

低 Z 泡沫材料密度测量

贾 鹏, 马小军, 高党忠, 罗 青, 叶成刚, 李宝荣

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:采用低能 X 射线对低原子序数(低 Z)泡沫样品进行透射照相,以胶片作为记录介质,对材料密度进行测量。描述了测量方法的原理、系统的组成及测量数据的获取及其分析。采用此方法可实现泡沫样品密度的小批量测量。基于测试图像分析,可获得不同泡沫样品的平均密度、密度均方差、密度分布图像。该测量技术为 CH 泡沫类靶材制备工艺的进一步改善提供了有力的分析测试手段。

关键词:低能 X 射线;CH 泡沫材料;密度分布

中图分类号: TG139

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)09-0847-04

Density Measurement for Foam Material of Low Atomic Number

JIA Peng, MA Xiao-jun, GAO Dang-zhong, LUO Qing, YE Cheng-gang, LI Bao-rong

(*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics,*

P. O. Box 919-987, Mianyang 621900, China)

Abstract: The density measurement technology of foam material with low atomic number was established by low energy X-ray radiography. The technology can obtain the average density, the image of density distribution, and density standard deviation of foam samples in batch. Based on the density image, the difference of various samples' density can be observed clearly. The technology is important for the improvement of CH foam facture.

Key words: low energy X-ray; CH foam material; density distribution

随着间接驱动激光惯性约束聚变(ICF)的深入研究,超声速传输因其传输速度快及受热辐射后介质密度不变而在 ICF 研究中越来越重要。用于填充柱腔靶内的低密度材料既可起到辐射传输通道的作用,受热后又可延缓腔壁的等离子体膨胀^[1],而材料的密度及其密度分布的均匀性是影响物理实验结果的重要参量,需精确测量。ICF 靶中用的泡沫材料孔架常为微米量级,微孔结构的存在使泡沫材料局部小

范围内的密度与整体平均密度有较大差异。在此需求背景下,本工作采用低能 X 射线机进行透射照相,选用颗粒度适宜的感光底片,对低原子序数(低 Z)泡沫样品的密度及其密度分布均匀性进行分析和测量。

1 原理

一窄束 X 射线在与物质相互作用过程中,如果所作用的物质为均匀介质,则在一定小的

厚度范围内,穿过物质后的射线强度 I 正比于入射射线强度 I_0 并与穿透物体的厚度 x 成指数关系,其相互作用^[2]可表示为:

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

式中: μ 为线性衰减系数。

在理论上,常用质量衰减系数 μ_m (μ 除以物质密度 ρ) 代替线性衰减系数 $\mu^{[2-3]}$, 则式(1)变为:

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} \quad (2)$$

物质的质量衰减系数既与射线能量有关,也与射线所穿过物质的原子序数有关。对于同种物质,入射射线能量相同时,其质量衰减系数亦相同^[4]。作为记录 X 射线与物质相互作用信息的 X 光底片,其经 X 射线曝光后的光学密度(灰度) D 为:

$$D = \lg(\Phi_0/\Phi) = \lg \frac{I_0 t}{I t} = \lg \frac{I_0}{I} \quad (3)$$

式中: Φ_0 为入射光通量; Φ 为透射光通量。

由式(2)、(3)可得:

$$D = \lg(1/e^{-\mu_m \rho x}) = \lg e^{\mu_m \rho x} = \lg e^{\mu_m(x)\rho} \quad (4)$$

由式(4)可看出,对于一定能量的 X 射线,底片灰度只与物质的密度和厚度相关。将材料衰减系数 $\mu(x)$ 表示为吸收材料厚度 x 的函数,采用吸收材料厚度高次项修正其物像关系,可得:

$$D = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \dots$$

设 $y = D(0) - D(d)$, 其中, $D(0)$ 为本底灰度, $D(d)$ 为样品灰度, 则有:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots \quad (5)$$

将欲分析的泡沫材料和同种材料的阶梯减光片进行低能 X 光机照相(图 1), 获取泡沫材料和相应台阶的 X 光图像^[5-6]; 然后, 提取其图像灰度, 由式(5)进行多项式拟合得到阶梯减光片的灰度-厚度物像关系曲线, 将泡沫材料每点的灰度代入物像关系曲线, 可得出其相应点的等效厚度。由于实验条件完全相同, 对于式(1), 可得出 $\rho_0 x_0 = \rho x$, 则泡沫材料感兴趣区域中每个像素点 ρ_0 的大小即可通过数据分析软件获得。经软件对感兴趣区域中所有数据点进行统计分析, 可得出泡沫材料的平均密度、密度分布的标准偏差、不同密度所占的百分比及密度分布的三维图像等信息。

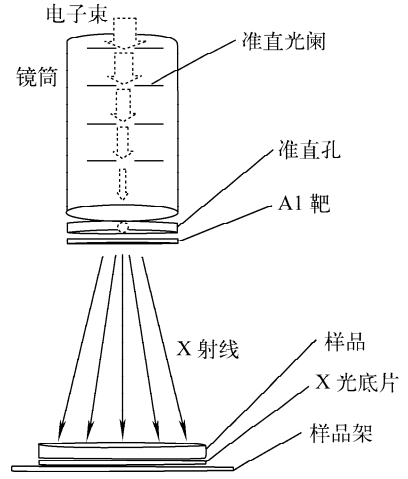


图 1 X 光机照相结构示意图

Fig. 1 Configuration of radioscopy

2 实验

2.1 样品制作

实验关键在于泡沫材料标准台阶的制作。采用 PMP 原材料, 对其进行台阶加工, 台阶高度视样品而定。根据 $\rho_0 x_0 = \rho x$ 的关系, 原材料的密度一定, 需根据所需泡沫的厚度及密度值计算相应的台阶厚度范围。

2.2 记录介质的选择

设备的靶源为铝, 其 K_α 线能量 1.486 keV, 对密度为 50 mg/cm^3 、长度约 $600 \mu\text{m}$ 的泡沫, 加速电压一般为 $16 \sim 18 \text{ kV}$ 。在该情况下, 如果选择底片的颗粒度太小, 则感光速度较低, 需延长曝光时间; 颗粒度太大, 则分辨率降低。这就需选择颗粒度适宜的底片^[7]。

本工作选用柯达 MX125 型 X 光胶片, 影像清晰, 且噪声低, 颗粒度在 μm 量级, 感光速度适中, 比传统胶片具有更好的耐热性能和较高的冲洗宽容度, 可降低在非标冲洗条件下造成的影像误差。

2.3 灰度采集、灰度-厚度曲线拟合

将图像的灰度信息采集入计算机, 调用 X 光图像分析软件, 绘制灰度-厚度拟合曲线示于图 2。

2.4 三维图像重组及数据分析

根据每发泡沫像素点的灰度值及泡沫厚度, 可得出每发泡沫、每个像素点的密度值 ρ_0 。采用 MATLAB 进行三维图像重组(图 3), 可清楚了解整个泡沫样品的密度分布状况。

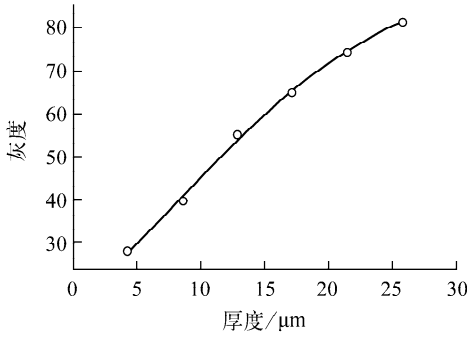


图 2 灰度-厚度拟合曲线

Fig. 2 Gradation-thickness fitting curve

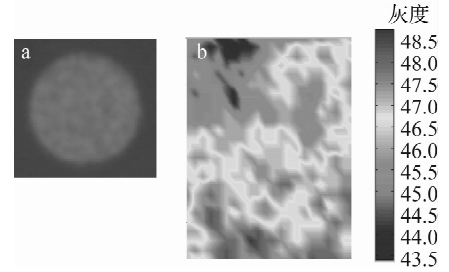


图 3 X 光图像(a)及三维密度分布(b)

Fig. 3 Radioscopy image (a) and density distribution (b)

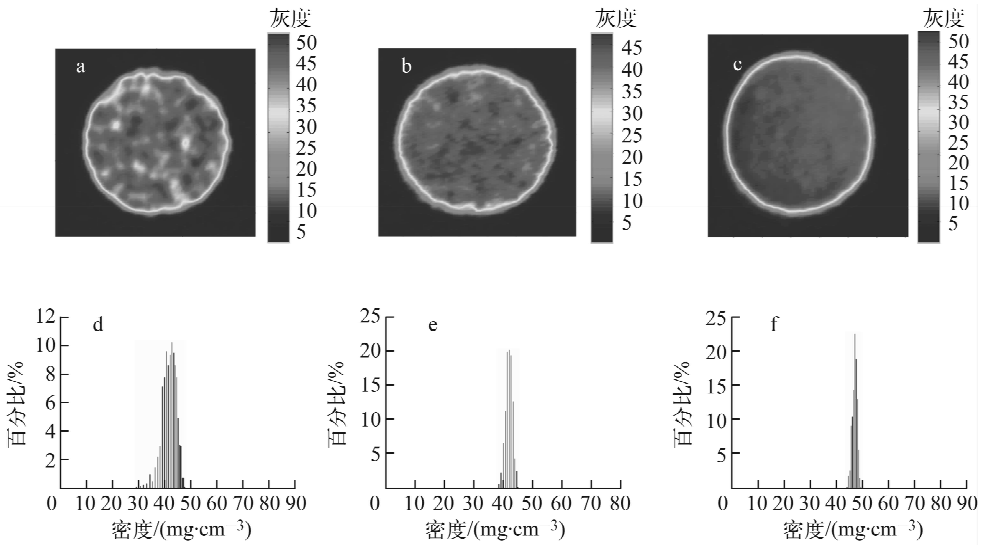


图 4 泡沫密度分布图像(a,b,c)及其密度均匀性(d,e,f)对比

Fig. 4 Density distribution image (a,b,c) and histogram (d,e,f) of various uniformity foams

密度, mg/cm^3 : a—41.4; b—41.1; c—46.4

均方密度差, mg/cm^3 : a—2.6; b—1.2; c—0.8

d,e,f 分别与 a,b,c 相对应

3 数据分析

通过对不同的 PMP 泡沫材料进行 X 光机照相, 分别得到其密度分布三维图像。基于该图像对泡沫材料进行筛选。由图 4 中 3 个样品的柱状图可看出, c 样品密度集中程度最高, 说明其孔架结构较为均匀, 其样品密度的均方根偏差为 $0.8 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 。图 5 为 c 样品泡沫柱的 X 光图像直径方向的像素分布, 直径 $600 \mu\text{m}$, 跨度约 60 个像素, 可得出分析的横向分辨率约为 $10 \mu\text{m}$ 。

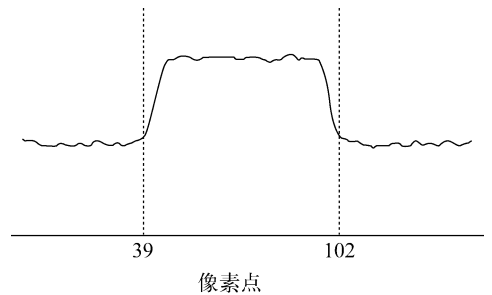


图 5 泡沫材料 X 光图像的径向像素分布

Fig. 5 Radial pixels distribution of foam X-ray image

4 结论

低密度泡沫材料测量系统可清晰测得不同泡沫样品的密度分布三维图及其密度分布的均方差,系统的横向分辨率可达 $10\ \mu\text{m}$ 。此测量系统可对泡沫材料制备工艺进行质量检测,同时可按照平均密度值及密度均方差对样品进行筛选,以对 ICF 辐射输运实验研究提供密度均匀的柱腔靶材。

参考文献:

- [1] 江少恩,孙可煦,郑志坚,等. 神光 II 装置 X 射线辐射在低密度 CH 泡沫中的超声速传播实验研究[J]. 物理学报,2004,53(10):3 413-3 416.
JIANG Shaoen, SUN Kexu, ZHENG Zhijian, et al. Experimental investigation of supersonic X-ray transport in radiatively heated CH foam cylinders on Shenguang II facilities [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(10): 3 413-3 416 (in Chinese).
- [2] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002:47-92.
- [3] 汤文辉,赵国民,张若棋. 物质对 X 射线的吸收系数和散射系数的计算[J]. 强度与环境,1998(2):49-56.
TANG Wenhui, ZHAO Guomin, ZHANG Ruoqi. Calculation of X-ray absorption coefficient and scatter coefficient for matter [J]. Structure & Environment Engineering, 1998(2): 49-56 (in Chinese).
- [4] 杨晓华,兑卫真. X-射线与三种金属作用的定量分析[J]. 有色金属,2002,54(2):16-19.
YANG Xiaohua, DUI Weizhen. Quantitative analysis of X-ray radiation to three metals [J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(2): 16-19 (in Chinese).
- [5] SCHROEN D G, BACK C A, HOLT R R, et al. Target fabrication for sandia's Z-pinch accelerator [J]. General Atomics, 2007, GA A25820: 1-5.
- [6] FALCONER J W, NAZAROV W, HORSFIELD C J. In situ production of very low density microporous polymeric foams [J]. Vacuum Science Technology, 1995, 13(4): 1 941-1 944.
- [7] 强天鹏,李衍. 射线照相黑度值的重要性及其标准规定值的合理性 [J]. 无损检测,2003,25(8): 428-433.
QIANG Tianpeng, LI Yan. The importance of density in radiography and the rationality of the values stipulated in standards [J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(8): 428-433 (in Chinese).