

试验研究

# X 射线实时成象在液化气钢瓶 焊缝探伤中的应用

曾祥照

(广东粤海钢瓶厂,南海 528247)

简志良

(佛山市锅炉压力容器检验所,佛山 528000)

**摘要** X 射线实时成象是可代替常规 X 射线胶片照相探伤的一项新兴的无损检测技术。概述了 X 射线实时成象技术在液化石油气钢瓶焊缝探伤中的应用,包括 X 射线实时成象检测系统的设备、检测方法和检测结果评价。

**关键词** 射线检验 成象 计算机 图象 焊缝

## APPLICATION OF X-RAY REAL-TIME IMAGING TO THE INSPECTION OF THE WELDED SEAMS IN LIQUEFIED PETROLEUM GAS CYLINDERS

Zeng Xiangzhao

(Guangdong Yuehai Steel Container Plant)

Jian Zhiliang

(Foshan Boiler & Pressure Vessel Inspection Institute)

**Abstract** X-ray real-time imaging is a new technique that can replace conventional X-ray film photographic inspection. The application of the technique to the inspection of the welded seams in liquefied petroleum gas cylinders are described including the equipments, examination technique and result evaluation of X-ray real-time imaging system.

**Keywords** Radiographic inspection Imaging Computer Image Weld

在计算机技术飞速发展的今天,X 射线实时成象无损检测技术应运而生。X 射线透过金属材料后经图象增强器将隐含的 X 射线信号转换为可见图象,此图象经摄像机摄取后输入计算机进行模/数转换,形成数字化图象,按一定格式储存在计算机硬盘内并显示在屏幕上。数字化图象能够提供有关金属材料表面及内部缺陷的性质、大小和位置等信息,运用计算机程序按有关标准进行辅助评定,从而达到无损检测之目的。数字图象的质量可与 X 射线照相底片相媲美,用它可代替照相底片并在计算机光盘上保存。X 射线实时成象无论在检测效率、经济效益、表现力、远程传送及方便实用等方面均具有优越性,因而有良好的发展前景。本文介绍本厂在液化石油气钢瓶焊缝探伤中应用 X 射线实时成象技术的情况。

### 1 YSP-15 型液化石油气钢瓶焊缝探伤要求

YSP-15 型液化石油气钢瓶属二类压力容器,其内径为 314mm,壁厚为 3mm,环焊缝为加垫板单面自动焊。按 GB5842-1996《液化石油气钢瓶》标

准规定,每连续生产 50 只抽取一只进行 X 射线探伤;按 JB4730-94《压力容器无损检测》标准进行焊缝缺陷评定,Ⅲ级为合格;X 射线实时成象检测方法按 LD108-1998《气瓶对接焊缝 X 射线实时成象检测》专业标准<sup>[1]</sup>执行;按《气瓶监察规程》规定,钢瓶制造由所在地锅检所进行监检。

### 2 实时成象检测设备

本厂 X 射线实时成象系统主要由 X 射线机、图象增强器、光学镜头、电视摄像机、计算机系统、图象处理单元、图象显示器和图象储存单元及检测工装等设备组成。使用国产 XG-3BX160-4 型恒压式、小焦点、强制水循环冷却 X 射线探伤机,射线管焦点尺寸为 0.4mm×0.4mm,图象增强器直径为 230mm/150mm,经实际测定系统设备分辨力为 1.4 Lp/mm。

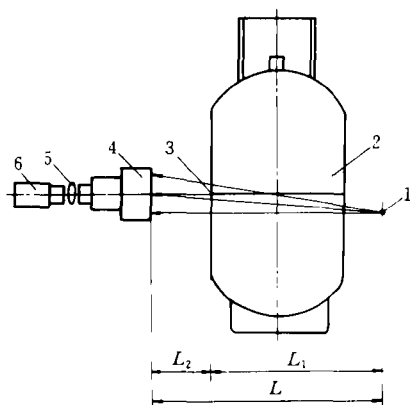
计算机系统配有三台 PC 机,一台用于图象摄取,一台用于图象辅助评定,另一台作为计算机服务器,用 Windows NT4.0 网络来管理图象摄取和辅助评定计算机。计算机的基本配置为 586 主板、

233M CPU、32MB 内存、4.3GB 硬盘、43.18cm (17in.) 0.25mm 逐行彩显(其中服务器的显示器为 35.56cm (14in.) 0.28mm 彩显)、1.44MB 软驱和 24 速光驱;图象摄取计算机另配 768×576 线图象采集卡;图象辅助评定计算机另配 CD 光盘刻录机;探伤室计算机系统配一台打印机。

### 3 实时成象检测方法

#### 3.1 成象装置

具体成象装置见附图。



附图 钢瓶检测图象放大原理图

1. X 射线管焦点 2. 钢瓶 3. 被检焊缝
4. 图象增强器 5. 光学镜头 6. 摄象机

#### 3.2 象质计、分辨力测试卡和长度标尺的放置

X 射线实时成象检测工艺具有连续检测、工艺稳定及一次检测长度较短等特点,没有必要也不可能每一幅图象都放置一个象质计、分辨力测试卡和长度标尺,根据 LD108—1998 标准规定,在透照工艺保持不变的前提下,每条焊缝中前三幅图象分别放置象质计、分辨力测试卡和长度标尺。只要图象中的象质指数、图象分辨力达到规定的要求,则表示该条焊缝的图象质量合格。铅质长度标尺则是测量检测长度的客观标志,因为检测图象是放大的,有必要在焊缝上放置一把长度标尺与焊缝一同成象,这样就可以用计算机在显示屏上直接测量焊缝的长度或缺陷的长度,测量误差为±0.1mm。

#### 3.3 透照参数

实测钢瓶双壁单带垫板加上焊缝余高的透照厚度为 12.5mm,管电压为 125kV,管电流为 4mA,放大倍数  $M=1.7$ ,钢瓶置于工装上。一条焊缝的多幅图象实行连续摄取,中间不切断高压,摄取一幅图象所需时间约 6~10s,其中焊缝静止进行图象处理的时间约 3~6s,焊缝转动 1/15 圆周时间约 3~4s。

试验表明,对于钢瓶焊缝双壁单影成象工艺,当放大倍数  $M < 2.0$  时,宜取近图象增强器的焊缝为检测焊缝,当放大倍数  $M \geq 2.0$  时,宜取近射线源的焊缝为检测焊缝。由于母材与焊缝的厚度差较大,双壁单影透照时对比度较难控制,需对厚度差进行补偿,或用滤板滤掉部分低能射线,以降低对比度。

#### 3.4 透照方式

透照方式采用双壁单影方式,透照倾角为  $5^\circ$ ,以靠近图象增强器的焊缝为检测焊缝,考虑到钢瓶的直径和射线管的尺寸,取  $L_1=400\text{mm}$ ,则

$$L_2 = (M - 1)L_1 = (1.8 - 1) \times 400 = 320\text{mm}$$

#### 3.5 检测工装

检测时将钢瓶置于工装上,工装按 1/15 圆周转动一次,摄取一幅静止的图象后再转一次,直至整条焊缝检测完毕。工装每转动一次,焊缝位移偏差  $\leq 2.0\text{mm}$ ,检测一幅图象所需的时间视计算机处理速度和工装转动速度而定,通常为 5~10s。

#### 3.6 计算机操作程序

在 Windows 95 中文平台的基础上开发 X 射线实时成象检测操作程序及其检测结果辅助评定程序。计算机操作程序窗口界面,中文提示,探伤人员经过培训均能操作。

##### 3.6.1 检测操作程序

检测操作程序具动态普查/静态摄象、图象摄取、降噪处理、亮度/对比度调节、图象尺寸调节、局部放大显示、图象保存、图象转储、图象删除、图象打印及图象编号自动记录等功能。检测时将钢瓶置于检测工装上,开启计算机和 X 射线机,在显示屏上即可看到检测图象,按照程序的中文提示,就能进行检测操作。

##### 3.6.2 辅助评定程序

计算机辅助评定是按照 JB4730—94 标准中的焊缝射线探伤规定的要求,编制计算机评定程序,对焊缝的缺陷进行定量和定级。缺陷的定性以取得 RT II 级以上资格人员的评判为准,其结果很大程度上取决于评定人员的专业水平和工作经验;缺陷的定量和定级由计算机来完成。评定结果由数据库管理,评定报告由计算机打印,大大地提高了焊缝检测结果的评定速度和准确性。

#### 3.7 检测图象的保存

检测图象暂储在计算机硬盘上,待储存到足够数量(如  $\geq 600\text{MB}$ )后,通过刻录机备份到 CD 只读光盘上,或由 MO 驱动器(磁光盘驱动器)拷贝到 MO 可擦写磁光盘上,通常备份一式两份,一份用于正常的评定、资料检索及锅检所监督等,另一份作为

档案长期保存。光盘保存的是数字量而不是模拟量,只要保存得当,数字是不会丢失的。光盘与胶片相比,具有容量大、价格低廉且保存期长(不少于 50a(年))等优点,可大大降低检测成本,完全能适应无损探伤的要求。

### 3.8 实时成象的特点

X 射线实时成象检测法虽可沿用或借鉴 X 射线胶片照相探伤法的一些概念和方法,但又存在一些区别。

X 射线实时成象检测图象与照相底片最大的区别是其图象是放大的。由于接收射线信号的图象增强器是金属制品,不可能象柔软的胶片那样紧贴在被检工件表面上,因此,被检工件必定置于 X 射线源与图象增强器之间,从几何投影原理可知,检测图象是放大的(附图)。

另外,由于显示器屏幕的象素尺寸不及胶片乳剂颗粒那么细微,为了提高细小缺陷的检出灵敏度,需要把图象放大。理论和实践证明,图象放大倍数过大或过小都会使图象清晰度下降,因此必然存在一个最佳放大倍数。根据成象理论可推导出最佳放大倍数  $M_{opt}$  和最小检出缺陷尺寸  $d_{min}$  公式

$$M_{opt} = 1 + \left( \frac{U_s}{d} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$d_{min} = \frac{U_s}{M^{\frac{3}{2}}}$$

式中  $U_s$ ——系统设备的不清晰度,mm

$d$ ——X 射线管的焦点尺寸,mm

$M$ ——图象放大倍数

系统设备的不清晰度可以用图象分辨力测试卡在显示屏上测试出来。测试卡由若干组金属栅条组成,两根栅条的间距等于栅条的宽度,一根金属栅条与一个间距构成一个线对,分辨力的单位是每毫米线对(Lp/mm)。图象清晰度与图象分辨力的换算关系是互为倒数的二分之一。测试时将测试卡紧贴在图象增强器输入屏(或工件焊缝)表面上,开启 X 射线机和计算机,直接在屏幕上观察测试卡的影象,当观察到金属栅条的影象与间距刚好重合时,栅条的宽度即为图象不清晰度;当观察到两根金属栅条的影象刚开始重新分离时,栅条宽度即为图象清晰度。图象不清晰度与图象清晰度的差值等于分辨力测试卡各组栅条数列的级差。

### 3.9 成象参数

#### 3.9.1 成象系统的固有不清晰度

已知设备系统分辨力  $P_s = 1.4 \text{Lp/mm}$ ,测试卡各组栅条数列的级差  $P_{min} = 0.2 \text{Lp/mm}$ ,则成象系

统设备的固有不清晰度  $U_s$  为

$$U_s = \frac{1}{2} \times \frac{1}{P_s + P_{min}} =$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{1.4 + 0.2} = 0.313 \text{mm}$$

#### 3.9.2 几何不清晰度

几何不清晰度为

$$U_g = d \frac{F_2}{F_1} = d(M - 1) =$$

$$0.4 \times (1.7 - 1) = 0.283 \text{mm}$$

#### 3.9.3 图象不清晰度与图象分辨力

图象不清晰度为

$$U = \frac{U_0}{M} = \frac{(U_s^3 + U_g^3)^{\frac{1}{3}}}{M} =$$

$$\frac{(0.31^3 + 0.28^3)^{\frac{1}{3}}}{1.7} = 0.22 \text{mm}$$

由图象不清晰度换算成图象分辨力为

$$P = \frac{1}{2} \times \frac{1}{U} - P_{min} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{0.22} - 0.2 =$$

$$2.1 \text{Lp/mm}$$

根据 LD108-1998 标准规定,当透照厚度为 6~25mm 时,图象分辨力应  $\geq 1.8 \text{Lp/mm}$ 。

#### 3.9.4 最佳放大倍数

已知 X 射线管焦点尺寸  $d = 0.4 \text{mm}$ ,则图象检测的最佳放大倍数  $M_{opt}$  为

$$M_{opt} = 1 + \left( \frac{U_s}{d} \right)^{\frac{2}{3}} = 1 + \left( \frac{0.313}{0.4} \right)^{\frac{2}{3}} = 1.7$$

#### 3.9.5 放大倍数

(1) 放大倍数  $M$

$$M = \frac{F}{F_1} = \frac{F_1 + F_2}{F_1}$$

(2) 取成象放大倍数  $M$  等于图象检测的最佳放大倍数  $M_{opt}$ ,即

$$M = M_{opt} = 1.7$$

#### 3.9.6 图象可检测出的最小缺陷尺寸

$$d_{min} = \frac{U_s}{M^{\frac{3}{2}}} = \frac{0.313}{0.17^{\frac{3}{2}}} = 0.22 \text{mm}$$

#### 3.9.7 一幅图象的检测长度

试验表明,图象增强器输入屏直径较小时图象清晰度较高,故选用图象增强器输入屏的直径  $D_{in} = 150 \text{mm}$ ,则

$$L_s = \frac{D_{in}}{M} = \frac{150}{1.7} = 88 \text{mm}$$

考虑到一幅图象内预留一定的搭接长度,取有效检测长度  $L_{eff} = 68 \text{mm}$ 。

#### 3.9.8 一条环焊缝检测图象的幅数

钢瓶焊缝外径  $D=324\text{mm}$ , 则一条环焊缝检测图象的幅数  $N$  为

$$N = \frac{\pi D}{L_{\text{eff}}} = \frac{3.1416 \times 324}{68} = 15(\text{幅})$$

### 3.9.9 焊缝的透照厚度比 $K$ 值校核

$$\theta = \tan^{-1} \frac{0.5L_{\text{eff}}}{L_1} = \tan^{-1} \frac{0.5 \times 68}{400} = 4.86^\circ$$

$$K = \frac{T'}{T} = \frac{1}{\cos\theta} = 1.004 < 1.1$$

符合 JB4730-94 标准的要求。

## 4 检测结果评价

### 4.1 图象质量

按以上工艺对钢瓶环焊缝进行连续检测时, 图象中的象质计可清晰地显示出第 13~14 号钢丝, 图象分辨力达到  $2.0 \sim 2.2\text{lp/mm}$ , 图象质量达到 LD108-1998《气瓶对接焊缝 X 射线实时成象检测》专业标准规定的要求。

### 4.2 焊缝缺陷检出符合性

为了进一步考核 X 射线实时成象检验的准确性, 随机抽取 30 只钢瓶同时进行 X 射线实时成象检验和胶片照相检验, 比较的结果是两者符合率为 99.3%, 底片上的气孔、点渣、条渣、未焊透、未熔合及裂纹等焊接缺陷在图象上均能发现, 只有一处特例, 即一段约 30mm 长的细微未焊透影象与显示器扫描线平行时难于发现, 瓶体稍作倾斜后再成象就可发现。为了提高焊缝缺陷检出率, 可从提高系统设备的分辨力来解决。

### 4.3 检测图象与照相底片的对比

X 射线实时成象检测图象质量可与胶片照相底片相媲美, 因图象放大后, 影象更清晰, 在显示屏上

(上接第 54 页)

位公差测量等新技术, 不仅在板形元件生产中得到成功应用, 而且可应用于其它核元件及部件的自动化精密测量与评价。

参加板形核元件无损检测技术研究的还有张志毅、邢传辉、李淑兰、龚薇、李慧丰、罗金海和王兆月等同志, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Nuclear Fuel Quality Assurance. UNDP/IAEA. Vienna: 1991.
- 2 He Fengqi. Portable radioscope system with  $^{252}\text{Cm}$  source for NDT of the nuclear fuel elements. Proc. of 13th WCNDT, Brazil: 1992. 30-33

可以正、负象随意翻转, 观察起来眼睛不会象观察底片那么疲劳, 检测图象无类似底片上伪缺陷现象存在, 更无底片报废的情况发生。

如一幅图象检测长度为 88mm (有效检测长度为 68mm), 则三幅图象的检测长度相当于一张  $240\text{mm} \times 80\text{mm}$  的底片 (有效检测长度为 204mm); 检测三幅图象只需 30s, 并且即时可看到检测结果, 而拍一张底片连暗室处理至少要 60min 后才能看到结果。

一张 650MB 容量的 CD 光盘可储存 3 000 幅图象, 相当于 1 000 张底片; 一张优质光盘目前市场价格不超过 50 元, 如果一张底片连冲洗药品费的成本按 5 元计算, 则实时成象的检测成本仅是胶片照相成本的 1%, 其经济效益不言而喻。

## 5 应用现状

X 射线实时成象是一项新兴的无损检测技术, 国内在钢瓶制造行业中首先试用。在总结国内五家钢瓶制造厂几年来试用该技术实践经验的基础上, 1998 年 3 月原国家劳动部批准并发布了 LD108-1998《气瓶对接焊缝 X 射线实时成象检测》专业标准, 使 X 射线实时成象检测方法纳入标准化轨道, 标志着该技术从试用阶段已逐步走向实际应用阶段。随着 X 射线实时成象检测技术的不断成熟和发展, 相信会有更多的单位应用该技术。

## 参 考 文 献

- 1 LD108-1998 气瓶对接焊缝 X 射线实时成象检测

收稿日期: 1997-11-20

- 3 王兆月. 检测板型元件轴均匀性的等效标准板. 核材料会议论文集, 成都: 四川科技出版社, 1991.
- 4 李淑兰, 何凤岐, 王庆恒.  $\text{U}_2\text{Si}_2\text{-Al}$  板型燃料元件表面铀污染量检测技术. 北京: 中国核情报中心原子能出版社, 1993.
- 5 He Fengqi. Computerized ultrasonic testing of MLC capacitors by impulse count method and image processing technique. Proc of 12th WCNDT, Amsterdam: 1989. 1599-1601
- 6 张志毅. 覆盖层厚度测量. 涡流检测教材. 成都: 核材料元件无损检测中心, 1991.
- 7 何凤岐等. 板型燃料组件综合尺寸自动化检测技术研究. 核材料会议论文集, 成都: 四川科技出版社, 1991.

收稿日期: 1997-12-12