

文章编号: 1006-9941(2016)06-0609-05

复杂构型 PBX 截面密度分布 CT 测试方法

杨雪海, 张伟斌, 杨仍才, 王依全

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 高聚物粘结炸药(PBX)的密度均匀性对其力学性能和安全性影响较大。用双标准同步 CT 扫描实验模型, 测试复杂构型 PBX 的截面密度分布。采用与 PBX 相同构型的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚四氟乙烯(PTFE)作为标准密度件, 以扇束扫描方式研究了 PBX 和标准密度件的截面 CT 值分布规律及线性关系, 用 MATLAB 软件, 通过灰度阈值和灰度值提取, 得到不同截面的 CT 值。通过标准件体密度获得 PBX 的截面密度, 利用排水法测得的 PBX 体密度计算修正系数 k , 对计算获得的 PBX 截面密度进行线性修正, 获得复杂构型 PBX 不同高度的截面密度分布。结果表明, PBX 截面密度与体密度的最大相对偏差为 0.74%。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX); 密度分布; 复杂构型; X 射线 CT (X-CT)

中图分类号: TJ55; TG115.28

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.06.017

1 引言

X 射线 CT (X-ray computed tomography, X-CT) 是无损测试材料密度分布或均匀性的重要手段^[1], 通过测试材料的衰减系数或 CT 灰度值(以下简称 CT 值), 建立衰减系数或 CT 值与密度的数学关系, 获得被测材料的体密度或局部密度, 已用于药粒^[2]、粉体^[3]、木材^[4]、C/C 复合材料^[5]、聚丙烯酸酯泡沫^[6]、石墨^[7]等的内部密度均匀性研究测试。

高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)是军事应用的重要材料, 其密度分布或均匀性可反映内部组成和细观结构的差异, 对研究 PBX 的起爆及传爆特性、力学性能、安全性具有重要作用^[8-11]。PBX 密度分布或均匀性测试研究主要采用 CT 技术^[12-14], 本课题组已采用测试 CT 值相对差的方法间接表征炸药晶体^[15]、PBX^[16]密度的均匀性。由于 PBX 试件构型复杂, 受工业 X-CT 射线硬化的影响, 复杂构型材料截面形状和面积的变化会导致 CT 值变化, 而材料内部密度的差异也会引起 CT 值改变, 所以难于判断 CT 值改变的真正原因。目前, CT 测试的标准密度件基本采用圆柱形, 与复杂构型待测件的形状、

尺寸存在差异, 如果直接利用圆柱形标准密度件的 CT 值, 容易给复杂构型待测件的局部密度计算带来较大误差, 因此复杂构型材料的局部密度测试成为难题, 目前尚无 CT 测试方法报道。

鉴于上述问题, 本实验采用双标准同步 CT 扫描实验模型, 研究了复杂构型 PBX 与标准密度件的截面 CT 值分布规律, 讨论了 X 射线能量波动、不同截面形状面积变化对 CT 值测试的影响, 通过标准件的密度计算 PBX 的截面密度, 并利用 PBX 体密度对计算结果进行了线性修正。

2 实验原理与测试模型

X 射线穿透材料前后的光强服从 Lambert-Beer's 定理^[17]:

$$I = I_0 e^{-\mu \Delta x}, \quad \mu = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

式中, I_0 为入射 X 射线强度, I 为出射 X 射线强度, Δx 为 X 射线穿过的厚度, cm; μ 为材料的线衰减系数, cm^{-1} ; μ 与 X 射线能量、材料化学组成和密度相关。

当 X 射线穿过材料某截面, 根据该截面在不同方向的投影数据(即 I_0/I 的变化)可以重建获得该截面的线衰减系数 μ 分布(CT 图像), CT 图像以灰度值方式显示在屏幕上, CT 值分布代表了线衰减系数 μ 分布, 当材料组成相似时 CT 值与材料密度在一定范围内呈线性关系, 通过测试材料截面 CT 值, 利用标准密

收稿日期: 2015-05-06; 修回日期: 2015-12-08

基金项目: 中国国防科技预研项目(4262020502, 4262020603)、中国工程物理研究院学科发展基金(2013B0203024)

作者简介: 杨雪海(1968-), 男, 副研, 硕士, 主要从事 CT 应用研究。

e-mail: HTC1022@sina.com

度材料进行标定, 可以获得待测材料的截面密度。

图 1 为 CT 同步扫描测试模型, 1[#]、2[#] 为标准密度件, 0[#] 为待测密度件, 它们的体密度分别为 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_0 , 可以采用排水法测得。待测件与标准件具有相同回转构型, 三者圆心处于同一圆环上且呈正三角形排列, 三角形中心与 CT 旋转台中心重合, 当任一高度位置进行 CT 扫描时, 三者均具有相同的截面形状和面积。

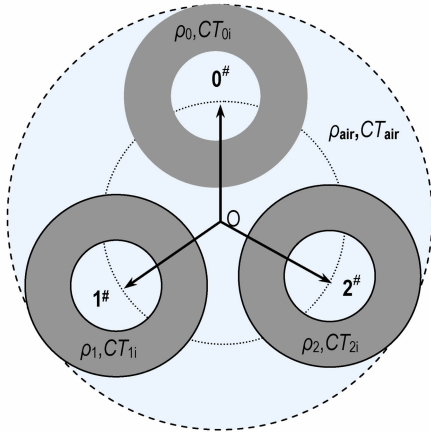


图 1 CT 同步扫描测试模型

Fig. 1 CT model of synchronous scanning

对于组成相同的 0[#]、1[#]、2[#] 材料, 在任意 i 截面上三者的截面密度分别为 $\rho_{0,i}$ 、 $\rho_{1,i}$ 、 $\rho_{2,i}$, 截面 CT 值分别为 $CT_{0,i}$ 、 $CT_{1,i}$ 、 $CT_{2,i}$, $CT_{air,i}$ 为空气 CT 值, 0[#]、1[#]、2[#] 间的截面密度与截面 CT 值满足下面公式:

$$\frac{\rho_{0,i}}{CT_{0,i} - CT_{air,i}} = \frac{\rho_{1,i}}{CT_{1,i} - CT_{air,i}} = \frac{\rho_{2,i}}{CT_{2,i} - CT_{air,i}} \quad (2)$$

分别测试 0[#]、1[#]、2[#] 不同高度的截面 CT 值, 减去不同截面的 $CT_{air,i}$ 后, 根据 1[#]、2[#] 的截面密度 (分别等于其体密度), 用式 (3) 计算获得 0[#] 不同高度的截面密度。

$$\rho_{0,i} = \rho_{1,i} + (\rho_{2,i} - \rho_{1,i}) \times (CT_{0,i} - CT_{1,i}) / (CT_{2,i} - CT_{1,i}) \quad (3)$$

对于组成存在差异的 0[#]、1[#]、2[#] 材料, CT 值与密度 ρ 的线性关系会受到影响, 根据式 (3) 计算的待测件截面密度与真实密度会存在偏差。由于真实的待测件截面密度加权平均后应该等于其体密度, 而体密度可以采用排水法测得, 可利用计算出的待测件的体密度 ρ_{cal} 与排水法测得的体密度 ρ_0 间的偏差系数 k 对 ρ_{cal} 进行线性校正, 获得修正后的待测件各截面密度 ρ_{cor} 。

即对于 0[#] 待测件,

$$\rho_{cal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{cal,i} \quad (4)$$

设

$$k = \frac{\rho_0}{\rho_{cal}} \quad (5)$$

有

$$\rho_{cor,i} = k \times \rho_{cal,i} \quad (6)$$

$$\rho_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{cor,i} \quad (7)$$

3 实验方法与 CT 值提取

设计加工复杂构型的 PBX 试件 (以下简称 PBX, 体密度为 $1.890 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 标准密度件选择聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA, 体密度为 $1.189 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 与聚四氟乙烯 (PTFE, 体密度为 $2.171 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。采用 9 MeV CT (密度分辨率为 0.3%) 在样件不同高度位置进行水平扇束扫描, 本实验选择 15 个高度, 切片厚度为 0.2 mm, 扫描高度间距为 10 mm, 扫描后重建获得 PBX 与 PMMA、PTFE 的截面 CT 图像, 不同扫描高度样件截面的形状与面积有所变化, 图 2 为不同高度的典型截面 CT 图像。

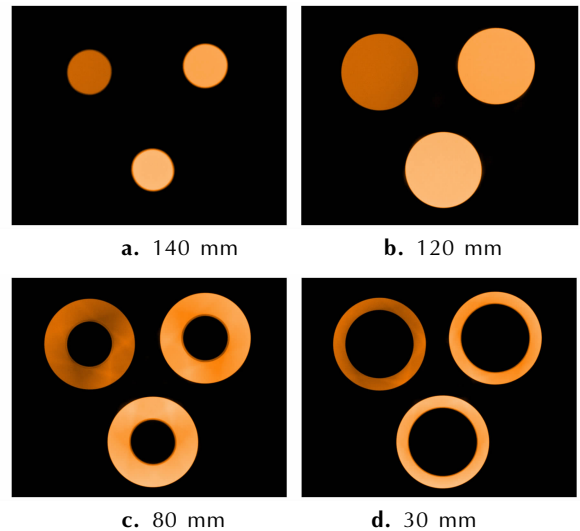


图 2 不同高度的截面 CT 图像

Fig. 2 CT images of cross-section at different height

采用 MATLAB^[18] 进行图像格式转换、灰度校正、图像降噪和边缘提取, 对不同高度位置的截面 CT 图像进行数据的阈值分割与提取, 圆与圆环的数据区域分割方式见图 3, 计算每个圆或圆环上 8 个区域的 CT 值, 将其平均值作为该圆或圆环的 CT 值, 采用相同方法分别获取 PMMA、PTFE、PBX 在不同高度位置截面的 CT 值。

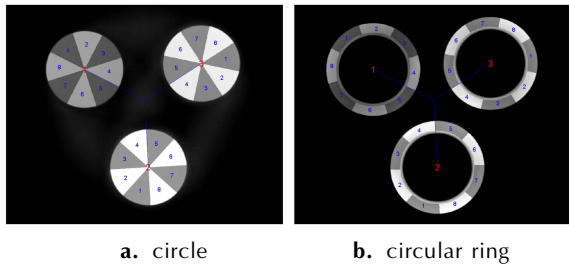


图3 两种典型截面 CT 图像 MATLAB 分割示意图
 Fig.3 Schematic diagram of CT image segmentation of two typical cross-section by MATLAB

4 实验结果与讨论

4.1 不同扫描时段对 CT 值的影响

在不同的扫描时段, X 射线能量会产生波动, 对 CT 值测试具有一定影响。为考察不同扫描时段, CT 能量波动对 CT 值测试的影响, 对 PMMA、PTFE、PBX

表 1 不同扫描时段样件的 CT 值

Table 1 CT values of samples at different time

sample scanning time	PBX				PTFE				PMMA			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
air blank	3466	3456	3450	3481	3466	3456	3450	3481	3466	3456	3450	3481
region 1	18673	18555	18611	18611	20368	20263	20347	20388	12918	12829	12881	12870
region 2	17624	17531	17645	17683	19130	19048	19128	19203	11611	11562	11620	11643
region 3	16967	16918	16967	17023	18839	18729	18787	18825	11528	11441	11512	11502
region 4	18298	18199	18264	18248	20489	20350	20420	20385	13166	13081	13137	13128
region 5	18847	18740	18793	18762	20115	19983	20087	20099	13015	12948	12992	12978
region 6	17029	16961	17074	17114	18728	18645	18701	18774	11444	11393	11410	11428
region 7	17283	17230	17302	17371	19404	19279	19360	19352	11710	11668	11722	11753
region 8	18544	18442	18507	18491	20448	20294	20376	20392	12936	12851	12911	12931
Cross-section	17908	17822	17895	17913	19690	19574	19651	19677	12291	12222	12273	12279
mean value	17885				19648				12266			
RD/%	0.130	-0.352	0.058	0.156	0.214	-0.377	0.013	0.149	0.203	-0.362	0.058	0.107

Note: The CT value of cross-section is the average of all region 1~8. The mean value is the average of cross-section in four scanning times. The RD (relative deviation) is calculated between cross-section value and mean value.

4.2 PMMA、PTFE、PBX 截面 CT 值的获取

利用 MATLAB 软件编程, 逐层获取 PMMA、PTFE、PBX 在不同高度的截面 CT 值, 分别计算三种材料的截面 CT 值的平均值, 以及截面 CT 值与平均值的相对偏差, 结果见表 2。

从表 2 看出, 随着扫描高度变化, PMMA、PBX、PTFE 试件的截面 CT 值也会发生变化, 三种材料增大或减小的趋势和幅度基本一致。这表明: (1) 采用同步 CT 扫描模式, X 射线能量波动和形状面积变化三

种材料 CT 值测试影响的程度基本相同, 可以在测试模型中作为系统误差进行修正, 不会对截面密度分布的测试造成影响; (2) 受不同时间段 X 射线能量波动与截面形状面积改变的影响, 样件的截面 CT 值会产生变化, 并且不同高度截面的 CT 值与平均值的相对偏差多数大于 1%, 而表 1 中 X 射线能量波动影响导致截面 CT 值变化的偏差幅度小于 0.4%, 说明不同高度截面的 CT 值变化主要源于截面形状面积的变化。

试件选择一个高度截面进行 4 次截面扫描, 每次扫描间隔时间约 25 min, 采用 MATLAB 编程, 获取第 1~4 次扫描的 PMMA、PTFE、PBX 的 8 个分割区域的 CT 值, 结果见表 1。空气灰度值为整个图像空白区域的灰度均值, 区域 1~8 的 CT 值已减去空气灰度值 CT_{air} 。计算第 1~4 次扫描环带 CT 值的平均值, 环带 CT 值与平均值的相对偏差。

从表 1 看出, 在第 1~4 次扫描过程中, 区域 1~8 由于距旋转中心距离不一, PMMA、PTFE、PBX 的 CT 值均有变化, 且三种材料的变化规律基本一致, 每种材料的环带 CT 值在 4 次扫描中变化均不大, 与平均值的相对偏差为 -0.377% ~ 0.214%, 空气 CT 值的变化也不大, 这表明在第 1~4 次扫描过程中, X 射线能量输出比较稳定, 对 PMMA、PTFE、PBX 环带 CT 值的影响幅度小于 0.4%, 某截面上任一时刻 X 射线扫描获得的 PMMA、PTFE、PBX 截面 CT 值用于密度值计算均具有代表性。

表 2 不同扫描高度 PMMA、PTFE、PBX 试件的截面 CT 值和相对偏差

Table 2 CT value and relative deviation of the cross-section of PMMA, PTFE and PBX components on different height

height /mm	PMMA		PTFE		PBX	
	CT value	RD/%	CT value	RD/%	CT value	RD/%
10	13700	12.29	21075	7.66	19448	8.98
20	12565	2.98	20074	2.55	18404	3.13
30	12056	-1.19	19576	0.01	17882	0.21
40	11716	-3.98	19153	-2.16	17478	-2.06
50	11523	-5.56	18649	-4.73	16963	-4.94
60	11657	-4.46	18819	-3.86	17136	-3.97
70	11592	-4.99	18667	-4.64	16993	-4.77
80	11714	-3.99	18845	-3.73	17165	-3.81
90	11867	-2.74	19067	-2.60	17355	-2.75
100	11984	-1.78	19233	-1.75	17521	-1.82
110	12269	0.56	19667	0.47	17886	0.23
120	12404	1.66	19872	1.52	18084	1.34
130	12603	3.29	20215	3.27	18387	3.04
140	12633	3.54	20289	3.65	18430	3.28
150	12737	4.39	20426	4.35	18543	3.91
Mean value	12201	/	19575	/	17845	/

Note: The RD is calculated between CT value at different height and mean value of every material.

4.3 PBX 截面密度分布计算

PMMA、PTFE 可视为密度均匀体, 各个截面密度等同体密度, 利用 PMMA 和 PTFE 的截面 CT 值与截面密度, 依据表 2 数据和式(3)分别计算得到 PBX 在不同扫描高度的截面密度, 结果见表 3。根据 PBX 15 个截面密度 $\rho_{cal,i}$ 和式(4), 计算获得 PBX 截面平均密度(即体密) ρ_{cal} 为 $1.941 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 而排水法测试的 PBX 体密度 ρ_0 为 $1.890 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 二者之间的相对偏差为: $(1.941-1.890)/1.890 \times 100\% = 2.70\%$ 。

这种偏差主要来自于标准件与待测件的组成差异。利用式(5)计算出 $k=0.9737$, 利用式(6)进行线性修正获得 PBX 各截面的修正密度 $\rho_{cor,i}$, 各截面修正密度的均值满足式(7), 计算 PBX 截面修正密度与排水法测得密度(ρ_0) $1.890 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 间的相对偏差, 结果见表 3。

从表 3 看出, 利用 PMMA、PTFE 的 CT 值-密度关系以及 k 值线性修正获得的 PBX 截面修正密度 $\rho_{cor,i}$, 密度值在 PBX 的体密度 $1.890 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 附近, 与体密度的最大偏差为 0.74% , 截面密度分布具有较好的均匀性, 表明采用同步扫描方式并利用排水法密度修正测试复杂构型试件截面密度的方法可行, 如果采用更多高度位置的截面扫描, 获得的修正 k 值更加准确, 获

得的截面密度将更接近真实的截面密度。此外, 获得的复杂构型 PBX 截面密度随着高度增加有减小的趋势, 初步分析可能是 PBX 成型过程导致内外型面与里层部位的密度差异, 以后将进一步研究其成因。

表 3 不同扫描高度 PBX 的截面密度

Table 3 PBX cross-section density on different height

height /mm	ρ_{cal} / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	ρ_{cor} / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	ρ_0 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	RD /%
10	1.954	1.903	1.890	0.740
20	1.953	1.902	1.890	0.619
30	1.950	1.899	1.890	0.474
40	1.950	1.899	1.890	0.476
50	1.939	1.888	1.890	-0.100
60	1.940	1.890	1.890	-0.019
70	1.939	1.888	1.890	-0.100
80	1.940	1.889	1.890	-0.049
90	1.938	1.887	1.890	-0.160
100	1.939	1.889	1.890	-0.078
110	1.935	1.884	1.890	-0.310
120	1.936	1.885	1.890	-0.243
130	1.935	1.885	1.890	-0.280
140	1.933	1.882	1.890	-0.415
150	1.931	1.880	1.890	-0.520
mean value	1.941	1.890	1.890	0.002

Note: ρ_{cal} is calculative density; ρ_{cor} is corrective density; ρ_0 is volume density; the RD was calculated between ρ_{cor} and ρ_0 , $RD = \frac{\rho_{cor}-\rho_0}{\rho_0}$.

5 结 论

(1) 建立了双标准 CT 同步对称截面扫描模型与实验技术, 标准密度件采用与 PBX 相同的构型, 可以获得较为准确的截面 CT 值, 较好解决截面形状、面积变化产生的 CT 值测试差异问题, 提高了 PBX 截面密度测试的准确性。

(2) X 射线能量波动对截面 CT 值测试的影响较小, 不同截面 CT 值变化主要受截面形状和面积的影响。

(3) 采用双标准 CT 同步对称截面扫描模型计算获得 PBX 的截面密度与体密度, 采用排水法测得的 PBX 体密度计算 k 值进行线性修正的方法, 可以获得复杂构型 PBX 不同高度的截面密度。不同高度截面密度与排水法测得 PBX 体密度 $1.890 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的最大相对偏差为 0.74% 。

参考文献:

- [1] Perkins D E, Martz H E, Hester L O, et al. Computed tomography experiments of Pantex high explosives [R]. UCRL-CR-

- 110256, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551, USA.
- [2] 文尚刚, 王胜强, 黄文斌, 等. 密度对压装 B 炸药燃烧转爆轰性能的影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 5-8.
WEN Shang-gang, WANG Sheng-qiang, HUANG Wen-bin, et al. The effect of density in composition B on deflagration-detonation-transition behavior[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 29(5): 5-8.
- [3] 王玮, 王建灵, 郭伟, 等. 装药密度及尺寸对 RDX 基含铝炸药爆压爆速的影响[J]. 含能材料, 2010, 18(5): 563-567.
WANG Wei, WANG Jian-ling, GUO Wei, et al. Effect of charge density and size on detonation pressure and detonation velocity of RDX-based aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 563-567.
- [4] Roger A Morris, Lowell D Harris. High-precision density measurements using tomography [R]. LA-UR-90-2988, Los Alamos National Laboratory, NM 87545, USA.
- [5] 王功庆, 杨锦清, 曾寄萍. 炮弹体内炸药密度的测定[J]. 电子学与探测技术, 1999, 19(3): 172-177.
WANG Gong-qing, YANG Jin-qing, ZENG Ji-ping. ICT nondestructive testing for high explosive density[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 1999, 19(3): 172-177.
- [6] 杨文海, 何得昌, 徐军培. 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, 24(3): 33-34, 72.
YANG Wen-hai, HE De-chang, XU Jun-pei. Determination of local TNT density in cannon projectile casing by γ ray non destructive inspection [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(3): 33-34, 72.
- [7] 张洪伟, 潘保青. 基于 ICT 技术的弹药无损检测设备[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(1): 76-79.
ZHANG Hong-wei, PAN Bao-qing. ICT-based ammunition NDT instrument[J]. *Chinese Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2006, 25(1): 76-79.
- [8] ASTM E 1935-1997 (Reapproved 2008), Standard test method for calibrating and measuring CT density[S]. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO BOX C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [9] Sinka I C, Burch S F, Tweed J H, et al. Measurement of density variations in tablets using X-ray computed tomography[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2004 (271): 215-224.
- [10] Ohashi J, Arakawa H. Use of X-ray CT scanner for density distribution measurements in powder compacts[J]. *J Japan Soc Powder and Powder Metallurgy*, 1995, 42(9): 1032-1036.
- [11] 韩书霞, 于雷, 孔超, 等. 基于计算机断层扫描技术的木材密度检测研究[J]. 森林工程, 2007, 23(1): 19-23.
HAN Shu-xia, YU Lei, KONG Chao, et al. Research of wood density testing based on computer tomography technology [J]. *Chinese Journal of Forest Engineering*, 2007, 23(1): 19-23.
- [12] 刘红林, 金志浩, 郝志彪, 等. ICT 技术测试炭/炭复合材料内部密度分布[J]. 无损检测, 2007, 29(12): 726-727, 735.
LIU Hong-lin, JIN Zhi-hao, HAO Zhi-biao, et al. A new method for testing the density of carbon/carbon composites[J]. *Chinese Journal of Nondestructive Testing*, 2007, 29(12): 726-727, 735.
- [13] 单雯雯, 张林, 徐家云. 聚丙烯酸酯泡沫密度均匀性的射线检测技术[J]. 强激光与离子束, 2007, 19(1): 71-74.
SHAN Wen-wen, ZHANG Lin, XU Jia-yun. Detecting technology for density uniformity of trimethylolpropane trimethacrylate polymer foams[J]. *Chinese Journal of High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 71-74.
- [14] 李俊杰, 韩焱, 王黎明. 基于 ICT 的石墨密度均匀性检测方法研究[J]. 无损检测, 2008, 30(3): 163-164, 192.
LI Jun-jie, HAN yan, WANG Li-ming. Study on the method of graphite density uniformity inspection based on X-ray ICT[J]. *Chinese Journal of Nondestructive Testing*, 2008, 30(3): 163-164, 192.
- [15] 张伟斌, 田勇, 杨仍才, 等. RDX 晶体颗粒压制密度分布的 μ CT 实验研究[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 565-570.
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, YANG Reng-cai, et al. Density distribution of pressed RDX crystals with a cone-beam micro-focus computed tomography[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(5): 565-570.
- [16] 杨雪海, 张伟斌, 戴斌, 等. 微焦点 CT 在含能材料密度测试中的应用研究[J]. CT 理论与应用研究, 2009, 18(4): 61-67.
YANG Xue-hai, ZHANG Wei-bin, DAI Bin, et al. Research on energetic material density by X-ray micro computed tomography [J]. *Chinese Journal of Computerized Tomography Theory and Applications*, 2009, 18(4): 61-67.
- [17] 庄天戈. CT 原理与算法应用[M]. 上海交通大学出版社, 1992.
- [18] The MathWorks, Inc. 3 Apple Hill Drive [CP], Natick, MA 01760-2098, USA.

CT Test Method for the Cross-section Density Distribution of PBX Component with Complex Configuration

YANG Xue-hai, ZHANG Wei-bin, YANG Reng-cai, WANG Yi-quan

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: The density uniformity of polymer bonded explosives (PBX) has a great effect on its mechanical property and safety performance. A dual-standard computed tomography simultaneous scanning model was applied to measure the cross-section density distribution of PBX component with complex configuration. Polymethyl methacrylate (PMMA) and polytetrafluoroethylene (PTFE) having same configuration of PBX were used as standard density components. The distribution rule of CT values and linear relation of the cross-section of PBX and standard density components were studied by a fan beam CT scanning mode. CT values of different cross-sections were obtained via the threshold of gray-scale and extraction of gray-scale value using MATLAB software. The cross-section density of PBX component was obtained from the volume densities of standard components. The corrected coefficient k was calculated using the volume density of PBX measured by water displacement method. The linear correction of the cross-section density of PBX component obtained by calculation was carried out. The cross-section density distribution of PBX component with complex configuration on different height was obtained. Results show that the maximal relative deviation between the cross-section density and the volume density of PBX is 0.74%.

Key words: polymer bonded explosives (PBX); density distribution; complex configuration; X ray computed tomography (X-CT)

CLC number: TJ55; TG115.28

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.06.017