

# 柱面内爆磁通量压缩超高速摄影技术研究

畅里华 汪 伟 谷卓伟 王 旭 温伟峰 尚长水

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术具有加载压力高、加载过程温升低及样品体积大等特点,在材料高压物性、新材料高压合成及超强磁场下的凝聚态物理等多个领域都具有广阔的应用前景。叙述了超高速摄影技术在柱面内爆磁能量压缩实验中的研究应用,用超高速分幅摄影和扫描摄影技术首次拍摄到柱面内爆强磁场压缩过程具有高时空分辨的一维和二维图像,成功观察到柱面套筒内爆整个压缩和反弹过程以及压缩过程中的界面不稳定性现象,获得了该过程的压缩直径随时间连续变化曲线,由此计算出柱面套筒内爆强磁场压缩速度。该实验数据对于炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术研究具有重要的指导意义。

**关键词** 超快光学; 柱面内爆; 磁通量压缩; 超高速摄影; 光电分幅相机; 转镜分幅/扫描相机

**中图分类号** O439; O521 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.1032001

## Study on Magnetic Flux Compression by Cylindrical Implosion Using Ultrahigh-Speed Photography Technology

Chang Lihua Wang Wei Gu Zhuowei Wang Xu Wen Weifeng Shang Changshui

*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

**Abstract** The magnetic flux compression technique by explosive cylindrical implosion has the advantages of high loading pressure, small temperature increase during loading process as well as the ability of holding large volume samples. By the virtue of all these characteristics, it has wide applications in the fields of high pressure physics, new material synthesis and ultrahigh magnetic field condensed matter physics. The utility of ultrahigh speed photography technology in the experiment of magnetic flux compression by cylindrical implosion method is reported. The one-dimensional and two-dimensional images of compression process of magnetic field with high temporal and spatial resolutions are obtained using ultrahigh speed framing photography and scanning photography techniques. The whole compression and rebound process as well as the interface instability phenomena are observed. By analyzing the dynamical curve of sleeve cylinder's diameter, the compression speed of magnetic flux is obtained. The experimental data is an important guideline for the research of future magnetic flux compression technology by cylindrical explosive implosion technique.

**Key words** ultrafast optics; cylindrical implosion; magnetic flux compression; ultrahigh speed photography; photoelectric framing camera; rotating mirror framing/streak camera.

**OCIS codes** 320.7080; 320.7100; 110.2970; 110.2960

## 1 引 言

炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术具有加载压力高、时间长、加载过程温升低及样品体积大等特点,是一种先进的高能量密度加载实验技术,在材料高压物性、新材料高压合成及超强磁场下的凝聚态物理等多个领域都具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。从20世纪60年代起,包括美、俄等多个国家的研究机构开展了大量这方面的研究工作<sup>[4-6]</sup>。目前国内在强磁场技术和物理研究领域研究逐步增加,但在超高磁场技术领域研究极少。2011年,

收稿日期: 2015-02-09; 收到修改稿日期: 2015-06-14

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ130019)

作者简介: 畅里华(1974—),女,学士,高级工程师,主要从事超高速摄影技术方面的研究。E-mail: clhwdd@163.com

通信联系人。E-mail: guzhw1969@126.com

中国工程物理研究院流体物理研究所在国内率先开展了炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术的实验和理论研究,研制了国内单个单级炸药柱面内爆磁通量压缩实验装置,并开展了多发动态实验研究。其中,柱面内爆强磁场等熵压缩速度是压缩实验中最为基本的参数,对于炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术的设计、数值模拟、及实验装置的改进,都起着极为重要的作用。鉴于柱面内爆强磁场压缩速度快的技术特点,高速摄影就成为光学测试技术中一个不可或缺的测试手段<sup>[7-8]</sup>。本文采用超高速扫描摄影和分幅摄影技术拍摄了柱面内爆强磁场压缩过程具有高时空分辨的一维和二维图像,成功观察到薄壁套筒内爆压缩整个发展过程及压缩过程中的界面不稳定性,得到了该过程的直径随时间连续变化曲线和压缩速度。

## 2 炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术原理

炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术原理如图1所示。利用炸药柱面内爆驱动金属套筒,套筒压缩预先引入的磁通量,将炸药化学能转化为磁场能,使之在轴线附近小体积内聚积,形成超强磁场及超高的磁压力。在实际过程中,虽然材料的电导率是有限的,但由于爆炸压缩过程很短,套筒内部的磁通量来不及扩散就被压缩至很高的磁通密度,所以仍然可以获得很高的脉冲磁场强度。这种加载技术以磁场作为缓冲介质对样品进行非接触加载,是一种等熵程度很高的非接触高压加载技术,会带来较低的温升,并能在样品中实现更高的加载压力<sup>[9]</sup>。

## 3 实验装置及拍摄布局

### 3.1 实验装置

柱面内爆磁通量压缩实验装置结构如图2所示。实验装置主要包括线圈、炸药、同步起爆装置、套筒、磁探针及样品等部分,另外需要建立初设磁场能库,并选取适合的开关系统等。在工作过程中,储能能库首先对线圈放电,建立初始磁场。当放电至磁场最强时,侧面同步起爆装置引爆圆柱形装药并推动金属套筒内爆做功,压缩金属套筒内部的磁通量,将炸药的化学能转化为磁能。由于磁扩散作用时间较长,在内爆压缩过程中,大部分的磁通量来不及扩散而被压缩在较小的空间内,从而形成超强磁场。实验装置设计中,炸药材料为JO-9159,套筒材料选用不锈钢,外径为 $\Phi 100$  mm,厚度为1.5 mm,内径 $\Phi 97$  mm,初设磁场采用4台11 kV,830  $\mu$ F的脉冲电容器作为能库,放电线圈采用16匝的一对磁线圈<sup>[10]</sup>。

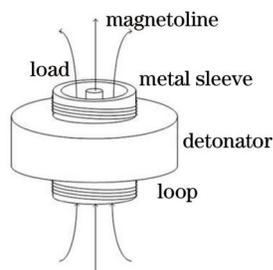


图1 柱面内爆磁通量压缩原理图

Fig.1 Schematic diagram of magnetic flux compression by cylindrical implosion

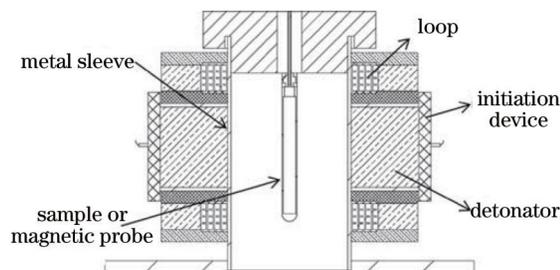


图2 柱面内爆磁通量压缩装置图

Fig.2 Device of magnetic flux compression by cylindrical implosion

### 3.2 高速摄影测试装置布局

柱面内爆磁通量压缩超高速摄影测试布局如图3所示。脉冲氙灯光源经照明物镜形成平行光后均匀照明被摄区域,经反射镜、相机物镜成像在超高速分幅、扫描相机系统上。由于内爆过程极快,实验过程中为拍摄到稳定、可靠的压缩过程图像,必须保证超高速相机系统摄影拍摄时刻、脉冲氙灯光源发光时刻及压缩过程的形成和发展时刻同步<sup>[11-13]</sup>。

在实验过程中,由于柱面内爆磁通量压缩装置产生高电压,大电流及强磁场,为避免超高速分幅、扫描相机因电磁干扰而产生误触发,实验时相机同步触发信号、相机控制系统与相机传输信号全部采用光纤传输,同时对相机进行电磁屏蔽。拍摄过程中高速分幅、扫描相机未因高电压、强电磁的干扰而产生误触发、时序不正常及图像丢失等问题,实现了目标发生时刻与相机拍摄时刻的精确同步,拍摄到柱面内爆强磁场磁通量压缩过程具有高时间分辨本领的清晰图像<sup>[14]</sup>。

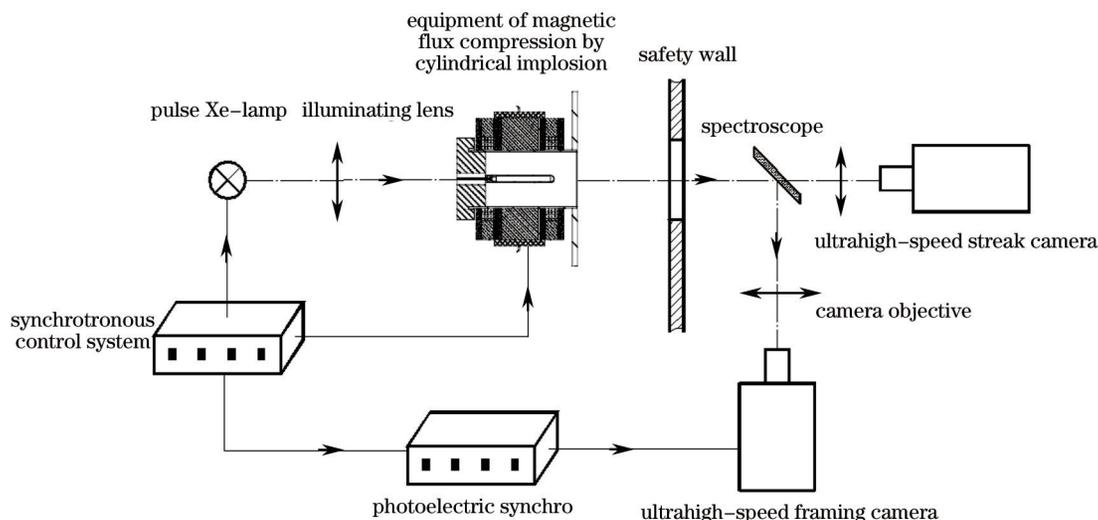


图3 柱面内爆强磁场磁通量压缩高速摄影布局图

Fig.3 High-speed photography layout of magnetic flux compression in cylindrical implosion high magnetic field

## 4 实验结果

### 4.1 转镜分幅相机摄影图像

图4是用FJZ-250型转镜式高速分幅相机拍摄柱面内爆强磁场磁通量压缩整个发展过程和反弹过程的图像。转镜分幅相机技术指标:摄影频率: $(25\sim 250)\times 10^4$  frame/s,画幅尺寸:15 mm $\times$ 20 mm,动态摄影分辨率21 lp/mm;画幅总数:40幅。拍摄条件:相机转速 $12\times 10^4$  r/min,摄影频率 $100\times 10^4$  frame/s,时间间隔1  $\mu$ s,曝光时间1  $\mu$ s。从系列图像可清晰看到柱面内爆强磁场磁通量压缩整个过程,同时观察到套筒压缩到一定程度后又反弹变大,这与理论上当套筒压缩到一定程度,其内部磁场强度迅速增加,对应的磁压力将会反弹相吻合。套筒从第6幅开始压缩,到第14幅时压缩到最小,第15幅开始反弹变大。以套筒压缩起始时刻为零时 $t_0$ ,第5幅对应时间为 $t_0$ ,每幅间隔1  $\mu$ s,第14幅压缩到最小对应时间为9  $\mu$ s,可知整个压缩过程约8~9  $\mu$ s。

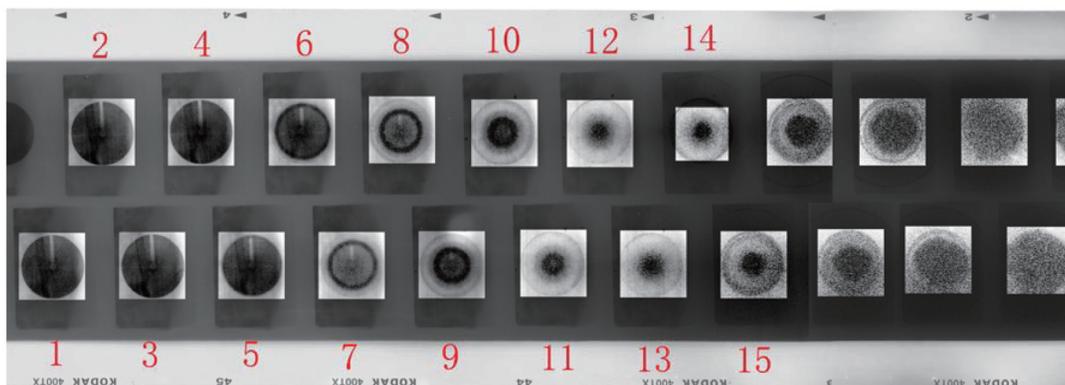


图4 转镜分幅相机拍摄柱面内爆强磁场压缩整个过程图像

Fig.4 Process images of cylindrical implosion high magnetic field compression using rotating mirror framing camera

### 4.2 超高速光电分幅相机摄影图像

图5是用超高速光电分幅相机拍摄的柱面内爆强磁场压缩过程图像,光电分幅相机主要技术指标:画幅数:6幅;最高摄影频率: $2\times 10^8$  frame/s;单幅最短曝光时间5 ns;拍摄总长度60 ms,幅间隔1 ns~10 ms分档可调;空间分辨率35 lp/mm。实验拍摄条件:相机摄影频率 $200\times 10^4$  frame/s,时间间隔500 ns,曝光时间20 ns,以套筒压缩起始时刻为零时 $t_0$ 。第1幅对应时间为4.5  $\mu$ s,到第8幅对应时间为8  $\mu$ s,从系列图像可看出,超高速光电分幅相机虽然幅数只有8幅,但每幅曝光时间只有20 ns,因此动态模糊小,可清楚地观察到套筒内爆压缩过程中存在不稳定性,且压缩过程界面不稳定性形状清晰可见。

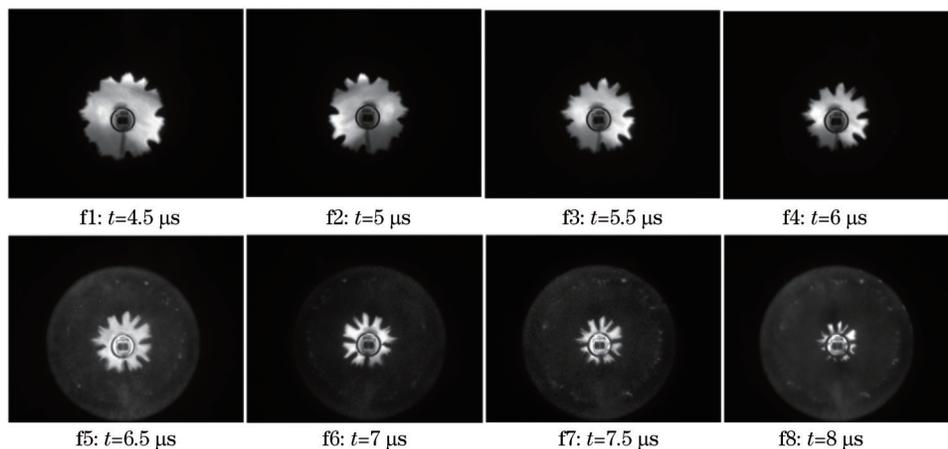


图5 光电分幅相机拍摄柱面内爆强磁场压缩过程图像

Fig.5 Compression process image of cylindrical implosion high magnetic field compression using optic electronic framing camera

### 4.3 转镜扫描相机摄影图像

图6是用SJZ-15型转镜式高速扫描相机拍摄的柱面内爆强磁场压缩过程直径随时间变化的一维图像。转镜扫描相机主要技术指标:扫描速度1.5~15 km/s,时间分辨率2.6 ns,总记录时间17~170 μs,静态空间分辨率80 lp/mm,记录长度24 mm×255 mm。拍摄条件:相机转速 $12 \times 10^4$  r/min,扫描速度6 km/s,狭缝宽度0.05 mm。图7是边缘处理后图像,从图7可明显看出柱面内爆强磁场压缩界面变化过程,清晰看出套筒压缩到最小后又开始反弹,且压缩过程对称性较好。

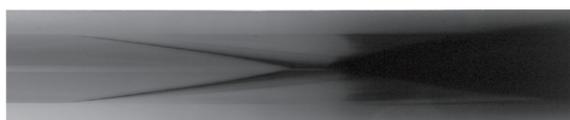


图6 转镜扫描相机拍摄柱面内爆强磁场压缩过程一维图像

Fig.6 One-dimensional image of cylindrical implosion high magnetic field compression process using rotating mirror streak camera

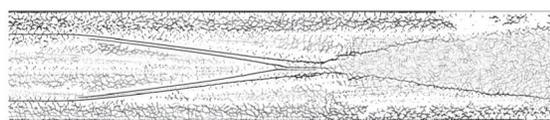


图7 转镜扫描相机拍摄柱面内爆强磁场压缩过程边缘处理后图像

Fig.7 Image of cylindrical implosion high magnetic field compression process using rotating mirror streak camera after edge processing

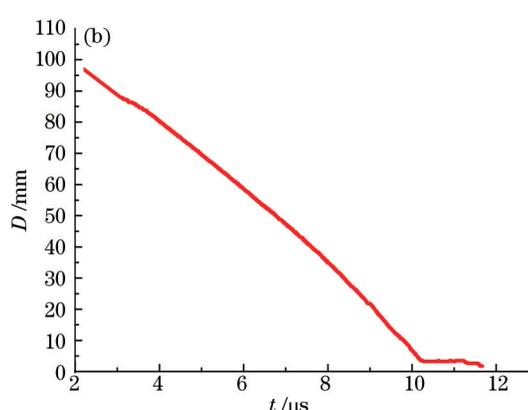
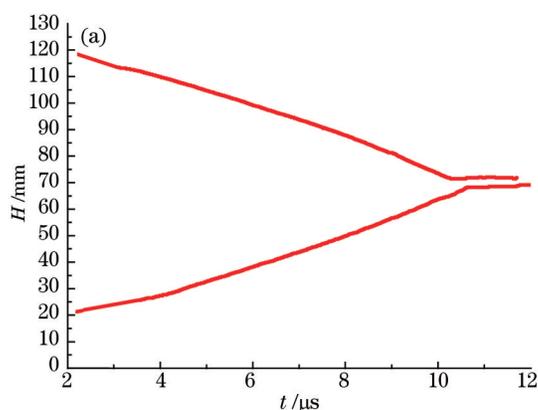


图8 柱面套筒直径变化曲线。(a)柱面套筒内壁 $H-t$ 曲线;(b)柱面套筒内壁 $D-t$ 曲线

Fig.8 Dynamical curves of the cylinder sleeve diameter. (a)  $H-t$  curves of cylinder sleeve inner wall; (b)  $D-t$  curve of cylinder sleeve inner wall

对拍摄到的图像进行处理及数据分析,套筒内壁直径随时间的变化曲线如图8所示。图8中横坐标为相机的扫描时间,图8(a)中纵坐标为图像边缘距测量原点的距离 $H$ ,图8(b)中纵坐标为套筒内壁直径 $D$ 。从图8中可以看出,其整个压缩时间约为8 μs,套筒内壁到中心平均压缩速度约为6.17 km/s。

## 5 结 论

通过实验研究,用超高速分幅摄影和扫描摄影技术首次拍摄到柱面内爆强磁场压缩过程具有高时间分

辨本领的一维和二维图像,成功观察到柱面套筒内爆压缩整个过程及压缩过程中的界面不稳定性,测得该过程的直径随时间连续变化曲线,得到了柱面内爆强磁场压缩速度,对开展炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术研究有较大的指导作用。

同时从转镜式高速分幅相机和超高速光电分幅相机拍摄结果对比可以看出,转镜式高速分幅相机每幅照片的曝光时间长,最短 400 ns,动态模糊较大,但记录时间长达 16~160  $\mu$ s,幅数多 40 幅,可观察到柱面内爆压缩整个过程。超高速光电分幅相机虽幅数少,最多 8 幅,但曝光时间短,连续可调,最小可到 5 ns,动态模糊小,更易看到压缩过程中界面不稳定性发展变化细节。

致谢 感谢王婉丽工程师在实验数据处理中给予的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Altgilbers L L, Brown M D J, Grishnaev I, *et al.*. Magnetocumulative Generators[M]. Sun Chengwei, Zhou Zhikui Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.  
Altgilbers L L, Brown M D J, Grishnaev I, 等. 磁通压缩发生器[M]. 孙承纬, 周之奎译. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- 2 Bykov A I, Dolotenko M I, Kolokol'chikov N P, *et al.*. VNIIEF achievements on ultra-high magnetic fields generation[J]. Physical B: Condensend Matter, 2001, 294(2): 574-578.
- 3 Bykov A I, Dolotenko M I, Kolokol'chikov N P, *et al.*. The cascade magnetocumulative generator of ultrahigh magnetic fields reliable tool for megagauss physics[J]. Physical B: Condensend Matter, 1996, 216(3): 215-217.
- 4 Pavlovskii A I, Dolotenko M I, Kolokol'chikov N P, *et al.*. Cascade magnetocumulative generator of ultra-high magnetic fields[J]. Ultrahigh Magnetic Fields. Physics. Techniques. Applications, 984.
- 5 Boyko B A, Bykov A I, Dolotenko M I, *et al.*. Generation of magnetic fields above 2000 T with the cascade magnetocumulative generator MC-1[C]. Abstr. of the VIII Int. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Topics, 1998: 149.
- 6 Liberman M A, De Groot J S, Toor A, *et al.*. Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- 7 Tan Xianxiang. Technique for High Speed Photography[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.  
谭显祥. 高速摄影技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
- 8 Tan Xianxiang. Test Technique for Optical High Speed Photograph[M]. Beijing: Science Press, 1992.  
谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- 9 Gu Zhuwei, Luo Hao, Zhang Hengdi, *et al.*. Experimental research on the technique of magnetic flux compression by explosive cylindrical implosion[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 170701.  
谷卓伟, 罗 浩, 张恒第, 等. 炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术研究[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 170701.
- 10 Zhao Jibo, Sun Chengwei, Gu Zhuwei, *et al.*. Magneto-hydrodynamic calculation of magnetic flux compression using imploding cylindrical liners[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2014, 26(9): 095003.  
赵继波, 孙承纬, 谷卓伟, 等. 内爆圆柱套筒磁通量压缩的磁流体动力学计算[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 095003.
- 11 Wang Wei, Wang Guiji, Luo Zhenxiong, *et al.*. Ultra-high speed laser shadow streak photography for flyer plates driven by magnetic fields [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 927-929.  
汪 伟, 王桂吉, 罗振雄, 等. 磁驱动飞片的超高速激光阴影扫描摄影技术[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(5): 927-929.
- 12 Liu Shouxian, Wen Weifeng, Yuan Shuyun, *et al.*. Full field velocity measurement of laser-driven flyer using framing-imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912007.  
刘寿先, 温伟峰, 袁树云, 等. 分幅面成像任意反射面速度干涉仪诊断激光驱动飞片全场速度[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912007.
- 13 Chang Lihua, Wang Wei, Shang Changshui, *et al.*. High-speed photography for electrical explosive loaded multi-layer target[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 27-30.  
畅里华, 汪 伟, 尚长水, 等. 电炮加载下靶板的高速摄影技术研究[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 27-30.
- 14 Feng Jie, Ding Yongkun, Wang Hongbin, *et al.*. Application of the X-ray picosecond framing camera in intense X-ray pulse[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(12): 1738-1740.  
冯 杰, 丁永坤, 王红斌, 等. X射线皮秒分幅相机在强 X 射线情况下的应用研究[J]. 光学学报, 1995, 15(12): 1738-1740.

栏目编辑: 苏 岑