

用工业 CT 测量物质密度的 ASTM 标准方法

刘 力, 张英平

(中国科学院 高能物理研究所 研发中心, 北京 100049)

摘 要:介绍了美国 ASTM 标准中推荐的一种利用工业 CT 测量物体质量密度的原理与方法以及一个应用案例, 显示了该方法较高的测量精度。该法可在工业 CT 的实际应用与系统性能测定中参考使用。

关键词:工业 CT; 质量密度; 线性衰减系数; 刻度

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)06-0324-02

ASTM Method of Density Measurement by Industrial CT

LIU Li, ZHANG Ying-ping

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A density calibration method by industrial CT was introduced, which was recommended by ASTM. An example was presented to demonstrate the feasibility and accuracy of the method under a 9MeV industrial CT. The method could be put into use in practical density measurement and in the performance test of an industrial CT.

Keywords: Industrial CT; Mass density; Linear attenuation; Calibration

ICT 是工业计算机断层成像技术 (Industrial Computed Tomography) 的简称, 主要用于工业产品无损检测 (NDT) 和无损评价 (NDE), 被检产品可小到毫米, 大到数米, 已经广泛用于航天、航空、核工业、军事工业、石油地质、钢铁、化工、机械、电力工业、反恐与缉毒等领域。ICT 除了可提供工件断层影像信息外, 还可以进行质量密度的绝对测定。

利用 ICT 测量工件的质量密度就是将 CT 数转换为质量密度 ρ , 在转换过程中需要进行复杂的刻度、标定、校正等处理。下面介绍了美国 ASTM 标准中推荐的 ICT 质量密度测量的原理与方法, 希望国内工业可借鉴。

1 ASTM 密度测量的原理与方法

ASTM (American Society of Testing Materials)

收稿日期: 2005-03-09

基金项目: 中国科学院创新基金项目 (KJCX1-SW-08)

作者简介: 刘 力 (1962~), 男, 博士, 副研究员, 从事放射成像研究和开发工作。

即美国材料实验协会的 E1935 标准^[1]介绍了利用 CT 进行物体密度测量的标准方法以及一个具体的应用案例, 该方法具有较高的质量密度测量精度。

其基本原理就是通过对标准件的 ICT 测量, 建立 CT 数与线性衰减系数之间的关系, 利用该关系换算出被测工件某部位的线性衰减系数, 再除以标准件的质量衰减系数 (根据被测工件的化学属性手册查得) 就能得到相应的质量密度。

在单色窄束情况下, 线性衰减系数 μ 的定义是

$$\mu = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{d} \quad (1)$$

式中 I_0 ——衰减前的入射射线强度

I ——经过物体衰减后的射线强度

d ——射线穿过物体的厚度

线性衰减系数 μ 与质量衰减系数 μ_m 的关系是

$$\mu = \mu_m \rho \quad (2)$$

在 ICT 中, CT 数可定义为经过校正、重建后的 CT 断层图像像素灰度的数值。理论上讲, CT 数应等于或正比于被测物的线性衰减系数, 其中空气的

CT 数应该是 0,但实际并非如此,因为有射束硬化、探测器系统的非线性等诸多因素影响。

ASTM 测试物体质量密度的标准方法就是选择两种以上标准工件(即 μ_m 与 ρ 已知)进行 CT 断层扫描,对重建后的断层图像选择合适的区域,算出其平均 CT 数 N_{CT} ,由称重法精确测出诸标准件的 ρ ,假设一个有效能量 E_{eff} ,由相关手册查表得到 μ_m ,由式(2)得到 μ ,作出 $N_{CT}-\mu$ 试验点图及其拟合直线,计算 N_{CT} 与 μ 试验点之间的相关系数,当采用某个 E_{eff} 值时相关系数最大,于是该 E_{eff} 就是系统的单能近似下的有效能量,此时的拟合直线就是该 CT 系统的刻度曲线,即线性衰减系数 μ 与 CT 值 N_{CT} 之间的换算关系

$$\mu_{CT} = aN_{CT} + b \quad (3)$$

式中 a, b 为拟合参数。

在对被测工件进行 ICT 密度测量时,ASTM 方法要求知道或近似知道被测物的质量衰减系数 μ_m ,进而可由 CT 数根据式(3)换算得到的 μ_{CT} 值经以下计算

$$\rho = \frac{\mu_{CT}}{\mu_m} \quad (4)$$

得到被测物感兴趣区域的质量密度,这实际上是一种刻度的方法。

2 标准件

用式(3)和标准工件可确定 ICT 系统的刻度直线。标准件的质量衰减系数仅与化学成分有关(这一点与线性衰减系数不同),应能从相关手册中查到。对由多种组分构成的标准件, μ_m 由下式计算

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (5)$$

式中 w_i ——第 i 种组分所占质量权重因子

$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ ——第 i 种组分的质量衰减系数

标准工件的 ρ 值应用称重法或其它方法精确测出(例如误差 $\leq 1\%$),一般手册中给出的数值精度往往不足以用来做刻度。

常被用做标准件的物品有纯金属、配制液体(如盐水、葡萄糖水等)和某些塑料(如丙烯酸树脂、碳氟化合物等)。标准工件应该具有确定的化学成分,可重复生产,还要求质地均匀,即均匀度优于刻度所要求的精度,无损伤,不变形等。

标准件要有一定的大小,保证所选区域有足够多的像素个数(像素大小与探测器有关)和足够大的

信噪比(与探测器和采集条件有关),使刻度曲线不受噪声涨落和边缘效应等的影响。ASTM 推荐选择 30×30 像素的矩形区域。同样,标准件及其所选区域也不能太大,否则射束硬化效应造成的密度分布不均匀性会大于测量的精度,尤其是对原子序数 Z 较大的物体。

ASTM 建议采用圆柱形工件,这样断层图像可以是圆形的,可避免尖锐边沿带来的伪影影响。所用诸标准件的 μ 值范围要覆盖被测物的 μ 值范围。

3 测量条件

所有标准件在 CT 扫描时都被放入一底盘中。该底盘通常是用有机玻璃圆柱制成,上面有许多圆孔,用以安放标准件(图 1)。底盘应该与被测物体具有大致相同的对射线的衰减量,其材质也尽量与被测物体相同或接近。

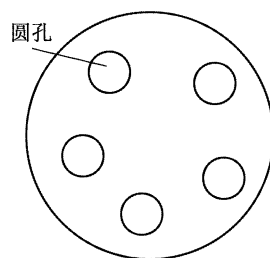


图 1 安放标准件的圆盘结构示意图

在实际测量中要对设备的能量、流强和动态范围等参数进行合适选择。在整个密度刻度与测量过程中,采集参数要固定,操作步骤要相同,要减少噪声,获取足够大的信噪比,要尽量避免各种伪影,使其控制在精度以内。此外,对标准件与被测物体的 CT 处理参数(如重建参数和平滑因子)也要相同。

4 应用实例

该 ASTM 标准列举了一个密度测量的实际例子。国外某台 9MeV 工业 CT 进行断层扫描,使用甲基丙烯酸甲酯($H_8C_5O_2$)、四氟乙烯(C_2F_4)和纯铝(Al)三种标准件进行刻度。使用称重法精确测出各自的质量密度(试验值),依照第 1 节所述方法确定有效能量为 3.8 MeV,由标准件化学成分查表得 μ_m 的理论值并代入式(2)求出诸标准件的“半试验” μ 值,结果见表 1。作 $N_{CT}-\mu$ 试验点图及其拟合直线,该拟合直线就是此系统在所选用的采集参数下

表 1 在有效能量为 3.8 MeV 时的密度刻度数

物质	试验 ρ g/cm ³	理论 μ/ρ cm ² /g	半试验 μ cm ⁻¹	CT 数
$H_8C_5O_2$	1.18	0.033 8	0.039 9	1 286
C_2F_4	2.16	0.030 6	0.066 1	2 119
Al	2.71	0.031 8	0.086 2	2 756

关于举办 2006 无损检测新标准宣贯会的预通知

全国无损检测标准化技术委员会、上海材料研究所和《无损检测》编辑部拟定于 2006 年 10 月 31 日—11 月 2 日在上海联合举办 2006 无损检测新标准宣贯会(与第 11 届中国国际质量控制与测试工业设备展览会同时进行)。

本次宣贯会拟对下列新标准进行宣贯和讲解:

(1) GB/T 3323—2005《金属熔化焊焊接接头射线照相》

(2) JB/T 4730.2—2005《承压设备无损检测 第 2 部分 射线检测》

(3) JB/T 4730.3—2005《承压设备无损检测 第 3 部分 超声检测》

(4) GB/T 5097—2005《无损检测 渗透检测和磁粉检测 观察条件》

(5) GB/T 15822.1—2005《无损检测 磁粉检测 第 1 部分 总则》

(6) GB/T 15822.2—2005《无损检测 磁粉检测 第 2 部分 检测介质》

(7) GB/T 15822.3—2005《无损检测 磁粉检测 第 3 部分 设备》

(8) JB/T 10554.1—2006《无损检测 轴类球墨铸铁超声检测 第 1 部分 总则》

(9) JB/T 10554.2—2006《无损检测 轴类球墨铸铁超声检测 第 2 部分 球墨铸铁曲轴的检测》

(10) JB/T 10555—2006《无损检测 气门超声检测》

(11) JB/T 10559—2006《起重机械无损检测 钢焊缝超声检测》

会议将邀请上述标准的主要起草人主讲。

欢迎报名参加会议,参加者将获得由全国无损检测标准化技术委员会颁发的培训证书。欲参加者请于 2006 年 8 月 31 日前向全国无损检测标准化技术委员会“2006 无损检测新标准宣贯会”会务组报名。会议正式通知将于 2006 年 9 月直接寄给报名者。

地址:上海市邯郸路 99 号;邮编:200437;传真:021-65544911;联系人:单国英(电话:021-65556775 转 311,E-mail:wm@mat-test.com),金宇飞(电话:021-65556775 转 396,E-mail:tc56@chinandt.org)。

(全国无损检测标准化技术委员会)

的刻度关系式。对聚酰胺($H_{11}NC_6O$)、聚碳酸酯($H_6C_{16}O_3$)和纯铜(Cu)三种工件进行 ICT 密度测量,结果见表 2,可见 CT 方法测出的质量密度值与公开发表值基本一致,偏差 $\leq 1\%$ 。

表 2 CT 导出的密度测量

物质	CT 数	测量 μ cm ⁻¹	理论 μ/ρ cm ² /g	测量值 ρ g/cm ³	发表值 ρ g/cm ³
$H_{11}NC_6O$	1 272	0.039 4	0.034 2	1.15	1.14
$H_6C_{16}O_3$	1 273	0.039 5	0.032 1	1.23	1.21
Cu	9 679	0.304	0.033 5	9.08	8.98

5 结语

上述 ASTM 推荐方法不是唯一的测定手段。如可以直接将标准件的密度与其 CT 值进行刻度,但其精度大为降低,如有些不同化学属性(不同 μ_m 值)的物体可能具有相同的 μ 值,这样直接密度刻度法就会失效,在 ASTM 标准文件中也进行了这两种方法的结果对比。

此外,上述 ASTM 推荐方法部分地考虑了射束硬化的影响。在 $N_{CT}-\mu$ 试验点图及其拟合直线中包含了射束硬化的效应, $\mu=\mu(E_{eff})$ 是采用了射束硬化的单色近似。上述实际测量例子也表明,ASTM 推荐的标准 ICT 密度测量方法在适当条件下可获得较理想的测量结果。甚至在被测物体(铜)的材质与支持标准件的托盘(有机玻璃)的材质有较大差异时,亦可得到较好的测量结果(表 2)。

但在该方法中也存在许多不确定因素,如散射影响,标准件的不均匀性,采集与操作的全同性,CT 本身的精度,被测工件的 μ_m 值的准确度,是否做了更完全的硬化校正等等。尽管如此,在实际 ICT 密度测量以及 ICT 系统性能测试中可考虑使用 ASTM 推荐的该密度测量方法。

参考文献:

- [1] ASTM E1935—1997 (Reapproved 2003), Standard Test Method for Calibrating and Measuring CT Density[S].