



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 35839—2018

---

## 无损检测 工业计算机层析成像(CT)密度测量方法

Non-destructive testing—  
Test method for measuring industrial computed tomography (CT) density

2018-02-06 发布

2018-09-01 实施

---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布  
中国国家标准化管理委员会

## 目 次

前言 .....	Ⅲ
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 基本要求 .....	1
5 检测方法 .....	2
6 检测工艺 .....	3
7 测量流程 .....	4
8 检测记录和报告 .....	5
附录 A (资料性附录) 密度对比试件制作规范 .....	6
附录 B (资料性附录) 典型材料不同能量下质量衰减系数 .....	7
附录 C (资料性附录) 等效能量计算方法 .....	8

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本标准起草单位:重庆大学、重庆真测科技股份有限公司、中国兵器科学研究院宁波分院、中国航天科技集团川南机械厂、中国人民解放军 96630 部队、重庆红宇精密工业有限责任公司、湖北三江航天江北机械工程有限公司。

本标准主要起草人:沈宽、王珏、蔡玉芳、刘丰林、段晓礁、卢艳平、倪培君、张政、苏志军、杨大洪、王晓勇、高锐、郭智敏、张维国。

# 无损检测

## 工业计算机层析成像(CT)密度测量方法

### 1 范围

本标准规定了使用工业计算机层析成像(CT)设备对物体的密度进行测量的方法。

本标准适用于使用能量范围为 200 keV~10 MeV 的工业 CT 系统对常见金属和非金属材料进行密度测量。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证(GB/T 9445—2015,ISO 9712:2012,IDT)

GB/T 29069 无损检测 工业计算机层析成像(CT)系统性能测试方法

GB/T 29070 无损检测 工业计算机层析成像(CT)检测 通用要求

GB/T 34365 无损检测 术语 工业计算机层析成像(CT)检测

### 3 术语和定义

GB/T 34365 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 4 基本要求

#### 4.1 检测人员

4.1.1 从事工业 CT 密度测量的人员应符合 GB/T 9445 和 GB/T 29070 中有关检测人员的要求。

4.1.2 从事工业 CT 密度测量的人员要具备材料、结构、工艺等相关知识,并经过工业 CT 密度测量的专门技术培训。

#### 4.2 环境条件

4.2.1 满足 GB/T 29070 关于环境条件的要求。

4.2.2 检测室和控制室的放射防护条件应符合满足使用单位要求。

#### 4.3 检测设备

##### 4.3.1 设备组成

工业 CT 系统一般由射线源系统、探测系统、数据采集传输系统、机械系统、控制系统、图像处理系统和辐射安全防护系统等组成。

##### 4.3.2 设备性能

工业 CT 设备射线源的能量应满足被检测工件的穿透力要求。密度分辨力性能指标应满足实际被

测工件密度的检测要求,通常情况下,密度分辨力指标应优于0.5%。空间分辨率、扫描时间等其他指标应满足实际产品的检测要求。

### 4.3.3 设备性能校验

按照 GB/T 29069 规定定期对 CT 系统的空间分辨力和密度分辨力等主要性能指标进行测试。在设备安装调试、维修或更换部件后,应对主要性能指标进行测试,并记录测试结果。

## 4.4 密度对比试件

### 4.4.1 概述

密度对比试件是在使用工业 CT 进行密度测量时,用来与待测工件进行密度比对的标准样件组,其中每一个密度标准样件由均质材料构成其密度值经过校准,射线衰减特性与被测样品相同或相近。密度对比试件含多个密度标准样件,其密度范围涵盖待测物体密度范围。

### 4.4.2 制作要求

应针对不同材料的产品、不同密度范围、不同部位进行单独设计和制作密度对比试件。密度对比试件的设计和制作要求参见附录 A。

### 4.4.3 密度值的校准和核查

密度对比试件的密度值在首次使用时应进行校准。在使用过程中,每隔半年应采用排水法或其他适当的方法进行核查。如发现密度值变化范围超过 0.5%时应重新进行校准。

## 5 检测方法

### 5.1 方法一

基本原理就是通过对密度对比试件进行工业 CT 扫描,建立当前扫描条件下密度对比试件 CT 数与线性衰减系数之间的关系,见式(1)。利用该关系计算出被测材料的线性衰减系数,再除以该材料的质量衰减系数,就能得到相应的质量密度,见式(2)。常见物质的质量衰减系数参见附录 B。

$$N_{CT} = k\mu + c \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$N_{CT}$ ——被测样品的 CT 数平均值;

$\mu$  ——线性衰减系数;

$k, c$ ——常数。

$$\rho = \frac{\mu}{\mu_m} \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$\rho$  ——被测样品的密度值,单位为克每立方厘米( $g/cm^3$ );

$\mu$  ——线性衰减系数;

$\mu_m$  ——质量衰减系数。

该方法由于需要已知被测物质的质量衰减系数,因此不能测量未知成分的物质或是难以测定质量衰减系数的聚合物类物质。由于不同能量下质量衰减系数是不同的,因此使用该方法时首先需要确定 CT 系统的等效能量,等效能量计算方法参见附录 C。当等效能量在 200 keV~2 MeV 时,质量衰减系



数几乎不随能量变化而变化,因此如果待测物质的质量衰减系数未知,可以试用密度相近的已知物质的质量衰减系数替代。

## 5.2 方法二

选取密度对比试件组中一个密度标准样件作为密度测量的密度参考样件。根据密度参考样件指定区域的平均 CT 密度  $\bar{f}_0$  和 CT 系统设定的比例系数  $K$  (根据 CT 系统总体参数确定,一般为 1 000~5 000),对每个密度对比试件指定区域的平均 CT 密度  $\bar{f}$  按式(3)进行归一化处理,获得该区域内的平均 CT 数  $\bar{\mu}$ :

$$\bar{\mu} = \frac{\bar{f} - \bar{f}_0}{\bar{f}_0} \times K \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- $\bar{\mu}$  ——密度对比试件指定区域的平均 CT 数;
- $\bar{f}$  ——密度对比试件指定区域的平均 CT 密度;
- $\bar{f}_0$  ——密度标准样件指定区域的平均 CT 密度;
- $K$  ——CT 系统设定的比例系数。

利用各个密度对比试件指定区域的平均 CT 数  $\bar{\mu}$  和该标准样件已知的密度  $\rho$ ,采用多项式拟合测量平均 CT 数  $\bar{\mu}$  与物质密度  $\rho$  之间的关系式  $\rho = f(\bar{\mu})$ ,推荐采用三次多项式拟合。

该方法直接从 CT 数测量物质密度具有较广的应用范围,但对具有相同的线性衰减系数而具有不同的质量衰减系数的物质密度测量具有较大的测量误差。

## 6 检测工艺

### 6.1 材料特性分析

6.1.1 检测前应详细了解被检工件的形状、结构、材料、质量、密度分布范围、检测精度等要求,确保 CT 设备满足被检材料的密度检测要求。

6.1.2 检测前应考虑被测工件的射线最大等效钢穿透厚度,以保证射线能够完全穿透被检工件。

### 6.2 扫描参数确定

6.2.1 密度标定与密度测量过程的射线衰减条件与扫描参数应保持一致。射线能量在保证穿透被检试件的前提下,同时应满足系统检测信噪比要求,应选择较低能量以提高系统的对比度,选择较大电流以提高信噪比。

6.2.2 采用前后准直器控制射线的宽度和形状,减少散射射线。

6.2.3 采用滤波片预先滤波,去除无用的软射线和减少散射射线的影响。

6.2.4 待测工件放置如图 1 所示。放大倍数  $M$  由式(4)定义:

$$M = \frac{SDD}{SOD} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- SDD ——射线源焦点到中心探测器的距离,单位为毫米(mm);
- SOD ——射线源焦点到旋转中心的距离,单位为毫米(mm)。

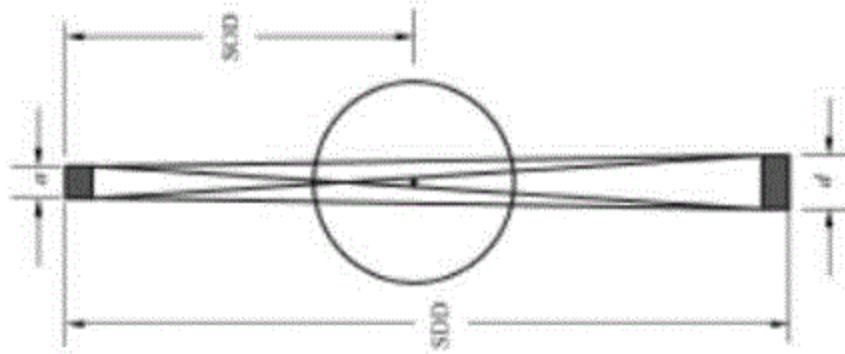


图 1 CT 扫描几何示意图

检测的最佳放大倍数  $M_{opt}$  由式(5)确定:

$$M_{opt} = 1 + \left(\frac{d}{a}\right)^2 \dots\dots\dots(5)$$

式中:

$d$  ——探测器有效宽度,单位为毫米(mm);

$a$  ——射线源焦点尺寸,单位为毫米(mm)。

对于某些型号的工业 CT 设备,由于放大倍数不可调节,此时应将扫描视场设置为被测工件旋转直径的 1.5 倍。

6.2.5 在检测时间允许的情况下,选择的采样点数应足够多,一般不小于  $512 \times 512$ 。具体应用中,采样点数的大小应根据工件及探测器的实际情况用试验的方法进行优选。

6.2.6 在检测时间允许及积分器输出不饱和的情况下,选择的积分时间应足够长,使材料均匀区域的 CT 图像具有较小的 CT 标准偏差。具体应用中,积分时间的大小应根据被检工件及探测器的实际情况用试验的方法进行优选。

6.3 图像重建、显示和处理

6.3.1 选用合适的数据滤波和图像重建方法,重建参数调整至系统密度分辨力最优的参数设置下。重建范围应大于被测工件断面,选用较大的重建矩阵以提高空间分辨力,且重建矩阵应不小于  $512 \times 512$ 。

6.3.2 根据需要选取黑白、彩色,二维或三维等图像显示方式。通过窗宽/窗位调整等方法,使得图像便于观察。

6.3.3 必要时,采用合适的图像处理方法进行图像处理,改善对比度和清晰度。

7 测量流程

7.1 概述

若采用方法一进行密度测量则首先需要确定当前扫描参数下的等效能量(计算方法参见附录 C),采用方法二则无需计算等效能量。

7.2 密度标定

7.2.1 用密度对比试件对工业 CT 设备进行密度标定。密度对比试件组应尽量放置在以系统转台中心为圆心的圆周上且等间角分布。密度标准样件旋转轴应与扫描切片平面垂直,切片位置应在密度标准样件高度的 1/2 处。密度标定的 CT 扫描工艺参数应与实际产品检测参数相同。

7.2.2 测定密度对比试件中每一个密度标准样件一定范围(测量范围宜为圆形区域,每个圆形区域像素数宜不少于 100 个,但不大于整个标准样件图像区域的 2/3 范围,测定次数不少于 5 次)的平均 CT



数,若使用方法一进行密度测量,推荐使用最小二乘法建立平均 CT 数和线性衰减系数之间的函数关系;若使用方法二进行密度测量,则推荐使用多项式拟合方法建立平均 CT 数和标准密度之间的函数关系。

7.2.3 CT 图像中灰度的变化反映被测物体密度的真实变化而不是伪像。由于探测器响应不一致、射线散射、射线硬化等原因,CT 图像可能呈现出一定程度的伪像,且伪像往往被误认为是密度变化。为确保该密度测量方法的有效性,在进行检测应尽量减少 CT 伪像和射线硬化引入的误差,测量范围选取应尽量避免受伪像影响的区域,选取的像素应保证是有效的像素,必要时可以采用滤波方法去除无效的像素。

### 7.3 密度测量

7.3.1 选取与密度标定时采用的同一密度参考样件(最接近待测物质密度的一个密度对比试件),将密度参考样件放在被测物体的待测区域附近与被测物体同时进行 CT 扫描;或将密度参考样件单独放在(与被测物体的待测区域)同一扫描位置,采用与被测物体扫描时相同的工艺参数,对密度对比试件单独进行扫描。

7.3.2 密度测量的 CT 扫描工艺条件如试件放置、扫描方式、扫描参数(管电压、管电流、焦点尺寸、滤波方法、切片厚度、视场直径、扫描矩阵、采样时间等)、重建参数等应与密度对比试件标定时的检测条件完全一致。

7.3.3 考虑到设备自身的稳定性问题,在实际检测过程中,根据情况,定期对密度对比试件重新扫描,测定密度对比试件 CT 数的变化,必要时对 CT 数和密度之间的函数关系进行修正,以提高检测准确性。

7.3.4 从密度参考样件的 CT 图像中,获取指定区域(指定区域内像素数宜不少于 100 个且不大于整个标准样件图像区域的 2/3)的平均 CT 密度  $\bar{f}$ 。

7.3.5 从被测物体的 CT 图像中,获取待测区域(区域内像素数宜不少于 100 个)的平均 CT 密度  $\bar{f}$ 。若使用方法二进行密度测量,则按式(3)进行归一化得到待测区域的平均 CT 数  $\bar{\mu}$ 。

7.3.6 根据被测物体的待测区域的平均 CT 数和已标定的函数关系,求得该区域平均物质密度。

7.3.7 重复测量同一均匀材质不同区域至少 5 次,以 5 次测得密度的平均值作为此材质的密度值,并计算密度测量的标准偏差。

7.3.8 若已知被测物质的成分和质量衰减系数,推荐使用方法一进行密度测量。

## 8 检测记录和报告

### 8.1 检测记录

8.1.1 检测记录应包括工件名称、编号、检测的部位、密度对比试件情况、设备型号、扫描方式、测量方法、扫描工艺、重建参数、图像描述、数据记录、曲线绘制、检测结果以及检测人、审核人、检测日期等。

8.1.2 图像数据文件中应包含 CT 设备型号、射线源、探测器、扫描方式、试件编号、图像编号、试件位置、扫描参数、重建参数等内容。图像数据应妥善保管在光盘、磁带或硬盘上面,至少应保存五年以上。

### 8.2 检测报告

检测报告的内容一般应包括:工件名称、编号、检测的部位、密度检测试件情况、设备型号、检测方法、切片位置、切片厚度、重建矩阵、检测结果、检测人、审核人、审批人、检测日期、报告日期等。



**附录 A**  
(资料性附录)  
**密度对比试件制作规范**

### A.1 基本结构

密度对比试件是以均质材料为基体(其衰减特性与被测工件密度检测区域周边材料相同或相近)的特定部位插入一系列已知密度的工件样件,且在基体上沿圆周均匀分布,基本结构如图 A.1 所示,其直径以 CT 系统最大成像直径的  $2/3$  为宜。

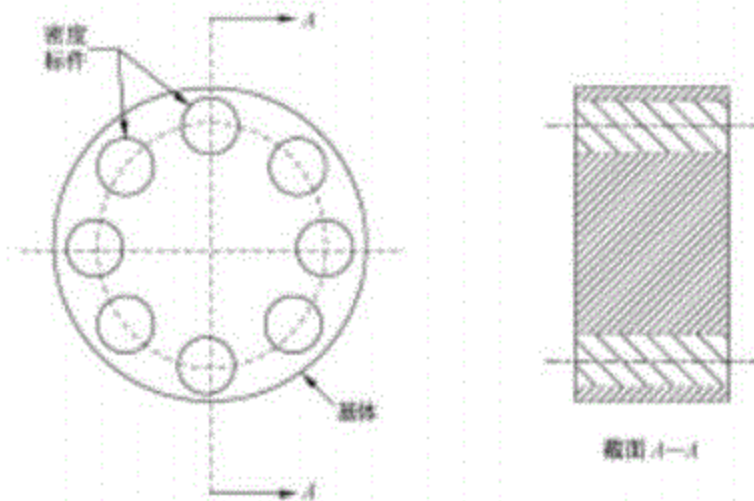


图 A.1 密度对比试件

### A.2 设计要求

A.2.1 密度对比试件由一系列组分均匀、密度数值稳定、易加工的材料制作的标准样件,密度范围应包含待测材料,且每个标准样件的密度已知。

A.2.2 每个标准样件应材质均匀,各个标准样件的尺寸规格应相同,密度对比试件高度应为 CT 切片厚度的 3 倍以上。

A.2.3 每个标准样件的密度块需经过严格校准,密度标定精度应高于测量需求精度一个量级,密度块直径不大于基体直径的  $1/7$  为宜,CT 扫描时应尽量保证密度块安装稳固,且横截面与 CT 系统转台平面平行。

A.2.4 粉末类、液体类材料密度对比试件应密封保存。

### A.3 使用要求

在密度检测中,密度对比试件的检测条件应与实际被测工件的条件相同,例如将密度对比试件放置在与实际工件相同的壳体内,以使射线衰减条件一致。

## 附录 B

(资料性附录)

## 典型材料不同能量下质量衰减系数

典型材料不同能量下质量衰减系数  $\mu_m$  见表 B.1。表 B.1 典型材料不同能量下质量衰减系数  $\mu_m$ 

单位为克每立方厘米

光子能量/ MeV	镁	铝	硅	钛	铁	镍	铜	铅	空气	水	聚乙烯	高硼硅 玻璃
0.01	20.8	26.2	34.1	113	172.0	213.8	224.2	136.6	5.04	5.21	2.17	17.1
0.02	2.7	3.39	4.36	15.8	25.5	31.7	33.7	85.5	0.758	0.778	0.429	2.24
0.03	0.914	1.12	1.41	4.88	8.11	10.3	10.9	29.1	0.35	0.371	0.261	0.785
0.04	0.481	0.565	0.693	2.18	3.61	4.62	4.88	13.8	0.248	0.267	0.216	0.43
0.05	0.327	0.367	0.435	1.19	1.94	2.52	2.61	7.71	0.206	0.222 5	0.197	0.299
0.06	0.257	0.277	0.319	0.752	1.2	1.52	1.6	4.87	0.187	0.202 5	0.186	0.241
0.08	0.195	0.201	0.223	0.4	0.59	0.723	0.768	2.37	0.167	0.18 5	0.173	0.19
0.1	0.169	0.17	0.184	0.271	0.37	0.446	0.462	5.78	0.155	0.171	0.164	0.166
0.2	0.125	0.122	0.128	0.132	0.147	0.159	0.157	1.104	0.124	0.137	0.132	0.125
0.3	0.107	0.104	0.108	0.104	0.11	0.116	0.112	0.406	0.107	0.119	0.115	0.107
0.4	0.094 8	0.092 6	0.096 1	0.090 8	0.094 1	0.097 8	0.094 2	0.233	0.095 4	0.106	0.103	0.095 3
0.5	0.086 3	0.084 4	0.087 5	0.081 8	0.084 1	0.087	0.083 5	0.161 4	0.086 8	0.096 6	0.093 7	0.086 8
0.6	0.079 6	0.077 9	0.080 6	0.075	0.076 8	0.079 3	0.076 2	0.124 9	0.080 4	0.089 4	0.086 7	0.080 1
0.8	0.069 9	0.068 2	0.070 8	0.065 7	0.066 9	0.068 8	0.065 9	0.088 6	0.070 6	0.078 5	0.076 1	0.070 4
1.0	0.062 8	0.061 3	0.063 4	0.058 9	0.06	0.061 5	0.059	0.070 8	0.063 5	0.070 6	0.068 3	0.063 3
1.5	0.051 2	0.050 0	0.051 7	0.047 8	0.048 7	0.05	0.047 9	0.051 8	0.051 7	0.057 5	0.056 7	0.051 5
2	0.044 1	0.043 1	0.044 7	0.041 7	0.042 5	0.043 7	0.041 9	0.045 5	0.044 4	0.049 3	0.047 6	0.044 4
3	0.036	0.035 3	0.036 7	0.035 0	0.036 1	0.037 3	0.035 9	0.041 7	0.035 8	0.039 6	0.038 1	0.036
4	0.031 6	0.031 1	0.032 4	0.031 8	0.033 1	0.034 4	0.033 2	0.041 5	0.030 8	0.034	0.032 6	0.031 4
5	0.028 8	0.028 4	0.029 7	0.029 8	0.031 5	0.032 9	0.031 8	0.042 4	0.027 6	0.030 3	0.028 9	0.028 4
6	0.026 8	0.026 6	0.027 9	0.028 6	0.030 6	0.032 1	0.031	0.043 6	0.025 2	0.027 7	0.026 3	0.026 3
8	0.024 4	0.024 4	0.025 7	0.027 5	0.029 9	0.031 6	0.030 7	0.046 7	0.022 3	0.024 3	0.022 7	0.023 7
10	0.023 1	0.023 2	0.024 6	0.027 3	0.029 9	0.031 9	0.031	0.049 6	0.020 5	0.022 2	0.020 6	0.022 1



**附录 C**  
(资料性附录)  
**等效能量计算方法**

**C.1 计算流程**

C.1.1 将检测参数调设置为最高密度分辨率,使用工业 CT 对密度对比试件进行检测。

C.1.2 测定密度对比试件中每一个密度标准样件一定范围(测量范围宜为圆形区域,每个圆形区域像素数宜不少于 100 个,但不大于整个标准样件图像区域的 2/3 范围,测定次数不少于 5 次)的平均 CT 数,使用最小二乘法建立平均 CT 数和线性衰减系数之间的函数关系[式(1)]。

C.1.3 将每个样件的密度乘以质量衰减系数获得样件的线性衰减系数  $\mu_1$ ,分别选取一组能量范围内(该范围应包括系统的等效能量)的质量衰减系数计算各个样件的线性衰减系数,即可得到不同能量下每个样件的线性衰减系数。

C.1.4 使用函数关系式[式(1)]计算每个样件的线性衰减系数  $\mu_2$ ,分别计算不同能量下线性衰减系数  $\mu_1$  和线性衰减系数  $\mu_2$  之间的相关系数。

C.1.5 选择相关系数最大值对应的能量作为 CT 系统的等效能量。

**C.2 计算实例**

采用 9 MeV 的工业 CT 系统对三种物质甲基丙烯酸甲酯(methyl methacrylate,  $H_8C_6O_2$ )、四氟乙烯(tetrafluoroethylene,  $C_2F_4$ )和铝(aluminum, Al)进行密度检测,分别测量三种物质的平均 CT 数,使用最小二乘法计算出式(1)的系数  $k$ 、 $c$ ,使用式(1)计算出各个物质的线性衰减系数  $\mu_1$ ;查表获取 3 700 keV~4 000 keV 下各个物质的质量衰减系数并乘以对应的密度获得各个物质的线性衰减系数  $\mu_2$ ,分别计算不同能量下线性衰减系数  $\mu_1$  和线性衰减系数  $\mu_2$  之间的相关系数。结果如表 C.1:

**表 C.1 CT 系统等效能量计算表**

物质名称	经验线性衰减系数 $\mu$				
	CT 数	3 700 keV	3 800 keV	3 900 keV	4 000 keV
甲基丙烯酸甲酯	1 286	0.040 4	0.039 9	0.039 3	0.038 8
四氟乙烯	2 119	0.067 0	0.066 1	0.065 2	0.064 4
铝	2 756	0.087 0	0.086 2	0.085 1	0.084 3
相关系数	—	0.999 988 7	0.999 999 6	0.999 999 1	0.999 989 3

选取最大相关系数对应的能量值 3 800 keV 作为系统的等效能量。