

点火器内装低射线衰减特性含能粉体材料检测

李雨驰, 曾亦龙, 张 勇, 雷 波, 吴庆华, 赵 哲

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2021年10月11日; 录用日期: 2021年11月4日; 发布日期: 2021年11月11日

摘 要

以钢质壳体内部装填低X射线衰减特性含能粉体材料的点火器类火工品及类似结构火工装置为研究对象, 设计加工模拟试件, 利用数字射线成像检测系统与工业CT检测系统, 通过实验摸索最优检测参数对研究对象进行有效检测成像; 同时通过数字检测图像分析, 确定封闭钢质壳体结构火工品内部低X射线衰减特性含能粉体是否装填。结果表明: 能够通过数字射线成像检测系统与工业CT检测系统互补, 对点火器类火工品及类似结构火工装置内部含能粉体是否装填有效判断。

关键词

数字射线检测, 工业CT, 含能粉体材料

Detection of In-Built Energetic Powdery Material with Low Dose X-Ray Attenuation Character in Igniter

Yuchi Li, Yilong Zeng, Yong Zhang, Bo Lei, Qinghua Wu, Zhe Zhao

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Oct. 11th, 2021; accepted: Nov. 4th, 2021; published: Nov. 11th, 2021

Abstract

This study took in-built energetic powdery material with low dose X-ray attenuation character in igniter within steel housing and its analogues as the major objects. Simulated specimens were designed and detected by digital radiographic detection system and industrial computed tomography (CT) detection system. The optimal parameters were explored by effectively imaging detection. In the meantime, image analyses through digital detection were used to make sure that in-built energetic powdery materials with low dose X-ray attenuation character were accurately loaded

in sealed steel housing. The results revealed that digital radiographic detection system collaborated with industrial CT detection system might estimate the in-built energetic powdery material in igniter within steel housing and its analogues more effectively.

Keywords

Digital Radiography, Industrial Computed Tomography, Energetic Powdery Materials

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

火工品广泛应用于各类宇航任务中,其中点火器(起爆器)类的火工品应用数量最多,且作为点火、分离、展开等关键工作的起爆源[1],其内部装药状态是否正常关系到整个宇航任务的成败。点火器类火工品典型装药结构如图1所示,装药位置一般位于钢壳体的同中心轴线上的圆孔内,装药直径一般在3 mm~10 mm之间,装药高度一般在2 mm~15 mm之间,在成品装配完成后,装药粉体压紧后被钢壳体与密封膜片紧紧包裹,无法再从外观目视检查或多媒体拍摄的方式对装药状态进行检查。其密封膜片极易损伤不能接触检测,装药部位钢壳体厚度一般在2 mm到10 mm之间,同时一般存在螺纹、六方、圆柱等外形。在装配完成后,对封闭壳体内的含能粉体材料进行无损检测,采用射线检测的手段是必要的。

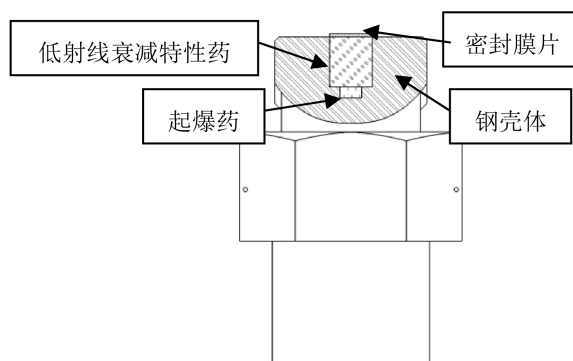


Figure 1. A diagram of the loading structure of a typical ignition

图 1. 某类典型点火器装药结构示意图

点火器类火工品内部装药主要分为起爆药、烟火药与猛炸药。其中起爆药装药量少,作为第一起爆源[2],引燃烟火药与猛炸药工作。目前点火器内装填的绝大多数起爆药为含铅起爆药。烟火药主要为各类高能含能材料与轻质金属如镁、铝的机械混合粉体,而猛炸药主要是不含金属的硝基有机物与其他少量非金属材料混合粉体[3][4]。

常规射线检测主要是对板材、管材或压铸件等较单一材料且厚度较均匀的材料缺陷检测,而火工品内装药剂检测是对非规则形状金属壳体内粉体装填状态检测,是单一材料射线检测技术的延伸,检测难度更大[5]。起爆药为含铅物质,对于X射线衰减与钢极为接近,在检测和判断上,通过合理的检测技术

可以较为简便地进行检测判断；烟火药与猛炸药所含物质原子序数较低，X 射线透照时衰减很低，且其粉体结构的密度较低，如图 2 所示在常规射线检测方法(如胶片照相检测条件下)中通过肉眼分辨是否装填的难度较大且在某些条件下不够准确，判定低 X 射线衰减特性药剂是否装填是一大难点。

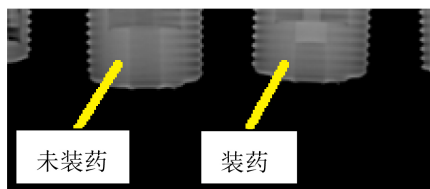


Figure 2. A partial image of loading (left) and unloading (right) in one igniter by film radiography

图 2. 某点火器装药(左)和未装药(右)胶片射线检测局部图像

2. 数字射线检测技术与工业 CT 检测技术简述

数字射线检测技术(简称 DR 技术)是在传统胶片 X 射线照相检测技术上发展起来，利用数字转换技术，将 X 射线穿透待检物体衰减后的信息通过探测器接收后转化放大为电信号，最后通过计算机处理形成最终数字图像，而后进行图像处理分析与识别。相对于传统胶片照相方式，数字射线检测技术基本上可以做到实时成像，不再需要洗片等暗室处理，检测效率高，过程工艺参数也更容易固化，重复检测图像质量一致性高[6]。

工业 CT 全称为工业计算机层析成像技术，通过 X 射线从不同角度穿透被检工件后的投影重建工件断层图像，工业 CT 检测技术能够给出工件内部的密度、有无缺陷、形态及空间位置等信息，相对其他射线检测技术，CT 图像判断密度类缺陷更直观，缺点是效率较低[7]。

3. 检测标准试验件设计

工厂装药产品数千种，不可能每种都专门制作装药/未装药对比的产品用于检测中，故需要设计能够表征不同产品装药状态的，与产品相同或相近外形的装药试验件，用于过程试验研究。

工厂生产航天火工品装药壳体外形主要分为圆柱、六方、标准螺纹等外形，项目组提前进行了从厚度 2 mm~20 mm 钢外壳标准等效测试工装的准备，壳体统一用的 1 毫米牙距标准螺纹如图 3 所示：



Figure 3. Part housing work wear

图 3. 部分等效测试外壳工装

在检测时，将不同大小的低射线衰减药剂粉体装药管壳装填入对应内径的外壳工装内进行检测，用以表征不同尺寸类型的点火器。

4. 检测系统

4.1. 数字射线检测系统

试验使用的数字射线检测系统的主要参数如表 1：

Table 1. The main parameters of the digital ray detection system**表 1.** 数字射线检测系统主要参数

设备	型号	主要参数及类型
X 射线机	Gulmay CF320	射线能量: 20~320 kV 功率: 800/1800 W 焦点: 0.4/1.0 mm
	Gulmay CP450	射线能量: 20~450 kV 功率: 900/4500 W 焦点: 3.6/5.5 mm
探测器	品臻 4343	成像面积: 430 mm × 430 mm 像素尺寸: 140 μm 转换位数: 16 bit 帧率: 4 fps
显示器	联想专业显示器	10 bit/27 寸/4 k 分辨率
图像处理软件	深圳深海公司定制软件	/
	ImageJ	开源软件
辅助器材	钢滤波板	1 mm/2 mm/3 mm
	铅板	限束及散射线防护用

4.2. 工业 CT 检测系统

试验使用的工业 CT 检测系统的主要参数如表 2:

Table 2. The main parameters of the industrial CT inspection system**表 2.** 工业 CT 检测系统主要参数

技术指标	参数
射线能量	6 MeV
CT 模式	三代 CT
触发频率	170 Hz
切层厚度	2 mm~3 mm
图像矩阵大小	4096 × 4096
微动次数	5 次
CT 软件	北京固鸿公司定制软件

5. 检测要素分析

检测人员对数字射线检测图像进行识别, 装药位置的影像不可避免的存在药剂投影之外的如壳体螺纹、厚度变化、散射线边蚀以及成像系统噪声的干扰。

对于光学图像, 背景信号和目标信号中的噪声具备泊松分布特性[8]。根据 ROSE 视觉感知阈值模型, 理论上当目标信号的对比度噪声比(简称 CNR)较高(5~7 以上)时, 能够肉眼分辨出的概率能超过 50%。

$$\text{CNR} = \text{Cr} \sqrt{\Phi A}$$

式中: Cr 为相对对比度; Φ 为光通量; A 为识别细节的面积。

在射线检测中, 相对对比度与管电压和曝光量(管电流)相关, 光通量与曝光量相关, 需要识别装药的投影面积即与工件自身相关, 如要提升图像质量, 有利于装药检测, 则需要从管电压、曝光量以及工件自身检测投影面积下手, 而在实际生产检测中投影面积提升很困难, 提高管电压与曝光量更为现实。

5.1. 管电压对壳体内装药分辨力的影响

项目组分析电压差异对于钢质壳体内轻质材料分辨能力可能带来的差异：

1) 管电压增加，射线强度呈平方增加，可以增加细节对比度，但同时也会降低不同材料的射线质量衰减系数，根据目前的文献资料数据，当射线能量较低时，随着射线能量的增加，对比度噪声比(CNR)快速增加，直至能量到达一定值时，CNR 值不再增加，即存在一个应达到的最佳透照电压值，过高过低的电压都不可取[9]。

2) 在实际检测环境中，提高电压对灰度值的提升远远快于提升管电流，对于点火器类具备较厚钢厚度的检测工件，在数字射线检测设备环境下，设备管电流已经接近最大值，而图像灰度仍然较低时，相对来说通过提升管电压来提升灰度，从而提升对比度更容易。

3) 在实际检测环境中，尤其是数字成像系统中，散射线对于图像对比度的影响极其明显，在采用了一系列设备硬件的散射线防护装置后，由于射线机出束射线的连续谱特性，仍然会存在低能散射线，提升管电压并采用滤波装置后，降低散射线的效果理论上会更明显。

4) 点火器类火工品与常规射线检测中常见的规则外形与较均匀厚度的工件不同，装药位置钢壳体厚度大多存在明显的局部差异，故在检测时，必须要考虑检测参数对厚度宽容度的影响，根据理论研究表明，提升管电压是能够明显提升厚度宽容度的，更有利于对壳体厚度差异大的多零件组合体的一次成像检测，能够将更多的内部信息在数字射线图像的灰度范围内呈现。

上所述，选择透照参数时，可以针对钢质壳体内的轻质材料如铝、镁制零件、非金属零件、低衰减特性药剂等，应在允许范围内适当提高管电压，提升检测分辨能力。下面笔者通过试验进行验证：

如表 3 所示，笔者分别采用不同管电压参数透照，达到同样的灰度进行图像对比试验，验证在不同管电压下，对于钢壳体内部装药和 0.3 mm 厚度铝管壳端面的检出能力。

Table 3. Different transmission voltage test of the Φ 3 mm filling tube shell in 16 mm steel housing body
表 3. 16 mm 钢壳体内 Φ 3 mm 装药管壳不同透照电压试

项目	管电压/kV	管电流/mA	分辨效果
低电压组	160	10.0	无法肉眼分辨
低电压组	190	8.5	难以肉眼分辨
高电压组	240	6.5	肉眼可分辨
高电压组	300	5.2	肉眼清晰分辨
高电压组	315	3.0	肉眼分辨

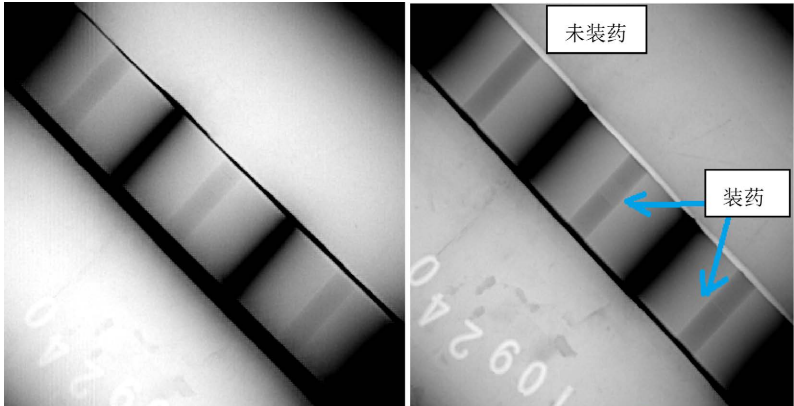


Figure 4. Low voltage 160 kV (left) vs. high voltage 315 kV (right) detection image
图 4. 低电压 160 kV (左)与高电压 315 kV (右)检测图像对比

如图 4 所示，试验发现在适当提高管电压条件下，获得了效果更好、更适合肉眼判读的图像，在高电压检测下，装药管壳与未装药铝管壳端面都清晰可见，符合分析预期，在对装药检测时，可以考虑采用适当提升管电压的检测方式。

5.2. 曝光量对壳体内装药分辨力的影响

在数字射线检测中，一般会固定探测器硬件最优的增益系数与采集帧率以及积分时间，曝光量只与管电流的大小相关，对于灰度的变化有直接影响。在管电压固定的情况下，应采用相对较高的管电流，使装药评定区域灰度值在不超出探测器采集上限(过曝光)的前提下尽可能高，可以提升对比度噪声比，有利于提升检测分辨能力[10]。

如表 4 所示，笔者在同一检测环境下进行了不同曝光量下的试验验证在管电流较大时，灰度值较大的区域，装药与未装药测量的灰度值差异更加明显，通过肉眼判断更加容易。

Table 4. Tests for different exposures

表 4. 不同曝光量试验

项目	管电压/kV	管电流/mA	钢壳体厚度/mm	装药尺寸/mm
低曝光组	315	2.5	14	$\Phi 2.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$
高曝光组	315	5.3	14	$\Phi 2.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$

如图 5 所示，试验结果图像可以发现在低曝光量参数下，图像上肉眼分辨出 14 mm 厚度钢质工装内的低射线衰减药剂较为困难。在提高的管电流一倍以上的高曝光量参数下装药投影区域图像灰度提升明显，能够通过肉眼分辨出装药状态差异(左边和右边壳体内孔内有部分装药，中间壳体内为未装药空管壳)。

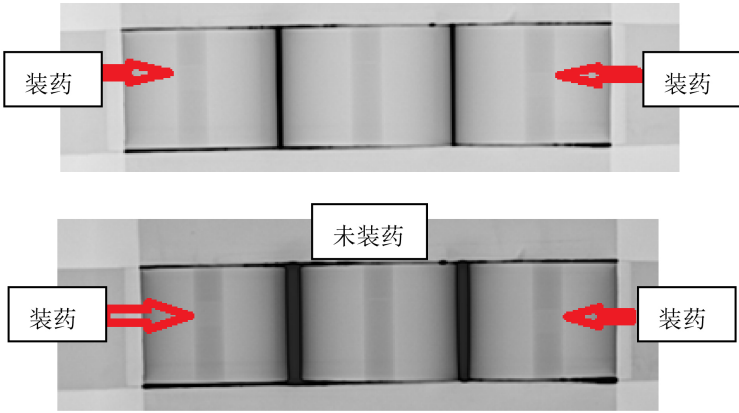


Figure 5. Low exposure (top) vs. high exposure (bottom) detection image
图 5. 低曝光量(上)与高曝光量(下)检测图像对比

6. 检测结果

6.1. 检测参数

笔者对外壳工装内小直径装药检测试验的最佳参数整理简表如表 5 所示。

6.2. 圆柱体与六方壳体下的数字射线检测结果

装药直径 $\Phi 2.5\text{ mm}$ 与 $\Phi 7.4\text{ mm}$ 的状态基本上代表了检测产品的上下限范围，笔者对圆柱体与六方

外壳工装内小直径装药检测试验结果简述如表 6 所示，检测图像如图 6 与图 7。

Table 5. The detection parameters
表 5. 检测参数

壳体厚 mm	管电压/kV	管电流/mA	焦距	采集帧数
2	150	6.5	1100 mm	64
4	180	6.0	1100 mm	64
6	220	5.5	1100 mm	64
8	250	5.1	1100 mm	64
10	300	4.5	1100 mm	64
12	315	4.9	1100 mm	64
14	315	5.3	1100 mm	64

Table 6. The steel housing work wear test of diameter of the cylinder in Φ 2.5 mm, Φ 7.4 mm and the six-side steel housing
表 6. 装药直径 Φ 2.5 mm 与 Φ 7.4 mm 圆柱体与六方钢外壳工装试验结果

壳体厚度	装药	MZ02 60 Mpa	MZ03 60 Mpa	YH08/YH01 定位压	滑石粉 60 Mpa	YH18 60 Mpa
2 mm 钢		可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨
4 mm 钢		可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨
6 mm 钢		可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨
8 mm 钢		可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨
10 mm 钢		可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨
12 mm 钢		可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨
14 mm 钢		可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨	可肉眼分辨

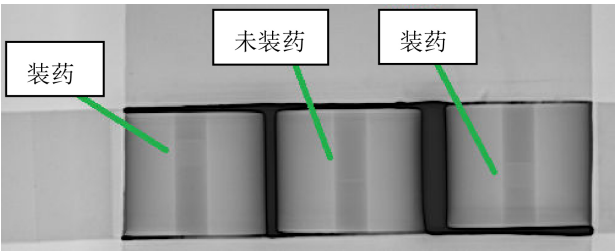


Figure 6. The load image of the Φ 2.5 mm MZ0214 in 14 mm steel thickness cylinder housing

图 6. 14 mm 钢厚度圆柱壳体下 Φ 2.5 mm MZ02 装药图像

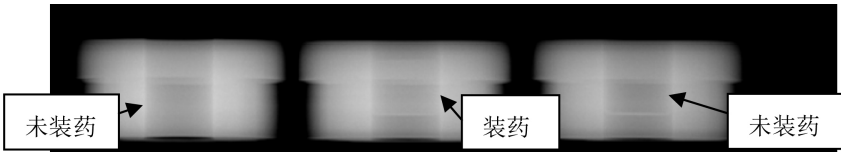


Figure 7. (The 18 mm six-side steel housing Φ 7.5 mm Tai'an MZ03) DR detection image (the middle was partially loaded)

图 7. (18 mm 六方钢壳体 Φ 7.5 mm 太安 MZ03) DR 检测图像(中间为部分装药件)

6.3. 螺纹壳体下的数字射线检测结果

螺纹壳体下的试验检测结果如表 7 所示：

Table 7. Results of the threaded housing work wear test, Φ 2.5 mm and Φ 7.4 mm in filling diameter
表 7. 装药直径 Φ 2.5 mm 与 Φ 7.4 mm 螺纹外壳工装试验结果

壳体厚度 \ 装药	MZ02 60 Mpa	MZ03 60 Mpa	YH08/YH01 定位压	滑石粉 60 Mpa	YH18 60 Mpa
2 mm 钢	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨
4 mm 钢	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨
6 mm 钢	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨
8 mm 钢	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨
10 mm 钢	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨	可测量分辨

螺纹外壳对于检测装药的最大影响在于肉眼判断时的干扰。对于较均匀厚度材质的六方、圆柱等外形，螺纹的周期厚度变化极易导致视觉误差，影响判断，故通过肉眼判读加测量测方法才更为稳妥，如下图，在螺纹壳体厚度 18 mm 下，仍然可以通过软件测量辅助肉眼进行判断 Φ 7.4 mm 内孔装药状态(图 8 靠右壳体内装药)，而在装药直径 Φ 2.5 mm 状态下，螺纹壳体厚度在 10 mm 以内，才可以有效测量分辨。

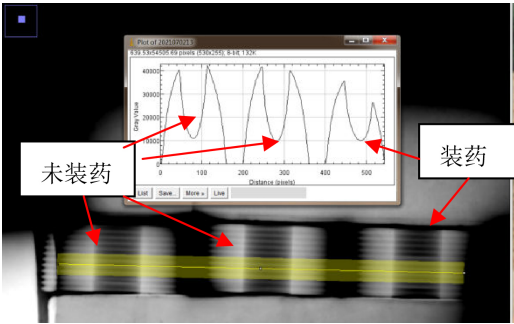


Figure 8. Measurement of the loading situation in M26 threaded housing Φ 7.4 mm YH18
图 8. 测量判断 M26 螺纹壳体内 Φ 7.4 mm YH18 装药情况

6.4. 工业 CT 检测结果

对于 14 mm 以上的钢壳体内的装药检测，特别是螺纹外壳体的装药工件，通过数字射线检测图像判断对检测人员的素质要求更高。笔者通过试验，确定通过工业 CT 检测方法，可以有效对 20 mm 钢壳体工件内是否装药进行判断，唯一的缺点是检测效率较低，但可以用作对数字射线检测方法下检出的疑似缺陷件验证。检测参数如表 8 所示：

Table 8. The parameters of CT detection
表 8. CT 检测参数

项目	切层厚度	微动次数	重建矩阵	钢壳体厚度/mm	装药尺寸/mm
CT 检测	2 mm	5 次	4096 × 4096	20	Φ 2.5 mm × 2 mm

检测图像如图 9 所示:

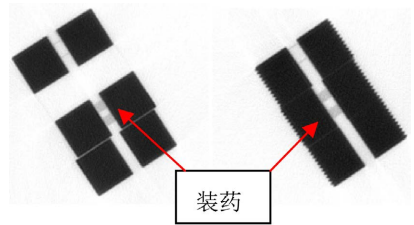


Figure 9. Images of the test pieces under industrial CT detection
图 9. 工业 CT 检测下的试验件图像

6.5. 数字图像处理与测量

数字射线检测相对于传统胶片照相检测的一大优势是数字图像的处理、分析和测量的优势。在检测中如图 10 所示, 笔者利用了开源的 ImageJ 软件测量数字射线图像, 实现了快速准确的装药状态判定。

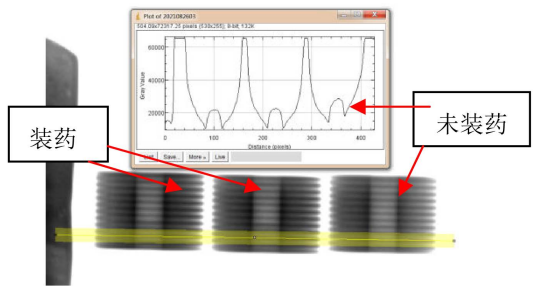


Figure 10. Measurements of detecting images of $\Phi 4$ mm filling pieces in 18 mm thick steel threaded housing
图 10. 18 mm 厚钢螺纹壳体内 $\Phi 4$ mm 装药件检测图像测量

如图 10, 可以从检测产品灰度测量曲线中, 准确判定出最右边的灰度数值明显更高(正片下), 肯定有效装填药剂。笔者通过多次反复测量测试发现, 在测量时, 一般满足像素宽度不低于 7 个像素以上比较准确, 对外螺纹壳体装药件测量时, 建议采用不低于两个牙距的测量宽度最佳, 避免在拉测量线时, 受到螺纹影像的过多干扰影响。

工业 CT 检测图像同样具备数字图像处理和测试的条件(如图 11), 一般来说, CT 图像处理软件会集成测量插件, 相对来说测量更加便捷, 缺点是工业 CT 生产检测应用效率较低。

6.6. 点火器类产品小批量测试

标准模拟试验件的检测已经完善, 笔者对点火器类产品在同一检测参数环境下(根据透照厚度选择参数), 进行了测试, 测试结果与模拟试验件结果接近, 参与检测的多种类产品均可以通过数字射线检测和 CT 检测判断出其中低 X 射线衰减特性药剂粉体是否装填, 检测图像如下图 12 与图 13。

6.7. 检测结论

(1) 对于装药直径不低于 $\Phi 2.5$ mm, 在六方、圆柱等厚度均匀(不超过 12 mm)无变截面的壳体内, 控制检测参数透照, 并有效图像处理, 可以极为有效的通过专业人员肉眼或简单灰度测量确定低射线衰

减特性药剂装填有无;

(2)对于螺纹外壳内装药或六方、圆柱等厚度均匀但壳体厚度较大(超过 12 mm)的装药工件判断,其数字射线检测图像除肉眼判断外,应利用软件进行测量确认,准确率才能足够高;

(3)在实际生产检测中,对于数字射线检测判断出装药状态差异的少量工件,可挑选出后结合 CT 切片再确认。



Figure 11. The loading status can be determined by CT measurement (CT measurement in Mark1)

图 11. 通过 CT 值测量可判断装药状态(Mark1 处线 CT 值测量)

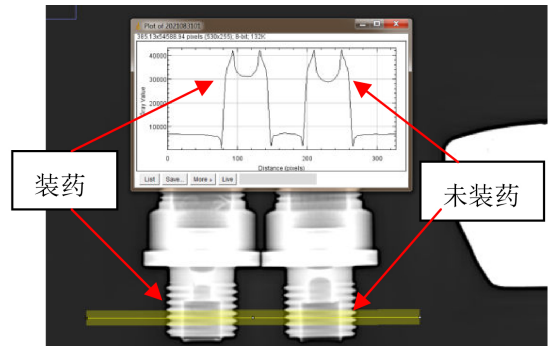


Figure 12. The ignition loading status is determined by digital ray detection image measurement (local image)

图 12. 通过数字射线检测图像测量判断点火器装药状态(局部图像)



Figure 13. Confirms ignition loading status via CT test (local image)

图 13. 通过 CT 检测确认点火器装药状态(局部图像)

7. 结束语

通过数字射线检测技术和 CT 检测技术的结合,采用合理的检测参数与软件进行测量,可以有效解决点火器类火工品内装低射线衰减特性药剂是否装填的判断难题,使点火器类火工品质量更加可靠,具备广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 刘竹生. 航天火工装置[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [2] 宋婧. 航天火工产品无损检测技术的应用与发展[J]. 现代制造技术与装备, 2020(6): 164-165.
- [3] 徐司雨. 《火炸药燃烧热化学》新书简介[J]. 火炸药学报, 2019, 42(4): 424.
- [4] 廉洁, 任翼飞, 杨瑞琴, 等. 基于荧光光谱的 2,4,6-三硝基苯酚(TNP)快速检测体系[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 804-808.
- [5] 赵哲, 龚读, 杨宏, 等. 一种起爆器含能粉体材料自动装填系统[J]. 国际航空航天科学, 2019, 7(3): 80-85.
<https://doi.org/10.12677/JAST.2019.73010>
- [6] 孙忠诚. 射线数字成像技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [7] 吕健, 满月娥, 刘涛, 等. 航空精密铸件的计算机层析成像测量方法[J]. 无损检测, 2019(11): 36-38.
- [8] 黄宇, 张晓芳, 俞信. 光子成像系统信号与噪声的统计特性分析[J]. 光学技术, 2012, 38(3): 340-344.
- [9] 郑世才. 数字射线成像检测技术的射线能量最佳化[J]. 无损探伤, 2019, 43(5): 27-31.
- [10] 郑世才, 王晓勇. 数字射线检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.