

药柱内孔分布的 X 射线在线检测方法研究

王志强^{1,2}, 刘宾^{1,2}, 潘晋孝^{1,2}, 韩焱^{1,2}, 陈平^{1,2}

(1. 中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对一类挤压成型的小型药柱, 基于正弦投影和经验, 通过重建多个视角下获取的 X 射线投影信息, 在线检测药柱内孔的分布情况。实验结果表明, 文中方法不仅减少了采集角度, 降低了检测成本, 同时还实现了在线检测的要求, 能够更好地保证药柱内孔分布信息的准确性, 当视角数目达到 6 个或以上时, 精度可达到 0.01 mm。

关键词: 兵器科学与技术; 药柱; 内孔; 正弦投影; X 射线; 在线检测

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2015)02-0327-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.02.020

An X-ray Online Detection Method for the Distribution of Grain Inner Holes

WANG Zhi-qiang^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, PAN Jin-xiao^{1,2}, HAN Yan^{1,2}, CHEN Ping^{1,2}

(1. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing & Processing, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. State Key Laboratory for Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: A novel method is proposed for detecting the distribution of inner holes of extrusion moulding propellant grain online by reconstructing X-ray projection information obtained in multi-angle based on the sinusoidal projection and experience. The experimental result shows that the method not only reduces the acquisition angles of view and the detection cost, but also achieves the requirement of online detection, and ensures the accuracy of the distribution information of inner holes. When the number of angles of view is greater than or equal to six, the detection accuracy of the method can reach 0.01 mm.

Key words: ordnance science and technology; grain; inner hole; sinusoidal projection; X-ray; online detection

0 引言

药柱制造过程中, 刚挤压成型的药柱成软性, 需在外界情况下固化冷却方可成品, 然而药柱在冷却过程中由于受到外部环境的影响其内孔的分布会发生偏移, 这将直接关系到药柱内侧

面的燃烧性能, 为了保证药柱高质量、高效率地生产, 本文使用 X 射线在线检测药柱内孔的分布情况。

以往构件进行 X 射线检测时, 需通过旋转构件进行不同角度成像, 以获得构件同一断层上的信息, 但对在线检测而言, 刚挤压成型的药柱呈软性无法

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61227003、61171179、61302159); 山西省自然科学基金项目(2012021011-2); 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20121420110006); 山西省回国留学人员科研资助项目(2013-083); 山西省高等学校优秀创新团队支持计划项目(2012年)

作者简介: 王志强(1987—), 男, 硕士研究生。E-mail: 3553290@163.com;

刘宾(1979—), 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: liubin0316@nuc.edu.cn

对其进行固定旋转,常规的 CT 成像无法实现其内孔分布的检测。为此,本文将考虑在多视角下完成对药柱内孔分布的检测。

在过去的 X 射线成像过程中,研究人员针对不同角度下重建目标图像进行了大量的研究。例如, Sidky 等研究了通过选取 20 个角度下的投影数据对物体进行重建^[1],该方法因为能够获取物体足够的内部投影信息,因而可重建出物体的内部结构分布; Raines 等提出了单角度下重建物体的一种算法^[2],而 Wang 等论证了该算法要求重建的目标图像大小不能大于 $15 \times 15 \times 15$ 像素^[3],而这无法满足一些工业中的精确重建要求。由于药柱的结构大小限制, Raines 等^[2]提出的单角度下重建物体的方法不宜采用,而若采用 20 个角度获取投影数据,势必将增加检测的成本,同时设备的安装也将成为实际检测中亟需解决的问题;因此针对工业 X 射线在线检测的要求需合理选取射线源和探测器的个数进行检测^[4-6]。本文以 3 个视角为例,选取一类含有 7 个内孔的药柱,针对内孔的分布提出一种在线检测的方法。

1 系统设计

根据在线检测的要求,药柱制造过程中,无法通过旋转药柱获取同一断层上信息,因此只能通过使用多组成像设备从不同角度同时成像以获取足够的内部信息。系统设计如图 1 所示。为能够提高成像质量,本文选取微焦点 X 射线源进行透照成像, X 射线透照成像原理如图 2 所示。

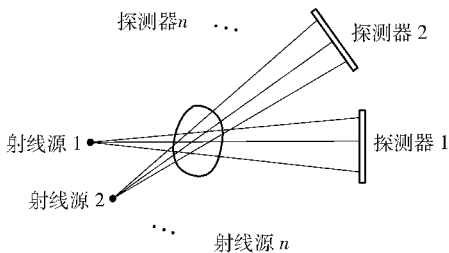


图 1 系统设计

Fig. 1 System design

X 射线对被检测物体进行透照强度为 I_0 , 根据比尔定律,由于物体对射线的衰减作用,最终在探测平板上获得 X 射线强度为 $I^{[7-8]}$ 。待测物体经过 X 射线成像系统后的投影值满足正弦投影原理,原理如图 3 所示^[8]。过给定点 (r, θ) 的射线 (x_r, φ) 均在以 r 为直径,以 $(0.5r, \theta)$ 为圆心的圆周上,定点在探

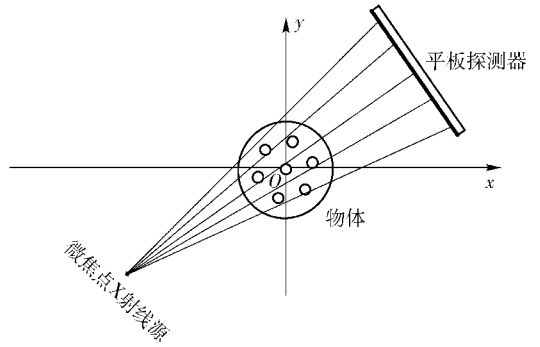


图 2 透射成像原理图

Fig. 2 Imaging principle of transmission

测器上的投影值满足

$$x_r = r \sin(\theta - \varphi). \quad (1)$$

由(1)式可知,理论上选取两个角度下投影值即可得到圆心坐标值,但由于(1)式中正弦函数不是一个单调函数,实际数据会存在一定误差,因此本文选取 3 个视角进行在线检测。

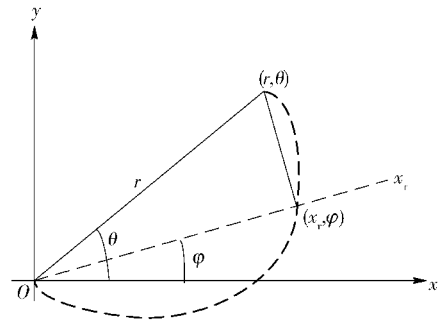


图 3 过定点 (r, θ) 的射线坐标轨迹

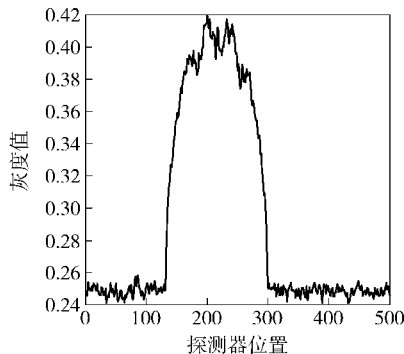
Fig. 3 Trajectory of ray across fixed point (r, θ)

2 检测算法

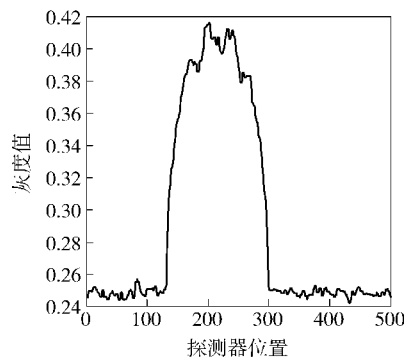
2.1 特征提取与处理

本文选取的探测器分辨率为 0.127 mm, 射线源到药柱的距离为 116 mm, 药柱到探测器的距离为 766 mm, 采集角度分别为 0° 、 120° 、 240° 。对每个角度下获取的投影数据进行绘图, 如 120° 下绘制的曲线如图 4(a) 所示, 其他两个角度类似。从图中可看出曲线含有噪声, 对其进行中值滤波处理, 滤波后的投影信息如图 4(b) 所示。通过二次曲线拟合和遍历取值比较每个波谷位置投影值的大小有效提取出 7 个内孔对应的投影数据及大圆的边界投影数据, 获取的投影数据如表 1 所示。因在实验过程中构件的固定位置和轴心位置存在偏差, 对其进行了中心校正, 最终得到

$$y = \begin{bmatrix} -83 & -39 & -17 & -17 & 8 & 28 & 28 & 54 & 83 \\ -84 & -51 & -27 & -27 & -2 & 21 & 21 & 39 & 83 \\ -85 & -45 & -23 & -23 & -1 & 19 & 19 & 44 & 84 \end{bmatrix}$$



(a) 滤波前投影曲线
(a) Projection curve before filtering



(b) 滤波后投影曲线
(b) Projection curve after filtering

图 4 滤波前、后的投影曲线

Fig. 4 Projection curves before and after filtering

表 1 3 个角度下的 3 组投影数据

Tab. 1 Three groups of projection data at three angles

角度/(°)	依次提取的坐标值(从左到右)								
0	88	132	154	154	179	199	199	225	254
120	237	270	294	294	319	342	342	360	404
240	164	204	226	226	248	268	268	293	333

2.2 数据匹配与拟合

如图 5 所示,图中曲线为 0°到 360°每个角度下小气孔先后位置的仿真实验图,由实验图可确定任意角度下 7 个内孔的先后位置分布,本文选取的采集角度分别为 0°、120°、240°。由图 5 可得此 3 个角度下 7 个内孔的先后位置为 x ,其中 x 的第一列和最后一列为确定外圆边界位置所设,

$$x = \begin{bmatrix} 9 & 5 & 4 & 6 & 7 & 3 & 1 & 2 & 10 \\ 9 & 6 & 1 & 5 & 7 & 2 & 4 & 3 & 10 \\ 9 & 1 & 2 & 6 & 7 & 3 & 5 & 4 & 10 \end{bmatrix}$$

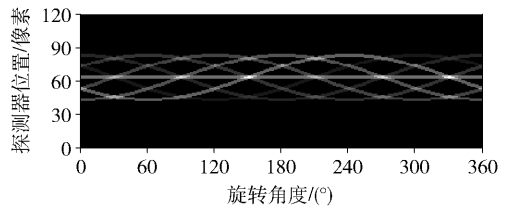


图 5 小圆实验位置图

Fig. 5 Experience locations of small holes

针对得到的 7 个内孔的先后位置 x 和校正后的数据 y 对其进行位置匹配,以确保每个内孔找到各自对应的 3 个 x_r 值。然后由(1)式对每个内孔进行正弦拟合,求出每个内孔各自对应的圆心坐标。将 y 矩阵的第一列和最后一列做差,取平均值可求出大圆的直径。

3 算法流程

对于 7 个内孔,本文首先需要解决的问题是:第一个角度下的每个内孔的 x_r 值对应到下一个角度下是哪个 x_r 。因为不同的组合求解出的结果千差万别。对此,本文将基于实验来确定投影坐标的对应关系。选定角度,依次提取出固定角度下反映内孔位置的 x_r 值,由于物体在透照过程中摆放位置存在一定偏差,故需要对采集到的每组 x_r 值进行中心校正^[9-10],然后将每个角度下校正后的 x_r 值与 7 个内孔的先后位置进行匹配,使得每个内孔都找到各自对应的一组 x_r 值。根据(1)式对每个内孔对应的一组 x_r 值做正弦拟合,由拟合曲线得到 7 个内孔各自所对应的坐标。在绘图过程中为判断 7 个内孔在构件内部的分布是否均匀,需找出构件的边界位置,即射线进出大圆时的投影值。上述算法的实现流程如图 6 所示。

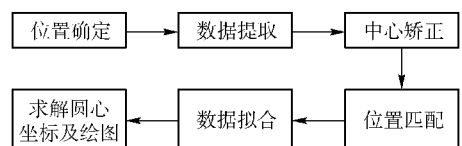


图 6 算法实现流程图

Fig. 6 Algorithm flow chart

4 实验结果

实验中,已知药柱直径为 2 mm,内孔直径为 0.2 mm,为方便验证对比本文算法的精确性,本文将固化后内部结构完整的药柱进行常规的 CT 成

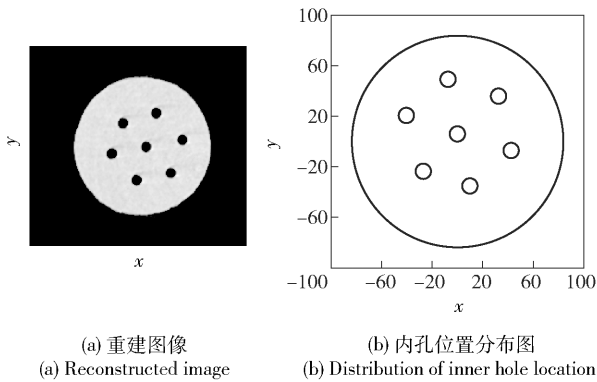


图 7 重建图像及内孔位置分布图

Fig. 7 Reconstructed image and the distribution of inner hole location

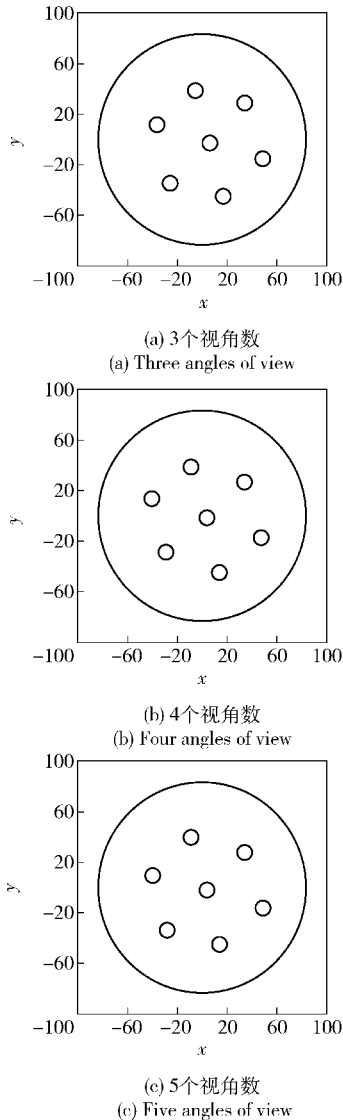


图 8 3 组视角下的实验结果图

Fig. 8 The experimental results

像,重建结果如图 7(a)所示。对上述 3 个角度下求得的内孔和大圆的坐标进行绘图,得到此类药柱内孔的分布如图 8(a)所示。由图 7 提取出药柱各个内孔的圆心坐标以及大圆圆心绘制坐标(见图 7(b)),图 8(b)和图 8(c)分别为 4 个和 5 个视角下内孔位置分布图。通过对实验数据进行对比分析,可得到 3 组视角下内孔坐标,其最大绝对误差如表 2 所示,满足检测要求。

表 2 3 组视角下的结果对比

Tab. 2 The comparison of results obtained at three groups of angles of view

视角数	最大绝对误差/mm
3	0.033
4	0.014
5	0.011

由表 2 数据可知,随着视角数目的增加,精度会有所提高,但增加的幅度逐渐减慢,当视角数目达到 6 个或以上时,精度可达到 0.01 mm。在工业应用中,可以根据不同的精度需要,采取不同的视角数目。

在实际检测过程中,药柱相对于射线源-探测器系统的位置会有一些的旋转。对此,通过实验对比发现 x 的取值只有两种情况,且这两种情况不会造成实验结果的误差,因此在以药柱为中心选定视角后,检测设备围绕中心旋转不会造成实验结果产生误差。同时本文选取的角度为 0° 、 120° 、 240° ,每个角度也会有一定的偏差,如 120° 可能偏差为 125° 。因此,在选取 0° 、 125° 、 240° 下投影数据确定的内孔位置分布会存在一定的变化,但同样可保持在误差允许范围内。

5 结论

本文针对一类小型药柱进行微焦点 X 射线在线检测,通过以 3 个角度为例介绍了检测算法,通过对比分析得到了 3、4、5 个视角下的内孔位置分布精度。根据不同的精度检测要求,在实际检测过程中,可选择合适的设备安装设计。实验结果表明,该系统能够准确地确定药柱内孔的分布情况,满足了实际工业检测中在线检测的需求。但是如何针对任意选取的采集角度下去确定药柱内孔的分布还有待进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] Sidky E Y, Kao C M, Pan X C. Accurate image reconstruction from few-views and limited-angle data in divergent-beam CT[J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2006, 14(2):119-139.
- [2] Raines K S, Salha S, Sandberg R L. Three-dimensional structure determination from a single view[J]. *Nature*, 2010, 463:214-217.
- [3] Wang G, Yu H Y, Cong W X, et al. Non-uniqueness and instability of 'ankylography' [J]. *Nature*, 2011, 480: E2-E3.
- [4] 李镜, 卢孝强, 孙怡. 有限角度CT重建方法[J]. *航空制造技术*, 2011(21):76-78.
LI Jing, LU Xiao-qiang, SUN Yi. CT reconstruction for limited angle[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(21):76-78. (in Chinese)
- [5] Lu X Q, Sun Y, Yuan Y. Optimization for limited angle tomography in medical image processing [J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(10/11):2427-2435.
- [6] Lu X Q, Sun Y, Yuan Y. Image reconstruction by an alternating minimisation[J]. *Neuro Computing*, 2011, 74(5):661-670.
- [7] 陈平, 韩焱, 潘晋孝. 变电压X射线多谱CT成像虚拟设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 8(2):8-10.
CHEN Ping, HAN Yan, PAN Jin-xiao. Research on X-ray multi-spectrum imaging based on variable voltage[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 8(2):8-10. (in Chinese)
- [8] 张朝宗, 郭志平, 张朋, 等. 工业CT技术和原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009:18-21.
ZHANG Chao-zong, GUO Zhi-ping, ZHANG Peng, et al. *Industrial CT technology and principle* [M]. Beijing: Science Press, 2009:18-21. (in Chinese)
- [9] 孟凡勇, 王维, 李静海. 利用正弦图自动校正CT投影中心[C]//2008年全国射线数字成像与CT新技术研讨会. 绵阳:中国电视学学会, 2008:266-268.
MENG Fan-yong, WANG Wei, LI Jing-hai. Using the sinogram automatic correction CT projection center[C]//2008 National Ray Digital Imaging and CT Technology Symposium Conference. Mianyang: Chinese Society for Stereology, 2008:266-268. (in Chinese)
- [10] 孙晶晶, 杨名, 刘静华. 基于正弦图的计算机断层图像校准[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(2):224-226.
SUN Jing-jing, YANG Ming, LIU Jing-hua. The sinogram image calibration based on computed tomography[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(2):224-226. (in Chinese)