

基于 CBS 的带保温层压力管道在线检测装置研制

丁克勤

丁厚本

(中国特种设备检测研究中心, 北京 100013) (合肥东方辐射技术开发公司, 合肥 230088)

摘要: 本文针对我国石油化工行业带保温层压力管道在线检测的问题, 基于 CBS 的技术原理, 研制开发了一种带保温层压力管道在线检测装置, 技术性能指标为: 检测管道直径范围不限; 保温层厚度 $\leq 145\text{mm}$; 钢材材料管壁厚度 $\leq 40\text{mm}$; 精度为 1.0mm 。文中简要阐述了该检测装置的基本原理、具体结构设计, 给出了外置铝皮带保温层 40mm 厚管道内表面双孔、单孔平面扫描实验的实验结果, 实验结果表明用该装置对实际管道的检测结果是精确的, 误差在允许的范围之内。

关键词: 带保温层压力管道, 在线, 检测, 康普顿背散射 (CBS)

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: B

Study on CBS On-line Inspection Apparatus of Pressure Pipeline with the Insulation

DING Ke-qin¹, DING Hou-ben²

(1. China special Equipment Inspection & Research Center, Beijing 100013, China;

2. Hefei Eastern Radiation Technique Development Co., Hefei 230088, China)

Abstract: With the problem of on-line inspection apparatus of pressure pipeline with the insulation in Chinese petroleum and chemical industry, a set of on-line inspection apparatus of pressure pipeline with the insulation based on CBS is developed in this paper. The main capability index of apparatus: the diameter scope of the inspected pipeline hasn't been limited; the insulation thickness is less more than 145mm ; the wall thickness of the steel pipeline is less more than 40mm ; the accuracy is 1.0mm . The basic principle and the exact structure design of the inspection apparatus has briefly explained in this text. It has also listed the double-hole and single-hole plane scanning experiment result of the inner-surface of the pipeline with 40mm thickness outer-laying aluminum scarfskin insulation. The experiment result has demonstrated when the apparatus is applied to inspect practical pipeline, the inspection result is very precise, and the error is in the allowance scope.

Key words: pressure pipeline with the insulation; on-line; inspection; Compton Backscatter Scanning (CBS)

1 引言

石油化工行业中带保温层压力管道的腐蚀、结垢、堵塞等一直困扰着石化企业的生产。在带保温层压力管道检修过程中, 存在的问题更加突出, 首先, 带保温层压力管道腐蚀、结垢检测没有适当手段, 难以制定更换管线方案及计划, 使得大部分检修只能依靠经验进行; 其次, 带保温层压力管道的腐蚀和结垢在线检测手段几乎是空白, 其检测也只有在停工检修、通过测厚进行, 往往要大量破坏压力管道的保温层, 且无法检出结垢及堵塞, 使得检修期十分紧张。而检修结果往往是检修工期紧、作

业多、停车时间延长;有的造成不必要的管道更换,有的该更换的管道却因发现问题不了而未及时更换,从而留下安全隐患。缩短检修时间,长周期运行已经成为石化企业增加经济效益的措施,企业对保温层压力管道的腐蚀、结垢、裂纹等隐患的在线检测手段的需求十分迫切。工业CT技术是集核物理学、核电子学、光学、电子学、计算机、工业自动化、机械学及图像技术于一体的高新技术,分为透射式和康普顿背散射(Compton Backscatter Scanning, CBS)扫描式两大类。本文基于康普顿背散射扫描技术,研制开发了带保温层压力管道CBS扫描成像在线检测装置样机,该装置具有轻便、在役、无须拆除保温覆盖层、单面检测、多功能等特点。其主要性能指标为:检测管道直径范围不限;保温层厚度 $\leq 145\text{mm}$;钢材料管壁厚度 $\leq 40\text{mm}$;精度为 1.0mm 。

2 基本原理

2.1 康普顿背散射(CBS)原理

依据 γ 射线与物质相互作用的康普顿散射效应,由被测物的单侧测量在不同位置、某特定散射角所对应的散射光子数,求出被测物质中的电子密度分布,经过一定数据处理或重建,得出被测物二维密度分布图像。进而根据要求处理得到被测物特定的物理指标,如密度、厚度或缺陷特征等。

CBS 技术原理与传统的透射吸收测量、工业 CT 相比,具有如下突出优点:

(1) 单侧测量,即 γ 射线源和探测器均可在被测物的单侧;(2) 对轻的物质,薄而多层材料,灵敏度高;(3) 不需要图像重建算法,只需将测得的光子数按照对应位置顺序排列起来,即可得到灰度图像。当然,它需要作出若干数据修正。

2.2 CBS 光子数计算公式

单次散射光子数为: $N_s = N_0 \cdot \Delta V \cdot \Delta \Omega \cdot (n_e \cdot ((dS(J))/d\Omega)) \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot h_1$

式中 N_0 --- 入射到被测物的光子数:

$$N_0 = [3.7 \times 10^{10} C / (4\pi r_1^2)] \cdot \Delta T \cdot z \cdot f$$

其中 C 为源的活度(C_i)、 r_1 为源到被测物中检测点的距离(cm)、 ΔT 为源照射时间(S)、 z 为源的利用系数、 f 为每次衰变产生的光子数。

ΔV --- 检测体积 (cm^3); $\Delta \Omega$ -- 源与探测器端面所张立体角 $\Delta \Omega = \Delta A / r_2^2$

ΔA --- 探测器有效接收面积(cm^2);

r_2 --- 被测物中的检测点到探测器的距离(cm)

$$f_1 = e^{-m_1 d_1} \quad f_2 = e^{-m_2 d_2}$$

n_e --- 电子密度,即被检测体积中单位体积的电子数(e/cm^3)

3 工作原理示意图

本文基于 CBS 研制的带保温层压力管道在线检测装置的工作原理示意图如图 1 所示(参见:丁克勤等著.带保温层压力管道在线检测装置研制.“十五”国家科技攻关课题研究报告,2003.)。

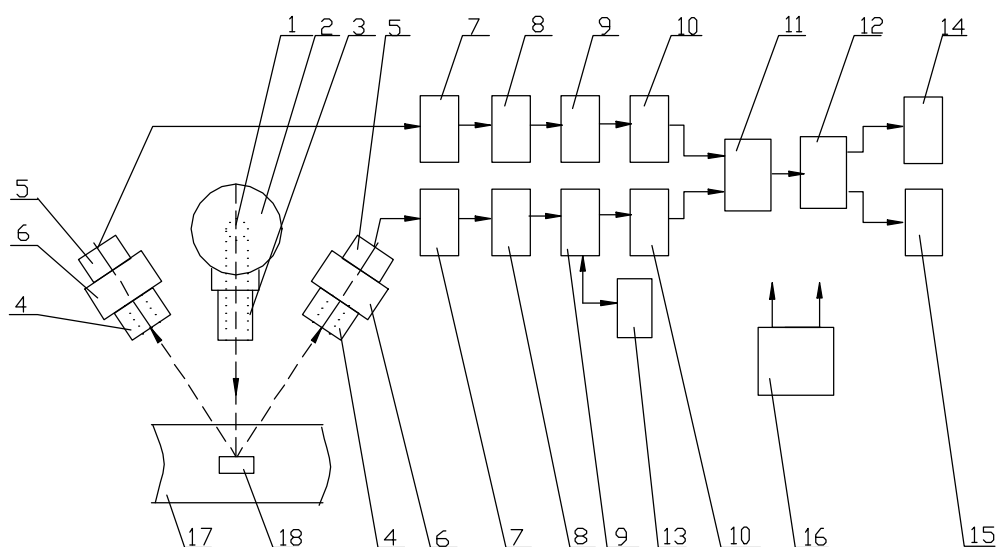


图1 工作原理示意图

图中的标号表示的部件如下: 1) γ 辐射源; 2) 源屏蔽容器; 3) 前准直器(源的准直器);
 4) 后准直器(探测器的准直器); 5) 探测器; 6) 探测器屏蔽套; 7) 线性放大器;
 8) 多道脉冲幅度分析器; 9) 微处理器; 10) 微机接口; 11) 通信综合板;
 12) 微机; 13) 步进电机驱动器; 14) 打印机; 15) 显示器
 16) 高、低压直流电源; 17) 被检测物体; 18) 被检测物的检测体积

4 带保温层压力管道在线检测装置设计

本文设计和研制的带保温层压力管道在线检测装置主要由 γ 射线源系统、探测采传系统、自动控制系统、扫描运动机械系统、计算机系统等系统组成, 如图2 所示。

在检测装置 γ 射线源系统设计与研制上, 选择了活度适当、尺寸小、能量适中、使用寿命合适、价格较便宜的 ^{75}Se 放射源作为该装置的放射源。源屏蔽容器的材料选用钨合金, 而不用贫化铀。前准直器的设计, 采用钨合金材料, 内部准直孔总长度为 48cm。外接部分的钨合金尺寸为 $\Phi 40 \times 42$, 孔径为 $\Phi 3$; 源容器内部孔长为 $\Phi 38$, 孔径为 $\Phi 2$ 。

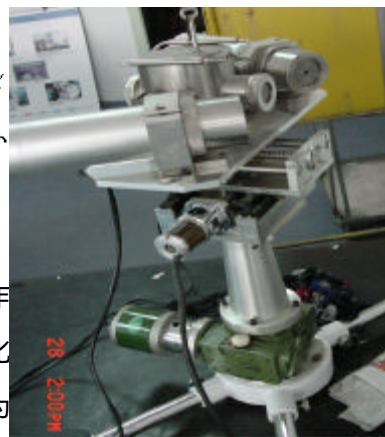


图2 带保温层压力管道在线检测装置示意图

所研制的探测采传系统主要有后准直器、探测器、数据采集、处理和传输电路、高/低压直流电源和多道脉冲幅度分析器等组成。

对于后准直器设计, 为了减小多次特别是二次散射和散射角分散的影响, 后准直器的孔长应大于

50mm, 孔径约为 $\phi 3\text{mm}$; 为了增大探测器的有效接收面积, 采用多孔聚焦式后准直器, 多孔聚焦式后准直器各个聚焦孔必须聚焦于同一点, 并应严格控制焦点的尺寸。其中外形尺寸为 $\phi 62 \times 50$, 孔数大于 15 个。除中心孔的孔径为 $\phi 5$, 其余斜直孔的孔径为 $\phi 3$, 前后孔径不变。

综合考虑能量分辨率、探测效率、寿命、价格和使用方便等因素, 采用碘化钠 NaI (TI) 闪烁晶体作为探测器的传感器是合适的。

多道脉冲幅度分析器是 CBS 系统中的核心模块。本装置研制的多道脉冲幅度分析器采用外置式结构设计方法, 即不插入微机的扩展槽中, 而另外设计成一个机箱, 再通过 RS232 串行口与计算机进行通信。在检测装置自动控制系统设计上, 根据扫描运动装置的使用要求, 将自动控制系统设计为点位控制系统。采用步进电机驱动的开环伺服系统。只需控制指令脉冲的数量、频率和电机绕组通电的相序, 就能控制扫描运动的位移量、速度和方向, 而无须使用反馈测量器件, 也无须采用独立控制用的微机接口卡。

在检测装置扫描运动机械系统设计上, 考虑扫描运动机械系统的三维运动要求, 具体结构由 Y-Z 向扫描运动机构、X 向升降运动机构和三角支撑架三个部分组成。将扫描头 (含源容器、探测系统、屏蔽块等) 配置在 Z 向运动的拖板上, 再将 Z 向运动结构装置在 Y 向运动拖板上, 两者形成一体再共同配置在 X 向运动拖板上。

在计算机软件系统设计上, 根据带保温层压力管道在线检测装置的需要, 设计开发了带保温层压力管道在线检测系统软件。主菜单界面设文件、电机参数、机械调整、能谱标定、扫描测量、三维显示六个子系统菜单。根据检测需要可以由此进入任意子系统。

检测系统软件的电机参数由电机运动参数设置来改变系统默认的参数设置。这里的步进电机转速, 是指扫描机使用蜗轮蜗杆减速器情况下所选的值, 其值越大, 电机移动的速度越快。X 方向即为上下运动, Y 方向即为左右运动, Z 方向即为前后运动。

检测系统软件的机械调整主要功能是用户在设置好参数后如果需要精确调整带保温层压力管道在线检测装置机械装置的位置, 可以调用机械调整窗口完成所需操作。

检测系统软件的能谱测量主要功能是通过在开源状态下测量能谱可以确定能谱的峰值, 再对峰值取 $\pm 5 \sim \pm 10$ 道就可以确定上阈值、下阈值, 确定上下阈之后就可以开始扫描测量。检测系统软件中扫描测量分为一维、二维和三维三种扫描方式, 可以根据自己的需要选择扫描方式。

5 扫描实验

为了验证带保温层压力管道在线检测装置的可行性和检测精度, 本文开展了外置铝皮带保温层 40mm 厚管道内表面双孔平面扫描实验、外置铝皮带保温层 40mm 厚管道内表面单孔平面扫描实验, 具体实验过程与结果如下:

(1) 外置铝皮带保温层 40mm 厚管道内侧壁上两个 $\Phi 25\text{mm}$, 深度为 28mm 双孔平面扫描实验。保温层材料为岩棉, 厚度为 140mm, 铝皮厚度为 0.5mm。

实验过程: 二维扫描 测量平面: XY 采样时间: 6.0 秒 重复次数: 1 次; X 方向范围: 60mm, X 方向步距: 1.0mm; Y 方向范围: 40mm, Y 方向步距: 1.0mm

实验结果如下: 实际扫描结果为: 直径为 24.5-25.3mm。

(2) 外置铝皮带保温层 40mm 厚管道内侧壁上 $\Phi 15\text{mm}$, 深度为 28mm 单孔平面扫描实验。保温层材料为岩棉, 厚度为 140mm, 铝皮厚度为 0.5mm。

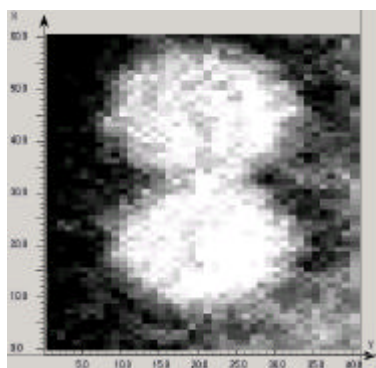


图3 原始数据图像显示

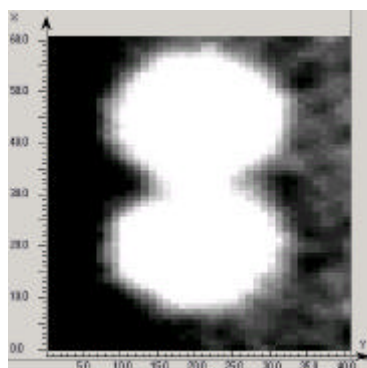


图4 图像处理后显示

实验过程: 二维扫描 测量平面: XY 采样时间: 6.0 秒 重复次数: 1 次; X 方向范围: 21mm, X 方向步距: 0.3mm; Y 方向范围: 21mm, Y 方向步距: 0.3mm

实验结果如下: 实际扫描结果为: 直径为 14.6~15.2mm。

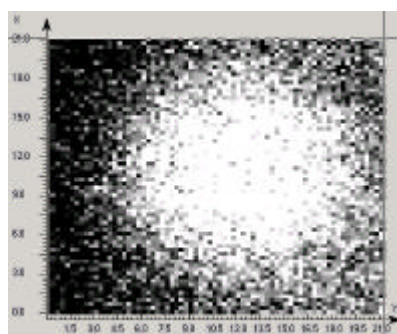


图5 原始数据图像显示

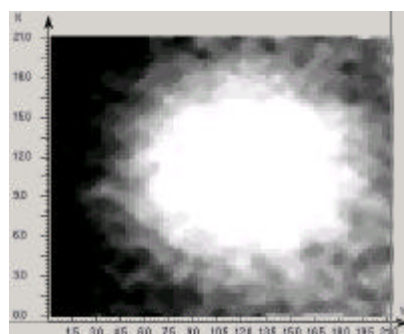


图6 图像处理后显示

6 结 论

1) 基于 CBS 的带保温层压力管道康普顿背散射扫描图像: 在线检测装置不仅可以进行二维平面扫描, 而且可以给出三维扫描成像, 扫描图像清晰; 2) 带保温层管道和不带保温层管道内表面康普顿背散射扫描图像基本相同: 说明带保温层并不影响检测结果; 3) 带保温层 40mm 厚以下的管道内表面: 缺陷平面扫描检测结果与实际值误差在 1mm 范围之内; 4) 外置铝皮带保温层管道和未置铝皮带保温层管道扫描成像检测结果相同: 说明外置铝皮不影响检测结果。

参考文献:

[1] 李海超, 丁克勤等著. 带保温层压力管道 CBS 检测软件系统设计[J]. CT 理论与应用研究, 2003, 12(2): 6~9.

[2] 丁克勤等著. 康普顿背散射扫描成像检测技术应用研究. 第八届全国无损检测大会论文集. 苏州, 2003.

作者简介: 丁克勤(1968-), 男, 中国特种设备检测研究中心研究开发部主任, 博士, 副研究员, 任疲劳断裂实验室主任和中国力学学会 MTS 材料试验委员会委员, 中国体视学学会 CT 理论与应用分会常务委员; 已在《Reliability Engineering & System Safety》, 《China Ocean Engineering》, 《力学学报》等国内外重要学术期刊发表文章 40 余篇, 现主要从事工业射线数字影像检测、漏磁检测等无损检测新技术研究。

本刊编者注: 上文和有关研究结果在 2004 年 CT 和三维成像学术会议上, 被评为“2004 年度 CT 和三维成像新进展荣誉奖杯”获得项目(该奖杯是由中国体视学学会设立的)。