

新一代 X 射线探测器在射线实时成像检测中的应用

李 衍

(无锡华光锅炉股份有限公司, 无锡 214028)

摘 要:介绍非晶硅(a-Si)平板探测器的技术特性,及其取代常用的图像增强器在焊缝和铸件的工业射线实时成像(RTR)检测中的应用。试验结果证明,选用适当型号的 a-Si 平板探测器,可获得优于图像增强器的像质计(IQI)灵敏度和空间分辨率。

关键词:非晶硅(a-Si);平板探测器;图像增强器;射线实时成像;射线直接数字成像;像质计灵敏度;空间分辨率

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)09-0488-03

Application of a New Generation of X-ray Sensitive Detectors in Real-time Radioscopic Inspection

LI Yan

(Wuxi Huaguang Boiler Co., Ltd, Wuxi 214028, China)

Abstract: The technical properties of a new generation of X-ray sensitive detectors — amorphous silicon (a-Si) flat-panel detectors were introduced. The new detectors could be in lieu of the usual image intensifier in X-ray real-time radioscopic (RTR) system for inspecting welds or castings. Experimental results showed that a suitable a-Si detector could achieve better IQI sensitivity and spatial resolution than an image intensifier. It's another new breakthrough bring the industrial direct digital radiography into the practical domain.

Keywords: Amorphous silicon(a-Si); Flat-panel detector; Image intensifier; Real-time radiography; Direct digital imaging; IQI sensitivity; Spatial resolution

射线实时成像(RTR)有在线、快速、高效、经济、动态和多方位检测等诸多优点,是工业射线无损检测重要发展方向。

近年来,新一代 X 射线探测器——非晶硅(a-Si)平板探测器的问世,使像质计灵敏度和空间分辨率得到了很大提高,而动态范围也得到了扩大(12~16 bit)。

下面对射线直接数字成像的关键硬件即非晶硅平板探测器的主要技术特性及其应用作一简介,并与以往常用的图像增强器作一比较,得出该平板探测器的灵敏度和空间分辨率优于原图像增强器。

1 射线实时成像系统组成和应用

1.1 系统组成

小焦点(0.1~0.5 mm)射线源发出给定能谱的 X 射线束,穿过一定材质和厚度的试件时,因试件结构和内部缺陷造成不同程度的衰减,含不同强度信息的射线图像被 X 射线探测器——图像传感器捕获。通常,图像传感器将强度分布不一的射线图像,转变成灰度层次与之相应的可见图像。而后由操作者在显示器监视屏上,根据图像细节的形貌特征,对试件质量进行近实时观测、分析和评价(缺陷定性、定量、定位和定级)。

一般用图像增强器作图像传感器时,要通过摄像管和模数转换器将视频信号变为数字信号,而后用计算机进行数字图像处理,以便达到标准所要求

收稿日期:2005-03-14

作者简介:李 衍(1940~),男,高级工程师。ASME 产品责任工程师,负责重大和出国产品的无损检测工作。

的像质计灵敏度和系统分辨率。但最近欧美已开始采用高性能的非晶硅即 a-Si 平板探测器取代图像增强器作图像传感器,不需摄像管和模数转换器,可直接输出数字信号。

1.2 应用特点

射线实时成像系统的图像空间分辨率 RP 或不清晰度 U_i 靠几何放大率 M 来调整,而焦点尺寸 d_f 给定后的几何放大率则取决于两个距离之比,即 F/f ,其中 F 为焦点至探测器距离; f 为焦点至工件距离。应用时,以下五个参数的设定特别重要

$$\text{几何放大率} \quad M = \frac{F}{f}$$

$$\text{几何不清晰度} \quad U_g = \frac{d_f(F-f)}{f}$$

$$\text{或} \quad U_g = d_f \frac{F}{f-1}$$

$$\text{或} \quad U_g = d_f(M-1)$$

$$\text{总不清晰度} \quad U_t = (U_g^2 + U_i^2)^{1/2}$$

$$\text{系统分辨率} \quad RP = \frac{1}{U_t}$$

$$\text{最佳放大率} \quad M_{opt} = 1 + (U_i/d_f)^2$$

在以往数十年间,用图像增强器作探测器的射线实时成像在工业上已得到广泛应用。该系统一靠图像增强器对光电转换后的射线检测图像作高倍电子放大,提高了输出图像亮度;二靠小焦点 X 射线和适当的透照布置作几何放大,提高了图像清晰度和细节分辨力;三靠计算机的数字图像处理(多帧叠加、降噪、滤波和场平整等),提高了图像信噪比和对比度。它已成功用在特种设备小口径薄壁管的在线检测及金属铸件的快速连续检测上。

用非晶硅(a-Si)平板探测器取代图像增强器是近年来出现的一项高新技术,它能直接输出数字信号。与图像增强器相比,平板探测器的优点是无需另加摄像机,因而避免了通常由光学传输与信号采集对图像质量的影响。

2 不同探测器的技术特性比较

目前,常用的射线实时成像系统的探测器,由图像增强器和电荷耦合(CCD)摄像机构成。表 1 比较了四种非晶硅(a-Si)平板探测器与图像增强器的一些重要技术特性。四种平板探测器中,两种为灵敏度不同的 RID 512 AL1 型和 RID 512 AL2 型,另两种为 Pax 扫描 2520 HR 型(高分辨率型)和 Pax 扫描 2520 RT 型(实时型)。

由表 1 可见,四种平板探测器与图像增强器的技术特性高低不一。RID 系列探测器动态范围非常大(是 Pax 系扫描探测器的 7 倍,图像增强器的 14 倍),又有 16bit 灰度值的分辨率,故特别适于轻合金铸件检验。Pax 系列扫描探测器选用高分辨率(HR)型时,能为对接接头对接焊缝的检验提供理想条件。只要通过像素芯距变换降低分辨率,Pax 系列扫描探测器还能以每秒 25/30 帧的实时模式工作。因有较宽的动态范围和 12bit 灰度值的分辨率,该探测器也能取代图像增强器,用于铸件检验。

3 像质计(IQI)灵敏度评价

图 1 表示透检不同铝合金厚度时,用 RID 系列平板探测器可达到图像增强器用数字增强法所获得的 IQI 灵敏度,且与读出速率无关。这就表明该平板探测器适合于轻合金铸件的 RTR 检验。

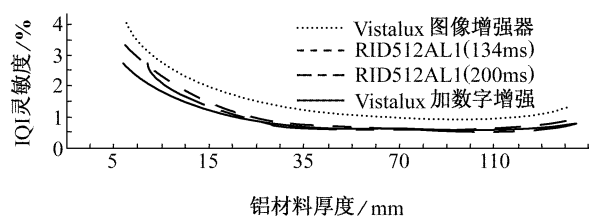


图 1 RID 系列平板探测器与图像增强器的 IQI 灵敏度比较(铝合金)

图 2 表示透检铝合金时,用实时型和高分辨力

表 1 几种平板探测器与图像增强器的特性比较

探测器		闪 烁 体	输出屏尺寸 mm	像素矩阵	像素芯距 μm	空间分辨率 Lp/mm	动态 范围	A/D 转换 bit	每秒 帧数	重量 kg
图像增强器和 CCD 摄像机		CsI	ϕ 215(9 in)	—	—	1.8~2.0	1 000	8	25/30	36
平 板 探 测 器	RID 512 AL1	Lanex(CsD)	205×205	512×512	400	1.4	14 000	16	7	8
	RID 512 AL2	Lanex(CsD)	205×205	512×512	400	1.4	14 000	16	7	8
	Pax 扫描 2520 HR	Lanex(CsD)	244×195	1920×1536	127	3.9	2 000	12	5	8
	Pax 扫描 2520 RT	Lanex(CsD)	244×195	1920×1536	254	1.9	2 000	12	25/30	8

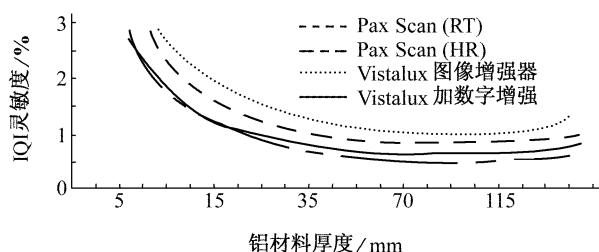


图 2 Pax 系列扫描探测器与图像增强器的 IQI 灵敏度比较(铝合金)

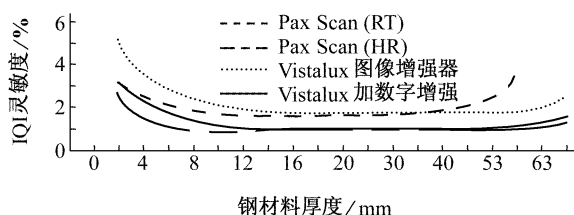


图 3 Pax 系列扫描探测器与图像增强器的 IQI 灵敏度比较(钢)

型两种 Pax 扫描探测器可获得的 IQI 灵敏度。

可见用实时型时,平板探测器还达不到图像增强器用数字增强法所获得的灵敏度;但用高分辨率型时,前者灵敏度优于后者。图 3 是透检钢铁材料时 IQI 灵敏度的比较,表明高分辨率型平板探测器对焊缝检验有一定优势。

注意,这些 IQI 灵敏度测量值并不等于实际缺陷的检出灵敏度,因此对其两者实际相关性作了进一步验证。

4 试验验证

对壁厚 5~35 mm 的铝合金铸件按实际条件进行 RTR 检验,RID 平板探测器的 IQI 灵敏度显然最好。为防散射边蚀效应吞噬图像质量,通常图像增强器要作重度预滤波处理,因而导致 IQI 灵敏度明显低于前述测量值。

用 RID 平板探测器也要作预滤波处理,但只需中等程度的预滤波,因此可在动态范围很大的前提下,IQI 灵敏度依然领先于数字法增强的图像增强器。而且,该平板探测器特别适合于铸件的全自动化检验。

单壁法透检壁厚 10 mm 钢试件,用高分辨率型 Pax 扫描检测器时,完全能达到胶片法射线照相检验标准(欧洲标准 EN 444, EN 462 和 EN 1435)对 IQI 灵敏度的要求,也能满足射线实时成像检测专用标准(EN 13608 第 3 部分)规定的像

质双指标要求(等比丝 IQI 灵敏度和 Pt-W 双丝 IQI 总不清晰度),即显示器上可显示等比丝号 W14(丝径 ϕ 0.16 mm)、Pt 双丝号 9D(总不清晰度 $U_t = 0.26$ mm),如表 2 所示。

表 2 射线实时成像透检钢材时要求达到的像质水平 (EN 13068 第 3 部分规定)

检测等级	系统等级	穿透厚度/mm	等比丝 IQI		双丝 IQI	
			丝号	丝径 ϕ /mm	组号	U_t /mm
SA 级 ¹⁾	SC 2 级 ²⁾	1.2~2.0	W17	0.08	11D	0.16
		2.0~3.5	W16	0.10	10D	0.20
		3.5~5.0	W15	0.13	9D	0.26
		5.0~7.0	W14	0.16	8D	0.32
		7.0~10	W13	0.20	7D	0.40
		10~15	W12	0.25	7D	0.40
		15~25	W11	0.32	7D	0.40
		25~32	W10	0.40	7D	0.40
		32~40	W9	0.50	7D	0.40
		40~55	W8	0.63	7D	0.40
		55~85	W7	0.80	6D	0.50
		0~1.5 ⁵⁾	W19	0.050	13D	0.10
		1.5~2.5 ⁵⁾	W18	0.063	12D	0.13
		2.5~4.0 ⁵⁾	W17	0.080	11D	0.16
SB 级 ³⁾	SC 1 级 ⁴⁾	4.0~6.0 ⁵⁾	W16	0.100	10D	0.20
		6.0~8.0	W15	0.130	9D	0.26
		8.0~12	W14	0.160	9D	0.26
		12~20	W13	0.200	9D	0.26
		20~30	W12	0.250	9D	0.26
		30~35	W11	0.320	9D	0.26
		35~45	W10	0.400	9D	0.26
		45~65	W9	0.506	9D	0.26

注:1) SA 级为普通级。2) SC2 级要求检测器固有不清晰度 $U_i \leq 0.5$,失真度 $V_{d_i} \leq 10\%$,均匀度 $H_{d_i} \leq 20\%$ 。3) SB 级为优化级。4) SC1 级要求 $U_i \leq 0.4$, $V_{d_i} \leq 5\%$, $H_{d_i} \leq 10\%$ 。5) 壁厚 $T \leq 6$ mm 时,按 SB 级达到所需几何放大率有困难时,经合同双方商定,所要求的双丝组号可减小 1。

为满足上述表 2 中规定的要求,Pax 扫描探测器需选用的几何放大率 M 约为 1.4。有文献指出,用高分辨力型 Pax 扫描探测器可检测的最大钢焊缝厚度为 160 mm。

与之相比,用常用的图像增强器加数字增强法 (下转第 492 页)

即当 $BE > BD$ 时, O_1E 才有可能与 O_2D 相交, 下面分别计算 BE 段和 BD 段的长度。

在三角形 BO_1E 中

$$BE = O_1B \cdot \frac{\sin\left(180^\circ - \frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta}{2} - \theta_{\max}\right)} =$$

$$r \cdot \frac{\sin\left(180^\circ - \frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta}{2} - \theta_{\max}\right)} = 1.19b$$

$$r = 0.69b \quad \beta = 63.43^\circ (\text{见原文})$$

在三角形 BO_2D 中

$$BD = O_2B \cdot \frac{\sin\alpha}{\sin(180^\circ - \theta_{\max} - \alpha)} =$$

$$R \cdot \frac{\sin\alpha}{\sin(180^\circ - \theta_{\max} - \alpha)} = 2.51b$$

$$R = 3.62b \quad \alpha = 26.57^\circ (\text{见原文})$$

可见 $BE < BD$, 即 O_1E 与 O_2D 没有交点, 对于该种椭圆形封头无法进行一次曝光检测, 而只能对三段圆弧分别进行检测, 至少应进行三次曝光。

3 结论

原文中采用一次曝光进行检测是在降低 K 值要求的基础上完成的, 封头拼接焊缝射线检测比较特殊, 椭圆曲线上各部分曲率是变化的, 为保证检测质量必须严格控制 K 值, 不能为减少曝光次数而降低对 K 值的要求, 椭圆形封头拼接焊缝的检测至少要进行三次曝光, 对于公称直径比较大的椭圆形封头则应综合考虑透照焦距和透照电压, 适当增加曝光次数以提高射线检测的灵敏度, 确保检验质量。

(上接第 490 页)

进行检测, 不仅要求几何放大率为 2, 还需对输入屏进行调焦, 且必须采用数字增强法。可检最大钢焊缝厚度为 64 mm。

5 结论

(1) 射线实时成像检测可用非晶硅(a-Si)平板探测器取代以往常用的图像增强器加 CCD 摄像机, 此新型非胶片检测器既适用于厚度宽容度大的铸件检验, 也适用于分辨率要求高的焊缝检验。

(2) 实际试验和应用表明, 针对被检试件特点选用最合适的非晶硅探测器(实时型或高分辨率型), 相比于图像增强器加数字增强法, 可取得更为优异的检测效果。

参考文献:

- [1] Purschke M. IQI- sensitivity and applications of flat-panel detectors and X-ray image intensifiers — a comparison[J]. INSIGHT, 2002, 44(10): 628—630.
- [2] Mohr GA. GE a-Si flat-panel detector performance in industrial digital radiography[J]. INSIGHT, 2002, 44(10): 631—633.
- [3] EN 13068—3:1999, Non-destructive testing—Radioscopic testing - Part 3: General principles of radioscopic testing of metallic materials by X- and gamma rays[S].
- [4] EN 13068—1:1999, Non-destructive testing—Radioscopic testing-Part 1: Quantitative measurement of imaging properties[S].

2006 年全国无损检测学会电磁(涡流)专业委员会年会胜利召开

由全国无损检测学会电磁(涡流)专业委员会主办, 华中科技大学承办的 2006 年全国无损检测学会电磁(涡流)专业委员会年会于 2006 年 8 月 4—7 日在湖北宜昌市召开。我国钢丝绳漏磁检测的先驱者、中国科学院杨叔子院士为会议论文集作序。全国无损检测学会副理事长沈功田和任吉林、总干事徐永昌、电磁(涡流)专业委员会主任林俊明及来自全国各行业的 47 名代表参加了会议。

本次会议旨在交流近年来我国在电磁(涡流)无损检测方面的最新理论、最新技术以及应用过程中和实际工作中取得的成果, 探讨研究电磁(涡流)技

术的现状、发展方向及如何走具有中国特色的自主创新道路。本次年会共收到论文 50 余篇, 其中, 有关磁记忆的论文 19 篇、涡流 22 篇、漏磁 6 篇以及其它 8 篇, 出版论文摘要集 1 本, 论文集光盘 1 张。

本次会议的圆满召开, 再次反映了我国电磁(涡流)无损检测技术的飞速发展, 新理论、新技术、新方法不断涌现, 呈现了“百家争鸣, 百花齐放”的局面, 并且在各行各业得以应用。让我们携手共进, 共同努力, 为 2008 年即将在我国召开的世界无损检测大会增光添彩。

(全国无损检测学会电磁(涡流)专业委员会)