

# 强吸收介质内部低 $Z$ 材料结构的 X 射线 显微成像研究\*

师绍猛 陈荣昌 薛艳玲 任玉琦 杜国浩 邓 彪 谢红兰 肖体乔†

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

(2007 年 11 月 30 日收到, 2008 年 3 月 29 日收到修改稿)

惯性约束核聚变靶室靶丸位置的原位无损检测是目前的研究热点和难点. 针对此需求, 建立了强吸收介质包裹的低  $Z$  材料 X 射线显微成像物理模型. 通过计算机模拟和实验, 较为系统地考察了光子能量、成像距离以及强吸收介质尺度等参量对成像质量的影响. 结果表明, 利用 X 射线相衬成像技术来实现惯性约束核聚变靶室靶丸的高分辨无损检测是可行的.

关键词: X 射线显微, 位相衬度, 核聚变靶, 无损检测

PACC: 4230, 0785, 4285F, 8170J

## 1. 引 言

能源问题制约着经济社会发展和人类的生存. 在现有新能源开发和利用中, 受控核聚变反应得到了许多国家的关注, 它是解决能源危机的有效途径.

实现受控热核聚变有两种途径: 磁约束核聚变和惯性约束核聚变(ICF). 惯性约束核聚变是利用高功率激光束、X 射线或粒子束均匀辐照含有核燃料氘(D-T)的微球靶丸, 在极短的时间里, 靶丸表面会发生电离和消融而形成包围靶芯的高温等离子体, 等离子体膨胀向外爆炸的反作用力产生极大的向心聚爆的压力(约为  $10^9$  个大气压). 在巨大压力的作用下, 靶芯被压缩成极高密度和极高温度的等离子体(称为热斑). 由于惯性, 等离子体在还未膨胀扩散以前就达到聚变反应条件, 引起 D-T 燃料的核聚变反应, 从而实现点火, 并逐步加热热斑周围的其余燃料, 使热核反应能够自持的延续下去<sup>[1]</sup>.

驱动惯性约束核聚变靶丸内爆有两种方式: 直接驱动和间接驱动(见图 1). 直接驱动方式是直接将驱动源, 如多束激光, 均匀辐照含有热核燃料的聚变靶丸, 驱动内爆; 间接驱动方式则是首先将驱动源

能量转化为软 X 射线能量, 由后者再去驱动靶丸内爆, 故又称辐射驱动.

在 ICF 中, 间接驱动方式由“黑腔靶”(hohlraum)加以实现. 黑腔靶是一个由高  $Z$  元素(常用金)构成的中空腔体, 形状多为柱形或球形. 聚变靶丸置于黑腔的中央, 激光束辐照黑腔的内壁, 激光能量转换为 X 射线, 驱动中心的靶丸内爆. 驱动方式不同, 则驱动能量不同, 选用的靶丸也有差异<sup>[2]</sup>.

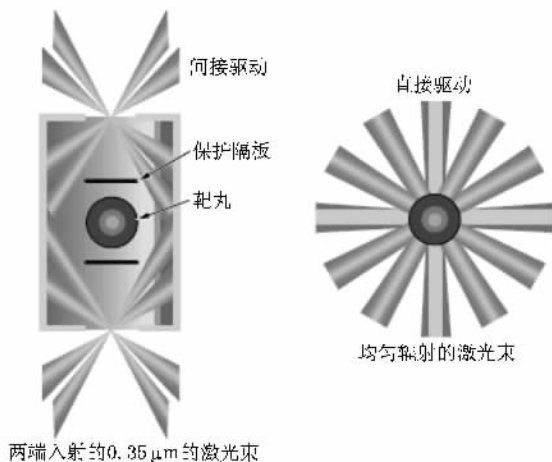


图 1 ICF 内爆驱动方式 (a)间接驱动 (b)直接驱动

\* 国家自然科学基金(批准号: 10275087 和 10705020), 上海市自然科学基金(批准号: 02ZF14116)和上海市科学技术发展基金(批准号: 022261023)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: tqxiao@sinap.ac.cn

应用到热核聚变反应中的靶丸在尺度、形状以及光滑度等各方面必须满足特定的规格,制造过程中需要对其进行合格检测后才能应用到工业中.把聚变靶丸准确的安装到固定位置,需要实时地观察靶丸的运动情况.在受控热核反应进行中,还需要监视和控制靶丸的反应情况.目前,没有有效的方法和技术实现这三方面的要求.从已有的工作看,有人研究过计算机层析(CT)、编码成像(菲涅耳波带片、半影和环孔显微镜)等方法的可行性<sup>[3,4]</sup>,但效果并不理想,而且离实际应用还有距离.国际上,有人曾把相衬成像技术引入到聚变靶丸规格的检测中<sup>[5,6]</sup>,还没有深入到靶室内靶丸的监测.

现有的相衬成像技术包括:干涉法、衍射增强法和同轴轮廓法.同轴轮廓相衬成像由于成像方式简单,对光源要求低,可以用实验室 X 射线源实现,得到越来越多的重视和应用.文献 [7—11] 表明, X 射线同轴轮廓相衬成像能够有效地实现对低 Z 材料成像.

当低 Z 材料被强吸收介质包裹时,相衬成像技术是否仍然可以取得好的成像结果,至今未见相关报道.本文从核聚变反应中靶丸的检测这一实际应用出发,建立金属材料(强吸收介质)包裹的低 Z 样品模型,研究强吸收情形下的相衬成像理论,并进行计算机模拟和实验研究,探讨强吸收介质包裹的低 Z 材料 X 射线同轴轮廓成像的可行性.

## 2. 物理模型

在已有的研究中,弱吸收样品的相衬成像理论已经得到非常全面的发展和运用.对于弱吸收样品,该理论简述如下.

入射 X 射线透过物体在空间传播一定距离后形成像场强度分布.样品复折射率可以表示为

$$n = (1 - \delta) + i\beta. \tag{1}$$

对于弱相位吸收体,物体透射函数<sup>[8]</sup>可以表示为

$$T(\xi, \eta) = \exp[-k\mu(\xi, \eta) + ik\psi(\xi, \eta)] \approx 1 - \mu_0(\xi, \eta) + i\phi_0(\xi, \eta), \tag{2}$$

其中  $\mu_0(\xi, \eta)$  和  $\phi_0(\xi, \eta)$  分别对应吸收项和相移项,表示为

$$\mu_0(\xi, \eta) = k\mu(\xi, \eta) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_L \beta(\xi, \eta) dz,$$

$$\phi_0(\xi, \eta) = k\psi(\xi, \eta) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_L \delta(\xi, \eta) dz.$$

当入射光波为单位平面单色波时,由菲涅耳衍

射积分得到像场复振幅分布(写成菲涅耳衍射积分的傅里叶变换形式)

$$U(x, y) = -\frac{i \exp(i k R)}{\lambda R} \iint T(\xi, \eta) \times \exp\left\{i \frac{k}{2R}[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\xi d\eta = -\frac{i \exp(i k R)}{\lambda R} \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda R}(x^2 + y^2)\right\} \times \iint T(\xi, \eta) \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda R}(\xi^2 + \eta^2)\right\} \times \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda R}(x\xi + y\eta)\right\} d\xi d\eta, \tag{3}$$

则像场强度分布

$$K(x, y, z) = |U(x, y, z)|^2 \approx 1 - 2\mu_0(\xi, \eta) * F^{-1}(\cos \chi) + 2\phi_0(\xi, \eta) * F^{-1}(\sin \chi), \tag{4}$$

其中,  $F^{-1}$  表示傅里叶逆变换,  $\chi = \pi \lambda R(u^2 + v^2)$ ,  $u, v$  为频域坐标,符号 \* 表示卷积.

(4) 式表明,物质的透射函数(吸收和相移项)以及成像几何参数决定了像场强度分布,利用傅里叶变换可以在已知成像条件参数的情况下模拟相衬成像过程.但是(4)式的推导过程中对透射函数采用了近似,即(2)式.这一近似只适用于弱相位吸收体. Wilkins 等人<sup>[12—15]</sup>的研究工作和结论都是基于这一近似.

如果样品不满足弱相位吸收体的要求(2)式的近似将不再适用,基于这一近似得到的像场强度分布也就不合理,必须采用新的方法计算像场强度分布.在这个想法的指导下,本文不再对物体的透射函数做近似,重新计算得到了强吸收时像场强度分布.

本文把(3)式写成如下形式,即菲涅耳衍射积分的卷积形式

$$U(x, y) = -\frac{i \exp(i k R)}{\lambda R} \iint T(\xi, \eta) \times \exp\left\{i \frac{k}{2R}[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\xi d\eta = -\frac{i \exp(i k R)}{\lambda R} T(x, y) * g(x, y), \tag{5}$$

其中

$$g(x, y) = \exp\left\{i \frac{k}{2R}(x^2 + y^2)\right\}.$$

对(5)式做傅里叶变换和逆变换,得到像场复振幅分布

$$U(x, y) = F^{-1}(W_1) + iF^{-1}(W_2), \quad (6)$$

其中,

$$X_1 = kR - \pi\lambda R(u^2 + v^2),$$

$$X_2 = e^{-kx} \cos(k\psi),$$

$$X_3 = e^{-ky} \sin(k\psi),$$

$$W_1 = \cos(X_1) \cdot F(X_2) - \sin(X_1) \cdot F(X_3),$$

$$W_2 = \sin(X_1) \cdot F(X_2) + \cos(X_1) \cdot F(X_3).$$

则像场强度分布为

$$I(x, y) = \sqrt{U(x, y) \cdot U^*(x, y)} \\ = \sqrt{[F^{-1}(W_1)]^2 + F^{-1}(W_2)]^2}. \quad (7)$$

基于(7)式,我们可以通过模拟计算得到强吸收介质相衬成像的像场强度分布.改变成像条件,如入射 X 射线能量、成像距离以及样品尺度等,可以得到不同实验条件时的像场分布,从而研究得出成像质量与这些参量的关系.这些工作可以为强吸收介质包裹的低 Z 样品 X 射线同轴轮廓成像实验提供指导.

图 2 为强吸收介质包裹的低 Z 样品同轴轮廓相衬成像示意图. X 射线透过样品在空间传播一定距离到达探测器截面,在这里发生相干叠加,形成相位衬度像.样品边界处位相发生显著变化,在像面上发生干涉时,对应部分强度变化很大,从强度的变化很容易得到样品的结构信息.

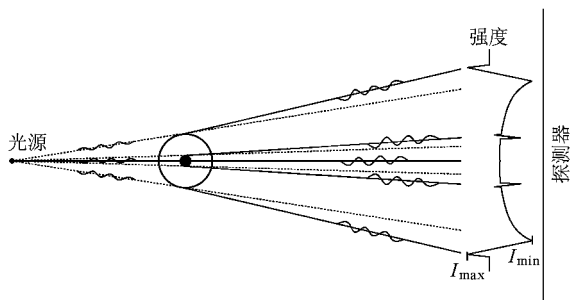


图 2 强吸收介质包裹的低 Z 样品同轴轮廓相衬成像示意图(俯视)

本文建立金属材料包裹的高聚物这一模型,该模型与聚变反应中聚变靶室内含靶丸的实际相符合.高聚物选择聚苯乙烯球,该样品与聚变靶丸的材料同属弱吸收相位体,是以前做相衬成像模拟和实验研究中经常选用的样品.金属材料包裹层为金,吸收很强,以前的相衬成像研究中不曾涉及这类强吸收样品.样品模型如图 3 所示,金柱体空腔内放置着聚苯乙烯球.金柱体腔直径一般在几个毫米,图中柱

体直径选择的是 5 mm,腔壳层厚度一般在几十到几百微米,内部聚苯乙烯球直径 1—2 mm.

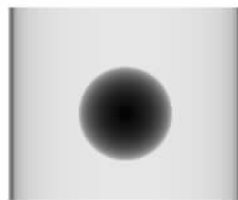


图 3 样品模型,其中金柱体腔直径为 5 mm,壁厚为 200 μm,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm

### 3. 数字模拟

首先采用计算机模拟的方法研究强吸收介质包裹的低 Z 材料 X 射线同轴轮廓成像的可行性.

本文采用自己编写的程序,改变 X 射线能量、成像距离、金壁厚等参量,研究各个参量对成像结果的影响.

为了定量的评价像质量,我们还引入边缘衬度比值、边缘强度最大差值等参量.衬度  $C$  (contrast), 衬度比值  $CR$  (contrast ratio) 和边缘强度最大差值  $\Delta I$  分别定义为

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

$$CR = \frac{C_{\text{PS}}}{C_{\text{Au}}},$$

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min},$$

其中  $C_{\text{PS}}$  和  $C_{\text{Au}}$  分别是聚苯乙烯和金的边界衬度.

#### 3.1. X 射线能量

改变入射 X 射线能量,物质的复折射率发生变化,从而得到不同品质的强吸收相衬像.

我们把内部聚苯乙烯球边界的强度最大差值和金边界强度最大差值的比值作为一个评价聚合物可分辨程度(VA)的定量因子.衬度曲线在评价单样品成像的图像时是一个非常好的定量参量.但对于混合样品成像,尤其是高吸收介质包裹的低 Z 样品成像,如果要描述内部样品相对于外部边界的可见度,衬度和衬度比值都不如最大差值比值曲线与直观图像吻合.

$$VA = \frac{\Delta I_{\text{PS}}}{\Delta I_{\text{Au}}},$$

这一因子的变化曲线如图 4 所示,它的变化与模拟得到的图像直观视觉效果非常一致.而且这一

变化规律可以从金吸收项随能量变化的曲线(图5)中得到反映和解释.即入射 X 射线能量小于 30 keV 时,射线被金吸收,不能对内部聚苯乙烯球成像.随着能量的增大,金对较高能量的入射 X 射线吸收系数减小,相衬成像结果越来越好.

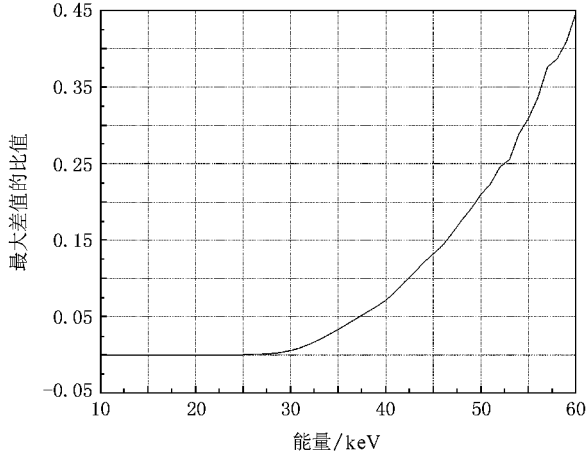


图 4 聚苯乙烯和金边界最大差值的比值随光子能量的变化曲线

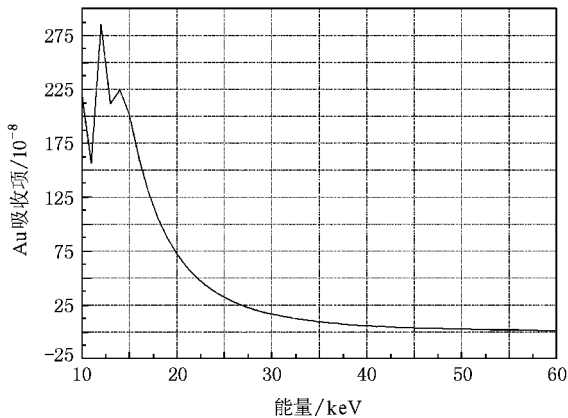


图 5 金吸收项随能量变化的曲线

下面的图像是模拟成像得到的直观可视效果图.

结合图 4 和图 6 可以看到,能量小于 30 keV 时,入射 X 射线几乎全部被吸收,不能检测到金腔内的聚苯乙烯球;能量大于 30 keV 时,聚苯乙烯边界逐渐变得清晰.随着能量的增大,成像效果越来越理想.

### 3.2. 成像距离

这里以样品到探测器距离(成像距离)为参量,研究相衬像与空间成像距离的关系.

图 7 和图 8 中实线是单独对聚苯乙烯微球进行

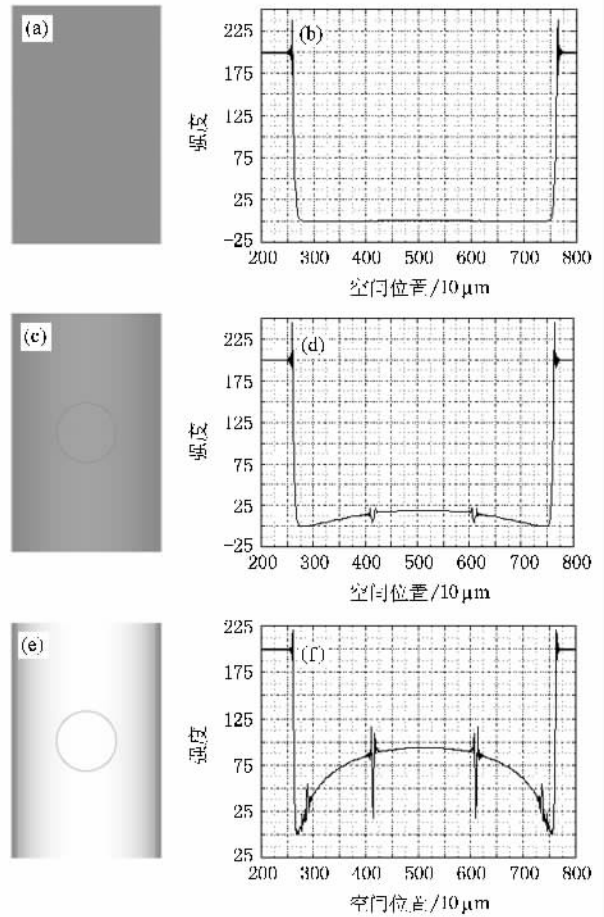


图 6 改变入射 X 射线能量得到的模拟相衬像 (a)(c)和 (e) 是光子能量分别为 30, 40 和 60 keV 时的相衬像 (b)(d)和 (f) 是光子能量分别为 30, 40 和 60 keV 时的相衬像沿中心线的强度分布(金柱体腔直径为 5 mm,壁厚为 200  $\mu\text{m}$ ,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,成像距离(样品到探测器的间距)为 30 cm)

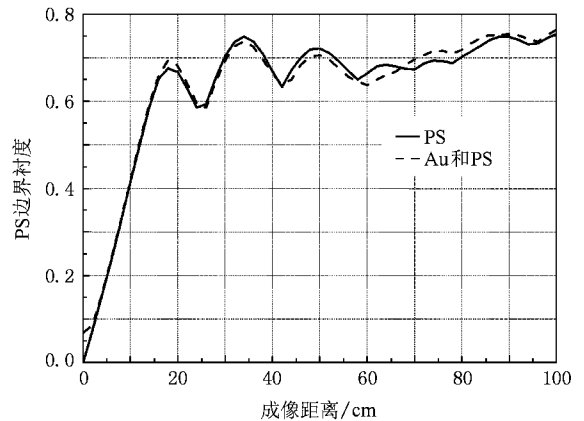


图 7 聚苯乙烯边界衬度与成像距离的关系曲线(金柱体腔直径为 5 mm,壁厚为 200  $\mu\text{m}$ ,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,入射 X 射线能量为 60 keV)

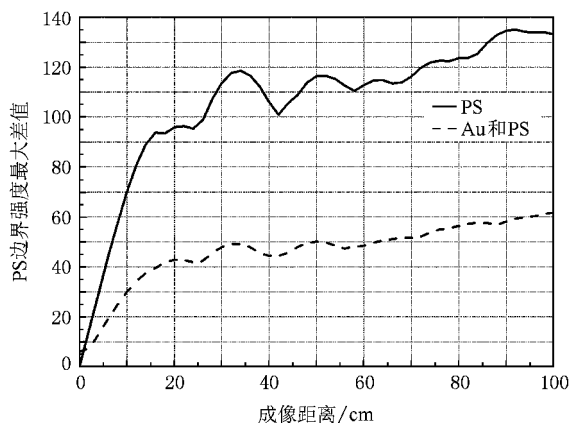


图 8 聚苯乙烯边界强度最大差值与成像距离的关系曲线(金柱体腔直径为 5 mm,壁厚为 200 μm,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,入射 X 射线能量为 60 keV)

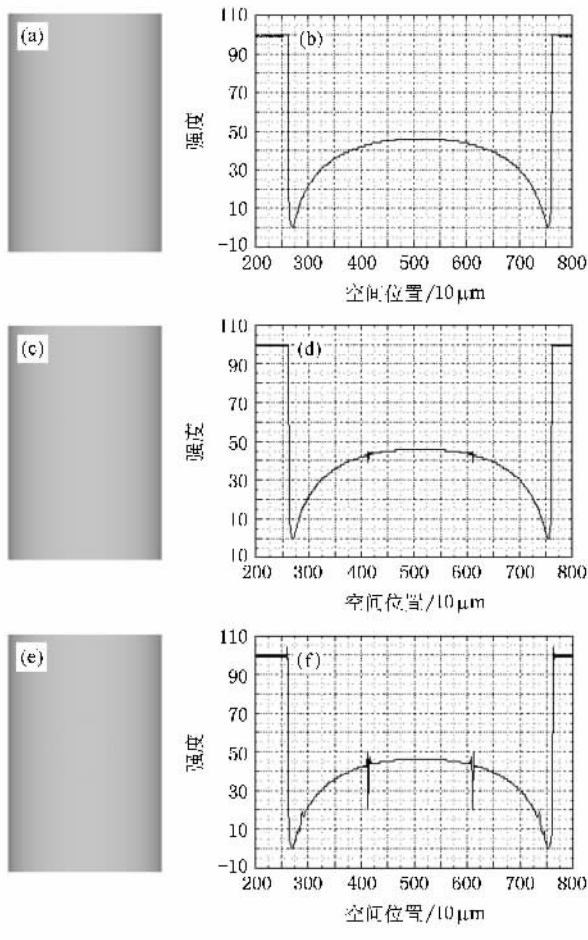


图 9 改变样品到探测器距离得到的模拟相衬像 (a)(c)和 (e)样品到探测器距离分别是 0.2 和 10 cm (b)(d)和(f)分别是 (a)(c)和(e)沿中心线的强度分布(金柱体腔直径为 5 mm,壁厚为 200 μm,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,入射 X 射线能量为 60 keV)

相衬成像,虚线是聚苯乙烯被金包裹时的情形。从上

面两图可以看到,曲线随距离的变化趋势相同。在图 8 中,由于金的吸收,被金包裹时的强度最大差值明显小于单个聚苯乙烯球时的情形。

另外,成像距离 15 cm 前后的变化趋势有着显著差异,可以认为这一距离是吸收与相衬贡献大小的临界距离。即小于 15 cm 时,主要是吸收成像机理,大于 15 cm 时,由于传播一定的空间距离,透射 X 射线有了一定的相干性,得到了相衬像。对于虚线,在小于 3 cm 时变化也十分特别(虚线斜率小于实线),可以认为当小于 3 cm 时不存在相干现象,为完全吸收成像。

下面是得到的模拟图像,可以很直观的看到成像距离变化对成像质量的影响结果。

从图 9(b)和(d)可以看到,金边界(2500—2700 μm处),强度都是从 100 降低到接近于 0,这是由于金的强吸收形成的边界衬度。成像距离较小时,为吸收像,从图 9(a)和(c)很难直接地观察到内部的聚苯乙烯球成的像。

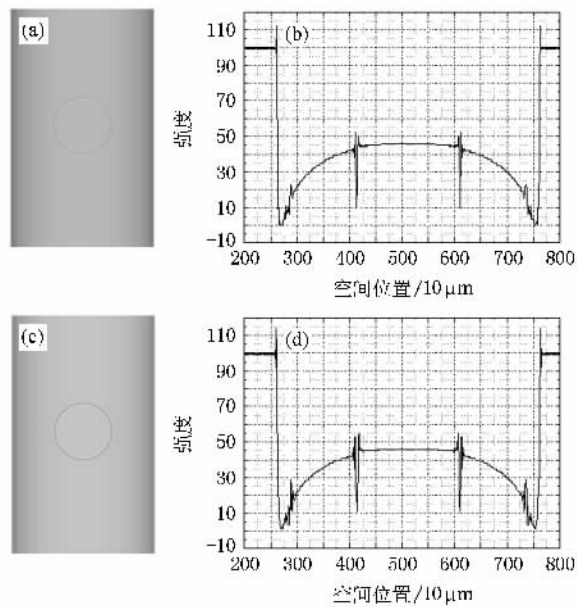


图 10 改变样品到探测器距离得到的模拟相衬像 (a)和(c)样品到探测器距离分别是 20 和 40 cm (b)和(d)分别是(a)和(c)沿中心线的强度分布(金柱体腔直径为 5 mm,壁厚为 200 μm,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,入射 X 射线能量为 60 keV)

图 9(e)中成像距离 10 cm,内部聚合物球的衬度明显增加,从图中也可以直观地分辨出内部聚苯乙烯球成的像。这一距离处开始有位相衬度的贡献,但吸收对成像的影响依旧占很大比重,是吸收与相位衬度像的过渡区域。另一个值得注意的是,图 9(f)

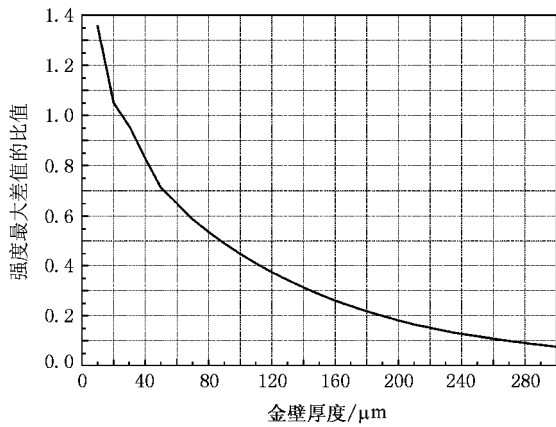


图 11 边界强度最大差值的比值(PS/Au)与金壁厚度的关系曲线(金柱体腔外直径为 5 mm,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,入射 X 射线能量为 60 keV,成像距离为 30 cm)

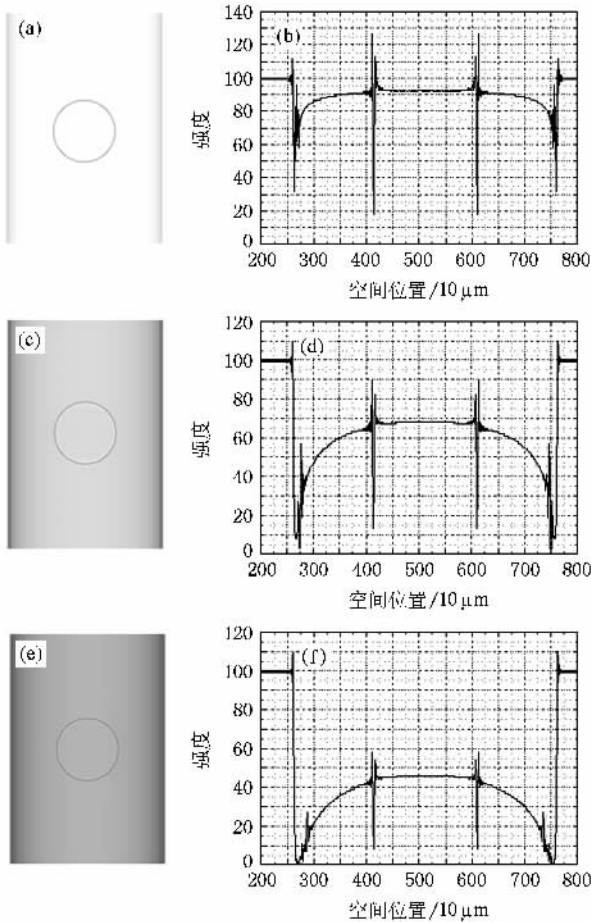


图 12 改变样品的金柱体腔壁厚度得到的模拟相衬像 (a),(c)和(e)分别是金柱体腔壁厚度为 10,50 和 100  $\mu\text{m}$  时的相衬像 (b)(d)和(f)分别对应于(a)(c)和(e)沿中心线的强度分布(金柱体腔外直径为 5 mm,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,入射 X 射线能量为 60 keV,成像距离为 30 cm)

中金柱体腔内边界开始显现,由于强度微弱,难以从图  $\alpha(e)$  直接观察到,但在强度分布图  $\alpha(f)$  上有了表现(成像空间位置 2800  $\mu\text{m}$  处的强度突起)。

成像距离大于 15 cm 时,随距离增大,内部聚苯乙烯的边界越来越清晰(见图 10)。

基于图 7—10 的分析可以得出,样品到探测器距离处于 0—3 cm 时是吸收成像,而 3—15 cm 是吸收与相位衬度像的过渡区域;当样品到探测器距离大于 15 cm 时,相位衬度的贡献开始占据主要部分。

### 3.3. 金壁厚度

改变金壁厚度,研究金壁厚度与相衬像的关系。通过计算机模拟得到的数据,可以发现内部聚苯乙烯边界强度最大差值与金边界强度最大差值同金壁厚存在图 11 所示的关系。从图 11 可以看到,随着金壁厚度的增加,边界强度最大差值的比值逐渐减小,即内部聚苯乙烯球的可见程度越来越弱。

图 12 和 13 是改变金壁厚度得到的模拟相衬像。从图 12 和 13 可以直观的看到,随着金壁厚度的增加,内部边界强度信息越来越弱。同时,金柱体腔的内边界也逐渐消失。实验时,在条件允许的情况下,金壁越薄成像效果越好。从上述结果来看,金壁的厚

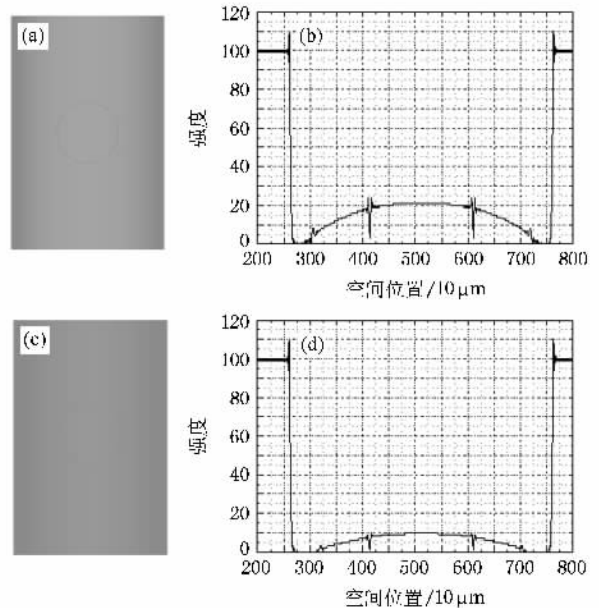


图 13 改变样品的金柱体腔壁厚度得到的模拟相衬像 (a)和(c)分别是金柱体腔壁厚度为 200 和 300  $\mu\text{m}$  时的相衬像 (b)和(d)分别是(a)和(c)沿中心线的强度分布(金柱体腔外直径为 5 mm,内部聚苯乙烯微球直径为 2 mm,入射 X 射线能量为 60 keV,成像距离为 30 cm)

度在  $100\ \mu\text{m}$  以下时可以很好的成相衬像。

#### 4. 实验结果及分析

实验采用微聚焦 X 射线源, X 射线光管为 Phenix X-ray tube 160 T, 钨靶。由于微聚焦 X 射线光源的光通量较小, 用吸收较强的金开展实验非常困

难, 因此, 本文实验部分用了吸收相对较小的锡代替重金属金。实验样品是锡箔包裹五个聚苯乙烯球, 其中最下面的球为破损的, 这一点可以从较为清晰的相衬成像结果中直接看到(球右侧边界有缺失)。

选取厚度为  $12.5\ \mu\text{m}$  的锡箔, 聚苯乙烯微球被锡箔包裹。源到样品的距离是  $20\ \text{cm}$ , 样品到探测器的距离为  $24\ \text{cm}$ 。第二种情况, 把源到样品的距离调

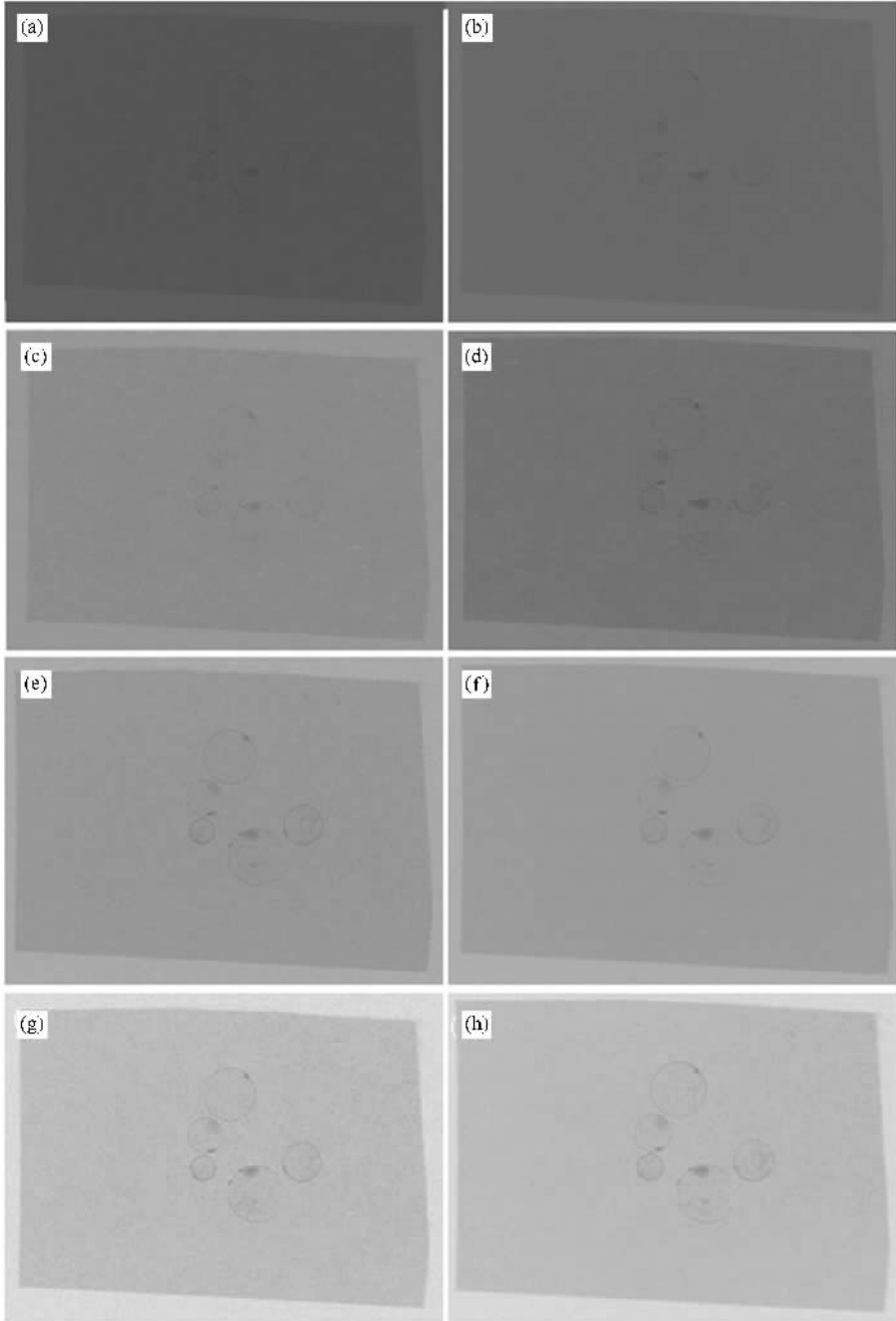


图 14 实验得到的相位衬度像(微聚焦 X 射线源) (a)(c)(e)和(g)光源到样品距离是  $20\ \text{cm}$ , 样品到探测器距离为  $24\ \text{cm}$ , X 射线管电压分别是  $60, 80, 100$  和  $120\ \text{kV}$ , 电流均为  $150\ \mu\text{A}$ , 锡箔厚度为  $12.5\ \mu\text{m}$  (b), (d)(f)和(h)光源到样品距离为  $12\ \text{cm}$ , 样品到探测器距离为  $32\ \text{cm}$ , X 射线管电压分别是  $60, 80, 100$  和  $120\ \text{kV}$ , 电流均为  $150\ \mu\text{A}$ , 锡箔厚  $12.5\ \mu\text{m}$

整为 12 cm, 样品到探测器的距离为 32 cm. 在这两种情况下分别改变 X 射线光管的电压. 实验结果如图 14 所示.

从实验结果可以发现, 随着管电压的增加, 成像效果变得清晰, 可以十分容易分辨出来被锡箔包裹的五个聚苯乙烯微球. 图 14 所示, 矩形阴影区域是锡箔的成像范围, 阴影内的圆边界是聚苯乙烯球的

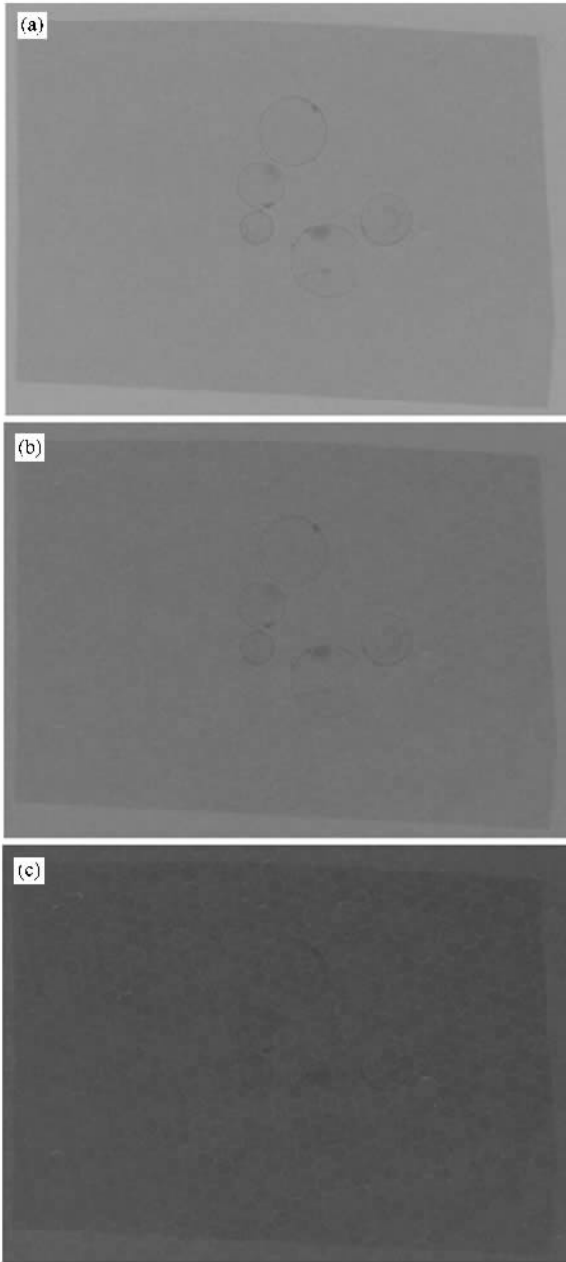


图 15 实验得到的相位衬度像(微聚焦 X 射线源) (a)(b)和(c)的锡箔厚分别是 25, 50 和 100  $\mu\text{m}$ , 其中(b)(c)里蜂窝结构背景是探测器光纤的投影, 未作处理(X 射线管电压为 100 kV, 电流为 150  $\mu\text{A}$ , 光源到样品距离为 12 cm, 样品到探测器距离为 32 cm)

相衬像. 由于管电压大小不同, 光通量有区别, 曝光量在管电压低时就很小, 使得相衬像整体比较黯淡. 当选择合适大小的管电压时, 聚苯乙烯球的破损边界在相衬图上得到了很好的反应, 见图 14(e)–(h).

另外, 由于成像距离不同, 图 14(a)(c)(e), (g)系列放大倍数(1.2 倍)略小于图 14(b)(d)(f), (h)系列的放大倍数(3.67 倍). 从视觉上可以看到, 放大倍数大时相衬成像效果要优于放大倍数小时的相衬像.(为了排版需要, 图 14(b)(d)(f)(d)的缩放比例很大, 所以从直观上看与图 14(a)(c)(e), (q)的图圆球大小与右侧的并无明显差异)

最后, 我们选择 X 射线管压为 100 kV, 改变锡箔的厚度: 25, 50, 100  $\mu\text{m}$ . 源到样品 12 cm, 样品到探测器距离为 44 cm. 样品的像与样品相比, 尺度被放大 3.67 倍. 实验结果如图 15 所示.

可以看到, 厚度增加, 内部聚苯乙烯微球边界逐渐变得模糊. 当把锡箔厚度增加到 100  $\mu\text{m}$  时, 内部聚苯乙烯的边界已经十分模糊, 很难用眼睛直接观察到内部聚苯乙烯球的具体分布情况, 如图 15(c)所示. 当厚度再增加, 我们的实验室微聚焦 X 射线光源不再适合.

为了直观的考察内部聚苯乙烯球的尺度, 我们还在样品中加入一根铜丝和发丝进行相衬成像作为比较, 见图 16. 衬度较大的是铜丝, 它的直径是 160  $\mu\text{m}$ , 发丝直径 100  $\mu\text{m}$ (管压 80 kV, 锡箔厚 12.5  $\mu\text{m}$ ). 可以从图上估计出最大的聚苯乙烯球(图 16 最上方的微球)直径约 1120  $\mu\text{m}$ , 最小的聚苯乙烯球直径约 530  $\mu\text{m}$ .

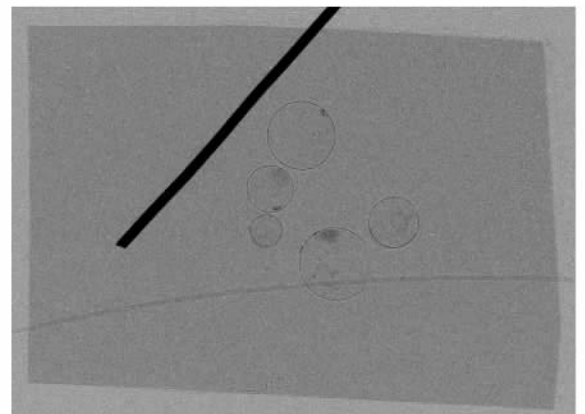


图 16 用铜丝和发丝做参照物时的实验相衬像(铜丝直径为 160  $\mu\text{m}$ , 发丝直径为 100  $\mu\text{m}$ , 管压为 80 kV, 电流为 150  $\mu\text{A}$ , 光源到样品距离为 12 cm, 样品到探测器距离为 32 cm, 锡箔厚度为 12.5  $\mu\text{m}$ )



## 5. 结 论

数字模拟及实验室结果表明,应用 X 射线同轴轮廓成像技术实现强吸收介质内部低 Z 材料结构的高分辨无损检测是可行的.成像质量受入射 X 射线光子能量、样品到探测器距离以及强吸收介质厚度等参量的影响.光子能量较低时,由于强吸收而不能检测到内部的聚合物,光子能量高到位相衬度占主导地位时,低 Z 材料结构像的质量变好.样品到探测器的距离很小时以吸收成像为主,只有在这一

距离大于 15 cm 时(对于本研究体系),相位衬度才逐步增强.重金属等强吸收介质的厚度较大时,需要提高入射 X 射线能量,以实现其内部的低 Z 材料结构成像.

由于实验 X 射线光源的光子能量及通量较小,很难满足实验的需要.因此,本文中用了吸收相对较小的锡代替重金属金开展实验.正在建设的上海光源 X 射线成像线站可提供 12—70 keV 的高通量单色 X 射线,实验装置也针对高分辨相衬成像优化,必将成为该项研究的理想装置.

- 
- [ 1 ] Zhao Z ,Deng B Q ,Feng K M ,Chen Z ,Yuan T ,Li Z Q 2005 *Sci. Tech. Engng.* **5** 1291 ( in Chinese )[ 赵 周、邓柏权、冯开明、陈 志、袁 涛、李增强 2005 科学技术与工程 **5** 1291 ]
- [ 2 ] Technical Report UCRL-MI-125743 1997 ( Lawrence Liv. ermore National Laboratory )
- [ 3 ] Jian S E ,Cao L F ,Yu Y N ,Li C G ,Zheng Z J 2004 *Physics* **33** 677 ( in Chinese )[ 江少恩、曹磊峰、于燕宁、李朝光、郑志坚 2004 物理 **33** 677 ]
- [ 4 ] Zhang J ,Sun B Y ,Hu J S 2003 *China Mechanical Engineering* **14** 904 ( in Chinese )[ 张 军、孙宝元、胡家升 2003 中国机械工程 **14** 904 ]
- [ 5 ] Koziemiński B J ,Koch J A ,Barty A ,Martz H E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 063103
- [ 6 ] Beg F N ,Stephens R B ,Xu H W ,Haas D ,Eddinger S ,Tynan G ,Shipton E ,DeBono B ,Wagshal K 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 101502
- [ 7 ] Davis T J ,Gao D ,Gureyev T E ,Stevenson A W ,Wilkins S W 1995 *Nature* **373** 595
- [ 8 ] Wilkins S W ,Gureyev T E ,Gao D ,Pogany A ,Stevenson A W 1996 *Nature* **384** 335
- [ 9 ] Xiao T Q ,Bergamaschi A ,Dreossi D ,Longo R ,Olivo A ,Pani S ,Rigon L ,Rokvic T ,Venanzi C ,Castelli E 2005 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **548** 155
- [ 10 ] Toth R ,Kieffer J C ,Fourmaux S ,Ozaki T ,Krol A 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 083701
- [ 11 ] Zoofan B ,Kim J Y ,Rokhlin S I ,Frankel G S 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 014502
- [ 12 ] Pogany A ,Gao D ,Wilkins S W 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 2774
- [ 13 ] Gureyev T E ,Nesterets Y I ,Paganin D M ,Wilkins S W 2006 *J. Opt. Soc. Am. A* **23** 34
- [ 14 ] Gureyev T E ,Wilkins S W 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 579
- [ 15 ] Liu L X ,Du G H ,Hu W ,Xie H L ,Xiao T Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4556 ( in Chinese )[ 刘丽想、杜国浩、胡 雯、谢红兰、肖体乔 2007 物理学报 **56** 4556 ]

# X-ray microscopic imaging of low $Z$ material wrapped by strongly absorbing medium<sup>\*</sup>

Shi Shao-Meng   Chen Rong-Chang   Xue Yan-Ling   Ren Yu-Qi   Du Guo-Hao  
Deng Biao   Xie Hong-Lan   Xiao Ti-Qiao<sup>†</sup>

( *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China* )

( Received 30 November 2007 ; revised manuscript received 29 March 2008 )

## Abstract

It is difficult for the nondestructive detection of inertial fusion capsule. Based on this requirement we constructed a physical model of low  $Z$  material wrapped by strongly absorbing medium. By simulation and experiments, we investigate the effect of some factors on phase contrast imaging quality, such as X-ray energy, distance of object to detector, thickness of strongly absorbing materials and so on. We find it feasible to realize the high resolution and nondestructive detection of inertial fusion capsule by X-ray phase contrast imaging.

**Keywords** : X-ray microscopic imaging, phase contrast, inertial fusion capsule, nondestructive detection

**PACC** : 4230, 0785, 4285F, 8170J

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10275087 and 10705020 ), the Natural Science Foundation of Shanghai, China ( Grant No. 02ZF14116 ), and the Foundation of Science and Technology Development of Shanghai, China ( Grant No. 022261023 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : txiao@sinap.ac.cn