现象在我国非常严重。对于小径管对接焊缝检测而言,虽然JB/T 4730.2—2005^[2]标准针对X射线胶片照相法已经作了详细规定,但对X射线非胶片成像技术应该执行的标准则没有明确。为使不同的成像方法达到相同的检测效果,现提出小直径钢管对接环焊缝检测依据标准的要点。

2.1 透照工艺

执行JB/T 4730.2—2005标准的相关条款内容。

2.1.1 透照布置

依据条款JB/T 4730.2—2005标准中4.1.4小径管环向对接焊接接头的透照布置规定。

小径管采用双壁双影透照布置,当同时满足 T (壁厚) $\leqslant 8$ mm和 g (焊缝宽度) $\leqslant D_0/4$ (D_0 为小径管外径)两个条件时,应采用倾斜透照方式椭圆成像;不满足上述条件或椭圆成像有困难时,可采用垂直透照方式重叠成像。

2.1.2 透照厚度比

依据JB/T 4730.2—2005标准表3规定,当管径 $D_0 \leqslant 100$ mm时,允许的透照厚度比 $K \leqslant 1.1$;当管径 $100 \text{ mm} < D_0 \leqslant 400$ mm时, $K \leqslant 1.2$ 。

2.1.3 透照次数

由于管子可以连续转动和观察,因此对于X射线实时成像,原则上透照次数不作限制。但在需要保存记录图像数据和采用数字照相的场合,依据JB/T 4730.2—2005标准中4.15和附录D之相关规定。

2.2 图像质量

执行JB/T 4730.2—2005和GB/T 19293—2003^[3]标准的相关条款内容。

(1) 像质指数 执行 JB/T 4730.2—2005 标准 4.11.3 表 6 或表 7 规定的 AB 级标准。

(2) 系统分辨率 执行 GB/T 19293—2003 标准 5.7 之规定,达到 3.0 Lp/mm。

2.3 总放大倍数

检测人员肉眼观察到的屏幕图像大小与被透照物体本身的大小之比称为系统总体放大倍数。由于软件对图像的放大并不会增加图像识别的有效物理信息,因此不在笔者此处的讨论范围。一般来说,基于检测人员对被检测工件的熟悉程度和对胶片照相的评定经验,总体放大倍数接近于 1 时视觉效果最舒适,判断结果最准确。

X 射线非胶片成像检测系统存在光学放大 M_o 、几何放大 M_g 和显示器放大 M_s 等多种放大倍数。系统反映在检测人员肉眼中的放大倍数 M 是上述各种放大倍数乘积,即:

$$M = M_o \cdot M_g \cdot M_s \quad (1)$$

2.3.1 光学放大倍数

光学放大只与相机光学镜头的焦距有关。焦距越短,光学放大倍数越大,视场越小。如果摄像机视场大小正好与 X 射线探测器最大探测区域相等,则光学放大倍数为 1。在图像增强器系统中的相机前端安装可变焦镜头,实际是为了调节系统的光学放大倍数,以改变系统分辨率,弥补探测器本身分辨率较低的缺陷,这种方法在需要对缺陷进行定量评估时存在许多不确定的因素。平板探测器和线阵列探测器的光学放大倍数可视为 1。

2.3.2 几何放大倍数

几何放大是通过改变射线管焦点、被测工件和探测器接收窗口三者之间的相互位置来实现的。在 X 射线实时成像技术的早期,由于探测器分辨率很低,人们对几何放大给予了足够的重视,得到了许多经验公式,产生了一定的积极作用。但随着探测器本身分辨率的提高,几何放大的作用也越来越小。当系统分辨率足够高时,应当采用尽量小的几何放大倍数。

2.3.3 显示器放大倍数

显示器对图像的放大作用以前人们不够重视,实际上它对检测人员的视觉效果影响非常大。显示器对图像的放大倍数可以通过下列公式进行计算:

$$M_s = \frac{P_s}{P_d} \quad (2)$$

式中 P_s 为显示器像素本身物理尺寸; P_d 为每个像素点代表的被检测物体的实际尺寸。

3 自动 X 射线实时数字成像系统的实现

3.1 设计原理

系统以软件为核心,将转管控制、实时成像、数字照相和图像保存等功能按检测流程融为一体,实现自动检测、提高图像质量和检测效率;将实时成像和数字照相两个功能同时实现并将检测结果同屏显示,使两种成像方法的优缺点互补;用实时图像录像和存储不同角度数字照相图像的方法,实现检测结果的完整保存;用高亮度、高对比度灰阶显示器将图像细节完美地表现出来,增加判定的准确性,防止漏检和误判。

3.2 关键技术的实现

3.2.1 X 射线机参数控制

利用高性能 X 射线高压发生器所配的 RS-232 数据通讯接口和外部控制命令,通过计算机通讯接口对射线机管电压、管电流、焦点选择和工作时间进行数字控制。根据管子壁厚来选择管电压和管电流。经过模拟试验,可依据检测人员输入的管子规格,自动选择相应的射线参数并进行记录射线参数的计算机软件控制,与人工调节相比具有探伤规范稳定、图像效果一致和没有误操作的优点,可延长设备的使用寿命,降低使用成本。

3.2.2 数字式高分辨率工业图像增强器系统

图像增强器在生产中已经广泛应用,通过柱状碘化铯闪烁体技术和抗老化处理技术等进行改进后,性能有了很大提高,表 1 为各种射线探测器性能价格比。

表 1 各种射线探测器的性能价格比较

探测器	分辨率/Lp·mm ⁻¹	平均使用寿命/a	参考价格/万元
图像增强器	7~9	2~3	5~6
荧光转换屏	4~5	2~3	<5
线阵列探测器	6	4~6	30
平板探测器	4	4~6	50

表 1 可见,图像增强器分辨率是所有射线探测器中最高的,穿透相同厚度的材料所需的射线能量最低,成像速度最快;依据使用寿命和成本进行折算,其性价比是线阵成像器的 3 倍以上,平板成像器的 5 倍以上。

因此,在系统设计中选择了高分辨率工业级图像增强器和高分辨率数字成像单元组成数字式高分辨率图像增强器系统。图 1 为装有高分辨率数字相

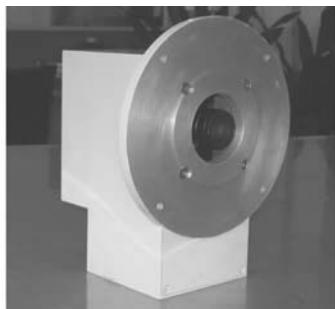


图1 高分辨率数字成像单元

机的成像单元,与图像增强器采用法兰连接,可随意调节视场大小并进行准确对焦。

3.2.3 检测机械与控制

采用气动压紧装置和伺服驱动的转管机构可以适应直径为20~120 mm的管子环焊缝检测,运动控制卡在软件控制下实现转管速度和位移量的精确调节,特殊的防滑措施保证管子连续、均匀转动。射线管头和图像增强器安装在电控倾斜装置上,可大范围调节透视角度、焦距和几何放大倍数。为减小散射线的影响,在图像增强器输入屏安装有电动光栅。独特设计的壁式结构铅房体积仅为传统方法的1/3,且可在外部对射线管头和图像增强器进行安装与调节,使用十分方便。图2所示为小径管检测机械的组成与布置示意图。

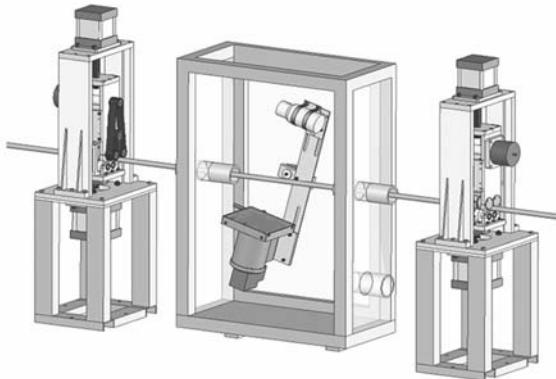


图2 小径管检测与防护机械布置图

3.2.4 系统软件

系统软件是整个检测系统的核心,具有图像处理、活动图像与积分图像同屏显示、运动控制、数据存储与传输和打印检测报告等功能。检测系统在成像软件的控制下,单键操作即可自动完成每根钢管的所有焊缝检测。

检测开始前,首先设置小径管焊缝图像的三级命名规则、焊缝数量和每条焊缝上需要保存的数字照相次数。操作人员按下“自动检测”功能键以后,

X射线机开始按照设定的焦点、管电压和管电流发射X射线,管子以设定的速度开始连续转动,透视后的动态实时检测图像显示在屏幕的左边区域。管子转动到设定的位置,系统在无明显停顿的状态下,采集多帧图像数据并积分降噪,积分图像依次显示在屏幕的右边区域。由于实时图像与多个位置的积分降噪图像同屏显示,检测人员既可在运动过程中通过实时图像进行判定,也可利用降噪后的高品质图像进行准确分析。每个焊缝检测完毕后,系统自动将降噪图像进行本地存储或利用网络实现远程传输。检测过程中,可选择使用动态实时图像的连续录像功能。

软件系统具有自动、半自动和手动三种工作模式,对返修焊缝可自动添加命名标记,完全遵循小径管的检测流程和检测人员的工作习惯,并按照用户指定的格式自动生成检测报告。图3所示为软件工作界面截屏图。

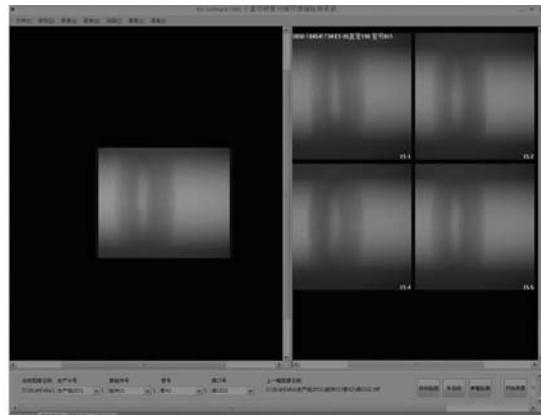


图3 系统软件工作界面截屏图

3.2.5 灰阶图像显示器的应用

普通显示器一般都是用来显示彩色图像的,每个像素实际上是由红、绿、蓝三原色构成,且像素物理尺寸较大。使用普通显示器来显示黑白图像主要存在以下问题:偏色现象出现、图像边缘清晰度下降、亮度和对比度低、图像细节不易观察到和较大像素尺寸带来的图像放大,降低了视觉效果。

系统设计时选用专业灰阶显示器,可同时显示1 024灰度等级的图像,像素尺寸仅为0.2 mm,亮度达到1 000 cd/m²,对比度为1 000:1,检测图像的视觉效果明显改善,提高了图像的细节识别能力。

4 系统参数测试

为了考核该成像系统的整体技术特性,分别在实验室和生产线上对系统分辨率、像质指数、检测速

度和可操作性等进行了测试。

4.1 测试条件

(1) X射线系统 320 kV 高频恒电压 X射线系统, 焦点尺寸 1.5 mm×1.5 mm。

(2) 图像增强器系统 152 mm(6 英寸)增强管, 成像视野 150 mm, 1 024 像素×1 024 像素数字相机, 4 096 灰度等级, 帧速 30 帧/s。

(3) 小径管规格 直径 20~120 mm, 壁厚 4~25 mm 环向对接焊缝钢管若干。

(4) 系统软件 采用通过国家软件测试中心测试的瑞奇戈德 RG-TUBE-100A 型小径管自动检测专用软件。

4.2 系统分辨率

将分辨率测试卡压紧在图像增强器输入屏上, 几何放大倍数为 1, 依据 GB/T 19293—2003 标准规定的分辨率测试方法的测试结果如图 4 所示。结果表明, 无论是观察动态实时图像还是积分降噪图像, 系统分辨率均达到了 3.5 Lp/mm, 超过了国家标准的要求。

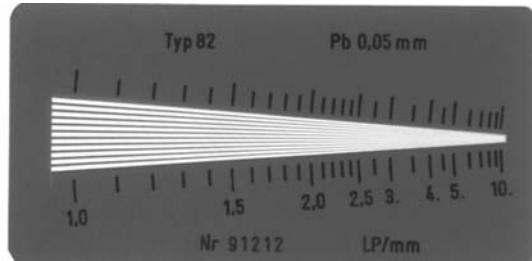


图 4 系统分辨率测试结果

4.3 像质指数

在系统总体放大倍数为 1.5, 焦距为 650 mm 的条件下, 将等径像质计置于射线源侧, 采用双壁双影椭圆成像法, 分别对不同直径、不同壁厚的管子焊缝进行检测, 读取同屏显示的动态图像和积分图像的像质指数, 测试结果如表 2 所示。

由表 2 可见, 自动 X射线实时数字成像系统动态图像的质量完全满足 JB/T 4730—2005 标准 AB

表 2 不同壁厚管子检测的像质指数

壁厚/mm	动态图像像质指数/号	积分图像像质指数/号	JB/T 4730—2005 AB 级要求/号(mm)
4	13	14	13(0.20)
7	12	13	12(0.25)
9	11	12	11(0.32)
11	11	11	11(0.32)
15	10	10	10(0.40)
20	9	10	9(0.50)
25	8	9	8(0.63)

级像质要求, 积分图像在多数情况下比标准要求提高一个像质指数。图 5 所示为 $\phi 76 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 的对接焊缝分别在间隔 60° 时记录的检测图像。

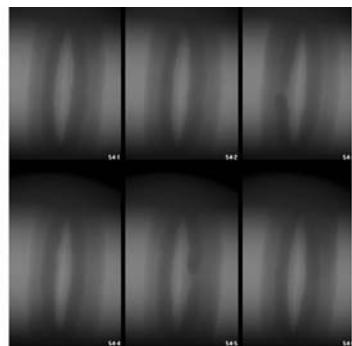


图 5 $\phi 76 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 管子对接环焊缝的完整检测图像

4.4 不同成像方法的综合性能比较

除分辨率和图像质量指标以外, 降低检测过程中的放射剂量、提高检测效率和减小操作人员的劳动强度也是 X射线在线检测时必须考察的指标。

目前用于小径管检测的设备主要有 X射线电视成像、荧光板慢扫描成像、线阵列成像等三大类。在采用相同射线源(320 kV)的条件下, 对不同成像方法的综合性能进行了对比测试, 结果见表 3。

表 3 可见, X射线电视成像系统虽然具有实时成像的功能和价格低廉, 但分辨率和图像质量均不能达到国家和行业标准的要求, 明显属于淘汰技术;

表 3 不同成像方法的综合比较

成像方法	分辨率/ $\text{Lp} \cdot \text{mm}^{-1}$	最大透照壁厚/mm	检测时间 ¹⁾ /s	曝光剂量/ $\text{mA} \cdot \text{s}$	像质指数	方向缺陷检出率	工作强度
工业电视实时成像	2.0	25	30	3.30	低于 A 级	低	高
慢扫描	3.0	22	30	3.30	AB 级	低	低
线阵列	3.5	20	90	10.90	AB 级	低	低
自动实行成像	3.5	25	12	3.12	达到和超过 AB 级	高	低

注:1) 针对 $\phi 76 \text{ mm}$ 管子而言。

荧光板慢扫描成像系统和线阵列成像系统的成像方式是数字照相,没有实时成像功能,分辨率和图像质量都可满足相关标准要求,但受照相角度的限制,对方向性缺陷的检测不灵敏。

研制的自动 X 射线实时数字成像系统,具备实时成像和数字照相双重功能,动态灵敏度和分辨率都达到了相关标准要求,可提高对裂纹和未融合等危害性大的缺陷的检出能力。与此同时,检测过程的自动化使检测效率比慢扫描成像提高 2.6 倍,比线阵列提高 7.5 倍;而放射剂量约为慢扫描成像的 1/3,线阵列成像的 1/50。

小径管自动 X 射线实时数字成像技术在行业内的多家锅炉生产企业的实际应用,表现出良好的经济和社会效益,并已经获得国家专利授权。

5 结论

(1) 以高分辨率数字相机和图像增强器构成的数字图像增强器成像单元,是当前性价比最高的 X 射线探测器。

(2) 自动 X 射线实时数字成像技术将动态图像与积分图像进行同屏显示,将实时成像与数字照相的优点集于一身,能有效提高焊接缺陷的检出能力

(上接第 122 页)

检测等,都应防止对被检复合材料结构造成表面划伤或撞击等,避免破坏其完整性。视频孔探则可利用固定的螺栓孔、铆钉孔或内部油箱接口等部位插入探头。结构设计制造时,也可预留检测孔,为视频孔探提供通道。此外,也可利用冷、热空气或特定介质进行内部热激励,通过红外热像仪在外部进行穿透法检测。

上述应用方法主要是根据外场需求和实际研究而提出,除此以外,在保证可靠性的前提下,也可采用电子剪切散斑成像、X 射线法、声阻抗法和敲击法等方法进行检测。通过多种方法的交叉进行和相互验证,确保最终检测结果的可靠性,保证飞行安全。

5 总结

飞机复合材料结构对外部冲击极为敏感,尤其是起降过程中的跑道碎石和日常维护中的普通工具撞击等低能冲击即能造成复合材料的损伤,使其内部产生分层、基体开裂或纤维断裂等。上述损伤在外表面往往目视不可检,但其压缩承载能力却已大幅度下降(外表面目视勉强可检的冲击损伤可使其

和检测效率。

(3) 以数字图像增强器构成的实时成像系统动态图像的像质指数达到 JB/T 4730—2005 标准 AB 级要求,静态图像较标准要求提高一号像质指数。

(4) 以数字图像增强器构成的实时成像系统分辨率可达到 3.5 Lp/mm 甚至更高,超过 GB/T 19293—2003 标准规定的要求。

(5) 自动实时成像技术是提高图像质量和检测速度、降低放射剂量的有效手段,可在生产实际中推广应用。

参考文献:

- [1] 宋伟伟,张勇为,曲英华. X 射线实时成像系统在锅炉压力容器管材探伤中的应用[J]. 锅炉制造,2004,(1): 80—82.
- [2] JB/T 4730.2—2005 承压设备无损检测 第 2 部分: 射线检测[S].
- [3] GB/T 19293—2003 对接焊缝 X 射线实时成像检测法[S].
- [4] EN 13608—2001 Non-destructive testing[S].
- [5] ASME Boiler & Pressure Vessel Code(2001 Edition, 2002, 2003 Addenda) Section V, Article 2 Mandatory Appendix II -Real-time radioscopic examination[S].

压缩强度降为无损强度的 40%^[1])。冲击损伤会显著降低复合材料的静、动态载荷性能,严重时直接威胁飞机的飞行安全,引起突发事故,因此必须及时有效地进行早期检测和预报。

参考文献:

- [1] 姜波. 飞机检测与维修实用手册[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社,2005.
- [2] 崔海波,温卫东,崔海涛. 复合材料层合板冲击损伤及剩余强度研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(3): 466—472
- [3] 吴涤,郦正能,寇长河. 蜂窝夹芯叠层板的低速冲击损伤分析[J]. 北京航空航天大学学报,1999,25(1): 45.
- [4] 张子龙,程小全,益小苏. 复合材料冲击损伤及冲击后压缩强度的等效实验方法[J]. 实验力学,2001,16(3): 313—319.
- [5] 童明波,陈普会,曾建江. 低能量冲击损伤复合材料飞机结构的强度性能研究[J]. 航空学报,1998,19(2): 233—235.
- [6] 沈真. 复合材料结构设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社,2001.