

工业 CT 无损检测国内外标准对比

肖 鹏,章 镇

(上海飞机制造有限公司 复合材料中心, 上海 201323)

摘要: 从标准概述、设备、样品、操作、图像质量参数、伪像、设备性能验证以及检测结果验证等方面对 ASTM, ISO 以及 GB 三大标准体系关于工业 CT 的部分进行了全方位的对比与介绍, 梳理了各自标准的优势和特点, 为标准使用者提供有益信息。

关键词: 工业 CT; 标准对比; ISO; ASTM; GB

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)05-0074-07

Comparison of domestic and foreign standards for industrial CT nondestructive testing

XIAO Peng, ZHANG Zhen

(Composites Center, Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201323, China)

Abstract: A comprehensive comparison and introduction of the parts of ASTM, ISO, and GB standard systems related to industrial CT were conducted from the aspects of standard overview, equipment, samples, operations, image quality parameters, artifacts, equipment performance verification, and detection result verification. The advantages and characteristics of each standard were summarized, providing useful information for standard users.

Key words: industrial CT; standard comparison; ISO; ASTM; GB

CT(计算机层析成像)检测技术可以得到试件的层析图像,清晰地展示检测对象的内部结构关系、物质组成及缺陷状况,其重建数据可用于各种分析研究^[1]。对于任何一项技术来说,标准的制定是其大规模推广应用的基础,工业 CT 技术也不例外。工业 CT 标准的制定,对 CT 的技术术语和性能指标逐步建立了比较清楚的概念,也建立了 CT 设备检验和验收的科学规范^[2]。

目前与工业 CT 检测相关的标准共有 40 多项,包括国际标准(ISO)4 项,美国材料试验协会标准(ASTM)7 项,国家标准(GB)20 项,国家军用标准(GJB)3 项,行业标准 12 项。标准的类型有技术导则、特定检测方法、测试卡、系统性能测试方法等。就相关标准的具体内容进行比较研究,对提高我国工业 CT 标准技术水平和相关技术发展有着重要意义。从标准概述、设备、样品、操作、图像质量参数、

伪像、设备性能验证以及检测结果验证等方面对 ASTM, ISO 以及 GB 三大标准体系关于工业 CT 的部分进行了对比与介绍,梳理了各标准的优势和特点,为标准使用者提供有益信息。

1 标准体系简介

1.1 ISO 标准体系

国际标准化组织无损检测技术委员会射线检测分委会(ISO/TC 135/SC 5)于 2002 年分别发布了 ISO 15708-1:2002 和 ISO 15708-2:2002。这两个标准提供了 CT 理论、使用的教程介绍以及检测方法指南。2017 年,ISO 15708 系列标准陆续升版。

ISO 15708:2017 系列标准对工业 CT 检测技术用语进行了定义,规定了射线工业 CT 的一般原理、使用设备、样品、材料和几何形状的基本注意事项,规定了系统的操作设置、检测结果的解释,并规定了系统在执行不同检测任务时进行性能验证的基本要求,旨在为检测人员提供相关技术信息,以便在检测过程中选取合适的参数,并对检测结果进行合理分析和评定。ISO 标准体系组成(CT)如表 1 所示。

收稿日期: 2022-10-18

作者简介: 肖 鹏(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事民机复合材料无损检测研究工作

通信作者: 章 镇, 18870471009@163.com

1.2 ASTM 标准

1995年,美国材料试验协会无损检测委员会射线分委会(ASTM E 07.01)相继发布了ASTM E 1695:95和ASTM E 1672:95。文中讨论的4篇ASTM通用标准并不像ISO标准一样对工业CT检测的全流程进行系统性的规范与指导,这些标准分别侧重于技术和原理的教程、性能参数测试、设备部件选购以及扇形射束CT。ASTM标准体系组成

(CT)如表2所示。

1.3 GB 标准

2012年,全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)发布了6篇与工业CT相关的国家标准。2017年后,针对工业CT系统的性能指标测试,SAC/TC 56发布了一系列测试卡标准(文中只讨论空间分辨率和密度分辨率的测试卡标准),GB标准体系组成(CT)如表3所示。

表1 ISO 标准体系组成(CT)

序号	标准号	英文名称	中文名称
1	ISO 15708-1:2017	Non-destructive testing-radiation methods for computed tomography part 1:terminology	无损检测-工业射线计算机层析成像检测-第一部分:术语
2	ISO 15708-2:2017	Non-destructive testing-radiation methods for computed tomography part 2:principles, equipment and sample	第二部分:原理、设备与样品
3	ISO 15708-3:2017	Non-destructive testing-radiation methods for computed tomography part 3:operation and interpretation	第三部分:操作和解释
4	ISO 15708-4:2017	Non-destructive testing-radiation methods for computed tomography part 4:qualification	第四部分:验证

表2 ASTM 标准体系组成(CT)

序号	标准号	英文名称	中文名称
1	ASTM E 1441:19	Standard guide for computed tomography (CT)	计算机层析成像的标准指南
2	ASTM E 1695:20	Standard test method for measurement of computed tomography (CT) system performance	测量计算机层析成像系统性能的标准试验方法
3	ASTM E 1672:20	Standard guide for computed tomography (CT) system selection	选购计算机层析成像系统的标准指南
4	ASTM E 1570:19	Standard practice for fan beam computed tomographic (CT) examination	扇束CT检测的标准规程

表3 GB 标准体系组成(CT)

序号	标准号	英文名称	中文名称
1	GB/T 29034—2012	Non-destructive testing-guide for industrial computed tomography (CT) imaging	无损检测 工业计算机层析成像(CT)指南
2	GB/T 29067—2012	Non-destructive testing-test method for measuring industrial computed tomography (CT) image	CT图像测量方法
3	GB/T 29068—2012	Non-destructive testing-guide for industrial computed tomography (CT) system selection	CT系统选型指南
4	GB/T 29069—2012	Non-destructive testing-test method for measuring industrial computed tomography (CT) system performance	CT系统性能测试方法
5	GB/T 29070—2012	Non-destructive testing-industrial computed tomography (CT) general requirement	CT检测通用要求
6	GB/T 35391—2017	Non-destructive testing-spatial resolution phantom for industrial computed tomography (CT) testing	CT检测用空间分辨率测试卡
7	GB/T 35386—2017	Non-destructive testing-density resolution phantom for industrial computed tomography (CT) testing	CT检测用密度分辨率测试卡

2 具体内容比较

2.1 设备

2.1.1 概述

ISO 15708-2:2017对工业CT设备中的每个部

件进行了详细的分类和描述,包括射线源的分类以及不同能量范围下射线源的应用情况与特点、探测器的分类以及应用范围、描述机械运动系统的运动模式以及规定计算机在数据采集、重建和可视化中的应用。ASTM E 1672:20和GB/T 29068—2012专门提到如

何选购一套工业CT系统,对于准备采购工业CT的潜在用户极具参考价值。这些标准对射线源、探测器、机械运动系统的要求存在差异,以下将展开详细介绍,而对采集、重建、可视化和存储系统等的要求基本一致,此处不再做分析与讨论。

2.1.2 射线源

各标准关于射线源的内容如表4所示(焦点尺寸指焦点直径)。

表4 各标准关于射线源的内容

项目	ISO 15708-2:2017	ASTM E 1672:20	GB/T 29068—2012
分类	开管X射线机:高分辨率,低能量,管电压为0~225 kV,管电流为0~3 mA,焦点尺寸小于100 μm (微焦点),焦点尺寸小于1 μm 的为纳米焦点,真空室能打开从而允许更换灯丝 密封管X射线机:管电压为0~450 kV,管电流为0~60 mA,焦点尺寸小于250 μm (小焦点),真空室不能打开从而无法更换灯丝,常用于成像尺寸或密度较大的样品	X射线源:给定焦点尺寸下,X射线源比同位素源强度高几个量级;X射线源在关闭时会停止辐射;未校正情况下,X射线源的多色性会导致射束硬化 同位素(单色性):不存在射束硬化,也不需要笨重且耗能的电源,输出强度更稳定,强度受到比活度的限制	同 ASTM E 1672:20
射线靶	直线加速器:不普遍使用,用在高密度、高能量的系统中,能量为1~16 MeV,焦点尺寸小于2 mm 透射靶承受较高电压,强度更大 反射靶焦点尺寸更小,辐射角度更大,几何放大倍数更大	同步辐射:产生连续谱射线,受穿透能力限制,只能检测小尺寸的物体,使用较少 无	无

表5 各标准关于探测器的内容

ISO 15708-2:2017	ASTM E 1672:20	GB/T 29068—2012
电离探测器:坚固耐用,可用于探测2 MeV的能量	LDA与扇形束CT系统一起使用,在扇形束CT系统中准直到一个狭缝以减少散射辐射,通常适用于探测0.4~20 MeV的射线能量	单探测器:效率最低,复杂度最小,不受散射和不一致性影响
闪烁探测器:设计灵活,非常耐用,使用DDA时辐射散射更大,DDA采集投影速度更快(与LDA相比)	DDA与锥束CT系统一起使用,锥束CT系统可以较平行和扇形束几何系统更快地获得3D体积图像,但容易散射辐射,可以通过软件进行校正	DDA采集速度快,需要高传输带宽和储存量,效率低,动态范围小,难以实现准直和屏蔽
半导体探测器:使用半导体直接将入射射线转化为电荷的面阵探测器,避免了光散射,可提高分辨率	—	LDA较好地综合了以上两种探测器的优点,速度较快,散射和不一致性在可接受范围内,可较好实现准直和屏蔽

表6 各标准关于机械运动系统的内容

ISO 15708-2:2017	ASTM E 1672:20	GB/T 29068—2012
通过增加随机线性运动和执行“连续旋转一个采集周期”这两种方式来减少伪像	分为立式、卧式结构(细而长的零件适合卧式布局,粗而短的零件适合立式布局)	—
大多数具有水平X射线轴,少数具有垂直X射线轴	精度分为扫描运动精度和装配几何精度	—
使用线阵探测器的系统中,应增加样品在旋转轴高度的相对运动轴	系统扫描运动精度由机械传动部件精度和控制系统控制精度共同决定	—
与CT数据相关的各机械运动系统的运动定位精度应优于CT系统最高分辨率的1/5	系统装配几何精度通过精密零件加工和精密调配调试保证	—

2.2 样品

ISO 15708-2:2017较为全面地描述了在检测过程中有关样品的注意事项,其中包括样品的尺寸、形状与

材料。该标准限制样品尺寸,提出最理想的形状是圆柱体,并可以转动至少180°。若由于几何或者穿透限制未能采集到所有角度的投影,则可能会出现伪像。

该标准含有一张不同材料和能量的10%穿透率的厚度表。通过查询该表,检测人员可以根据不同需求的待测样品来选择信噪比最好情况下的射线能量。

ASTM E 1672:20 和 GB/T 29070—2012 中列出了样品参数与系统性能的关系:①样品参数包括最大回转直径、最大长度(或高度)、最大重量以及最大等效钢厚度等;②最大回转直径由系统最大能量、射线分布以及扫描方式等因素决定;③最大长度(或高度)由立式系统的最大升降行程或卧式系统

的最大平移行程决定;④最大重量由系统运动部件及机械结构综合承载能力决定;⑤最大等效钢厚度主要由射线源能量决定。

2.3 操作

ISO 15708-3:2017 规定了 CT 系统的操作及结果解释,目的是为检测人员提供相关技术信息,以便在检测过程中选取合适的参数。ASTM E 1441:19 和 GB 中也对操作设置做出了相应规定。各标准具体操作指南如表 7 所示。

表 7 各标准具体操作指南

操作设置	ISO 15708-3:2017	ASTM E 1441:19	GB/T
最佳能量	最佳能量是提供最佳信噪比的能量,但不一定是得到最清晰射线照片的能量。可调整加速电压以使其线衰减系数的差异最大	给定样品的最佳射线能量不是由提供足够穿透力的最低能量决定的,而是由产生最大信噪比的能量决定	无
几何布置	优先考虑射线源到待测物的距离最小,射线源到探测器的距离宜尽可能小,且锥束覆盖整个探测器 对于锥束系统,锥角应小于 15°,被测物体通常旋转 360°。理想情况下,投影分度数不宜小于 $\pi/2 \times$ 矩阵大小,投影的数量宜大于 $\pi \times$ 矩阵大小	无	不宜用大视场直径来检测小直径待测物 选择扫描视场时,被测物在图像中,宜占视场的 2/3(29070—2012)
射线源参数	设置最大射束能量和管电流宜采用的衰减比约为 1:10 使用前置滤波片可获得最佳灰度范围,前置滤波片可减小射束硬化的影响,也会降低射线强度	当样品组分物理密度差异较大时,可以在高源能量下获得最佳信噪比,此时,减少图像噪声比增加对比度更重要 当样品组分物理密度差异不大时,可以在低源能量下获得对材料的最佳区分,此时,增加对比度可能比减少图像噪声更重要 穿透样品的射线强度占入射射线强度的 13% 时,对比度灵敏度通常最好	所选射线能量对应 8~10 个钢的半值层厚度,应大于检测对象的最大等效钢厚度 检测对象的材料密度差很小时,在保证足以穿透的情况下,选择低能量的射线源 检测对象尺寸较大、密度较大或者由密度相差较大的材料组成时,宜选择能量高、强度大的射线源
探测器	充分考虑曝光时间(帧速率);每个投影的迭加数量;数字增益和偏置;像素合并等参数 必要时,宜使用偏置、增益和坏像素校正,数字化的最大辐射强度值不超过其饱和值的 90%	同时使用的像素点越多,扫描数据采集得越快 探测器元件的良好校准(以均衡响应并减去暗场信号)对于良好的重建至关重要	开机时,进行暗场和空气校准;准直器和射线参数调整后,进行空气校准(29070—2012)
重建	应设定要重建的体积区域、CT 图像的大小及其动态范围,宜优化重建算法或校正设置,体积区域由 x, y 和 z 轴上的体素数决定		无
缺陷检测	对于单独的孔隙、空洞或裂缝的可检测性,其最小范围通常应为体素大小的 2 到 3 倍(在样品位置)		
尺寸测量	确定精确的图像比例,阈值(明确材料表面),调整基本几何体,生成几何数据,标称/实测比较几何数据的进一步处理		

ISO标准中规定数字化的最大辐射强度值不超过探测器饱和值的90%，能够有效避免射线过曝对探测器造成的伤害以及对检测结果的影响。ISO标准可以有效地通过体素尺寸来描述最小缺陷可检性，为缺陷检测提供了量化的途径。

2.4 图像质量参数

CT图像的质量参数是衡量工业CT检测效果最直观的方式。

ISO 15708-3:2017 规定了对比度、噪声、信噪比、对比度噪声比以及空间分辨率这些基础的图像质量参数，并以实例的方式详细讲述了采用线对卡和固体密度差法来分别测量空间分辨率和密度分辨率的完整方法。ASTM E 1695:20 则重点讲述调制传递函数(MTF)和对比度鉴别函数(CDF)的测试方法、测量原理、测量步骤以及最终的结果分析。GB/T 29034—2012 将 ISO 15708-3: 2017 和 ASTM E 1695:20 中的关于图像质量参数的内容融合在一起，更加全面。GB/T 35391—2017 和 GB/T 35386—2017 则汇总了 ISO 标准和 ASTM 标准中所有测量密度分辨率和空间分辨率的方法。

以下将从密度分辨率、空间分辨率以及对比度细节图(CDD)3个方面来对比 ISO、ASTM 和 GB 标准。

2.4.1 空间分辨率

上述3份标准都以MTF来表征空间分辨率，MTF描述了CT系统的总不清晰度降低周期性图像对比度的因素，描述了CT系统对图像信号的调制(相对强度变化)的传输，是调制的空间频率。

ISO 15708-3:2017 规定了两种测量MTF的方法，一种是从均匀圆柱体的CT图像获取MTF，一种是用线对卡来直接测定离散点处的MTF，并在附录中对有关线对测试卡的详细测量方法进行了完整的规定，其中包括线对卡的设计制作、测量原理以及最终的测量结果分析。

ASTM E 1695:20 只详细说明了从均匀圆柱体图像获得MTF的试验方法，对重建圆柱切片边缘锐度的图像进行分析得出MTF曲线，对计算逻辑、测量过程和测量数据等方面的描述比ISO的描述更加具体和详细。

2.4.2 密度分辨率

密度分辨率又称对比灵敏度。ASTM E 1695:20 通过CDF曲线来表征密度分辨率，而 ISO 15708-3:2017 通过固体密度差法和对比度噪声比来表征密度分

辨率。GB/T 29034—2012 中未提及密度分辨率。

ISO 15708-3:2017 用对比度噪声比来衡量细节特征和背景之间衰减值是否大于背景噪声水平。通常认为对比度噪声水平不小于3时，具有良好的检测置信度，另外该标准规定了固体密度差法来测量密度分辨率的方法，参考试件由一个包含添加物的圆柱形部件组成，分为高能和低能两种模式，标准详细给出了测量添加物密度的公式，规定了如何通过相关曲线评价系统性能。

ASTM E 1695:20 提出，在一定的噪声水平下，可以通过CDF曲线，近似地描述从基体判别大小为D的对比度特征的能力。CDF描述了图像噪声对其他同质材料邻域中特征可检测性(对比度灵敏度)的影响，作为该特征在体素中的大小D的函数。该测定基于对均匀圆柱体材料的CT扫描，CDF曲线是分析圆柱体切片中心的对比度和统计噪声的图像得出的。

2.4.3 对比细节图

在现实中，人眼能够检测到的有效对比度(成功率50%)取决于图像噪声和特征直径。只有ASTM E 1695:20 和 GB/T 29034—2012 规定了CDD曲线的要求，ISO 15708-3:2017 标准中并没有提到。

CDF描述了特定尺寸特征的可检测性和噪声场中的最小对比度(忽略不清晰度的影响)，而MTF几乎完全代表不清晰度对特征的影响。这两个量可以在CDD中统一，CDD将感知对比度和物理对比度结合起来，以表征CT系统在给定评估条件下解析和区分特征的总体能力。

2.5 伪像

表8 总结标准了 ISO 15708-2:2017, ASTM E

表8 各标准提及的伪像成因

名称	ISO 15708-2:2017	ASTM E 1441:19	GB/T 29068—2012
射束硬化伪像	√	√	√
边缘伪像	√	√	×
散射	√	√	×
不稳定性	√	×	×
环形伪像	√	√	√
旋转中心偏差伪像	√	×	×
运动伪像	√	√	×
投影数量不足	√	×	×
引起的伪像			
锥束伪像	√	√	×
探测器元件尺寸	×	√	×
重建伪像	×	√	×
部分容积效应	×	×	√

1441:19 以及 GB/T 29068—2012 中提及的伪像成因(√表示提及,×表示未提及)。这些标准中关于伪像图像及其成因的描述,能让检测人员更好地分辨伪像,进而有效地避免伪像。

2.6 设备性能验证方法

各标准对设备性能验证方法的具体规定如表9,10 所示^[3],可见,ISO 标准对设备性能验证的方法和规定最为丰富,且该标准规定了标准试件和模

表 9 各标准性能验证要求

性能参数	ISO 15708-4:2017	ASTM E 1570:19	GB/T 29070—2012
总体性能	与参考测量结果进行对比,短周期核查(如每周)	定期测量和监控设备参数性能	无
空间分辨率	缺陷检测和尺寸测量应用	1 次/周	≥1 次/年;安装调试、维修、更换部件后
密度分辨率	缺陷检测应用	1 次/周	≥1 次/年;安装调试、维修、更换部件后
切片厚度	无	1 次/周	
伪像	组件质量评价或组件发生变化后	1 次/周	无
组件性能	无	安装、维修或组件发生变化后	

表 10 各标准设备性能验证方法

性能参数	ISO 15708-4:2017	ASTM E	GB/T
总体性能	对参考样件进行检测,比对检测结果,如缺陷(气孔、裂纹)、最薄处、最厚处、厚度等,对总体性能进行监控	对空间分辨率、密度分辨率等指标进行核查,检测前验证是否满足使用要求(1570:19)	对空间分辨率、密度分辨率等指标进行核查,检测前对缺陷检测能力进行验证(29070—2012)
空间分辨率	圆盘卡法、线对卡法	圆盘卡法(1695:20)	线对卡法(按分辨率分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级)、圆孔卡法(按孔径分为Ⅰ级和Ⅱ级)、圆盘卡法。测试卡按材料可分为钢质、硅质和其他金属质(35391—2017)
密度分辨率	缺陷检测应用	圆盘卡法(1695:20)	空气间隙法、密度差法、圆盘卡法(29069—2012)
切片厚度	无	用棱锥体、圆锥体、斜板、螺旋槽等验证(1570:19)	
伪像	与参考图像比较	观察均匀圆盘密度变化(1570:19)	
机械系统	使用坐标测量设备(CMMs)检查移位轴轨迹和定位精度		无
图像比例	用已知空间结构的高精度球体组合(如球杆、哑铃)检查		
射束轴与探测器的垂直度	使用合适的测试样品(如钨丝或细针、球体等)进行测试		
焦点	采用扫描方法、针孔照相机射线照相方法、边缘方法、小焦点和微焦点 X 射线管的有效焦点尺寸的测量方法测试;通过比较不同放大倍数下 CT 扫描获得的尺寸在规定的误差范围之内进行核查	无	2575.1-5—2010《无损检测工业 X 射线系统焦点特性》
射线输出稳定性	通过测量剂量率检查 X 射线管输出的稳定性		
探测器	和交付状态进行比较核查动态性能。定期核查坏像素。通过一定时间内的强度测量核查输出稳定性		无
重建与可视化	在重新安装、更换硬件或升级后,将重建与可视化结果与以前的结果进行比较		

拟试件的制备方法,足以支撑设备日常使用过程中的性能验证,且验证周期最短;GB 标准规定空间分辨率、密度分辨率和总体性能每年需验证一次,要求相对较松。

2.7 检测结果验证

各标准对检测结果验证的具体规定如表 11 所示。

表 11 各标准对检测结果验证的具体规定

检测目的	ISO 15708-4:2017	ASTM E 1570:19	GB/T
缺陷检测	目标特征可检性的核查(空间分辨率、对比度分辨率、重建、可视化等)		
	适用性验证(采用参考试件结合剖切对比进行验证)	对是否满足检测要求进行验证	标准或对比试样核查 (29070—2012)
	一致性验证(重建、CT 图像比例、正弦图或 CT 投影序列、系统状态等)		
尺寸测量	尺寸测量能力的核查(空间分辨率、X 射线穿透性、三维数据等)	标准对比试样(空心柱、校准孔阵列、模拟试件)核查	标准或对比试样核查(29070—2012)
	精度验证(采用可进行测量溯源的参考标准样品或参考试件进行核查)	验证尺寸测量精度的标准样件要经过校准	通过制作标准试件(长方体)进行尺寸测量校准,该标准中包含标准制作与检测要求(29067—2012)
	一致性验证(重建、CT 图像比例、正弦图或 CT 投影序列、系统状态等)	—	—

3 结语

ISO、ASTM 和 GB 的标准内容都是编者按照业内公认的基本原理、大量实际操作中积累的普遍经验以及市场上主流供应商提供的商品信息总结而来。这些标准对于国内工业 CT 的应用与研发起到了一定的积极作用,让设备使用者和供应商对于基本术语和相关技术要求逐步建立了统一的概念。

从工业 CT 导则的角度,GB 标准和 ASTM 标准都罗列出样品参数与系统性能的关系并介绍了工业 CT 的技术基础,如物理基础、数学基础、基本算法以及扫描方式等,ISO 标准未提及。ISO 标准规定了样品的注意事项,并列出了不同材料下管电压与穿透厚度的关系,为射线源的参数设置提出了指导性的参考标准。因此,GB 标准和 ASTM 标准更偏向基础原理,而 ISO 标准更注重实际应用。

从设备性能评价的角度,GB 标准只对总体性能、空间分辨率和密度分辨率性能评价进行规定,而 ASTM 标准只对总体性能、空间分辨率、密度分辨率、切片厚度以及伪像的性能评价进行规定,ISO 标准则对除以上提到的参数进行性能评价外,还对焦点、探测器、机械系统等各个部件重要参数的性能评价进行了规定。由此可见,ISO 标准对于设备性能评价的规定更全面且规范。

从检测方法的角度,ASTM 标准专门发布了关于扇束射束 CT 检测标准规程,ISO 标准按照检测目的将工业 CT 检测分为缺陷检测和尺寸测量,并

对其检测步骤进行了详细规定,GB 根据检测原理和经验,对射线源控制等 CT 检测参数给出指导性建议。在进行 CT 检测参数的选择时,应按需使用各个标准。

总体来说,ISO 标准完整地规定了工业 CT 原理、设备和样品、操作和解释、验证等内容,对工业 CT 检测全过程提出了质量控制要求,基本涵盖了工业 CT 技术的方方面面,对工业 CT 在各个领域的应用具有高度的指导作用。ASTM 系列标准的内容则更加具有针对性,主要侧重在图像性能测试、设备采购推荐、测量并校准密度上。在标定空间分辨率和密度分辨率、采购工业 CT 设备以及测量试样密度时,能提供详细具体的应用示例、方法与建议。GB 系列标准则是充分吸取了国外优秀标准的内容并将其与国内行业发展相结合,其内容对中文读者更加友好,相对国外标准也有了不少创新之处,但内部不统一,如空间分辨率和密度分辨率在不同的国标中有不同的测量方法,需要在后续工作中进一步完善。

参考文献:

- [1] 魏彪,先武.工业 CT 技术及其 NDT 应用[J].现代物理知识,2000,12(增刊 1):77-79.
- [2] 张朝宗,肖永顺.对修订现行工业 CT 相关国家标准的建议[J].CT 理论与应用研究,2015,24(4):629-635.
- [3] 倪培君,张维国,郭森,等.工业 CT 检测的实验室能力认可[J].无损检测,2021,43(9):58-63.