

工业 CT 技术在弹药装药密度差测量中的应用

高玉玲, 瑞 睿, 宋丽君, 张 晶, 李 凤, 张 峰, 胡东常

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘 要:采用两种方法对现有 BT-400 型工业 CT 无损检测系统进行了密度分辨率指标测定, 得出该系统的密度分辨率为 1.0% 左右, 并使用 BT-400 型 CT 设备对某战斗部装药完成了密度差测量, 测量结果与这批样品开壳弹排水法结果进行了比较, 装药密度测量误差小于 1%, 密度差测量结果在量值上一致。说明工业 CT 技术密度差测量方法可行、测量结果可信, 具有一定参考意义。

关键词:工业 CT; 密度分辨率; 密度差; C_t 值; 装药密度

中图分类号: TG115.28, TJ410.3⁺4 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2014)04-0014-06

Application of the Industrial CT Technology in the Ammunition Charge Density Difference Measurement

GAO Yu-ling, RUI Rui, SONG Li-jun, ZHANG Jing, LI Feng, ZHANG Feng, HU Dong-chang

(Xi'An Modern Chemistry Research Institute, Xi'An 710065, China)

Abstract: This paper introduces two kinds of methods for the testing of the density resolution of the BT-400 type industrial CT nondestructive testing system. The density resolution of the system is about 1.0%, and the measurement of one warhead charging density difference is completed by the industrial C_t equipment. The results and the sample open shell drainage method results are compared. The charge density error is less than 1%, the density difference is consistent in magnitude. It shows that the density difference measurement method is feasible by industrial CT technology, the measurement results are reliable. It has some reference significance to the reader.

Keywords: Industrial CT; Density resolution; Density difference; C_t value; Charge density

现用 BT-400 型工业 CT 无损检测系统是 1998 年从俄罗斯引进的, 最初没有提出密度分辨率指标要求, 随着检测工作的深入和用户的实际需求, 需要了解该系统的密度分辨率指标。笔者在密度分辨能力基础上, 探索利用 BT-400 型工业 CT 机测量弹药装药密度和装药密度差的方法。

1 BT-400 型工业 CT 系统密度分辨率指标测定

对于工业 CT 密度分辨率这一技术指标的精确测试, 通常是工业 CT 制造商和用户都非常关注的问题。检验工业 CT 密度分辨能力的试验方法有多种, 比如 ASTM E1695—1995(2001)《标准测试方法—计算机层析成像(CT)系统性能测试》^[1]、国军

标 GJB 5311—2004《工业 CT 系统性能测试方法》均有描述。

1.1 测定方法之一^[2]

用不同盐浓度的蒸馏水做密度标准件, 质量分数有 0.3%, 0.5%, 0.8%, 1%, 2%, 3%, 5%。蒸馏水做密度标准件是由西安近代化学研究所分析测试中心配置的。

纯蒸馏水密度件的 CT 图如图 1 所示。

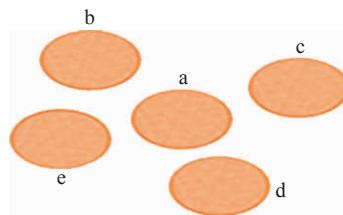


图 1 纯蒸馏水密度件 CT 图

纯蒸馏水密度件 C_t 值及 C_t 值标准偏差列表 1。
盐溶液密度标准件制作:

收稿日期: 2013-05-13

作者简介:高玉玲(1966—), 女, 高级工程师, 主要从事工业 CT 无损检测、环境性能试验等测试技术研究。

表 1 不同位置 C_t 值测量及标准偏差

样品	位置	C_t 值	标准偏差
		10062103	σ
纯蒸馏水	a	7 336	9.60
纯蒸馏水	b	7 348	
纯蒸馏水	c	7 350	
纯蒸馏水	d	7 355	
纯蒸馏水	e	7 362	

用不同盐质量分数的蒸馏水做密度标准件,质量分数有 0.3%,0.5%,0.8%,1%,2%,3%,5%,计算方法:100 g 蒸馏水加 0.297 9 g 盐,则质量分数是 0.297 0%,取为 0.3%,0.5%实际质量分数是 0.496 4%,0.8%实际质量分数是 0.788 7%,1.0%实际质量分数是 0.992 5%,2.0%实际质量分数是 2.001 0%,3.0%实际质量分数是 3.000 1%,5.0%实际质量分数是 4.999 9%;对应的密度是 1.001 6,1.002 7,1.004 3,1.005 4,1.010 9,1.016 4,1.027 7 g/cm³。

七种密度的盐溶液装在完全一样的塑料容器中,直径 ϕ 50 mm,按密度从小往大依次编号 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号、6 号和 7 号样品。

七种标准密度盐溶液是进行 BT-400 工业 CT 机密度分辨率指标测定的标准样件,而纯蒸馏水密度件作为 0 号标准密度件, $\rho_0=1$ g/cm³、 C_t 值记为 C_{t0} 。

密度差分辨判据:不同密度蒸馏水 CT 切层图测得的 C_t 值,与纯蒸馏水 CT 切层图测得的 C_t 值差异大于 3σ (σ 为纯蒸馏水在相应检测位置对应的 C_t 值的标准偏差)则认为可以分辨相对应的密度差^[1]。

BT-400 工业 CT 机参数设置:340 kV 电压,准直器 $X=2, Z=2$,工作场直径 100 mm,探测器灵敏度 $F=10$,铜滤波器厚度 0 mm。对密度标准件相同条件装配后进行 CT 断层扫描,得到 CT 图如图 2。

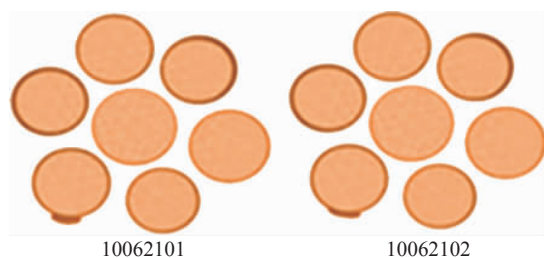


图 2 蒸馏水密度标准件 CT 图

由表 2 可见,第一组和第二组数据 1[#]、2[#]、3[#] 样品与 0[#] 样品 C_t 值无法区分,说明 BT-400 工业

表 2 盐溶液蒸馏水密度标准件 C_t 值统计表

样品 编号	盐质量分数/% (与纯蒸馏 水对比)	理论计 算密度/ (g·cm ⁻³)	第一组 C_t 值 10062101	第二组 C_t 值 10062102
0	纯蒸馏水	1	7 362	7 336
1	0.3	1.001 6	7 343	7 326
2	0.5	1.002 7	7 307	7 290
3	0.8	1.004 3	7 364	7 335
4	1	1.005 4	7 402	7 350
5	2	1.010 9	7 441	7 414
6	3	1.016 4	7 482	7 464
7	5	1.027 8	7 566	7 536

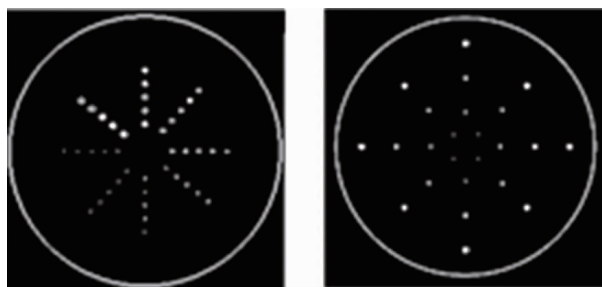
CT 设备对密度差小于 0.5% 的密度变化无法分辨;而 4[#] 样品第一组数据 C_t 值差 = 40 > $3\sigma = 3 \times 9.60 = 28.8$ 与第二组数据 C_t 值差 = 14 < 3σ (28.8),说明该设备对 4[#] 样品的分辨不稳定;5[#] 样品与 0[#] 样品 C_t 值差第一组为 79、第二组为 78,差值远大于 3σ (28.8),说明该设备对密度差为 $(1.0109 - 1) / 1 \times 100 = 1.09\%$ 的密度变化完全可以区分。

该方法判定 BT-400 型工业 CT 机的密度分辨率达到 0.5%~1.0% 之间。

1.2 测定方法之二

1.2.1 气孔密度试样的设计与制作

结合实际检测工作,基于体积变化可以转换为密度变化的原理,设计采用一个较大有机玻璃圆盘气孔试样(有规则地分布不同直径的孔)来测试现有工业 CT 系统的密度分辨率。1 号、2 号气孔密度试样的结构图如图 3 所示。



(a) 1 号样品

(b) 2 号样品

图 3 气孔密度试样结构

其中 1 号样品的试验参数:① ϕ 200 mm \times 20 mm 试样的密度为 1.73 g/cm³;② 间隔 45° 加工 ϕ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mm 八组孔,深度为 20 mm。

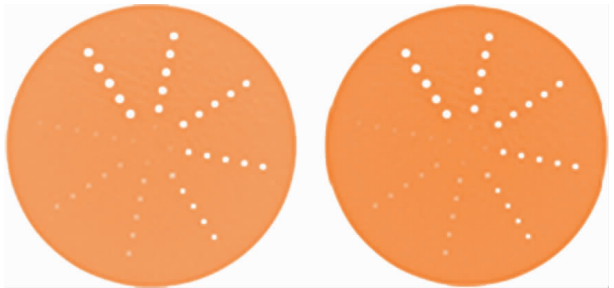
2 号样品的试验参数:① $\phi 200\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 试样的密度为 1.73 g/cm^3 ;② 间隔 45° 加工 $\phi 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{ mm}$ 六组孔,深度为 20 mm ,每组孔分别在 $\phi 20, 40, 60, 80, 100, 120\text{ mm}$ 的圆环上。孔径与密度差对应关系列于表 3。

表 3 测量区域密度差对应关系

d/mm	密度差/%	d/mm	密度差/%	d/mm	密度差/%
0.5	—	1.5	0.56	3.0	2.25
0.8	0.16	2.0	1.00		
1.0	0.25	2.5	1.56		

1.2.2 密度试样 CT 检测及测量结果

BT-400 型工业 CT 成像条件为二代扫描方式, $0.8\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$ 小焦点,最高电压 450 kV ,等功率 0.9 kW ,切片厚度小于 $0.5\sim 2.0\text{ mm}$, 1024×768 重建矩阵。在 CT 图像上测量以孔为中心 20 mm 区域范围为测量区 C_i 值,在无孔区域相应位置测试的 C_i 值为对照区 C_i 值。1 号样品的 CT 图如图 4 所示,CT 测量结果列于表 4,表 5 是由表 4 计算得出的;2 号样品的 CT 图如图 5 所示,CT 测量结果列于表 6。



(a) 切层厚度 $1.5\sim 2\text{ mm}$ (b) 切层厚度 $1\sim 1.5\text{ mm}$

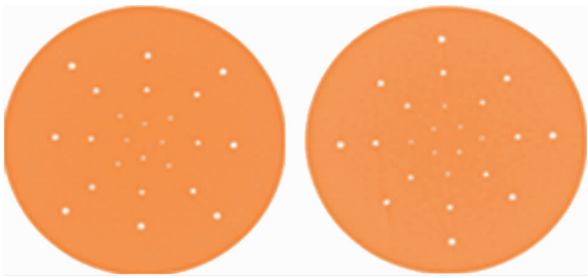
图 4 1 号样品 CT 扫描图

表 4 测量区与对照区试样 C_i 值(切片厚度 $1.5\sim 2\text{ mm}$)

区域	L/mm				
	40	60	80	100	120
对照区	8 208	8 194	8 162	8 136	8 102
0.5	8 202	8 177	8 152	8 117	8 086
0.8	8 196	8 173	8 150	8 116	8 078
1.0	8 185	8 168	8 142	8 114	8 078
1.5	8 162	8 144	8 118	8 078	8 048
2.0	8 114	8 101	8 068	8 037	8 000
2.5	8 076	8 057	8 029	8 001	7 966
3.0	8 007	7 989	7 955	7 931	7 885
3.5	7 930	7 906	7 887	7 848	7 811

表 5 表 4 中各列数据与对照区 C_i 值差
(切片厚度 $1.5\sim 2\text{ mm}$)

L /mm	测量区							
	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
40	-6	-12	-23	-22	-94	-132	-201	-278
60	-17	-21	-26	-50	-93	-137	-205	-288
80	-10	-12	-20	-44	-94	-133	-207	-275
100	-19	-20	-22	-24	-99	-135	-205	-288
120	-16	-24	-24	-54	-102	-136	-217	-291



(a) 切层厚度 $1.5\sim 2\text{ mm}$ (b) 切层厚度 $1\sim 1.5\text{ mm}$

图 5 2 号样品 CT 扫描图

表 6 同一孔径在同一圆环上测量 C_i 值及标准偏差

D /mm	测量值 C_{i1}	测量值 C_{i2}	测量值 C_{i3}	测量值 C_{i4}	标准偏差 σ	备注
0.5	8 216	8 212	8 220	8 229	7.27	1 号试样
0.8	8 174	8 184	8 187	8 180	5.62	2 号试样
1.0	8 175	8 172	8 171	8 177	2.75	2 号试样
1.5	8 110	8 113	8 121	8 127	7.72	2 号试样
2.0	8 055	8 065	8 063	8 081	10.89	2 号试样
2.5	7 994	7 999	7 985	7 977	9.74	2 号试样
3.0	7 925	7 937	7 927	7 936	6.13	2 号试样

由表 4,5 可见,包含 $0.5, 0.8, 1.0, 1.5\text{ mm}$ 直径气孔的测量区域的 C_i 值与相应的对照区的 C_i 值之间的差异无明显差异,说明系统无法分辨相对应的密度差。

由表 6 可见, C_i 值最大标准偏差 $\sigma=10.89$,由表 5 可见包含 1.0 mm 直径气孔(对应密度差为 0.25%)的测量区域的 C_i 差值完全小于 3σ ,说明该 CT 系统无法分辨密度差小于 0.25% 的变化;包含 1.5 mm 直径气孔(对应密度变化为 0.56%)的测量区域的 C_i 差值,有的差值大于 3σ 、有的差值小于 3σ ,说明该 CT 系统无法稳定分辨密度差小于 0.56% 的变化;包含 2.0 mm 直径气孔(对应密度变化为 1.00%)的测量区域的 C_i 差值均远大于 $3\sigma=$

32.67,因此,用该标准件测得 BT-400 工业 CT 系统的密度分辨率在 0.5%~1.0%之间。

综合上述两种密度分辨率测定方法,得出 BT-400 型 CT 无损检测系统的密度分辨率在 0.5%~1.0%之间。

2 工业 CT 技术测量装药密度差的方法

2.1 工业 CT 技术测量装药密度初步设想

利用工业 CT 测量样品材料密度就是将其对应的 C_t 值转换为密度值,在转换过程中需要进行复杂的标定、校正等处理^[3],对一般的 CT 操作者来说,在有检测需求时才进行有针对性的方法建立。

在使用工业 CT 进行样品断层检测时,得到如图 6 的 CT 图片,通过计算:

$$\rho_1/C_{t1} = \rho_2/C_{t2} \quad (1)$$

式中: ρ_1, C_{t1} 为钢壳的密度和 C_t 值; ρ_2, C_{t2} 为弹药装药的密度和 C_t 值。

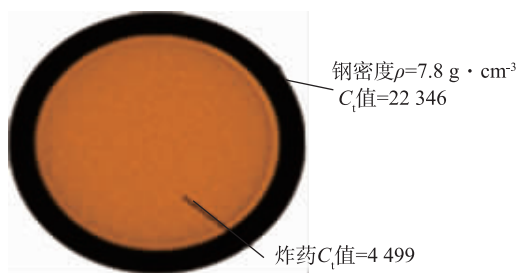


图 6 炸药装药 CT 图

图 6 的 CT 图中外层是钢,钢的密度 7.8 g/cm³、测得 C_t 值为 22 346;CT 图中炸药装药测得 C_t 值是 4499,那么,直接换算得到炸药装药的密度 $\rho_{药}$:

$$\rho_{药} = 4499 \times 7.8 / 22346 = 1.570 \text{ g/cm}^3$$

而该装药真实密度是 1.87 g/cm³,显然,误差很大,说明不同材料直接换算是不可行的。

分析原因:一方面,材料对 X 射线衰减(吸收)不是线性的,射线透射过物质时遵从比尔衰减定律。另一方面,药柱与弹壳钢材料在同一次 CT 断层扫描条件下形状不同:弹壳是圆环形状、处于外围;药柱是圆柱形状、处于内圈;即使是同一种材料也会随几何尺寸、形状的变化而测量出不同的 C_t 值。在这种情况下,采用上述方法直接换算得到密度值是不可行的。

2.2 直接换算密度的方法

在实际工业 CT 检测中,准备一个待检测弹药装药的弹壳体,制作一个标准药柱,装填在实际弹

药样品要检测的位置即保持检测条件和弹壳壁厚影响的一致性,设置相同的 CT 扫描检测参数,得到如图 7 中标准件的 CT 图,测量其对应的标准药柱 C_{t0} 值(至少五次扫描、五次测量,或五点测量,取平均 C_t 值),记为 C_{t0} ,用排水法得到标准药柱的实际密度,记为 ρ_0 ;相同条件下对批量实际装药样品相同检测位置进行 CT 扫描检测,测量 CT 图得到各自对应的 C_t 值记为 $C_{t1}, C_{t2}, C_{t3}, \dots$,典型 CT 图如图 7 中待测量样品的 CT 图。把 ρ_0, C_{t0} 和 C_{ti} 代入式(2),计算得到的 $C_{t1}, C_{t2}, C_{t3}, \dots$ 分别对应的 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$ 。

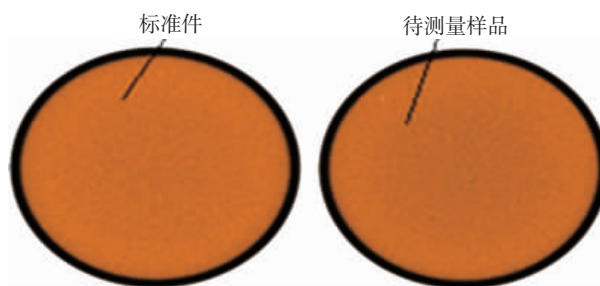


图 7 炸药装药 CT 图

式(1)转换为式(2):

$$\rho_i = \rho_0 \times C_{ti} / C_{t0} \quad (2)$$

暂称该方法为密度直接换算法。

上述介绍的工业 CT 密度测量方法需要一个已知密度的标准件,且 CT 检测参数设置、检测样品装配结构与标准件装配结构等要求尽量一致,以便减少误差。

3 方法应用

3.1 密度换算法测量及验证

仍然使用表 2 数据,分析:1 号、2 号、3 号、4 号、5 号和 6 号样品在一次 CT 扫描中处于相同的位置、CT 扫描参数相同,与其对比的 0 号样品(纯蒸馏水样品)处于该次 CT 扫描的工作场中心,对 1~6 号样品的影响是相同的,影响包含在计算误差内;7 号样品替换其中一个样品再做 CT 扫描检测,得到 7 号样品的 CT 图。

从 C_t 值比较可以看出测得 C_t 值记为 $C_{t4}, C_{t5}, C_{t6}, C_{t7}$;测得纯蒸馏水密度样件的 C_t 值,记为 C_{t0} 。

分析数据列于表 7。

按照式(2)换算得到七种样品的换算密度,表 7 列出了 4 号、5 号、6 号和 7 号样品的标准密度与 C_t 值换算密度,比较可见,误差在 0.4% 以内,说明该密度换算法是可行的。

表 7 盐溶液 C_t 值、密度值和线性换算法密度值比较表

标准件号	盐质量分数/%	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	第一组 C_t 值 10062101	换算法密度值/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	误差/%	第二组 C_t 值 10062102	换算法密度值/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	误差/%
0	纯蒸馏水	1	7 362	1	—	7 336	1	—
4	1	1.005 4	7 402	1.005 4	0	7 350	1.001 9	-0.348
5	2	1.010 9	7 441	1.010 7	-0.030	7 414	1.010 6	-0.030
6	3	1.016 4	7 482	1.016 3	-0.010	7 464	1.017 4	0.098
7	5	1.027 8	7 566	1.027 7	-0.010	7 536	1.027 3	0.049

得到密度值后就可以表征相互之间的密度差。

3.2 测量装药密度差的方法

3.2.1 直接测量装药密度差的方法

分析公式(1)、(2),得到工业 CT 技术测量装药密度差的简单方法,如公式(3):

$$\frac{(\rho_1 - \rho_2)/\rho_2 \times 100\%}{(C_{t1} - C_{t2})/C_{t2} \times 100\%} = \quad (3)$$

式中: ρ_1, C_{t1} 为钢壳的密度和 C_t 值; ρ_2, C_{t2} 为弹药装药的密度和 C_t 值。同式(1)。

可见,利用工业 CT 技术进行弹药装药密度差测量,可以直接用各层装药对应的 C_t 值直接计算,对于只关心各弹药上中下各段之间装药密度差的样品不需要测量装药的绝对密度。

必须满足的条件:在弹药装药结构基本一致时才能应用式(3),且要求 CT 检测参数一致。弹药装药结构是指弹体直径、弹臂厚度和装药直径,保持一致,确保其对 CT 图产生的影响一致。

3.2.2 测量装药密度,然后换算密度差

(1) 方法之一:直接换算密度法

当弹药装配结构发生变化时,例如弹体底部臂厚与弹体头部臂厚差别较大,就不能使用式(3)直接用 C_t 值计算这两段装药之间的密度差,必须采用上述介绍的式(2),首先制作不同弹体部位适合装配的标准密度样品,完成标定,得到弹体底部和弹体头部分别对应的标准参数,即弹底对应 C_{t0} 和弹头对应 C_{t0} ,然后进行 CT 实际检测测量,得到弹底、弹头装药对应的密度值,再计算得出弹底与弹头装药密度差。

(2) 方法之二:密度拟合对比法

在测量精度要求较高情况下,应按照兵器行业标准《弹药装药密度工业 CT 定量无损检测方法》中规定的标准方法(已通过评审,待颁布),公式为^[3]:

$$\rho = A + B \times CT \quad (4)$$

式中: ρ 为待测物密度; CT 为待测物 C_t 值; A, B 为

标定得到的系数。

首先制作适合的密度标准件,至少需要五个^[3-4]已知密度件(或密度标准件),然后按照弹药装药检测要求对密度标准件进行 CT 扫描,完成该式的标定,得到适用的系数 A 和 B ,再完成被检装药样品的密度测量。该方法测量误差小、准确度高。

3.3 C_t 值取值方法

在得到的 CT 图上,对其装药范围内对应的1/3~2/3区域(或不小于 $\phi 20 \text{ mm}$)^[5],然后按照各自使用的 CT 设备所规定操作方法进行测量,记作该检测扫描层对应的 C_t 值,标准件对应 C_t 值则记为 C_{t0} ,待测量样品则记为 $C_{t1}, C_{t2}, C_{t3} \dots$ 。

4 某种弹药装药密度差测量

4.1 工业 CT 技术测量盐溶液密度样品密度差

继续使用表 1 的数据,在 BT-400 型工业 CT 机 0.5%~1.0%密度分辨率条件下,5 号、6 号、7 号密度标准件和 0 号密度标准件(纯蒸馏水样品)CT 技术密度差测量结果与实际密度差值比较,列于表 8,CT 技术密度差测量按照式(4)计算得到。

表 8 CT 技术密度差测量值与标准密度差值比较

标准件号	标准密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	标准密度差/%	第一组 C_t 值	相对密度差/%	第二组 C_t 值	相对密度差/%
0	1		7 362		7 336	
5	1.010 9	1.08	7 441	1.06	7 414	1.05
6	1.016 4	1.61	7 482	1.60	7 464	1.72
7	1.027 8	2.71	7 566	2.70	7 536	2.65

而 6 号、7 号密度标准件与 5 号密度标准件密度差比较,计算结果列于表 9。

说明:(1) 6# 与 5# 样品实际密度差 $= (1.016 4 - 1.010 9) / 1.016 4 \approx 0.54\%$ 、7# 与 5# 样品实际密度差 $= (1.027 8 - 1.010 9) / 1.027 8 \approx 1.64\%$ 。

表 9 6 号、7 号密度标准件与 5 号密度标准件密度差比较

标准件号	标准密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	标准密度差/%	第一组 C_t 值	相对密度差/%	第二组 C_t 值	相对密度差/%
5	1.010 9		7 441		7 414	
6	1.016 4	0.54	7 482	0.55	7 464	0.67
7	1.027 8	1.64	7 566	1.65	7 536	1.62

(2) 第一组 C_t 值 6# 与 5# 样品相对密度差 = $(7\,482 - 7\,441) / 7\,482 \approx 0.55\%$, 7# 与 5# 样品相对密度差 = $(7\,566 - 7\,441) / 7\,566 \approx 1.65\%$; 第二组计算方法相同, 结果分别是 0.67%、1.62%。

由表 8、表 9 可以看出, 在 CT 检测环境相同、样品结构一致的条件下, 不同装药断层之间的 C_t 值相对差与装药实际密度差在量级上是一致的, 说明方法可行, C_t 值相对差可以表征装药实际密度差。

4.2 某种弹药装药密度差的测量与结果分析

在 BT-400 型工业 CT 机上对某弹药装药进行 CT 检测, 该样品外径尺寸是 $\phi 120\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 、装药尺寸为 $\phi 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 。该样品装药主要成份是钝黑铝。

4.2.1 合格判据

在某种弹药装药密度差检测中送样厂方要求密度差计算: (最大密度值-最小密度值)/最大密度值, 并乘以 100%, 用百分数表示, 结果不大于 5% 为合格。

按照式(4), 转换成 C_t 值计算密度差, 则应该是 (最大 C_t 值-最小 C_t 值)/最大 C_t 值, 得到被检测样品(XX 战斗部)各段装药 CT 扫描断层的 C_t 值, 用 C_t 值相对差来表征密度差。

4.2.2 实际测量

BT-400 型工业 CT 无损检测机无损测量密度差, 结果列于表 10。

用户对该批样品采用“开合弹”排水法测量密度, 得到的实际密度差结果列于表 11。

用户只对产品编号为 10-1、10-2、10-3、10-4 和 10-5 的五发样品进行了“开合弹”排水法测量密度, 这里计算了这五发样品的实际装药密度差, 与 CT 技术测得的相对密度差结果进行了比较, 可以看出, 两种结果在量值上是一致的, 再次说明利用工业 CT 技术 C_t 值相对差来表征特定状态装药密度差, 结果可信、方法可行。

因而得到结论: ① CT 技术检测中, C_t 值是在 CT 扫描检测断层薄片体内取值, 厚度只有 0.5~

表 10 弹药装药 C_t 值及相对密度差结果

产品编号	取样位置 200±1 mm	检测位置 250±1 mm	密度差 /%
10-1	5 511	5 777	4.60
10-2	5 532	5 781	4.30
10-3	5 527	5 764	4.11
10-4	5 508	5 655	2.60
10-5	5 509	5 664	2.74
10-6	5 504	5 790	4.94
10-7	5 509	5 654	2.56
10-8	5 522	5 783	4.51
10-9	5 611	5 890	4.73
10-10	5 616	5 908	4.94

表 11 开合弹排水法测量绝对密度及密度差

产品编号	绝对密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		密度差 /%
	取样位置 200±10 mm	检测位置 250±10 mm	
10-1	1.60	1.68	4.76
10-2	1.61	1.68	4.17
10-3	1.61	1.69	4.73
10-4	1.64	1.69	2.96
10-5	1.63	1.68	2.98

2 mm。②“开合弹”排水法取样是不规则药块, 要求在 CT 检测层附近取样, 包含 CT 检测层。可见, 两者存在一定取值误差。

5 结论

(1) 采用式(2)直接换算法或式(4)密度拟合对比法, 测得各个 CT 扫描断层的密度值, 然后求出同一个样品不同装药断层之间的密度差, 属于密度值直接表征密度差的方法。

(2) 在检测要求相对较低时(本次样品要求装药密度差控制在 5% 以内为合格), 在 CT 检测环境相同、样品结构一致的条件下, 测得各个 CT 扫描断层的 C_t 值, 然后求出同一个样品不同装药断层之间的 C_t 值相对差, 用来表征装药密度差。

(3) 由表 10、表 11 可以看出, 代表检测层装药密度的 C_t 值, 其相对误差值与排水法得到密度差在量值上是一致的, 进一步说明在工业 CT 技术中采用 C_t 值相对差来表征弹体装药密度差是可行的。

(下转第 25 页)

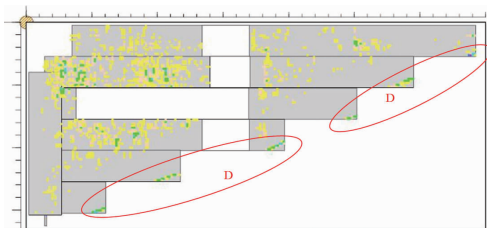


图6 6 mm/8 mm 搭接焊缝扫描信号

为焊缝的实际位置,幅值也比较大。这种信号在数据处理的时候,需要以伪信号去除,以免影响对底板的修补处理。

图7是在罐底板喷砂前的漏磁扫描图,图中E处信号显示最大值为80%,虽然处于底板上垫板的旁边,但是从信号形状以及幅值大小配合上,确认是一个底面腐蚀信号,并对该处作了补板要求。图8(a)为罐底板喷砂处理后与图7中E处对应的实际割板正面照片,图8(b)为该割板的底面(与基础的接触面)照片。可以准确地说,在喷砂处理前并没有发现罐底板穿孔,在喷砂后才发现穿孔,并采取割板检查,发现底面腐蚀很严重,是典型的底面腐蚀穿孔。从这个实例可以看出,对于罐底板上垫板处

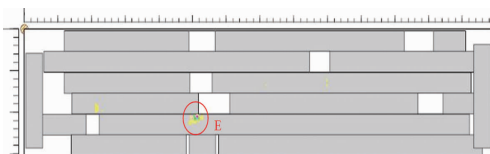


图7 底板补板旁边扫描信号



(a) 割板正面 (b) 割板底面(与基础接触面)

图8 割板后底板的正反面

(上接第19页)

工业CT技术测量装药密度及装药密度差,方法可行、结果可信,对读者具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 刘力,张英平.用工业CT测量物质密度的ASTM标准方法[J].无损检测,2006,28(6):324-326.

不能扫描的检测盲区,需要对垫板周围做相应的技术处理。如图9所示,在垫板周围按照箭头方向进行4次扫描,只要扫过检测盲区即可,可以最大限度地减少由于仪器的扫描盲区而产生不必要的漏检。

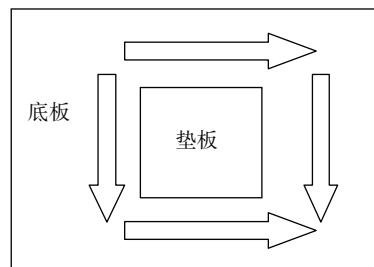


图9 垫板周围扫描

4 结论

(1) 常压储罐底板漏磁检测是针对罐底板腐蚀检测的有效手段之一,但是在检测过程中的一些注意事项和检测方法值得同行们来共同探讨研究。例如:现场检测时需要对一些影响数据分析的情况做详细记录。如扫描经过焊疤时产生的干扰信号、搭接焊缝处产生的扫描信号、罐底板起伏较大而与传感器盒摩擦产生的信号等等。

(2) 对底板有垫板、补板或支架等干扰处产生的检测盲区需要做进一步补充扫描,以降低漏检风险。

(3) 在信号分析和处理方面,使用不同的检测仪器,其信号分析软件采用的计算、分析和图像显示方法是不同的,要区别对待。

参考文献:

- [1] WANG Ya-dong, XU Yan-ting, WANG Bing, et al. Research on metal atmospheric storage tank inspection method for standard in China[C]// Proceedings of the ASME 2009 Pressure and Piping Division Conference. Prague, Czech Republic. 2009, 07.
- [2] 李光海.常压储罐检验检测技术[J].无损检测,2010,32(7):509-512.
- [2] GJB 5311—2004 工业CT系统性能测试方法[S].
- [3] 杨文海,何德昌,徐军培,等.γ射线工业CT技术在高能炸药密度检测中的应用[J].火炸药学报,2001(3):33-34,72.
- [4] 倪培君,蔡和平,张维国,等.非均匀结构材料密度工业CT定量检测方法[J].无损检测,2012,34(2):11-15,44.
- [5] GJB 5312—2004 工业射线层析成像(CT)检测[S].