

# 辐射输运用泡沫密度测量不确定度分析

贾 鹏, 高党忠, 马小军, 叶成刚, 袁玉萍, 任 玮

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 低密度泡沫材料是 X 光辐射输运实验的首选介质, 而低能 X 射线照相法是泡沫密度测量的重要手段。本工作主要研究泡沫密度测量过程中的各种误差来源, 按照国际通用方法对各不确定度分量进行合成与扩展, 得到了该方法的不确定度评定。结果表明, 该方法的横向分辨率优于  $10\ \mu\text{m}$ , 密度测量不确定度小于 4.7%, 已成功用于 SG II 物理实验中, 取得了满意的效果。

**关键词:** 辐射输运; 泡沫密度; 低能 X 射线; 测量不确定度

中图分类号: TG139

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)07-0778-04

## Uncertainty Analysis of Foam Density Measuring in Radiation Transport Experiment

JIA Peng, GAO Dang-zhong, MA Xiao-jun, YE Cheng-gang, YUAN Yu-ping, REN Wei  
(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-987, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Foam material of low density is the preferred medium for X-ray radiation transport experiment, and the low energy X-ray radiography is the important technology for foam density measuring. The every error origin in the process of foam density measuring was investigated. According to the international general method, the component uncertainties were combined and expanded respectively to obtain the uncertainty evaluation. The results indicate that, the horizontal resolution is over  $10\ \mu\text{m}$ , the measuring uncertainty of density is under 4.7%, at the same time, it has applied in SG II physical experiment successfully, and has acquired satisfactory effect.

**Key words:** radiation transport; foam density; low energy X-ray; measuring uncertainty

随着间接驱动激光惯性约束聚变的深入研究, 软 X 光辐射在材料中的超声速传输成为研究的重点内容。为满足特定的物理要求, 低密度泡沫材料成为 X 光辐射输运介质的首选<sup>[1-2]</sup>, 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。

由于泡沫材料的特殊性, 目前的方法是采

用低能量高强度的透射式 X 射线机, 选用颗粒度适宜的感光底片, 将原材料的阶梯减光片与待测样品一起进行 X 光照相, 从而对泡沫样品的密度及其密度分布均匀性进行测量和分析。

本工作针对各测量环节的误差来源进行分析, 针对不同误差的影响因子, 采用国家标准方法对各不确定度分量进行合成与扩展, 最终对

该测量方法的不确定度进行评定<sup>[3]</sup>。

## 1 实验

实验所用设备仪器及材料如下:低能 X 射线机(铝靶材),Microtek5980 扫描仪, Wyko NT1100 白光干涉仪,STM6 测量显微镜,Leitz 干涉显微镜, METTLER-TOLEDO XP6 微量天平,柯达 MX125 型 X 光胶片,柯达 D72 显影液、定影液。

实验时,将待测样品与原材料的标准台阶共同置于 X 射线软胶片上,用低能 X 射线机进行 X 射线照相。加速电压为 16~20 kV,电子束流为 1 mA,曝光时间为 40~45 min。

设  $y = D(0) - D(x)$ ,  $D(0)$  为本底灰度,  $D(x)$  为样品灰度,  $x$  为吸收材料长度。根据多项式关系,则有:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots \quad (1)$$

依据上述关系,将标准材料的厚度及灰度数据进行拟合,可得到标准工作曲线。将待测样品的灰度与标准台阶的灰度进行比对,根据实际的拟合曲线即可得到待测样品的密度<sup>[4-5]</sup>。

## 2 数学模型

待测样品密度的计算公式为:

$$\rho = \rho_0 x_0 / x \quad (2)$$

式中: $\rho$  为待测样品密度; $\rho_0$  为标准样品密度; $x_0$  为待测样品灰度所对应的标准样品等效厚度; $x$  为待测泡沫柱的长度。

## 3 测量结果的不确定度评定

从式(2)知,泡沫密度测量的不确定度主要来源于  $\rho_0$ 、 $x$ 、 $x_0$  的不确定度。而这 3 个输入量的不确定度又主要来源于测量重复性误差、设备的示

值误差及校准误差、台阶的等效厚度偏差等<sup>[6]</sup>。

### 3.1 $u(\rho_0)$ 的评定

标准材料密度的标准不确定度  $u(\rho_0)$  的主要来源为天平称量、样品长度和厚度测量误差引起的测量不确定度分量等(表 1)。

由表 1 可算得,  $u(\rho_0)$  为 1.49%。 $\rho_0$  为 0.75 mg/cm<sup>3</sup>。

表 1 标准密度的不确定度分析

Table 1 Uncertainty analysis of standard density

误差源项	标准不确定度/%	标准值
微量天平	0.51	1.370 mg
显微镜长度测量(x 方向)	0.007	41.5 mm
显微镜长度测量(y 方向)	0.02	13.4 mm
厚度不均匀性	1.43	5.216 $\mu$ m

### 3.2 $u(x)$ 的评定

待测泡沫柱长度  $x$  的标准不确定度  $u(x)$  主要来源于重复测量的统计涨落和测量显微镜的示值误差。根据设备特性及厂家的标称,泡沫柱长度测量的相对标准不确定度为 0.1%。

### 3.3 $u(x_0)$ 的评定

待测样品的等效厚度  $x_0$  测量是最大的误差影响因素。 $u(x_0)$  的来源有:重复测量的统计涨落,设备校准误差,标准台阶本身的厚度一致性,灰度重复选取的统计涨落,等效厚度重复测量的统计涨落。其中,标准台阶本身的厚度一致性等效厚度重复测量的统计涨落是最主要的误差源项,其他可忽略不计。

标准台阶本身的厚度一致性引起的相对标准不确定度可通过多点测量得到的测量列计算得到。表 2 列出了厚度多点测量结果,依此计算出的相对实验标准差为 0.6%。

表 2 标准台阶厚度参数

Table 2 Thickness parameters of standard steps

台阶	6 次测量的标准台阶厚度/ $\mu$ m						平均厚度/ $\mu$ m	标准偏差/ $\mu$ m
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次		
1	5.129	5.207	5.244	5.280	5.302	5.135	5.216	0.073
2	5.287	5.412	5.445	5.312	5.282	5.312	5.342	0.069
3	5.167	5.177	5.305	5.287	5.247	5.292	5.246	0.060
4	5.360	5.350	5.292	5.305	5.287	5.392	5.331	0.043
5	5.512	5.380	5.370	5.282	5.263	5.382	5.365	0.089
6	5.282	5.280	5.382	5.365	5.512	5.385	5.368	0.085

等效厚度重复测量引起的统计涨落通过实际厚度与单次的灰度的实验测量结果(表3)确定。

采用多项式拟合实验数据,取多项式指数  $n=2\sim 4$ <sup>[7]</sup>。

图1示出相同数据的不同指数拟合曲线。由图1明显看出,4阶指数的拟合曲线已不符

合实验的变化规律,易造成较大的误差。根据表3的数据,分别取多项式指数2、3进行拟合,拟合结果列于表4。从拟合结果综合比较看,3次拟合精度更高,拟合误差优于1.3%,所以,取多项式指数  $n=3$  进行多项式拟合。

针对拟合误差最大点进行多次测量,可得到等效厚度引起的相对标准不确定度为0.59%。

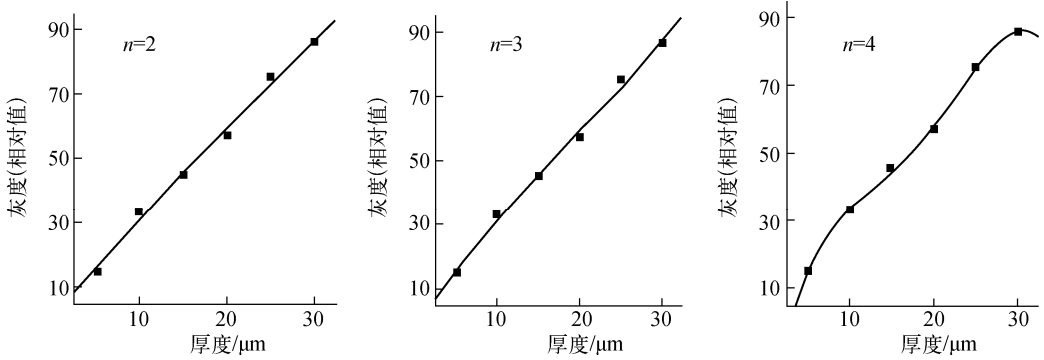


图1 相同数据不同指数的拟合曲线

Fig.1 Fitting curves with different index for same data

表3 标准台阶厚度与单次实验灰度值

Table 3 Thickness of standard steps and gradation of single experiment

台阶	厚度/ $\mu\text{m}$	灰度	本底
1	5.22	129.1	113.9
2	10.56	145.9	113.6
3	15.80	160.7	113.8
4	21.14	171.7	113.4
5	26.50	190.8	113.7
6	31.87	202.3	113.7

表4 标准台阶灰度-厚度拟合结果

Table 4 Gradation-thickness fit results of standard steps

标准台阶厚度/ $\mu\text{m}$	2次方拟合误差/%	3次方拟合误差/%
5.22	1.2	0.8
10.56	0.3	1.3
15.80	1.2	0.6
21.14	0.0	0.6
26.50	1.7	0.8
31.87	0.9	0.3

### 3.4 标准不确定度合成

输入量的标准不确定度汇总列于表5。总不确定度为2.36%。

表5 不确定度汇总

Table 5 Aggregate table of uncertainty

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度/%	指数
$u(\rho_0)$	设备示值误差,样品厚度偏差,显微镜测量误差	1.49	1
$u(x)$	测量重复性,设备示值误差	0.1	-1
$u(x_0)$	测量重复性,设备校准误差,台阶的等效厚度偏差	1.83	1

### 3.5 扩展不确定度的评定

按照自由度为50,取置信概率  $P=95\%$ ,查  $t$  分布表,得:

$$t_{95}(50) = 2.01$$

扩展不确定度  $U_{95} = t_{95}(50) \cdot u(x) = 2.01 \times 2.36\% = 4.7\%$ 。

## 4 横向分辨率分析

X射线成像系统的分辨率(包括射线照相

底片分辨率)是考核成像系统质量和照相底片质量的重要指标,需要用客观的测量器具(即射线成像用分辨率测试卡)直观地反映图像的分辨率性能指标,避免人为因素的影响。

图2示出系统的分辨率测试图像。从图像中可清晰观测到分辨率测试卡 $7.9\ \mu\text{m}$ 线对细节,表明该成像系统综合分辨率好于 $10\ \mu\text{m}$ 。

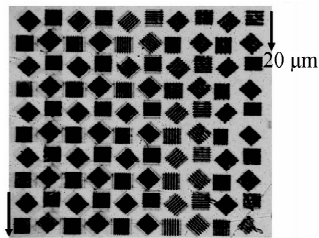


图2 分辨率测试图像

Fig. 2 Resolution test image

## 5 结论

针对现有的泡沫密度测量手段,分析了实验测量过程中的误差来源,并对其影响程度进行了分析。结果表明,该系统的横向分辨率优于 $10\ \mu\text{m}$ ,密度测量不确定度约为 $4.7\%$ 。将该方法应用于泡沫材料制备工艺的检测及辐射输运物理实验所需泡沫样品密度的检测,为泡沫材料制备工艺的优化及辐射输运实验的量化研究提供了准确参数。

## 参考文献:

[1] 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.

[2] 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 Kexi, 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).

- [3] 戴骐. ICP-AES测定香菇中镉含量的不确定度评定[J]. *食品科学*, 2007, 28(12): 376-378.
- DAI Qi. Evaluation of uncertainty in determination of cadmium in dried mushroom by ICP-AES[J]. *Food Science*, 2007, 28(12): 376-378(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 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]. *NDT*, 2003, 25(8): 428-433(in Chinese).
- [6] 郭寿鹏,王向阳,王继刚. 钼蓝光度法测定不锈钢中硅的测量不确定度评定[J]. *山东冶金*, 2007, 29(2): 55-57.
- GUO Shoupeng, WANG Xiangyang, WANG Jigang. Evaluation of the measurement uncertainty for determination of silicon in stainless steel by reduced molybdenum spectrophotometric method[J]. *Shandong Metallurgy*, 2007, 29(2): 55-57(in Chinese).
- [7] 李新,张国伟,寻丽娜,等. 短波红外平场光谱仪的波长定标[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 903-906.
- LI Xin, ZHANG Guowei, XUN Lina. Wavelength calibration of short wave infrared flat spectroradiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 903-906(in Chinese).