

文章编号: 100124322(2004)0921157204

塑料多层靶丸 X 射线照相技术^X

高党忠, 刘元琼, 罗 青, 唐永建, 袁玉萍, 温树槐

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 从理论上分析了高增益 ICF 实验燃料容器的塑料多层微球材料对 X 射线吸收机理, 给出了适当的 X 射线照相条件, 即工作电压取 10kV, 照像时间为 1.5h, 获得了壳层反差较为理想的靶丸 X 光图像。照相实验所得底片具有很高的横向分辨率, 经显微镜放大, 微球图像界面清晰可辨, 用 CCD 将图像输入计算机, 使用一般图像软件即可较为精确读出壳层厚度像素, 为塑料靶丸制备工艺提供了方便有效的跟踪测量手段。

关键词: X 射线照相; 壳层反差; 塑料靶丸

中图分类号: TN249; TL619

文献标识码: A

多层塑料微球属于非透明靶丸, 其典型结构以聚苯乙烯 (PS) 壳作芯轴, 中间阻气层为聚乙烯醇 (PVA), 外表面为用低压等离子体镀膜 (LPP) 方法制备的碳氢 (CH) 涂层, 各壳层材料的密度及光学折射率各不相同, 因此单纯使用传统的光干涉法^[1]难以直接精确测量其总壁厚及壳层厚度。1986 年日本 Kinki 大学 Uichi Kubo 等人将多层球进行切片, 用扫描电镜对微球断面观测以获得球壳各层厚度, 但该方法为破坏性的。美国通用原子公司 (General Atomics) R. B. Stephens 等人于 1995 年发展了基于 X 射线照相, 利用计算机软件对多层球 X 光图像进行分析^[2~4], 获取多层球壁厚数据, 实现了微球壁厚的非破坏性测量, 其测量精度可达 0.3 μ m。中国工程物理研究院刘元琼等人曾经研究用表面轮廓仪直接扫描 PS 及玻璃微球 X 光底片以测量其壁厚, 得到较高测量精度^[5]。理论上, 由于因化学成分及密度等性质上的差异, 多层球各壳层对 X 光的吸收率是不同的, 因此微球 X 光图像的吸收强度变化在界面是不连续的。将图像沿微球径向灰度描述为半径的函数并求二次微分, 壳层界面处会出现突变尖峰 (见图 1)。R. B. Stephens 等人的做法是, 将多层球 X 光底片用高分辨率 CCD 数字化后输入计算机, 利用专用软件对图像进行插值平滑处理, 将径向灰度曲线对角度进行求和平均达到精确测量目的。

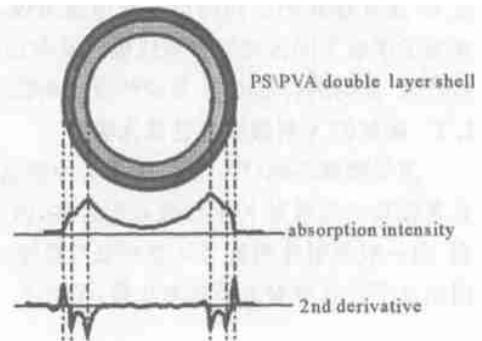


Fig. 1 Diagram for thickness measuring of plastic shell by X-ray radiograph

图 1 X 射线照相法测量多层靶丸壁厚

为了便于软件处理获得正确结果, 首先在实验上获得理想的微球 X 射线图像是十分重要的。虽然 X 射线照相作为一种成熟的无损检测手段在工业探伤和医疗诊断有着非常广泛的应用, 但这些测量一般使用较高能量 X 射线, 而且被测对象往往体积较大, mm 量级的检测精度一般就能够得到满意的测量结果。但本文研究对象为直径为 200 ~ 400 μ m, 壳层壁厚只有 1 ~ 30 μ m 的微球, 各壳层均为低 Z 材料, 而且测量精度要求很高。要获得这样微小尺度样品对比度良好的 X 光图像并进行精确测量, 相对于一般探伤测量是非常困难的, 一方面需要焦斑很小的 X 光机以提高图像分辨率, 另一方面必须严格选择控制 X 光机的工作条件以获得合适能量的 X 射线。Stephens 采用 5kV 的工作电压, 使钨靶 X 光管输出能量分布于 1 ~ 5keV 的 X 射线, 然后用 150 μ m 厚的塑料薄膜滤掉一部分低能射线后进行微球照相。作者通过理论与实验研究, 证明 Stephens 实验所用的并非最佳照相条件, 本文介绍了我们在这方面的研究情况。

应用, 但这些测量一般使用较高能量 X 射线, 而且被测对象往往体积较大, mm 量级的检测精度一般就能够得到满意的测量结果。但本文研究对象为直径为 200 ~ 400 μ m, 壳层壁厚只有 1 ~ 30 μ m 的微球, 各壳层均为低 Z 材料, 而且测量精度要求很高。要获得这样微小尺度样品对比度良好的 X 光图像并进行精确测量, 相对于一般探伤测量是非常困难的, 一方面需要焦斑很小的 X 光机以提高图像分辨率, 另一方面必须严格选择控制 X 光机的工作条件以获得合适能量的 X 射线。Stephens 采用 5kV 的工作电压, 使钨靶 X 光管输出能量分布于 1 ~ 5keV 的 X 射线, 然后用 150 μ m 厚的塑料薄膜滤掉一部分低能射线后进行微球照相。作者通过理论与实验研究, 证明 Stephens 实验所用的并非最佳照相条件, 本文介绍了我们在这方面的研究情况。

1 多层靶丸 X 射线吸收性能研究

1.1 图像反差与靶丸 X 射线吸收性能关系

X 射线照相技术研究物体内部结构的一个很重要的特征就是使用适当能量 X 光源, 获得最佳图像反差。

X 收稿日期: 2003212210; 修订日期: 2004205224

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 国家自然科学基金资助课题 (19989501)

作者简介: 高党忠 (1968 —), 男, 硕士, 副研, 研究方向为 ICF 靶参数测量技术; 绵阳 9192987 信箱。

一般而言, X射线在物体内部的吸收遵循指数衰减规律, 即

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

式中: I_0, I 分别为吸收前后 X射线强度; μ, x 分别为待测材料的 X射线线吸收系数及吸收厚度。 μ 可表示为

$$\mu = \mu_m \quad (2)$$

式中: ρ 为待测材料密度; μ_m 为质量吸收系数, 它只与吸收材料的原子序数和 X射线波长有关, 而与物质外在形态无关。

射线检测学中工件对比度(即景物反差)定义为射线通过两个等厚的不同区域后射线强度之比值, 由此定义及(1)式容易得到在靶丸壳层界面附近透过微球的 X射线强度反差, 亦即理论上样品在底片上成像反差为

$$C = e^{(\mu_2 - \mu_1)x} \quad (3)$$

式中: μ_1, μ_2 分别为界面两边材料线吸收系数。而被样品各区域界面两侧物质吸收的 X射线强度 I_a 之比为

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{I_0 - I_1}{I_0 - I_2} = \frac{1 - e^{-\mu_1 x_1}}{1 - e^{-\mu_2 x_1}} \quad (4)$$

由于几种微球材料密度均约为 $1\text{g}/\text{cm}^3$, 微球壳层壁厚仅 $10\mu\text{m}$ 左右, 因而有 $\mu x \ll 1$ 条件成立, 因此(4)式可简化为

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{\mu_{m1}}{\mu_{m2}} \quad (5)$$

由(3)式可看出 X光经过样品吸收后各部分强度反差与吸收厚度及吸收系数之差呈指数关系。在厚度一定情况下, 只依赖样品材料对所使用的 X射线线吸收系数之差, 如果要提高图像反差, 应尽量使用低能 X射线进行照相。但这不是说能量越低越好, 由于任何感光底片都有一定动态响应范围, 能量太低时, 材料吸收系数很大, 底片曝光不足同样得不到理想图像。对照相所用 X射线能量的选择应该遵循一个原则, 即样品内密度或原子序数不同区域对该射线吸收具有比较显著的差异, 又在底片动态记录范围内, 则有可能获得比较好的反差效果, 此时的样品对 X射线的吸收系数应使(5)式具有极值。

1.2 碳氧的 X射线吸收性能比较

多层微球芯轴(PS)及烧蚀层为纯碳氢材料, 阻气层(PVA)主要成分为碳氢, 此外还含有少量氧元素, 而氢元素较其它元素对 X射线吸收弱得多, 因此微球壁两个内界面两边的反差主要来源于碳氧对 X射线吸收的差别, 由一般放射性测量工具参考书可查得二者对 $4 \sim 20\text{keV}$ 之间 X射线的质量吸收系数, 由此不难计算出在相同能量下二者绝对差及相对比值, 见表1。

表1 碳氧 X射线吸收系数比较

Table 1 Xray absorption compare between C and O

energy / keV	$\mu_{mC}/(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$\mu_{mO}/(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$\mu_{mO} - \mu_{mC}/(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	μ_{mO}/μ_{mC}
4	37.7	93.0	55.3	2.47
5	19.0	47.8	28.8	2.5
6	10.8	27.7	16.9	2.56
8	4.34	11.4	7.06	2.63
10	2.27	5.72	3.45	2.52
15	0.782	1.78	0.998	2.28
20	0.432	0.843	0.411	1.95

由表2可看出, 随着 X射线能量降低, 碳氧质量吸收系数差急剧增大, 而其相对比值却在 8keV 处为最大值, 根据(4)式, 这意味着对于 8keV 的 X射线, 碳氧对 X射线吸收强度差别最大。在微球材料整体对 X射线具有足够吸收量的情况下(即微球与空间背景有足够反差), 尽量增加 PS 与 PVA 相对强度吸收比值可能得到较好的微球内部结构图像反差。

1.3 X光管输出射线能量分析

X射线来源于 X光管, 要获得适当能量 X射线输出, 就必须对 X光管在不同工作电压下输出的 X射线能量进行分析比较。将 X光管输出窗口置于扫描电镜样品室内, 应用电镜 Si(Li) 探头能谱仪可对 X光管在不同工作电压下输出的 X射线谱进行测量分析, 图2为工作电压为 $3 \sim 10\text{kV}$ 时的 X射线谱, X光管在低电压下工作时, 其管电流有一定限制, 整体输出功率也随电压变化而变化。能量分布对应的光强峰值及 X光管输出功

率随电压变化情况列于表 2。

表 2 XTF5011 型 X 射线管 3~10kV 工作电压之间输出的 X 射线光强峰值对应的能量及功率

Table 2 Energy at peak intensity and power output from model XTF5011 Xray tube operating at 3~10kV

voltage / kV	3	4	5	6	7	8	10
energy at peak intensity / keV	2.86	3.62	4.23	4.56	5.24	5.53	5.86, 7.99
output power / W	1.13	2.08	3.0	4.66	6.3	8.12	12

由图 2 能谱曲线及表 2 峰值数据可看出, X 射线管工作电压逐渐增大时, X 射线谱逐渐展宽, 而且由单峰逐渐变成双峰。表 2 和表 1 数据清楚显示, 在 10kV 工作状态下, X 射线分布在 7.99keV 处出现一峰值, 对应这个能量正好符合 PS 与 PVA 强度吸收差别最大的能量要求, 这说明选择该工作电压可以得到最佳壳层图像反差; 此时, X 光管电子束流已达到最大, 射线强度大大增加, 照相时间有效缩短, 工作效率明显提高, 实验结果也进一步证明了这个判断。

2 实验

2.1 实验装置

真空低能 X 射线照相系统如图 3 所示, 系统主要部件为美国牛津公司生产的 XTF5011 型 X 光管, 其焦斑尺寸为 0.13mm × 0.15mm, 光管窗口离微球及底片为 450mm。对于只有几百 μm 的样品而言, 这个工作距离可以保证在微球处光束接近平行光, 从而在不显著增加照相时间的情况下最大程度减小图像伴影(或者说图像几何不清晰度), 将微球无放大地记录在进口高分辨底片上。由于 X 射线能量较低, 为消除空气对 X 射线的吸收, 提高图像背景反差, 样品及底片放置于有机玻璃真空罩底部, 由机械泵抽气, 真空度在 10Pa 左右。

2.2 照相条件

根据以上影响图像质量的各种因素作用的分析, 经过不同条件比较实验, 结果证明在 10kV 的工作电压下可获得最佳图像反差及分辨率, 拍照时间与微球材料种类及壁厚大小有关, 一般为 1.5h。作为比较我们对同一个 PS/PVA 双层球在 5kV (即 Stephens 的工作条件) 及 10kV 工作电压下进行照相, 照相参数列于表 3, 图 4 为两种照相条件的双层球 X 光底片经过显微镜放大后用 CCD 拍摄的图像。图 5 为在 10kV 条件下获得的三层塑料微球 X 光图像, 由图可见微球具有明显的三层结构, PVA 阻气层较薄, PS 芯轴及 CH 烧蚀层稍厚, 壳层之间界面清晰, 反差适当, 给壁厚的精确测量提供了良好条件。

表 3 两种照相参数

Table 3 Two conditions of radiograph

work voltage / kV	beam current / mA	radiograph distance / mm	exposure time / h
5	0.6	300	6
10	1.2	450	1.5

3 结果分析

由图 4 清楚看出, 10kV 条件下拍照, 时间仅 1.5h 左右, 图像壳层界面清晰反差适当, 使用测量显微镜在较高放大倍数下便可以精确测量微球壳层壁厚, 可显著提高测量工作效率。如果使用软件计算处理可以得到各个方向具体位置更精确的测量结果, 亦即可得到各壳层厚度分布变化情况; 而 5kV 照相条件由于 X 射线管未能工作在饱和状态, 束流较低, 光源强度仅为 10kV 条件的四分之一, 拍照时间延长了 3~4 倍, 其结果只是增加了样品与背景的反差, 而样品内部细节清晰程度却并不理想。图像虽然也能分辨出双层结构, 由于 PVA 的包覆影响, 使得内外壳层反差反而小得多, 必须借助软件处理才能进行测量, 即便如此也只能获得各壳层整个

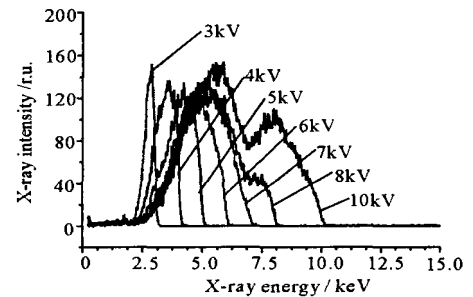


Fig. 2 Spectra of Xray output from model XTF5011 Xray tube

图 2 XTF5011 型 X 射线管输出 X 射线谱

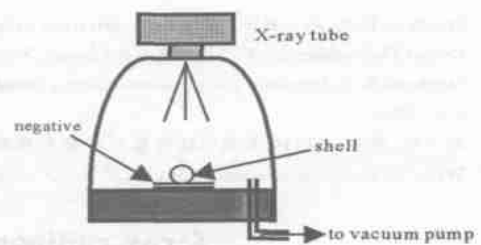


Fig. 3 Diagram of radiograph of low energy

图 3 低能 X 射线真空照相示意图

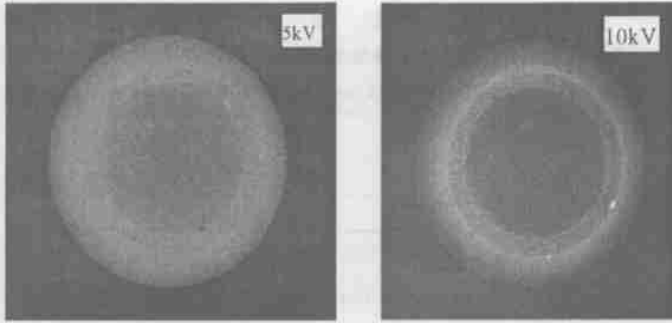


Fig. 4 X-ray images of double-layer plastics shell under different voltage

图 4 不同工作电压下获得的双层球 X 图像



Fig. 5 X-ray image under 10kV

图 5 10kV 工作电压获得的三层球图像

微球的平均壁厚,对于壳层壁厚不均匀的微球,这样测量结果的误差是相当大的。因此,经过理论与实验证明,R. B. Stephens 文中提供的实验条件并不是最理想的方案。以此类推,利用低能 X 射线对低 Z 样品内部进行无损测量,要获得比较理想的细节反差,必须从样品的元素成分与所使用的光源谱线进行具体分析,然后选择合适照相条件,最终达到精确测量目的。

参考文献:

- [1] Stephens R B, Wittman M D. Laser fusion target shell wall thicknesses from interference fringe shape analysis[J]. *J Vac Sci Technol*, 1994, **A12**(4): 1302—1308.
- [2] Stephens R B. Precision shell characterization using radial averaging of X2ray image[J]. *J Vac Sci Technol*, 1995, **A13**(3): 979—982.
- [3] Bernet D, Stephens R B. Algorithm for better X2radiography analyses[J]. *Fusion Technology*, 1997, **31**: 473—476.
- [4] Stephens R B. Precision shell characterization using radial averaging of X2ray image2part [A]. Proc of Mat Res Spc Symp[C]. 1995, **372**: 203—208.
- [5] 刘元琼, 罗青, 王明达. X 射线法测量 ICF 靶丸参数中表面轮廓法的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(1): 69—71. (Liu Y Q, Lou Q, Wang M D. X2ray measurement of ICF target using surface profiler scanning. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(1): 69—71)

X2ray radiograph of multi2layer plastics shell

GAO Dang2zhong, LIU Yuan2qiong, LUO Qing, TANG Yong2jian, YUAN Yu2ping, WEN Shu2huai
(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 9192987, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, the X2ray radiograph technology, which is used for wall2thickness measurement of multilayer plastic mi2crosphere, is expounded in detail. The mechanism that X2ray is absorbed by the material of plastic shell used as a high2gain target in ICF is investigated theoretically. The theoretical analysis and experiment prove that, in vacuum environment, the X2ray tube works under 10kV voltage and outputs X2ray of 8keV energy, the best image of shell with good contrast and clear interface can be obtained. This technique offers a good measuring method to the shells making.

Key words: X2ray radiograph; Contrast between layers; Plastics shell