

焊缝 X 射线检测及其结果的评判方法综述

周正干, 滕升华, 江巍, 李和平

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院 100083 北京)

摘要: 分析了焊缝 X 射线检测方法的现状, 指出了目前存在的主要问题; 介绍了焊缝 X 射线检测结果的人工评定和计算机辅助评定方法, 论述了国内外焊缝 X 射线检测结果计算机辅助识别的研究现状。研究结果表明, X 射线数字实时成像技术是焊缝射线检测的发展方向, 焊缝射线数字图像的计算机自动分析与识别技术是射线实时成像技术成功应用的基础。

关键词: 无损检测; 图像处理; 模式识别; 焊接

中图分类号: TP391. 6 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)03-85-04



周正干

0 序 言

目前, 焊接已作为一种基本工艺方法, 应用于航空、航天、舰船、桥梁、车辆、锅炉、电机、电子、冶金、能源、石油化工、矿山机械、起重机械、建筑及国防等各个工业部门^[1]。由于焊接过程中各种参数的影响, 焊缝有时不可避免地会出现熔合不良、裂纹、气孔、夹渣、夹钨、未熔合和未焊透等缺陷。为了保证焊接构件的产品质量, 必须对其中的焊缝进行有效的无损检测和评价。射线检测是常规无损检测的重要方法之一, 是保证焊接质量的重要技术, 其检测结果将作为焊缝缺陷分析和质量评定的重要判定依据^[2]。对 X 射线检测结果的评定方法有两种: 人工评定和计算机辅助评定。当人工评定检测结果时, 评定人员的工作量大, 眼睛易受强光损伤, 效率较低, 而且缺陷分析受评定人员的技术素质、经验以及外界条件的影响, 结果往往会因人而异。采用计算机对 X 射线检测结果进行分析和识别, 可以大大提高工作效率, 有效地克服人工评定中由于评定人员技术素质和经验差异以及外界条件的不同而引起的误判或漏判, 使评定过程客观化、科学化和规范化。

1 焊缝 X 射线的检测方法

目前, 焊缝 X 射线检测最常用的方法是胶片照相法。X 射线胶片照相的成像质量较高, 能正确提供焊缝缺陷真实情况的可靠信息, 但是, 它具有操作过程复杂、运行成本高、结果不易保存且查询携带不便等缺点。随着电子技术及计算机技术的发展, 一

种新兴的 X 射线检测技术——基于 X 射线图像增强器(X ray image intensifier)的实时成像技术(Radioscopy)应运而生, 其工作原理如图 1 所示, 图 2 是一种典型的图像增强器。X 射线图像增强实时成像检测技术的出现使焊缝 X 射线检测的效率大大提高。但是, 与胶片照相法相比, 由于图像增强实时成像法成像环节较多, 信噪比低, 图像容易产生畸变, 故成像质量相对较低, 检测结果的图像对比度和空间分辨率均不是很高。

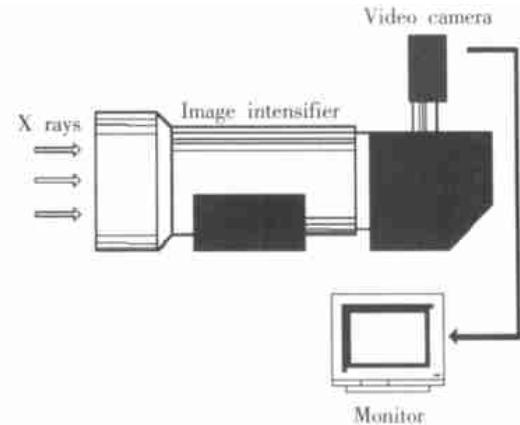


图 1 图像增强实时成像检测系统原理图

Fig. 1 Sketch of image intensifier-based radioscopy system

为了解决上述问题, 20世纪90年代末出现了 X 射线数字实时成像检测技术(Digital radioscopy, DR), 亦称为 X 射线数字照相(Digital radiography, DR), 其工作原理如图 3 所示。X 射线数字实时成像系统中使用的平板探测器(Flat panel detector)如图 4 所示, 其像元尺寸最小可达 0.127 mm, 因而成像质量及分辨率明显优于 X 射线图像增强器系统, 几乎可与胶片照相媲美, 同时还克服了胶片照相中

表现出来的缺点。

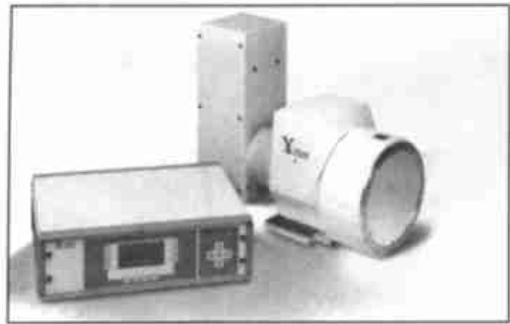


图2 一种典型的图像增强器系统

Fig. 2 Typical image intensifier system

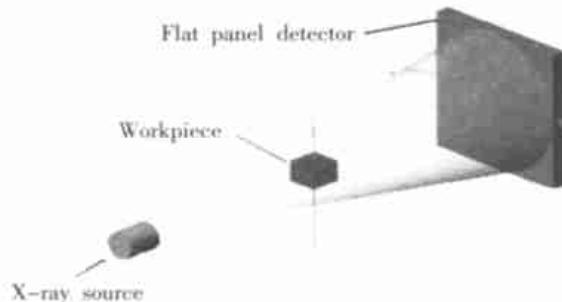


图3 X射线数字照相系统原理图

Fig. 3 Sketch of digital radiography system

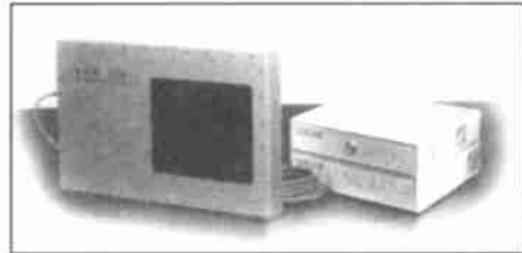


图4 一种典型的X射线平板探测器系统

Fig. 4 Typical X-ray flat panel detector system

2 焊缝X射线底片的评判

2.1 焊缝X射线底片的人工评判

正确地识别X射线底片上的影像,判断影像所代表的缺陷性质,评定人员可根据影像的几何形状、黑度分布及位置三方面进行综合考虑,做出判断。

不同性质的缺陷具有不同的几何形状和空间分布特点。例如,气孔一般成球形,裂纹多为宽度很小、且有变化的缝隙等。由于X射线底片上缺陷的影像是缺陷的几何形状按照一定规律在平面上投影形成的图形,因此,影像的几何形状常常是判断缺陷性质的最重要依据。不同性质的缺陷其内在性质不同:气孔可认为内部含有气体;夹杂物是不同于工件本身材料的物质等。这种不同性质的缺陷对射线的

吸收不同,形成的缺陷影像黑度也就不同,故影像的黑度分布是判断影像性质的又一个依据。另外,缺陷影像在X射线底片上的位置,也就是缺陷在工件中位置的反映,这是判断影像缺陷性质的第三个依据。

焊接过程中产生的缺陷主要有六类,即:(1)熔合不良:未焊透、未熔合;(2)裂纹:热裂纹、冷裂纹;(3)孔洞:气孔、缩孔;(4)夹杂物:夹渣、夹钨;(5)成形不良:咬边、烧穿和焊瘤等;(6)其他缺陷。射线检测主要检测的是前5类,以下是焊接常见缺陷在射线底片上的表现形式^[3],评片人员可据此识别之。

未焊透在X射线底片上一般呈现为笔直的黑线影像,并处于焊缝影像的中心,实际的未焊透缺陷影像还可能是断续的黑线、变宽的黑线条、偏离焊缝中心线的黑线等,或伴随其他形态影像的线状影像。未熔合在X射线底片上的形态与射线束的方向有关,一般情况下它呈现为模糊的宽线条状影像,线条沿焊缝方向延伸,位置与未熔合的位置相关,影像的黑度与背景的黑度差较小,有时影像的一侧呈现直边状。裂纹在X射线底片上的基本形态呈现为黑线,影像的黑度可能较大,也可能较小,容易与其它缺陷的影像相区别;由于裂纹属于窄缝性缺陷,所以当射线束与它的扩展面成较大角度时,裂纹的影像将变得很模糊,甚至在X射线底片上不能形成具有一定对比度的裂纹影像,这点需要注意。气孔在X射线底片上呈现为黑度大于背景黑度的斑点状影像,黑度一般都较大,影像清晰,影像的形状可能是圆形、椭圆形或长圆形(梨形)。夹渣在X射线底片上常见的影像有点状夹渣、密集夹渣和条状夹渣三种形态,其影像的主要特点是形状不规则、边缘不整齐、黑度较大而均匀。夹钨的影像主要有孤立点状和密集点状两种形态。咬边在X射线底片上类似于夹渣,但它一定出现在焊缝区两侧。烧穿在X射线底片上呈现为低黑度的圆环或椭圆环及中心高黑度的暗斑形貌。焊瘤在X射线底片上呈现为具有圆滑轮廓的较大的低黑度斑点影像,它可能出现在焊缝区内,但经常是出现在焊缝两侧区。

2.2 焊缝X射线底片的计算机辅助评判

国内外对于X射线底片的计算机评判的通用方法是^[4]:将射线底片图像通过底片数字化扫描设备(或CCD摄像机和模数转换器)变成数字图像,然后将其输入计算机,应用适当的图像处理系统,对其进行数据处理——降噪、平滑化、清背景和差分等,再将处理结果用三维图显示或彩色显示,这样无需熟练技术,缺陷形状也很容易识别。这仅是射线底片计算机评定的初级阶段。射线底片的全自动评定

需要多道程序: (1) 缺陷检出系统。其主要目标是对射线底片上的影像进行图像处理, 研究图像中缺陷的存在及其位置, 并采用适当的图像显示——三维显示或彩色显示。此为初级水平的自动化。(2) 缺陷辅助判别系统。对因有噪声存在难以判别的缺陷图像, 作更高级的图像处理, 使缺陷形状变得醒目, 再供给评定人员作最终评判。这种系统就是人机对话系统。此为计算机评片的中级阶段, 对难判缺陷的明朗化较有效。(3) 缺陷自动判别系统。对获取的图像尽可能采用非定量图像处理, 使缺陷位置和形状突现, 再通过自动判别系统, 对缺陷作定量评价、等级分类和合格判定。此为计算机评片的高级阶段。它是上述(1)(2)两系统的综合和发展, 引入了人工智能等算法。国内沈阳工业大学李德元和徐鲁宁等人对焊缝 X 射线底片的自动评判进行了一些深入研究, 实现了图像的输入和输出、图像的预处理、缺陷边界的提取以及伪彩色处理等基本功能, 并为典型条形缺陷的区分与识别建立了判据^[5]。南京气象学院的傅德胜和郑关胜等人也对焊缝 X 射线底片图像的计算机处理与识别进行了研究, 通过选择缺陷的若干模式参数, 建立了焊缝缺陷计算机识别模式的基本方法, 能比较准确地识别出圆形缺陷、裂纹缺陷、长形夹渣和未焊透缺陷等^[6]。上海理工大学何怡、杨永才和王海鹏等人运用数字图像处理技术, 在对 X 射线底片数字图像进行预处理的基础上, 提取出焊缝缺陷的若干参数, 采用统计模式识别的方法对缺陷进行分类, 实现了焊缝 X 射线底片的计算机辅助评判^[7]。

在国外, 日本冈山科技大学的 V. Lashkia 利用模糊推理的方法实现了焊缝 X 射线底片的计算机自动分析和焊接缺陷的计算机识别, 其识别效果达到了专业评片人员的水平^[8]; 德国柏林 BAM 公司的 C. Jacobsen 等人利用图像处理和神经网络技术实现了 X 射线底片中焊缝裂纹缺陷的自动识别^[9]; 阿尔及利亚的 Nacereddine Nafa 和 Drai Redouane 等人利用数字图像处理技术实现焊缝边界的轮廓跟踪, 利用神经网络技术实现了焊缝缺陷的分类^[10]; 德国汉堡的 T. Just 和 W. Thale 等人运用数字图像处理技术, 实现了对焊缝 X 射线底片的自动分析和缺陷识别^[11]; 白俄罗斯飞行器焊接及表面涂层技术研究所的 A. E. Kapustin 和 I. I. Bardusova 等人也研究了焊缝底片的计算机辅助识别技术^[12]。另外, 法国、乌克兰和英国等都对此领域进行了卓有成效的研究工作, 并在 1999 年柏林召开的“CT 在工业中的应用及 X 射线照相中的图像处理”会议上发表了相关的研究论文^[13~15]。

3 焊缝 X 射线实时成像结果的计算机辅助评定

射线实时成像检验技术, 是实时地将射线照相的强度分布转换成可见光图像并对检验结果作出评定的技术。目前用于生产实际的射线实时成像检验系统主要有图像增强实时成像检验系统和数字实时成像检验系统。

图像增强实时成像检验系统的工作原理及设备前已述及。对于该种实时成像检验系统形成的图像进行自动分析的研究工作, 国内已开展了多年, 如清华大学的任大海和尤政、天津大学的孙长库和叶声华等人均在此领域进行了多年的研究工作, 运用数字图像处理技术和神经网络技术建立了焊缝 X 射线实时成像自动分析系统, 现已应用于实际焊缝检验, 取得了良好的效果^[16]。广东粤海钢瓶厂曾祥照、彭志华等同志在此方面亦进行了一些研究工作, 他们研制了图像增强实时成像的图像辅助评定软件, 用于对焊缝检测图像的辅助评定, 使焊缝缺陷评定工作准确性和速度大大提高, 评定结果纳入检测数据库管理^[17]。

在国外, 法国 IUT 无损检测技术实验室的 C. Gueudré 和 J. Moysan 等人运用边缘检测和区域检测相结合的方法, 能够较好地从射线实时成像系统获取的图像中将焊接区域分离出来, 通过对焊接区域图像的分析, 实现对焊接过程的自动控制^[18]; 印度 Sri Venkateswara 工程学院电气电子工程系的 Hemanth Jagannathan 和 Narayana Bhaskar 等人为焊缝 X 射线实时图像的自动分析与识别研究了基于数字图像处理的新算法, 运用这些算法对图像进行预处理, 将处理结果再利用神经网络算法进行分类, 最后得出焊缝缺陷的类型、长度、面积和其他一些供分析用的必要的参数^[19]; 德国飞利浦工业 X 射线公司(Philips Industrial X Ray)为俄罗斯 OJSC‘ MSZ’(专门生产核燃料和快速反应堆的单位)生产了 MU80F 半自动 X 射线检测系统, 并已装入核燃料装置生产线, 用于检测核燃料装置上焊缝缺陷的尺寸及数量^[20]。印度 BHEL 无损检测实验室的 R. J. Pardikar 在锅炉焊缝 X 射线检测实时成像系统中运用图像处理技术, 大大提高了缺陷检测效率^[21]。

在数字实时成像检验系统中, 射线转换器采用平板探测器, 其动态范围可大于 2000: 1, 极限分辨率达 4 lp/mm, 是一种很有前途的数字实时成像检验系统。由于该种平板探测器价格昂贵, 达 100 000 美元左右, 因此, 该种数字实时成像检验系

统在国内工业中几乎还未得到使用。然而,这种系统在美国、德国、法国和日本等国家已得到广泛的应用。德国 SERFEIT 公司和 YXLON 公司均运用该种数字实时成像检验系统,研制成功了全自动工业 X 射线检测系统,用于快速检验批量生产的铸铝件。进入这种全自动检测系统的工件由传送带送入,检测完成后由计算机系统自动分析其数字图像,自动标记零件缺陷位置并判断零件合格与否,然后将合格与不合格的零件分别从不同的出口送上不同的传送带^[22]。

4 结束语

国内焊接质量的 X 射线检测,包括对激光焊、等离子弧焊和电子束焊等焊缝的检测,均采用传统的 X 射线胶片照相技术。对于未焊透和气孔等缺陷的检测,胶片照相不但可以保证可靠检出微细缺陷,而且具有良好的可视性。但是,胶片照相的检测周期长,无法实现焊接过程的实时、在线(或快速)检测和质量监控;另外,由于胶片照相不可能全方位进行,对于那些对射线方向敏感的缺陷有可能漏检。为了解决上述问题,X 射线数字实时成像(Digital Radioscopy)或 X 射线数字照相技术(Digital Radiography)是焊缝 X 射线检测的发展方向。在应用 X 射线数字实时成像(照相)技术过程中,必须辅之以 X 射线数字图像自动分析技术,实现焊缝缺陷的自动识别。否则,X 射线数字实时成像检验技术就很难实现“实时检验”的目的,其优越性的发挥也将受到限制。

参考文献:

- [1] 薛迪甘. 焊接概论(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 1~4.
- [2] 中国机械工程学会无损检测分会. 射线检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 88~97.
- [3] 郑世才. 评片技术(II)[J]. 无损检测, 2000, 22(5): 229~236.
- [4] 李衍. 国外电脑评片技术的最新进展[J]. 无损探伤, 1997, (1): 1~6.
- [5] 李德元, 邵成吉, 徐鲁宁. 焊接缺陷自动检测中区分典型条形缺陷判据的建立[J]. 焊接技术, 1998, (1): 7~8.
- [6] 傅德胜, 郑关胜. 计算机对焊缝射线底片图像的处理与识别[J]. 微型电脑应用, 1998, (6): 42~45.
- [7] 何怡, 杨永才, 王海鹏. 焊缝底片计算机辅助识别的研究[J]. 无损检测, 2000, 22(12): 548~569.
- [8] Lashkia V. Defect detection in X-ray images using fuzzy reasoning [J]. Image and Vision Computing, 2001, 19(5): 261~269.

- [9] Jacobsen C, Zscherpel U. Automated evaluation of digitized radiographs with neuronal methods[A]. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiography[C]. Berlin: DGZfP proceedings, 1999. 141~152.
- [10] Nacereddine Nafa, Drai Redouane. Weld defect extraction and classification in radiographic testing based artificial neural networks [A/CD]. Proceeding of 15th WCNDT, ROMA, 2000.
- [11] Just T, Thale W, Clausen R, et al. Interpretation of radiographs by digital image processing [J/OL]. The E—Journal of Nondestructive Testing, 1998, 3(10).
- [12] Kapustin A E, Bardusova I I. Computer technologies and X—ray flaw detection of welds [A/CD]. Proceeding of 15th WCNDT, ROMA, 2000.
- [13] Lavayssiére B, Bonin A, Gautier S. New development in industrial radiography [A]. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiography[C]. Berlin: DGZfP Proceedings, 1999. 115~121.
- [14] Palenichka R M, Alekseichuk A V. Flaw detection in radiographic images by structure—adaptive binary segmentation[A]. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in radiography[C]. Berlin: DGZfP Proceedings, 1999. 221~232.
- [15] Haase O, Goebels J, Bailey M. High energy tomography and crack recognition [A]. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiography[C]. Berlin: DGZfP Proceedings, 1999. 233~239.
- [16] 任大海, 尤政, 孙长库, 等. 焊缝 X 射线实时成像自动分析系统[J]. 焊接学报, 2000, 21(1): 60~63.
- [17] 曾祥照, 罗佩. X 射线实时成像在焊缝探伤中的应用[J]. 焊接, 2000, (1): 29~30.
- [18] Gueudé C, Moysan J, Comeloup G. Weld quality control by radioscopy using ‘edge and area’ segmentation method [A/CD]. Proceeding of 15th WCNDT, ROMA, 2000.
- [19] Hemanth Jagannathan, Narayana Bhaskar. A step towards automatic defect pattern analysis and evaluation in industrial radiography using digital image processing[A/CD]. Proceeding of 15th WCNDT, ROMA, 2000.
- [20] Dau H D. Digital image processing in X—ray control of welds [J/OL]. The E—Journal of Nondestructive Testing, 1998.
- [21] Pardikar RJ. Real time radioscopy and digital image processing techniques for on—line inspection of welds in boiler tubes[A/CD]. Proceeding of 15th WCNDT, ROMA, 2000.
- [22] Domingo Mery, Nejila Pauspour. Improvement in automated aluminum casting inspection by finding correspondence of potential flaws in multiple radioscopic images [A/CD]. Proceeding of 15th WCNDT, ROMA, 2000.

作者简介: 周正干,男,1967年5月出生,湖南湘潭人。分别于1987年和1992年在哈尔滨工业大学机械工程系获学士、博士学位。现任北京航空航天大学机械工程及自动化学院副教授。主要研究方向为计算机测控技术和数字图像处理技术等。研制的电火花线切割机床系统曾获航天工业总公司科技进步二等奖,在国内外公开发表学术论文30余篇。

Email: zhenggan@sina.com