

航天火工装置 γ 射线工业 CT 检验方法

1 范围

1.1 主题内容

本标准规定了航天火工装置（以下简称火工装置） γ 射线工业 CT 无损检验的人员资格、设备与仪器、防护、检验程序和方法、检验后的处理等要求。

1.2 适用范围

本标准适用于火工装置内部装药、结构缺陷、装配位置正确性等的 γ 射线贯穿辐射式断层扫描成像无损检验。特别适用于直径大于 2mm 的导爆索内部装药的检验及结构复杂的火工装置内部结构的检验。

2 引用文件

- GB 8703 - 88 辐射防护规定
- QJ 833 - 84 封印方法
- QJ 2137 - 91 航天火工装置生产试验安全技术规范
- QJ 2558A - 97 航天无损检测人员的资格鉴定与认证

3 定义

3.1 空间分辨率

在断层扫描图像中，按规定的信噪比，分辨被测物几何结构细节的能力。

3.2 密度分辨率

反映工业 CT 机区分被测物断层图像对比度并间接反映被测物密度最小差别的能力。

3.3 投影时间

由射线源强度、探测器与源的距离、准直器窗口尺寸及系统信噪比确定的单次采样时间。

3.4 断层图像

被测断层对射线衰减特征值的二维分布图。

3.5 图像象素

构成断层图像或有关影像的一个基本单元。

3.6 准直器

将射线源发出的射线束限制或处理成所需形状的一种装置。用于减少散射，改善分辨率等。准直器分为前准直器和后准直器。前准直器限制射线源发射的射线方向和射束形状；后准直器将透射过被测物的射线束离散并衰减散射射线对探测器的影响。

3.7 图像重建

根据所测断层对射线的衰减数据，获取描述物体断层衰减特征信息分布图像的计算过程。

3.8 断层扫描

对被测断层进行辐射测量以获取图像重建所需数据的过程。

3.9 探测器

将包容被测断层对射线衰减信息的辐射转换为电信号的一种换能器。

3.10 探测器通道的一致性

由准直器、探测器和信号电路组成的探测器通道，在测试空气场时，通道输出信号之间的一致程度。

4 一般要求

4.1 人员资格要求

按照 QJ 2558A 的规定，检验人员应通过工业 CT 检验的技术和操作培训，并经考核合格方可上岗。

4.2 主机室

主机室应清洁、无火源，有良好的通风及照明。温度、湿度应控制在设备说明书所要求的范围内。主机室有效面积应大于 35m²， γ 射线出束方向的墙体与 γ 射线源的距离应大于 3m。辐射防护措施应符合 GB 8703 的规定。

4.3 控制室

控制室应尽量与主机室相邻，有防护墙与主机室隔离，有符合辐射防护安全的通道相连。室内应清洁、光线柔和，温度控制在 20~25℃，相对湿度小于 80%。信号接地应符合说明书要求，有可靠的避雷设施。

4.4 通讯设备

主机室与控制室之间，应配置专用通讯设备。

4.5 监视系统

监视系统的摄像机应安装在主机室内视野好的位置，能清楚观察到辐射源开闭与被检工件，监视器安装于控制室内。

4.6 辐射防护安全设备与措施

使用 γ 射线工业 CT 机，除了要求符合 GB 8703 规定外，还必须具备辐射防护及安全保护设施，包括射线源工作场所应配备的辐射剂量仪器、辐射剂量报警器等。上述仪器必须按有关规定检定；主机室的安全门开关与射线源的开关联锁；控制室与主机室应设置剂量报警指示信号。

4.7 特殊安全规定

与火工装置有关的所有安全防护应符合 QJ 2137 的规定。

4.8 设备与仪器

所有的设备与仪器应周检合格并在有效期内。

5 详细要求

5.1 γ 射线工业 CT 机

γ 射线工业 CT 机的最大透照厚度及检验质量应能满足被检火工装置的检验要求。 γ 射线工业 CT 机包括 γ 射线源、机械扫描系统、探测器与数据采集系统、控制系统、计算机系统和图像输出设备等，如图 1 所示。

5.1.1 γ 射线源

透射式 γ 射线源包括产生 γ 射线的放射性同位素、带控制功能的源容器和前准直器。

推荐采用比活度大、能量高的点源，如 ^{60}Co 。源容器屏蔽层厚度应符合 GB 8703 二级包装标准的要求，源的重复定位精度应小于源活性区直径的二十分之一。

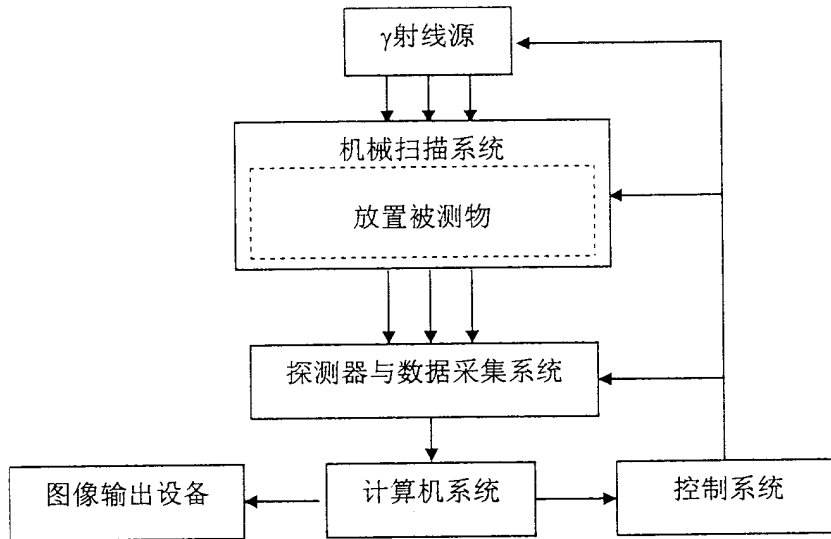


图 1 γ 射线工业 CT 机结构原理示意图

5.1.2 机械扫描系统

机械扫描系统的运动自由度和精度应满足扫描测试要求。

5.1.3 探测器与数据采集系统

探测器通道的一致性应大于 95%。

数据采集系统将探测器获得的信号转换、收集、处理、存储在计算机中，供图像重建使用；其中单次采样时间可选。

5.1.4 控制系统

控制系统实现工业 CT 机对扫描测试过程中机械运动的精确定位和采样时间控制，系统的逻辑控制，时序控制以及测试工作流程的顺序控制和系统各部分的协调，并担负系统的安全连锁控制。

5.1.5 计算机系统

工业 CT 机必须具有优质的计算机系统资源，满足高速有效的数学运算能力、大容量的图像存储和归档要求，有专用的高分辨率及灰度级多的图像显示系统，足够的图像重建、处理、分析、测量等软件。系统扫描重建最大象素矩阵应大于或等于 1024×1024 。

5.1.6 图像输出设备

工业 CT 机的图像一般用视频拷贝机或高质量的激光打印机输出。

5.2 检验前准备

工业 CT 机应定期调校，定期调校后至少应进行空间分辨率、密度分辨率、系统自检、探测器通道的一致性性能测试。

5.2.1 测试空间分辨率

用以下方法之一测试空间分辨率，应高于 0.5mm 或 1Lp/mm 。

5.2.1.1 用图 2a 所示的圆孔测试卡（简称孔卡），测试观察图像能清楚分辨出最小孔的直径值，作为工业 CT 机的空间分辨率。孔卡的厚度大于被测断层厚度的两倍，最小孔的直径应小于 0.5mm ，孔的行距大于相邻行最大孔间距。

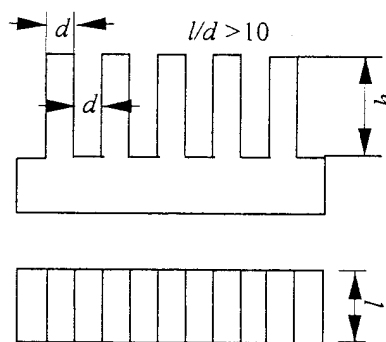
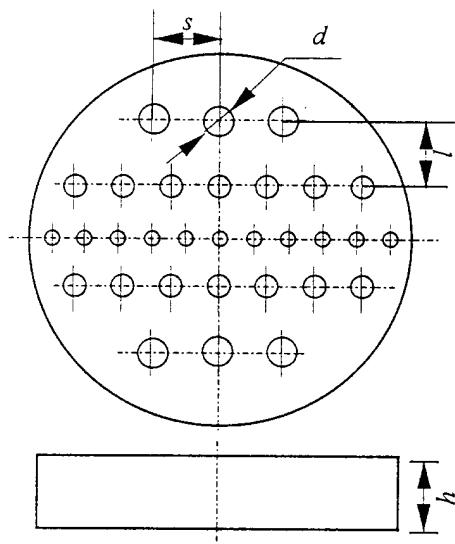


图 2a 空间分辨率测试卡（孔卡）示意图 图 2b 空间分辨率测试卡（条卡）示意图
 d - 孔径； s - 孔间距（ $2d$ ）； l - 行间距； h - 卡厚度 l - 缝长； d - 缝宽及条宽； h - 条高度

5.2.1.2 用图 2b 所示的条形测试卡（简称条卡），测试观察图像能清楚分辨的最小条纹的尺寸，并折算为每毫米的线对数（ Lp/mm ），作为工业 CT 机的空间分辨率。

上述两种测试卡均用高密度材料制作。

5.2.2 测试密度分辨率

按以下方法测试密度分辨率，应达到 4% ($\phi 3\text{mm}$ 范围)。

5.2.2.1 如图 3 所示的密度测试卡，在断层厚度内，采用一种材料与空气组成的比例差别而形成的平均体密度差别作为密度分辨率测试的依据。这种存在密度差别的区域应有相应的面积要求。这时测试的对比度分辨率正比于密度分辨率。

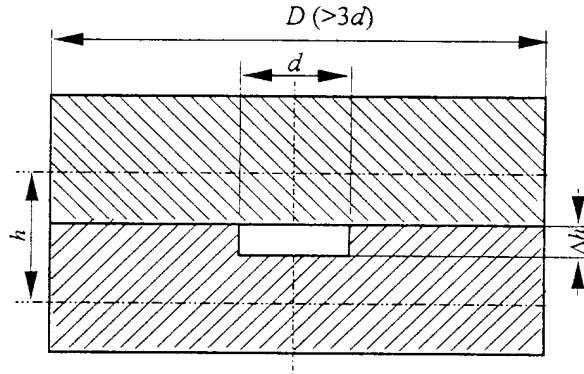


图 3 密度测试卡

D — 密度测试卡外径； d — 凹槽或凸台直径； h — 断层厚度； Δh — 凹槽的深度或凸台的高度

5.2.2.2 当扫描测试的断层厚度为 h ，凹槽的深度或凸台的高度为 Δh 时，只要射束切片厚度完全包含了凹槽或凸台（最好位于中心），可通过公式 1 或公式 2 计算出凹槽或凸台部位通过断层扫描的平均体密度与基体材料的体密度差的相对值：

$$\delta = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta = \frac{\Delta h}{h} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中： δ — 密度分辨率；

h — 断层厚度，mm；

Δh — 凹槽的深度或凸台的高度，mm；

ρ_1 — 基体材料的体密度， g/cm^3 ；

ρ_2 — 断层厚度内有凹槽或凸台对应区域（基体材料和空气隙）的平均体密度， g/cm^3 。

在断层厚度 h 一定的情况下，改变凹槽的深度或凸台的高度 Δh 就可以改变密度差的相对值。采用不同凹槽的深度或凸台的高度 Δh 的密度卡就可测试出密度分辨率。

5.2.3 系统自检

工业 CT 机开机后自动进行自检，操作人员应注意显示的自检结果，并作相应处理。

5.2.4 测试探测器通道的一致性

以调整探测器通道的灵敏度来调整通道的一致性，通道的一致性应满足 5.1.3 条的要

求。

5.3 检验程序和方法

5.3.1 参数选择

根据火工装置大小、材料密度、结构特点及检测要求，确定相应的参数。

5.3.1.1 准直器尺寸选择

对空间分辨率要求高的选择小尺寸孔准直器，对密度分辨率或对检验效率要求高的选择大尺寸孔准直器。

5.3.1.2 扫描重建图像像素大小

空间分辨率要求高的选用较大扫描重建图像像素矩阵。

5.3.1.3 投影时间

尺寸大的、材料密度高的、断层厚度小的选用较长的采样时间。

5.3.2 产品准备

把待检产品分组，在原始记录上记下待检产品的名称、代号、批次、顺序号；在每组待检产品的首发产品处，用高密度材料制作标识。

5.3.3 产品安装

将一组产品安装在夹具上，再放置于主机的扫描工作台上，根据产品的大小确定产品的水平位置。根据产品检验要求确定测试断层位置，并使其与射线扇平面平行，然后调整工作台高度使其与射线扇平面重合。让产品转动一周，观察无异常后，即可记录产品高度位置，操作人员退出主机室，关闭防护门。

5.3.4 断层扫描测试

输入计算机有关扫描测试参数，重建显示参数、工艺参数及产品特殊信息后，开启射线源，进入自动扫描测试过程，完成断层扫描测试。

5.3.5 断层扫描数据传输

关闭射线源，开启防护门，取出工件。

对多机系统，将断层扫描测试的原始数据通过通讯口从数据采集计算机传送至图像计算机；同时可以进行下一组工件的安装、断层扫描测试。

5.3.6 图像重建

综合考虑图像质量和重建时间，选择重建算法，完成断层图像重建。

5.3.7 图像显示、保存、分析与处理

对重建的原始断层图像进行显示，并输入产品代号、批次及每发产品的顺序号，然后保存。如果原始断层图像所反映的被测物需要检验的物理特征不够明显，或图像中存在干扰信息，不便识别，可采用有关的图像处理、分析和测量方法，提高判别能力。若仍无法判别，应查明原因，重新检验。

5.3.8 检验中断处理及断层图像保存

在检验过程中，如遇断电或设备故障等情况，造成检验中断，本次检验应重新做。原始断层图像文件和分析处理后的断层图像文件均应保存。

5.4 检验结果评定

以火工装置技术条件、图样和工艺条件为依据，根据评定区内火工装置内部装药和结

构断层图像灰度变化情况，进行火工装置断层检验结果的判定，并对同批产品在评定区内断层图像的一致性进行整体判断，作出检验结论。

必要时，应建立标准试件和典型缺陷试件的断层图像文件，以便对比和分析。

5.5 检验后的处理

5.5.1 已检产品的处理

将已检产品和待检产品隔离；将不合格品、怀疑有问题的产品与合格产品隔离，分别存放在有明显标志的不同房间或包装箱中，并进行金属封印，金属封印方法按 QJ 833 的规定进行。

5.5.2 检验报告

检验后，应及时写出包括以下内容的检验报告：

- a. 检验设备、日期和操作人员；
- b. 检验时的工艺参数：扫描图像像素、采样时间、射线源、断层位置和断层厚度；
- c. 火工装置名称、代号、批次、顺序号以及检验要求等；
- d. 根据需要附上原始断层图像文件或分析处理后的局部（或完整）断层图像文件拷贝；
- e. 判定结果及检验结论。

5.5.3 资料存档

将检验原始记录、检验报告、原始断层图像文件、分析处理后的断层图像文件、标准试件的断层图像文件、典型缺陷试件的断层图像文件等资料存档，保存期一般为 12a。

附加说明：

本标准由中国航天工业总公司七〇八所提出。

本标准由中国航天工业总公司〇六二基地六九二厂、重庆大学 ICT 研究中心负责起草。

本标准主要起草人：左红军、王 珏、刘恩承、尤良华、罗 军。

本标准主要审查人：刘克斌、沈 明、房云平、刘平义、姜照汉、倪培君、杨谋祥、朱家元、谢清谷、马吉亭、刘天儒、鲍国苗、蒋家荣、邬 岗、杜晓东、杨 劲、张 政。