

文章编号 1004-924X(2017)11-2852-07

## 球面弯晶成像的优化设计及实验测试

张强强, 魏 来, 杨祖华, 陈 勇, 范全平, 巫殷忠, 曹磊峰\*

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**为满足“神光 II”升级激光装置实验的激光等离子体高空间分辨和窄带宽的精密成像诊断需求, 本文研究球面弯晶单色成像技术, 并对其进行优化设计及实验验证。首先, 使用光线追迹方法分析了成像像距、布拉格角、背光源尺寸等成像系统参数对球面弯晶成像性能的影响, 分析了设计参数的变化对成像空间分辨能力的影响, 并在 X 射线管上开展了测试验证实验。研究表明: 二维成像时, 在等分辨成像像距处可以获得较好的成像结果, 增大布拉格角可以抑制像差进而提高成像质量, 更小的背光源尺寸也有助于提高成像的空间分辨率。测试实验获得了清晰的网格背光成像, 成像结果与预期相符, 空间分辨率优于  $14\ \mu\text{m}$ 。这一工作有助于球面弯晶成像系统的优化设计及其在激光等离子体精密诊断中的应用。

**关键词:** X 射线成像; 球面弯晶; 光线追迹; 单色成像; 等离子体

**中图分类号:** TL65 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172511.2852

## Optimum design and test experiments of spherically bent crystal imaging

ZHANG Qiang-qiang, WEI Lai, YANG Zu-hua, CHEN Yong,  
FAN Quan-ping, WU Yin-zhong, CAO Lei-feng\*

(*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion,  
Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: leifeng.cao@caep.cn*

**Abstract:** In order to achieve high spatial resolution and narrow spectral bandwidth imaging of laser plasma in updated SG-II laser facility, the relations of the imaging quality of spherically bent crystal with image distance, Bragg angle and backlit size were discussed. First, spherically bent crystal imaging at diverse image distances, Bragg angles and backlit sizes were studied with a ray tracing program X-LAB. Then, a test experiment was carried out by using X-ray tube device. The results show that better two-dimension image could be obtained at the image distance of equal resolution of two dimensions, and larger the Bragg angle is, better the imaging is. Furthermore, smaller size of backlit is also helpful to improve the imaging quality. The experiment result agrees well with the expectation, a spatial resolution better than  $14\ \mu\text{m}$  in the image of the mesh. The results obtained contribute to the optimization design of the spherically bent crystal imaging system and precision diagnosis of laser plasma.

**收稿日期:** 2017-04-10; **修订日期:** 2017-05-04.

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFA0206011); 科技部国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2012YQ120125)

**Key words:** X-ray imaging; spherically bent crystal; ray tracing; monochromatic imaging; plasma

## 1 引言

在激光驱动惯性约束聚变实验研究中<sup>[1-4]</sup>,需要用多路纳秒激光脉冲将原始直径约为 1 000  $\mu\text{m}$  的聚变燃料靶丸均匀压缩至直径小于 100  $\mu\text{m}$  的高温高密度等离子体状态<sup>[4]</sup>,使用 X 射线背光照相的方法可以诊断压缩后靶丸的尺寸和密度分布信息,从而推断压缩后等离子体是否达到点火条件<sup>[5-6]</sup>。此外,强激光与靶物质相互作用产生的自发辐射成像可用于推断超热电子的分布和传输特性,这对快点火研究具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。在这些激光等离子体诊断研究中,要获得高质量、高置信度的成像结果,需要使用准单色(窄能谱宽度)高空间分辨率的 X 射线成像技术<sup>[8]</sup>。传统的针孔成像<sup>[10-11]</sup>是宽谱成像,KB 显微<sup>[12]</sup>成像技术的选谱能力有限,均不能满足上述诊断要求。基于球面弯晶的 X 射线单色成像技术可实现高空间分辨、窄能谱宽度成像,是有效的解决方案<sup>[8]</sup>。目前,该成像技术已在国外的 Omega EP、NIF 等大型激光装置上得到了成功的应用<sup>[13-16]</sup>。

“神光 II”升级激光装置包含 8 路纳秒激光和一束高功率皮秒激光,可用于快点火的初步实验研究。目前,该装置上主要的等离子体成像诊断设备仍为针孔相机和 KB 显微镜,急需发展球面弯晶单色成像技术,以提高诊断结果的置信度。针对这一需求,本文分析了球面弯晶单色成像原理,使用 X 射线光线追迹软件 X-LAB<sup>[17]</sup>对球面弯晶成像技术进行了参数优化,并在实验室 X 射线管上进行了测试实验,实验结果验证了设计的合理性,从而为球面弯晶成像技术在“神光 II”升级装置上的应用奠定了基础。

## 2 球面弯晶成像工作原理

晶体内部的原子整齐有序排列,是天然的 X 射线分光器,入射到晶体上的复色 X 射线只有满足布拉格方程的部分才发生干涉加强,从而得到有效反射<sup>[8]</sup>:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (1)$$

式中: $d$ 为晶体的晶格常数, $\theta$ 为布拉格角, $\lambda$ 为 X 射线波长, $n$ 为衍射级次。在晶体晶面和布拉

格角选定后,反射的 X 射线波长也随之确定(包含谐波)。根据此原理可以选择单一能量的 X 射线。

将晶体按照罗兰圆半径的二倍弯曲为球面,根据球面几何光学可知罗兰圆上的发光点经过反射后会聚焦于一点,可用于成像<sup>[8]</sup>。基于球面弯晶的成像结合了晶体的能量选单功能和球面镜的成像功能,故可实现单能成像。在球面弯晶成像时,物像距满足<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{1}{a} + \frac{1}{b_m} = \frac{2}{R\sin\theta} \\ \frac{1}{a} + \frac{1}{b_s} = \frac{2\sin\theta}{R} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $R$ 为球面弯晶的曲率半径, $a$ 为物体到球面弯晶的距离, $b_m$ 和 $b_s$ 分别为子午和弧矢方向的像距。图 1 为球面弯晶的成像原理,背光源发出的复色 X 射线透过物体后携带物体的信息以 $\theta$ 角入射到球面弯晶上,只有满足布拉格公式的 X 射线才以 $\theta$ 角反射,并被探测器接收。在自发辐射测量中无背光源。

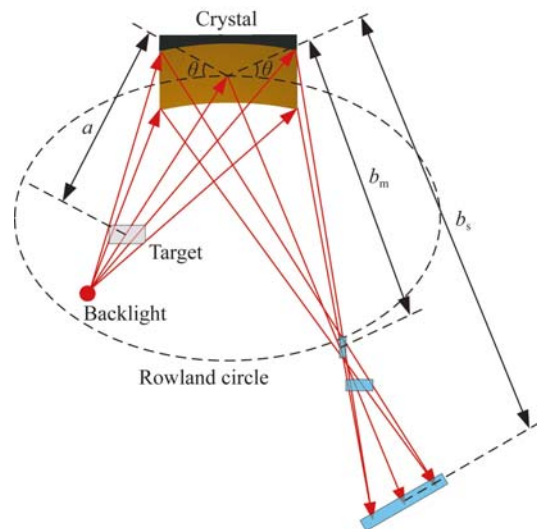


图 1 球面弯晶成像原理示意图

Fig. 1 Schematic of spherically bent crystal imaging

球面弯晶的成像性能与系统参数密切相关。由球面弯晶成像的物像距公式(2)可知,球面弯晶在子午和弧矢方向的焦点不重合。球面弯晶在 X 射线波段的成像空间分辨率主要由几何像差决定<sup>[8]</sup>,在子午和弧矢方向的成像空间分辨率 $\sigma_m$ , $\sigma_s$ 分别为:

$$\sigma_m = \left| d_s \frac{a}{p-a} \cdot \frac{b-b_m}{M_m b_m} \right| = \left| \frac{aR \sin \theta - 2ab + bR \sin \theta}{2pb - (p+b)R \sin \theta} \right| d_s, \quad (3)$$

$$\sigma_s = \left| d_s \frac{a}{p-a} \cdot \frac{b-b_s}{M_s b_s} \right| = \left| \frac{aR - 2abs \sin \theta + bR}{2pb \sin \theta - (p+b)R} \right| d_s, \quad (4)$$

式中  $M_m$  和  $M_s$  分别为子午和弧矢方向的放大倍数。由此可见, 球面弯晶成像的分辨率与物像距、布拉格角、晶体曲率半径和光源尺寸等参数密切相关。

### 3 光线追迹

针对铜  $K\alpha$  (波长为 0.154 06 nm、能量为

$$b_r = \frac{[2ap(\sin \theta + \csc \theta) - (a+p)R + ((p-a)^2 R^2 + 4a^2 p^2 \cos^2 \theta \cot^2 \theta)^{\frac{1}{2}}]R}{[2(R^2 - (a+p)R(\sin \theta + \csc \theta) + 4ap)]}. \quad (5)$$

使用 X-LAB 软件模拟研究不同像距条件下的成像结果。采用背光成像模式, 背光源均匀分布, 物体为周期性方形网格, 其周期为 100  $\mu\text{m}$ , 占空比为 0.4, 其余参数如表 1 所示。

表 1 像距对成像质量影响的参数

Tab. 1 Parameters for studying imaging performance with different image distances

Parameters	Values	Parameters	Values
$d_s/\mu\text{m}$	500	$a/\text{mm}$	140
$\lambda/\text{nm}$	0.154 06	$p/\text{mm}$	152
$R/\text{mm}$	250	$\theta/(\text{^\circ})$	80
$2d/\text{nm}$	0.156 4	$b_m/\text{mm}$	1 019.8
$b_s/\text{mm}$	1358.4	$b_r/\text{mm}$	1 201.0

8.048 keV) 的 X 射线成像测量, 使用光线追迹方法模拟研究了像距、布拉格角、背光源尺寸等参数对球面弯晶成像性能的影响, 并根据模拟结果对系统参数进行优化设计。

#### 3.1 像距对成像性能的影响

由式(3)和式(4)可知, 当像距  $b=b_m$  时子午方向的空间分辨最佳; 同理, 当  $b=b_s$  时弧矢方向的空间分辨最佳。由于在等离子体诊断时需要得到二维分辨的成像, 因此期望成像在子午和弧矢方向的分辨率相同。令  $\sigma_m$  和  $\sigma_s$  相等, 得到等分辨率成像处的像距  $b_r$  为:

光线追迹模拟结果如图 2 所示, 图 2(a) 为等分辨成像处的成像结果, 此时子午和弧矢方向的空间分辨率基本相同; 图 2(b) 为子午焦点处的成像结果, 此时子午方向 ( $y$  方向) 的空间分辨率最佳, 但弧矢方向 ( $x$  方向) 的空间分辨率极差; 图 2(c) 为弧矢焦点处的成像结果, 两个方向的分辨率刚好与 2(b) 相反。图 2(a) 中的空间分辨率略低于图 2(b) 中子午方向或图 2(c) 中弧矢方向的分辨率。

根据模拟结果, 在二维成像时像距应当选择等分辨成像像距。当需要对某一维方向成像时, 选择该方向焦距为像距可以获得很好的效果。

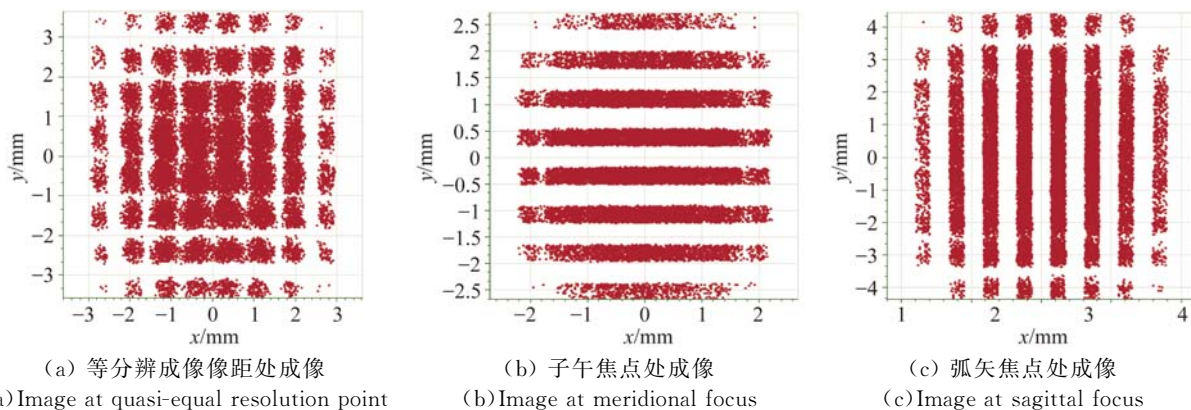


图 2 不同像距成像的模拟仿真结果

Fig. 2 Simulation results of imaging at different image distances

### 3.2 布拉格角对成像性能的影响

利用球面弯晶进行成像时,由式(3)和式(4)推导可知子午和弧矢焦线间的距离满足:

$$\Delta b = \frac{1}{\frac{2 \sin \theta}{R} - \frac{1}{a}} - \frac{1}{\frac{2}{R \sin \theta} - \frac{1}{a}} \quad (6)$$

当布拉格角  $\theta$  增大时,  $\Delta b$  减小,相应地像散减小。故对于给定的测量能点,可以选择合适的晶体晶面使得布拉格角  $\theta$  尽可能大,从而抑制像散,以获得更好的成像分辨率。

表 2 布拉格角对成像质量影响的参数

Tab. 2 Parameters for studying imaging performance with different Bragg angles

Parameters	$\theta/(\circ)$		
	88.7	80	71.6
$2d/\text{nm}$	0.308 2	0.156 4	0.162 4
Crystal	Quartz 21 <u>31</u>	—	Quartz 50 <u>52</u>
$n$	2	1	1
$b_r/\text{mm}$	1 166.7	1 201.0	1 555.9
$M_m$	8.4	10.8	23.9
$M_s$	8.3	7.1	7.2

使用 X-LAB 软件模拟 3 个不同布拉格角条件下的成像,仍采用背光成像模式、均匀光源以及与上面模拟相同的周期网格参数。根据 3.1 节的结论,在成像模拟时像距均选择等分辨成像的像距。模拟参数见表 2,表 2 中未提及的参数与表 1 相同。

模拟结果如图 3 所示,图 3(a)是布拉格角等于  $88.7^\circ$  时的成像结果,此时在二维方向上均可获得较好的空间分辨率,可以清楚地分辨出网格中透光和不透光的区域。用模拟成像得到的周期除以放大倍数得到成像后网格的周期值为  $98.6 \mu\text{m}$ ,与实际周期  $100 \mu\text{m}$  相比,相对误差为  $1.4\%$ 。图 3(b)是布拉格角为  $80^\circ$  时的成像结果,模拟图像虽然可看到网格的形状,但是透光与不透光区域的边界不清晰,难以分辨,其成像分辨率远低于图 3(a)的结果。图 3(c)给出了布拉格角为  $71.6^\circ$  时的成像结果,此时成像分辨率很低,已完全不能分辨网格的形状,且子午与弧矢方向的放大倍数相差明显。

综上所述,随着布拉格角的增大,像差变小,成像分辨率提高。因此,在球面弯晶成像时一般要求布拉格角在  $80^\circ \sim 90^\circ$ 。但是,大的布拉格角有两个缺陷,一是限制了可用光源能点的数目,二是会增大屏蔽难度。

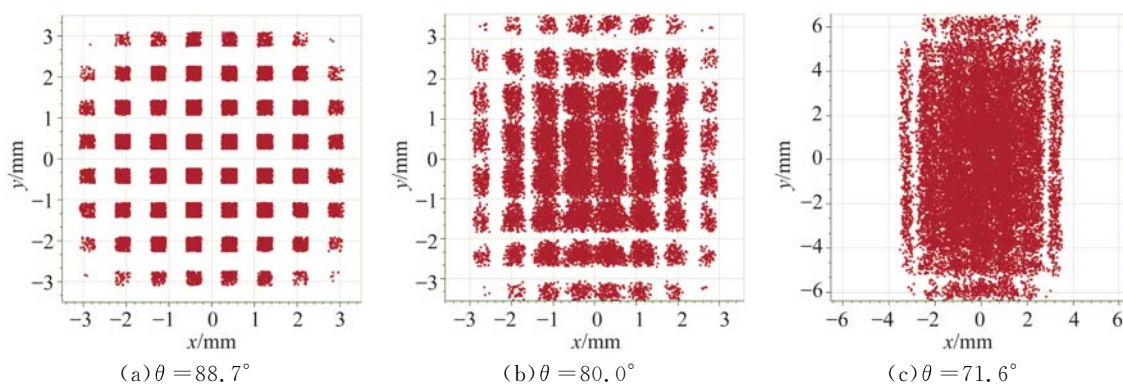


图 3 不同布拉格角成像的模拟仿真结果

Fig. 3 Simulation result of imaging at different Bragg angles

### 3.3 背光源尺寸对成像性能的影响

在不同背光源尺寸条件下,使用 X-LAB 软件模拟研究了弯晶成像性能的变化规律。为了便于比较,选择布拉格角为  $80^\circ$ ,除光源尺寸外,其余设计参数与表 1 相同。

模拟结果如图 4 所示,图 4(a)、4(b)、4(c)分别

是光源直径为  $100, 500$  和  $1\ 000 \mu\text{m}$  的成像结果。由图可知,随着背光源尺寸的增大,成像的空间分辨率逐渐下降,这与由球面弯晶成像分辨率公式得出的分辨率与光源尺寸成正比的结论相符。因此,在球面弯晶进行背光成像,且其他条件相同时,应尽量选择较小尺寸的背光源,以获得更好的空间分辨率。

综合以上模拟结果可知:在应用球面弯晶进行二维成像时,应选择等分辨率的成像像距、布

格角尽可能大(一般大于  $80^\circ$ )的晶体晶面和尺寸尽可能小的背光源。

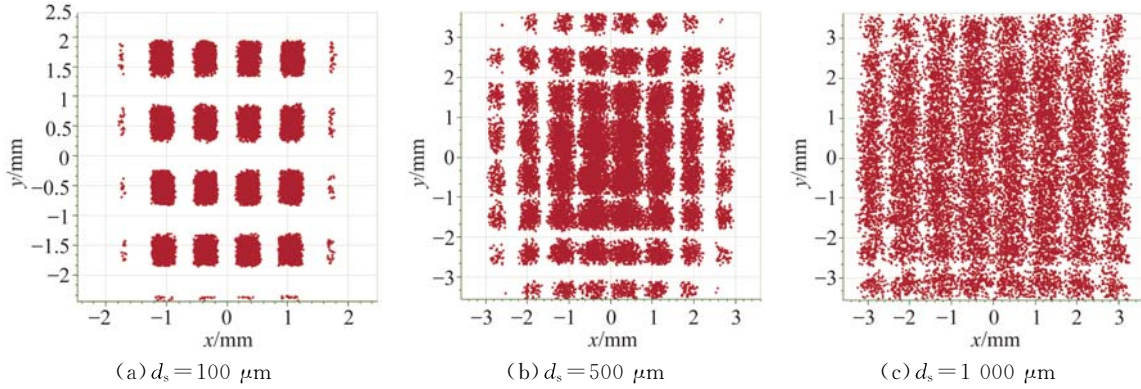


图 4 不同背光源尺寸下的成像模拟仿真结果

Fig. 4 Simulation result of imaging at different backlit sizes

### 4 测试实验

为验证上述优化设计结果,在实验室 X 射线管照射条件下开展了测试实验,实验参数选择如表 3 所示。X 射线管阳极材料为 Cu,以 X 射线管发出的 X 射线作为背光源对厚度为  $10 \mu\text{m}$  的钽周期网格进行背光成像。

表 3 球面弯晶成像测试实验参数

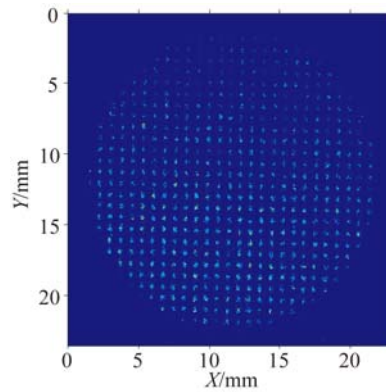
Tab. 3 Experiment parameters of spherically bent crystal imaging

Parameters	Values	Parameters	Values
$d_s/\mu\text{m}$	500	$a/\text{mm}$	140
Crystal	Quartz 21 31	$p/\text{mm}$	440
$2d/\text{nm}$	0.308 2	$\theta/(\text{^\circ})$	88.7
$R/\text{mm}$	250	period of mesh/ $\mu\text{m}$	100
$\lambda/\text{nm}$	0.154 06	length of hole/ $\mu\text{m}$	40
$b/\text{mm}$	1 166.7	M	$8.3 \times$

为有效抑制像散,达到较好的成像分辨率,选择晶体晶面为石英 21 31,对应的布拉格角为  $88.7^\circ$ 。像距选择等分辨率的成像点,以使成像在二维方向的分辨率尽可能相同。为了获得较好的

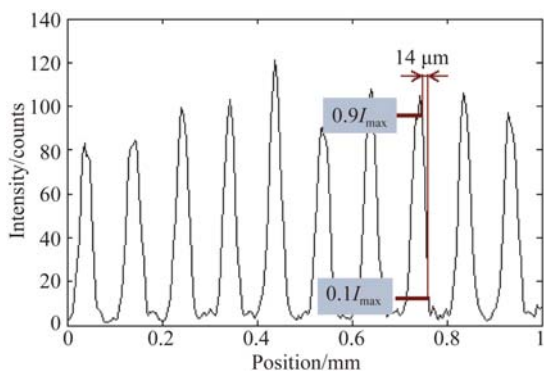
成像分辨率,用厚 5 mm 的铜孔将直径约为 2 mm 的 X 射线管的出光孔限制为  $500 \mu\text{m}$ 。没有选择更小限制孔的原因是避免光通量过小。为了避免 X 射线管管体阻挡晶体反射光,在实验中背光源与弯晶的距离为 440 mm,这与模拟用的参数略有不同。使用 IP 成像板作为 X 射线探测器,其本征空间分辨率为  $25 \mu\text{m}$ 。

图 5(a)是测试实验的成像结果,由图可以看到清晰的网格图像,与图 3(a)的模拟结果基本相符(除背光源距离外,二者的参数均相同)。图 5(b)是图 5(a)网格成像的一维强度分布曲线,成像强度曲线上升沿(或下降沿)10%~90%的距离是成像的分辨率,其值小于  $14 \mu\text{m}$ 。



(a)测试实验得到的网格背光成像

(a)Backlit image of mesh acquired in experiment



(b) 成像的一维强度分布曲线

(b) Intensity curve of image

图 5 球面弯晶成像实验结果

Fig. 5 Result of spherically bent crystal imaging experiment

## 参考文献:

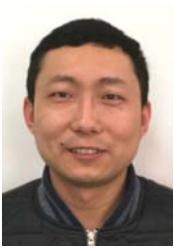
- [1] 张家泰, 何斌, 贺贤土, 等. 激光聚变快点火机理研究[J]. 物理学报, 2001, 50(5): 921-925.  
ZHANG J T, HE B, HE X T, *et al.*. Study on the mechanism of the fast ignition in laser fusion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50 (5): 921-925. (in Chinese)
- [2] TABAK M, HAMMER J, GLINSKY M E, *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers [J]. *Physics of Plasmas*, 1994, 1(5): 1626-1634.
- [3] KODAMA R, NORREYS P A, MIMA K, *et al.*. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition [J]. *Nature*, 2001, 412(6849): 798-802.
- [4] ATZENI S, MEYER-TER-VEHN J. *The Physics of Inertial Fusion* [M]. Oxford: Clarendon Press, 2004.
- [5] THEOBALD W, SOLODOV A A, STOECKL C, *et al.*. Time-resolved compression of a capsule with a cone to high density for fast-ignition laser fusion [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5785.
- [6] CASEY D T, WOODS D T, SMALYUK V A, *et al.*. Performance and mix measurements of indirect drive Cu-doped Be implosions [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(20): 205002.
- [7] MORACE A, BATANI D. Spherically bent crystal for X-ray imaging of laser produced plasmas [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 623(2): 797-800.
- [8] 张强强, 魏来, 杨祖华, 等. 用于超热电子诊断的单体 X 射线成像技术[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1234001.  
ZHANG Q Q, WEI L, YANG Z H, *et al.*. Monochromatic X-ray imaging technology for diagnostics of hot electrons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1234001. (in Chinese)
- [9] FÖRSTER E. Bent crystal X-ray optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1823-1828.
- [10] SINARS D B, BENNETT G R, WENGER D F, *et al.*. Evaluation of bent-crystal X-ray backlighting and microscopy techniques for the Sandia Z machine [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(19): 4059-4071.
- [11] 白晓红, 白永林, 刘百玉, 等. 神光原型诊断设备: 门控针孔分幅相机的研制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 367-373.  
BAI X H, BAI Y L, LIU B Y, *et al.*. SG diagnostic equipment: gating pinhole framing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 367-373. (in Chinese)
- [12] 伊圣振, 穆宝忠, 王新, 等. 周期多层膜 Kirkpatrick-Baez 显微镜成像性质分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1681-1685.  
YI SH ZH, MU B ZH, WANG X, *et al.*. Imaging characteristic analysis of Kirkpatrick-Baez microscope with periodic multilayer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1681-1685. (in Chinese)
- [13] STOECKL C, FIKSEL G, GUY D, *et al.*. A spherical crystal imager for OMEGA EP [J]. *Review Scientific Instruments*, 2012, 83(3): 033107.

## 5 结 论

本文采用 X-LAB 软件, 利用光线追迹法模拟研究了多种设计参数对球面弯晶成像性能的影响, 模拟结果表明: 在实验参数选择时, 应选择等分辨率的成像像距、尽可能大 ( $>80^\circ$ ) 的布拉格角和尽可能小的背光源尺寸。X 射线管实验验证了模拟结果, 成像分辨率小于  $14 \mu\text{m}$ 。此研究为球面弯晶成像技术在激光等离子体诊断中的应用提供了有利的支持。

- [14] KOCH J A, LANDEN O L, BARBEE T W, *et al.*. High-energy X-ray microscopy techniques for laser-fusion plasma research at the National Ignition Facility [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1784-1795.
- [15] HALL G N, BURDIAC G C, SUTTLE L, *et al.*. Monochromatic radiography of high energy density physics experiments on the MAGPIE generator [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11D608.
- [16] 刘利锋, 肖沙里, 毋玉芬, 等. 球面弯曲晶体在 X 射线背光成像的应用 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2023-2028.
- LIU L F, XIAO SH L, WU Y F, *et al.*. Application of spherically bent crystal to X-ray backlight imaging experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2023-2028. (in Chinese)
- [17] 杨祖华. X 射线光学仿真软件(简称: X-LAB): CN 2015R11S080585 [P].
- YANG Z H. X-LAB V1. 0: CN 2015R11S08 0585 [P]. (in Chinese)

#### 作者简介:



张强强(1988—),男,陕西榆林人,硕士,助理研究员,2014年于中国工程物理研究院获得硕士学位,主要从事X射线诊断方面的研究。E-mail: qiangz0521@163.com



曹磊峰(1967—),男,河南开封人,博士,研究员,2002年于中国工程物理研究院获得博士学位,主要从事激光等离子体诊断方面的研究。E-mail: leifeng.cao@caep.cn