

基于 Abel 逆变换的辐射驱动内爆壳层密度分布研究*

董建军[†] 曹柱荣 陈伯伦 黄天暄 缪文勇 张继彦
刘慎业 江少恩 丁永坤 谷渝秋 单连强

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011年7月26日收到; 2011年9月27日收到修改稿)

给出了一种利用 Abel 逆变换反演壳层压缩密度分布的方法. 使用微焦点 X 射线光源对直径 1 mm、密度已知的空心 CH 球壳进行了透射照相, 通过 Abel 逆变换反演得到了空心 CH 球壳的壳层密度, 反演密度与实际密度符合, 表明通过 Abel 逆变换反演壳层密度的有效性. 对 16 幅相机记录的辐射驱动内爆靶球图像进行 Abel 逆变换, 得到了不同时刻壳层压缩密度分布. 定性分析了背光空间分布、针孔成像系统和壳层厚度变化对密度反演的影响.

关键词: Abel 逆变换, 背光照相, 壳层密度分布, 辐射驱动内爆

PACS: 52.70.-m

1 引言

激光聚变辐射驱动内爆壳层压缩过程决定了芯部燃料的状态. 内爆过程通常包括加速、常速、减速、停滞和壳层飞散等复杂过程, 在内爆早期和后期还伴随有流体不稳定扰动增长过程, 主要是 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性扰动增长, 它会破坏辐射驱动压缩的对称性, 造成燃料和壳层的混合, 降低芯部燃料的温度导致芯部燃料点火失败. 芯部燃料的状态和 RT 不稳定性扰动, 可以通过对壳层内爆压缩状态参数的定量研究来推断^[1], 人们发展了许多方法来研究壳层的内爆速度、面密度和形状因子等参数.

文献 [2—5] 系统研究了壳层面密度分布调制的测量方法和数据分析, 通过靶球壳层的多个单能图像导出壳层面密度调制, 利用多针孔和平面晶体测量靶球的多个单能图像, 从相邻的两个单能图像获得壳层面密度的调制. 此外利用在壳层的某个特定位置掺杂特征元素, 通过芯部自发光的吸收谱线测量芯部的发射光谱. Marshall 等^[6]通过芯部自发射被 CH 吸收后的光谱推断芯部的温度以及壳层

的面密度. 2009 年 Marshall 等^[7]利用 Abel 逆变换的方法推测了背光靶球图像壳层的密度分布, 该方法需要利用辐射流体程序预先计算壳层烧蚀后的剩余质量, 所以密度反演的精度与程序计算的精度直接相关. 2010 年 Hicks 等^[8]利用 X 光条纹相机配狭缝获得了完整的内爆压缩流线轨迹图像, 并通过 Abel 变换获得了壳层面密度演化.

本文首先利用直流 X 射线源对空心 CH 微球进行了背光照相, 利用 Abel 逆变换获得了密度分布, 结果与实际的密度分布符合, 验证了程序的正确性. 对分幅相机测量的辐射驱动内爆靶球背光照相图像进行 Abel 逆变换, 获得了不同时刻内爆靶球的压缩壳层密度分布. 对背光空间分布、针孔成像系统和壳层厚度变化对密度反演的影响做了细致分析, 给出了定性结论.

2 Abel 逆变换求靶球壳层密度分布原理

Abel 逆变换是通过线积分求解柱对称和球对称分布的物理量的一种有效方法, 在等离子诊断中广泛应用. 图 1 是 Abel 逆变换的示意图原理, 可以

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2010B0102015) 和国家自然科学基金 (批准号: 10905050) 资助的课题.

[†] E-mail: d.dragonfly@sina.com

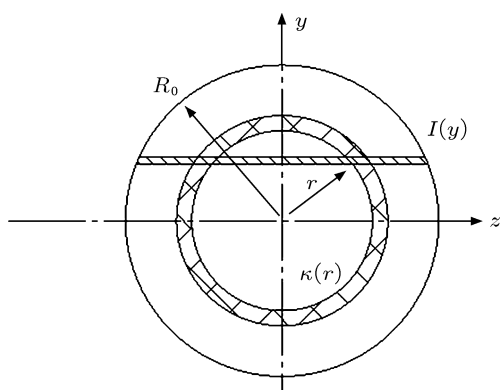


图1 Abel 逆变换示意图

由下式描述:

$$\kappa(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{R_0} \frac{dI(y)/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy, \quad (1)$$

式中 $\kappa(r)$ 代表柱对称或者球对称物理量, $I(y)$ 代表物理量 $\kappa(r)$ 沿弦线的积分, 通过 (1) 式就可以求得物理量 $\kappa(r)$. 通过背光照相获得的是靶球壳层的吸收图像, 由 X 射线吸收规律和 Abel 逆变换可以反推球壳的吸收系数 $\kappa(r)$, 球对称分布的吸收系数的 Abel 逆变换由下式给出:

$$\kappa(r) = \frac{1}{\pi} \int_r^{R_0} \frac{d}{dy} \left\{ \ln \left[\frac{I(y)}{I_0} \right] \right\} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}}, \quad (2)$$

其中 (2) 式中 I_0 代表背光强度. 由 $\rho = \kappa/\mu_{\text{eff}}$ 和 $M_s = 4\pi \int_0^{R_0} r^2 \rho(r) dr$ 得

$$\rho(r) = \frac{M_s \kappa(r)}{4\pi \int_0^{R_0} r^2 \kappa(r) dr}, \quad (3)$$

其中 μ_{eff} 是等效质量吸收系数, M_s 是靶球壳层的质量, 由 (2) 式和 (3) 式可以求解壳层的密度分布.

3 空心 CH 微球实验验证 Abel 逆变换

Abel 逆变换的数值求解方法很多, 本文用文献 [9] 给出的方法编制了 Abel 逆变换程序. 为了验证程序, 在直流 X 射线源上进行空心 CH 微球的透射成像实验, 实验布局如图 2 所示. 直流 X 射线源焦点大小 $d = 0.1\text{--}0.2\text{ mm}$, 阳极材料为 Al, 管压为 4000 V, 管流为 $13\text{ }\mu\text{A}$, 光源发射的 Al 的特征谱线约为 1.4 keV, 光强度约为每秒 10^9 个光子 (10^9 s^{-1}). CH 微球直径 D 约为 1 mm, 球壳厚度约为 0.1 mm, 密度 ρ 约为 1.05 g/cm^3 , CH 微球贴于金属细丝, 细丝再粘贴到直径 5 mm 的一个小孔板上, 记录设备为 2048×2048 的 X 射线电子耦合器件 (CCD), 像素大小为 $13\text{ }\mu\text{m}$, CCD 曝光时间为 10 min. u 为 X 射线源距 CH 球的距离, v 为 CH 球距离 X 射线 CCD 的距离.

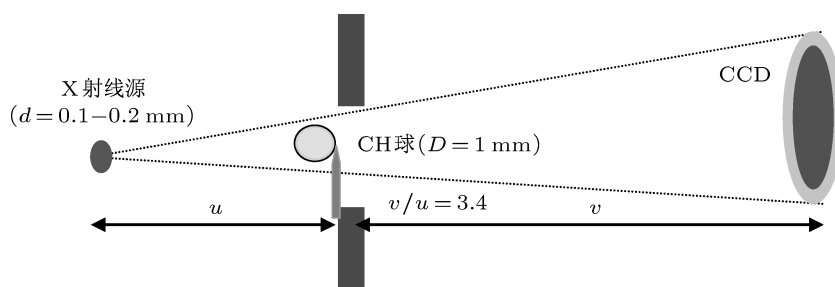


图2 空心 CH 微球透射成像布局示意图

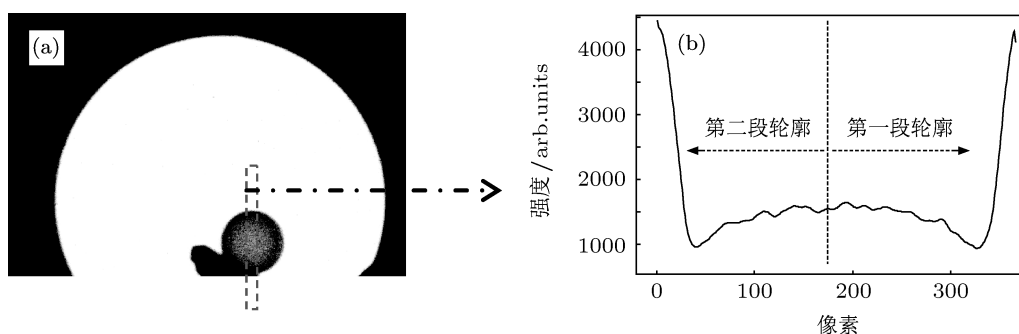


图3 空心 CH 微球透射成像实验结果 (a) CCD 记录结果; (b) 图 (a) 中线框区域垂直扫描结果

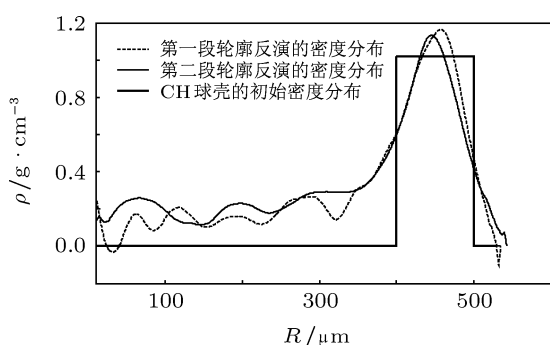


图4 空心CH微球壳反演密度分布和实际密度分布比较, CH球壳密度约为 1.05 g/cm³

图3是实验结果,大圆是直径为5 mm小孔的像,图3(b)是图3(a)中线框区域垂直扫描的结果,以中心分割为两段轮廓.该轮廓曲线就是靶球沿径向的弦线积分值分布.图4是应用Abel逆变换得到的CH微球壳密度分布曲线, R 为CH球的半径,并与实际的CH微球壳的密度分布做了比较.可以看出二者基本符合,反演的密度分布在微球的空心

部分不为零,这主要是在成像过程中由于噪声和系统本身引入的展宽造成的.CH微球实验验证了程序的正确性.

4 Abel 逆变换求辐射驱动内爆靶球壳层密度分布

通常利用背光照相对辐射驱动的靶球成像,文献[10]对此做了完整的论述.图5为X射线分幅相机(XFC)记录不同 t 时刻靶球透射图像示意图.内爆靶球的直径为230 μm ,球壳厚度为15 μm ,球壳初始密度 ρ 为1.05 g/cm³,靶球内充10 atm (1 atm = 10⁵ Pa)的D₂气体,柱腔为1350 μm × Φ 800 μm ,八路激光能量为每路260 J,激光脉冲宽度为1 ns,波长为308 nm,第九路激光能量为1500 J,脉冲宽度为2 ns,波长为530 nm,斜45°聚焦到背光靶面中心,背光材料为Pd,中心能点约为3.1 keV.图6是XFC记录的16幅不同时刻内爆靶球图像.

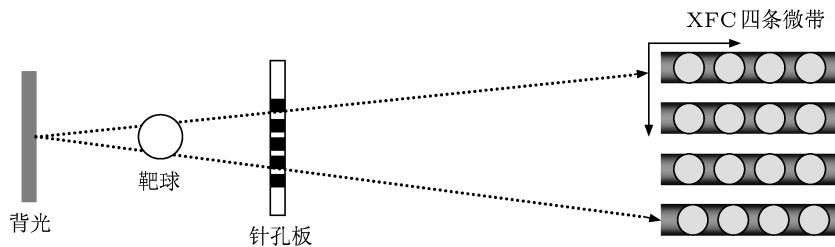


图5 XFC记录的靶球背光成像示意图

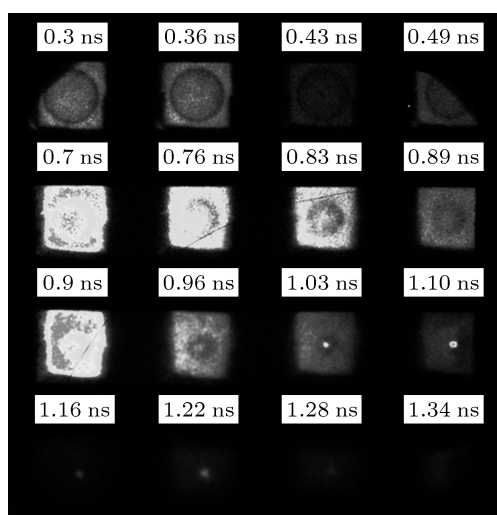


图6 XFC记录的内爆靶球图像

从图6可以看出,内爆时刻较早的图像(0.36 ns和0.43 ns)比较晚时刻(0.70 ns和0.83 ns)的信噪比高,从密度反演的结果看出,0.36 ns和0.43 ns反

演的密度分布宽度比0.7 ns和0.83 ns反演的密度分布宽度精确.反演的密度分布结果存在一定的误差,主要是由于图像信噪比差,靶球的透射图像很模糊,很难界定靶球压缩的内界面,从而导致了反演的壳层密度分布展宽很多,峰值密度降低,图7清楚地反映了这一点.

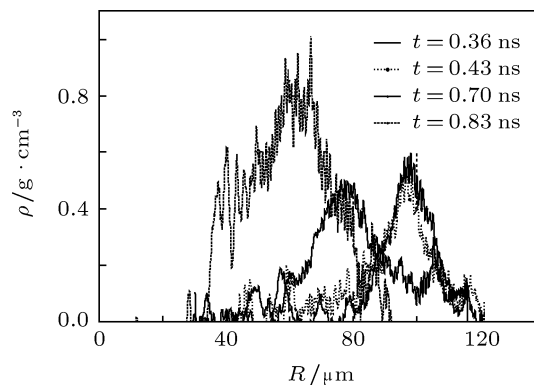


图7 Abel 逆变换反演的不同时刻内爆靶球壳层密度分布

5 影响 Abel 逆变换的几个主要因素

在内爆靶球的成像和记录过程中, 成像系统、记录设备等环节引入的透射图像展宽以及背光空间分布引入的不确定性均影响 Abel 逆变换密度反演的结果, 图 8 给出了靶球成像各环节引入的展宽. 信号图像或者目标图像叠加有自身的噪声, 含有噪声的图像在图 8 虚线框内的成像和记录系统内又叠加了新的噪声, 此外由于针孔大小有限造成的展宽会使图像变模糊, XFC 和 CCD 组成的记录系统

也会造成图像对比度的下降, 所有这些因素可以由每个环节的调制传递函数描述, 最后测量到的图像是这些调制函数和噪声共同作用的结果. 这里仅考虑针孔大小引起的图像模糊对 Abel 逆变换的影响. 图 9 是针孔大小分别为 13 和 30 μm 时反演密度与初始密度分布的比较, R 为径向坐标. 图 9(a) 的结果更接近实际的密度分布, 而图 9(b) 的密度反演结果与实际偏离较多, 峰值密度降低且密度分布展宽了许多, 从而说明针孔对图像的模糊作用越大, 利用 Abel 逆变换反演的密度误差越大.

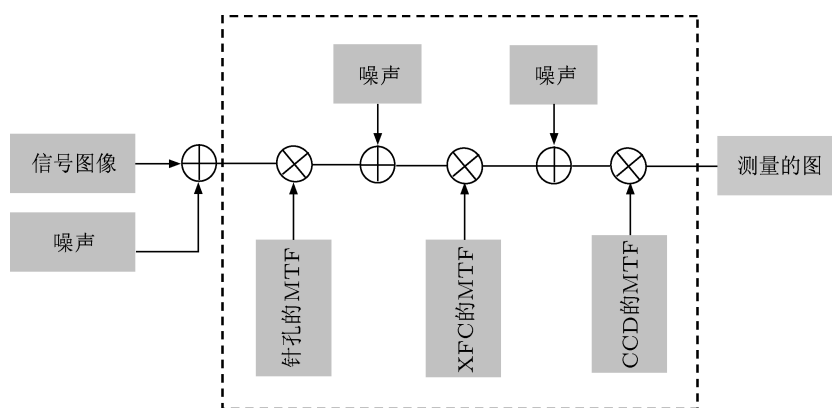


图 8 成像测量系统示意图

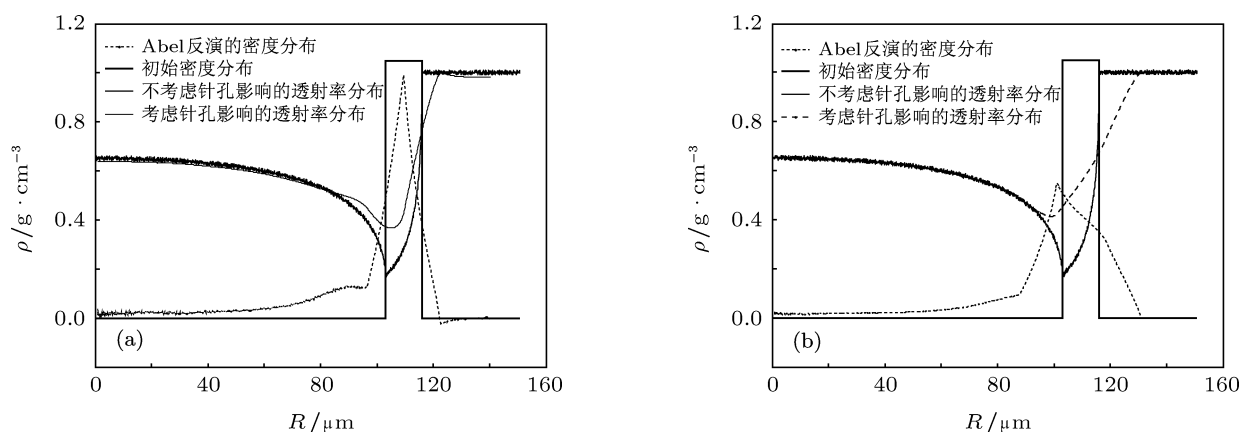


图 9 不同大小的针孔对密度反演的影响 (a) 针孔直径为 13 μm ; (b) 针孔直径为 30 μm

由于靶球成像的信噪比变差, 靶球内界面很难准确给定, 造成壳层的厚度有很大的不确定度. 图 10 分析了不同厚度壳层的靶球利用 Abel 逆变换反演的密度分布变化. 图 10(a) 是壳层厚度从初始的 15 μm 变为 10 μm 的壳层透射率分布, 图 10(c) 是壳层厚度从初始的 15 μm 变为 30 μm 的壳层透射率分布. 可以看出, 壳层厚度变小, 内界面位置变

大, 反之变小, 图 10(b) 和 (d) 是反演的壳层密度分布和初始密度 (初始壳层厚度为 15 μm) 分布的比较. 壳层厚度变小, 反演的密度峰值增大, 宽度减小; 壳层厚度增大, 反演的密度峰值减小, 宽度增大. R_0 和 δR 分别表示壳层的初始半径和壳层的厚度, 改变 R_0 和 δR , 反演的壳层密度峰值 ρ_m 随壳层厚度变化如图 11 所示. 可以看出, 密度峰值与壳层厚度

的立方成反比, 这里假设了靶球的质量保持不变. 因为总质量保持不变, 壳层厚度减小相当于壳层体

积变小, 所以密度增大; 同理, 壳层厚度增大, 壳层体积增大, 则密度降低.

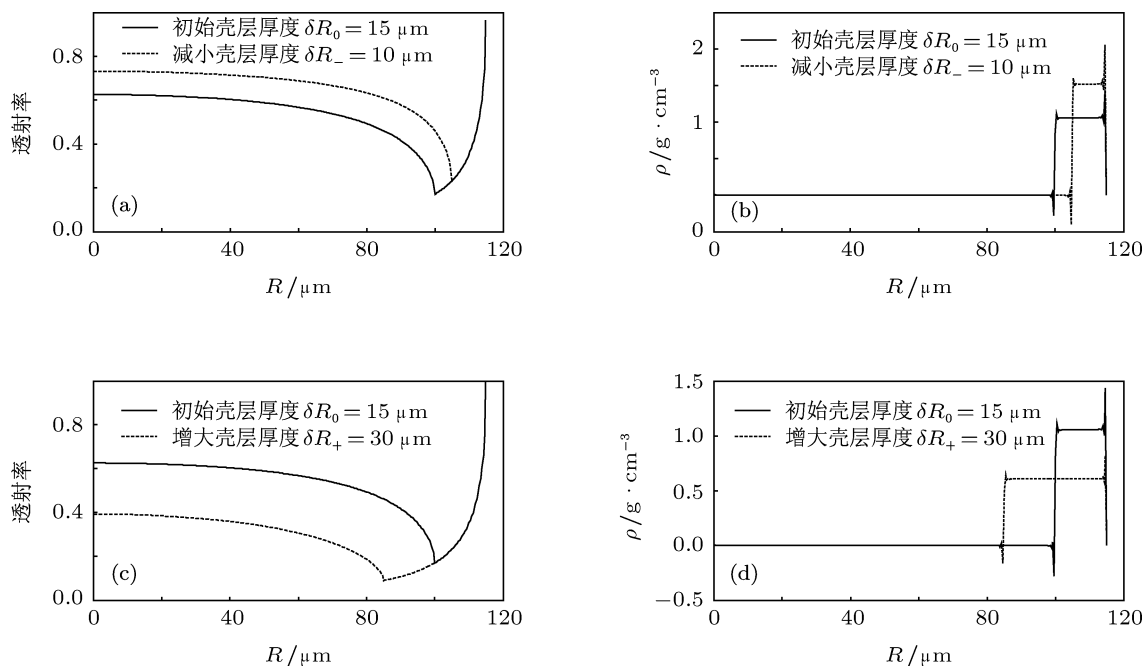


图 10 靶球厚度变化和反演密度的关系 (a) 壳层厚度减小的透射率分布; (b) 壳层减小后反演密度和初始密度比较; (c) 壳层厚度增大的透射率分布; (d) 壳层增大后反演密度和初始密度比较

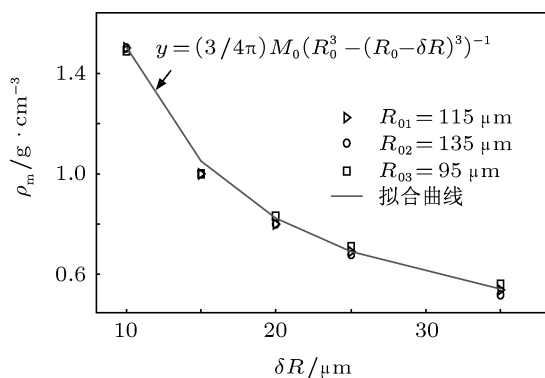


图 11 反演密度峰值随壳厚度的变化

背光源强度空间分布对 Abel 逆变换的影响是直接的, 因为 Abel 逆变换数据处理时背光作为输入量直接参与运算, 背光分布与实际背光分布偏离越多, 反演的密度分布与实际密度分布差异越大. 图 12 计算了背光为超高斯分布, 指数为 2.5, 背光半宽度分别为 150, 250, 350 和 450 μm 时反演的密度分布, bk 代表背光分布的半高宽度, 内爆靶球初始密度峰值约为 1.05 g/cm^3 . 可以看出, 背光分布偏离实际分布 (半宽约 300—400 μm) 越多, 反演的密度和实际密度相差越大.

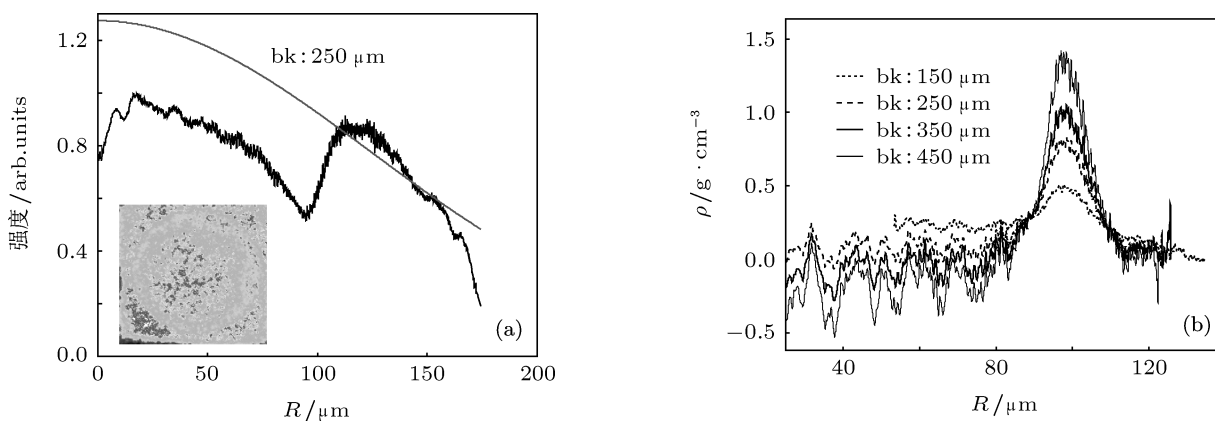


图 12 不同背光分布情况反演密度的比较 (a) 壳层透射强度分布; (b) 反演的密度分布

6 结论

本文通过直流 X 射线源对 CH 球壳进行透射照相, 利用 Abel 逆变换反演获得的 CH 球壳密度和实际密度分布基本符合, 显示了通过 Abel 逆变换反演壳层密度的有效性. 对 XFC 测量的不同时刻内爆靶球图像进行反演, 获得了内爆压缩靶球壳层密度分布. 通过靶球壳层透射成像的数值模拟分析了成像系统对图像的模糊、靶球壳层厚度及背光源半宽度的变化对反演密度的影响. 分析发现, 系

统的空间分辨和壳层界面的变化展宽了密度分布, 使得密度峰值减小; 背光源的空间分布越均匀则反演的密度分布越精确.

需要指出的是, Abel 逆变换处理技术适用于柱对称或球对称密度分布情况. 由于物理上 X 射线辐射驱动有可能是非球对称, 并且壳层界面处会发生 RT 不稳定性、实验上壳层界面位置难以准确定位以及图像实际空间分辨的影响, 壳层会发生一定的变形, 从而给壳层密度的反演带来误差.

-
- [1] Lindl D, Amendt P, Richard L, Berger S, Glendinning G, Glenzer H, Haan W, Robert L, Kauffman, Landen L, Laurence J 2004 *Phys. Plasmas* **1** 339
 - [2] Yaakobi B, Smalyuk V A, Delettrez J A, Marshall F J, Meyerhofer D D, Seka W 2000 *Phys. Plasmas* **7** 3727
 - [3] Smalyuk V A, Delettrez J A, Dumanis S B 2003 *Phys. Plasmas* **10** 830
 - [4] Yaakobi B, Marshall F J, Bradley D K 1997 *Phys. Plasmas* **4** 3021
 - [5] Yaakobi B, Shvarts D, Marshall F J, Epstein F L 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 728
 - [6] Marshall F J, Delettrez J A, Epstein R 1994 *Phys. Rev. E* **49** 4381
 - [7] Marshall F J, McKenty P W, Delettrez J A, Epstein R, Knauer J P, Smalyuk V A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 185004
 - [8] Hicks D G, Spears B K, Braun D G, Olson R E, Sorce C M, Celliers P M, Collins G W, Landen O L 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10E304
 - [9] Jiang S E, Liu Z L, Tang D Y, Zheng Z J 2000 *Opt. Precision Engineering* **8** 181 (in Chinese) [江少恩, 刘忠礼, 唐道源, 郑志坚 2000 *光学精密工程* **8** 181]
 - [10] Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, Liu S Y, Zheng Z J, Zhang B H, Zhang J Y, Huang T X, Li S W, Cheng J B, Jiang X H, Yi R Q, Yang G H, Yang J M, Hu X, Cao Z R, Huang Y X 2009 *Sci. China G* **39** 1571 (in Chinese) [江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 刘慎业, 郑志坚, 张保汉, 张继彦, 黄天暄, 李三伟, 陈家斌, 蒋小华, 易荣清, 杨国洪, 杨家敏, 胡昕, 曹柱荣, 黄翼翔 2009 *中国科学 G 辑* **39** 1571]

Study on the spatial distribution of implosion shell based on the inverse Abel transform*

Dong Jian-Jun[†] Cao Zhu-Rong Chen Bo-Lun Huang Tian-Xuan
Miao Wen-Yong Zhang Ji-Yan Liu Shen-Ye Jiang Shao-En Ding Yong-Kun
Gu Yu-Qiu Shan Lian-Qiang

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 26 July 2011; revised manuscript received 27 September 2011)

Abstract

A method of solving spatial distribution of shell density by inverse Abel transform is presented. CH sphere imaging on the micro-focus X-ray source is implanted to test the method of inverse Abel transform. The reversion of shell density is in agreement with real density, which verifies the correctness of the method. The 16-frame implosion target images are processed by inverse Abel transform, and the distributions of compressed shell density at different times are obtained. Qualitative analysis of back-lighter distribution, pinhole imaging and variation of shell thickness is proposed for inverse Abel transform.

Keywords: inverse Abel transform, back-lighter imaging, shell density distribution, radiation driving implosion

PACS: 52.70.-m

* Project supported by the Foundation for Development of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2010B0102015) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905050).

[†] E-mail: d.dragonfly@sina.com