

一种中能闪光照相降散射网栅的设计及实验验证

刘文杰 马庆鹏* 范 诚 刘 军

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 利用蒙特卡罗方法提出了一种厚度2 mm的钨制降散射网栅设计方法,采用精密机械钻孔技术实现了幅面52 mm×52 mm网栅研制,并基于450 kV中能X光机实验平台开展了网栅降散射能力闪光照相实验,同时采用蒙特卡罗方法进行了数值模拟验证。成像实验结果显示,使用该网栅后中能闪光照相图像质量发生实质性改善,样品芯部界面清晰度得到显著提升。数值模拟结果表明,使用降散射网栅后,辐射成像任意位置的散射灰度均低于直穿灰度,二者之比较无网栅状态下降约74.7%。

关键词 X射线光学; 中能; 闪光照相; 降散射网栅; 蒙特卡罗模拟

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0934001

Design and Performance Testing of an Anti-Scattering Grid for Medium-Energy Flash Radiography

Liu Wenjie Ma Qingpeng Fan Cheng Liu Jun

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

Abstract An effective design of a tungsten anti-scattering grid with 2 mm in thickness for medium-energy X-ray imaging is proposed. The grid is produced by precise mechanical drilling technology and is with the typical size of 52 mm × 52 mm. The flash radiographic experiments to test grid anti-scattering performance are performed based on a 450 kV medium-energy X-ray source, and the numerical simulation by the Monte Carlo method is also carried out. The imaging experimental results show that the image quality of flash radiography is improved substantially after the grid is used, and the boundary clarity in the sample core is enhanced obviously. The numerical simulation results indicate that scattering gray at any image position is lower than direct gray when the anti-scattering grid is used, and the ratio of scattering gray to direct gray is reduced by 74.7% compared to that without grids.

Key words X-ray optics; medium-energy; flash radiography; anti-scattering grid; Monte Carlo simulation

OCIS codes 340.7440; 110.7440; 290.5825

1 引 言

X射线辐射成像可以实现对物质内部特征信息的诊断探测,在医学诊断、无损检验、机场安保、工业探伤以及国防等领域得到广泛应用。在国防领域,自曼哈顿计划时期起美国洛斯阿拉莫斯实验室(LANL)就致力于发展高能闪光X光照相技术,并在流体动力学实验中利用兆伏级X射线探针实现了对高压缩性稠密金属的定量密度诊断^[1-3]。这种非接触式诊断手段为新武器系统的设计做出了重要贡献^[2-6]。

在X射线辐射成像过程中,有效的直穿光子和与样品及其他光路器件(准直及防护器件)发生非弹性碰撞的散射光子均被图像接收系统记录^[7]。散射光子的存在将降低样品图像的信噪比及对比度,导致关键图像信息丢失进而影响实验图像的处理,是影响X射线闪光照相实验效果的关键因素之一^[8]。为有效降低散射X光强度,1915年Bucky等^[9]发明了一种紧贴图像接收系统的降散射网栅,这种降散射网栅由一系列金属

收稿日期: 2015-04-13; 收到修改稿日期: 2015-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(21307119)

作者简介: 刘文杰(1982—),男,博士,副研究员,主要从事X光照相技术方面的研究。E-mail: wjlju@mail.ustc.edu.cn

*通信联系人。E-mail: maqingpeng@caep.cn

平板拼接而成,平板上预置阵列圆孔,圆孔一一对接形成聚焦至光源焦点的X光通道,仅容直穿X光子通过,运输方向异于直穿信号的散射信号将被网栅吸收^[8]。近一个世纪以来,对于降散射网栅的研究得到了长足的发展并在部分能量段X射线诊断中得到应用。其中,在低能X射线医学诊断领域(X光能量小于50 kV),针对网栅的数值模拟、制造工艺及结构设计方面均获得了大量的研究成果^[10-17]。在 高能闪光X光照相领域(X光能量大于1 MV),LANL的Watson小组设计研制的一种大幅面降散射网栅已成功应用于其双轴闪光照相流体动力学实验(DARHT)设施中^[4-5]。但是,用于工业无损探伤^[18-19]及基础物理实验^[20-23]的中能闪光X光照相(MEFR,X光能量介于50 kV和1 MV之间)领域的降散射网栅设计和应用研究相对较少。

本文提出一种用于中能闪光照相平台的降散射网栅的设计及实验验证方法,利用蒙特卡罗方法完成网栅参数设计和实验设计,采用精密机械钻孔技术完成网栅研制。在此基础上,基于450 kV X光机实验平台开展网栅降散射能力闪光照相实验,并通过蒙特卡罗方法对实验结果进行数值模拟验证。根据实验及数值模拟结果,分析采用降散射网栅对中能闪光照相实验图像质量的影响,为提升中能闪光照相实验能力提供一种行之有效的方法。

2 网栅参数及实验设计

2.1 降散射网栅设计

为达到最佳的降散射能力,网栅需基于X射线光源参数进行匹配设计,采用中能X光辐射成像领域较为成熟的商用450 kV闪光机(瑞典Scandiflash 450s型),光源类型为二级射线管。阳极为密度18.668 g/cm³的钨锥,阴极为密度7.679 g/cm³的不锈钢刀口圆环,实验中实测的物理参数如表1所示。采用蒙特卡罗法对其光阴极射线管结构进行数值建模,求解得到450 kV闪光机的光源参数(图1)。结果显示,距离光轴半径8 cm范围内光子衰减仅为2%,光源发射的X射线可近似为平行光束,加权平均能量为109 kV。基于光源为近似平行光束的特点,将降散射网栅设计为单片通孔型,材料选用对千伏~兆伏能段X光吸收性能优良的高纯钨(密度19.32 g/cm³)。网栅厚度以散射X光穿透能力小于10⁻⁸为设计准则^[5],X射线在物质中运输满足Beer-Lambert定律^[3]:

$$I = I_0 \exp(-\mu_l l), \quad (1)$$

式中 I_0 和 I 分别为X光穿透网栅前后的照射量, μ_l 和 l 分别为钨的线吸收系数和网栅厚度。

对于加权平均能量在100~200 kV能段的中能X光, $\mu_l = 85.5$ 。因此,通过计算得出,取网栅厚度 l 为2 mm时可达阻挡散射X光的要求。成像平面上的散射照射量大小由栅孔直径 d 和孔间距 s 共同决定,孔径过大而孔间距过小将增大成像平面的散射照射量,反之将导致直穿X光衰减过多。在此,采用透射率 R 衡量网栅的综合透光能力,其表达式为

$$R = \frac{n\pi d^2}{4a^2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中 n 和 a 分别为网栅孔数和网栅幅面边长(为便于加工网栅幅面设计为正方形,网栅孔为平行排列)。其中 n 可用网栅边长 a 和孔间距 s 换算:

$$n = \left(\frac{a}{s} + 1\right)^2. \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式,得到透射率 R 与 a 、 d 和 s 的关系:

$$R = \frac{\pi d^2}{4a^2} \left(\frac{a}{s} + 1\right)^2. \quad (4)$$

考虑到中能闪光照相基础物理实验的照相幅面通常为 $\Phi 15 \text{ mm} \sim \Phi 30 \text{ mm}$ ^[22-23],网栅幅面决定采用边长 $a = 52 \text{ mm}$ 的正方形。依据前期研究成果,为达到降低散射X光并减少直穿X光衰减的最佳效果,栅孔直径 d 和孔间距 s 分别确定为1.1 mm和1.5 mm^[24],代入(3)式得到网栅孔数 $n = 1225$ 。进而通过(4)式可以得到透射率 $R \approx 44.7\%$,该结果显示设计的降散射网栅透射能力较强,与美国DARHT闪光装置上采用的大幅面网栅性能相当^[4]。网栅设计参数如表2所示,结构示意图如图2(a)所示。网栅加工采用精密机械钻孔技术实现,其实物图如图2(b)所示。

表1 Scandiflash 450s 闪光机实测物理参数

Table 1 Physical parameters of Scandiflash 450s X-ray source

Physical parameters	Value
Output voltage	480 kV
Tube current	10 kA
Pulse width	25 ns
Source size	2.5 mm
Focal spot	1 mm
Output dose at 1 m (X_1)	24 mR (6.192×10^{-6} C/kg)

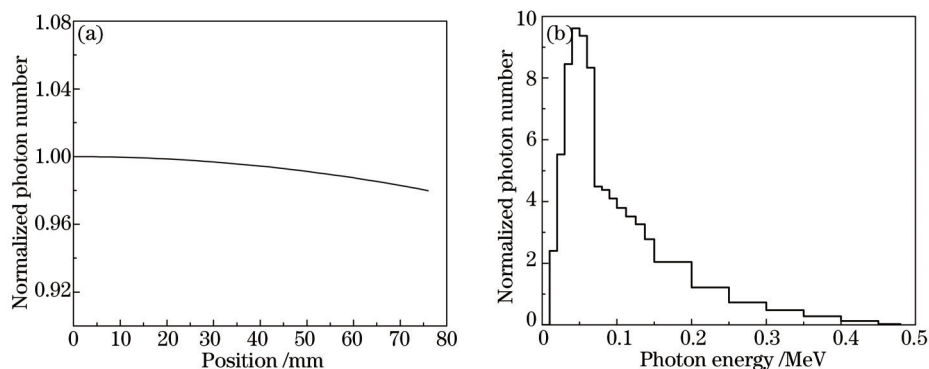


图1 450 kV 闪光机光源参数蒙特卡罗计算结果。(a) 径向光程分布; (b) X 光能量分布

Fig.1 Monte Carlo simulation results of Scandiflash 450s X-ray source. (a) Radial distribution of rays; (b) energy distribution of X-ray

表2 降散射网栅设计参数

Table 2 Optimized parameters of anti-scattering grid

Hole diameter /mm	Thickness /mm	Hole distance /mm	Density $/(g \cdot cm^{-3})$	Size $/(mm \times mm)$	Hole amount	Transmission /%
1.1	2	1.5	19.2	52×52	1225	44.7

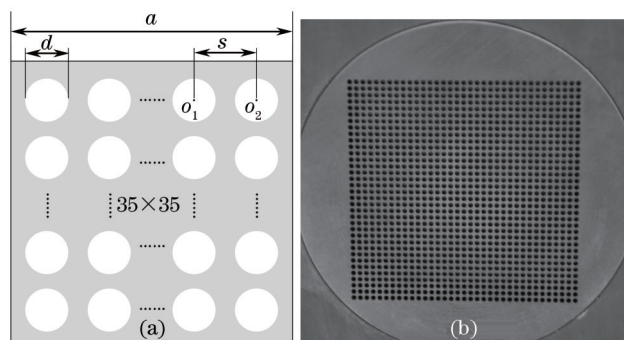


图2 降散射网栅结构图。(a) 网栅参数示意图; (b) 网栅实物图

Fig.2 Anti-scattering grid used in MEFR experiment. (a) Schematic; (b) photograph

2.2 验证实验设计

为验证网栅在中能闪光照相实验中的降散射能力,以 450 kV 闪光机为输入参数进行了降散射实验的照相布局和被照样品设计。实验设计主要基于两个基本要求进行:1) 在无网栅条件下成像平面散射 X 光照射量需大于直穿 X 光;2) 成像平面最深穿透点直穿照射量应超过底片灵敏度。因此,实验中被照样品选取半径为 40 mm 的空心铝球,芯部空腔半径为 10 mm,铝球外部包裹半径为 60 mm 的同心有机玻璃壳层并以聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 有机玻璃底座支撑。在照相布局方面,被照样品中心距 450 kV 闪光机 500 mm,贴近底片放置的铝板(模拟散射源,厚度为 10 mm)距光源 580 mm,底片距光源 600 mm。在铝板和底片间设置一个中空铅准直屏蔽环,空心尺寸与网栅匹配以便嵌入网栅,网栅近光端距光源 590 mm,样品和接收系统结构与闪光照相布局如图 3

所示。在此实验条件下,可根据实验图像中铝球内界面边界的成像效果对网栅的降散射能力进行评估。

基于以上实验状态,采用基于蒙特卡罗方法的蒙特卡罗 N 粒子(MCNP)程序^[25]对成像平面上的直穿照射量和散射照射量开展数值模拟研究。在电子撞击钨靶产生韧致辐射光子的光源模拟中,电子的空间坐标在半径为 0.1 mm 的柱面内进行均匀抽样,电子的飞行方向垂直于几何光轴,电子的能量为 480 keV。由于照相客体为球形客体,其几何建模相对简单,用不同半径的球面来形成给定材料的实体几何;而网栅的每个小孔按矩形均匀排列,且孔径相同,可以采用重复结构来描述。为获得更加真实的散射照射量,模拟过程中考虑了 X 射线与材料作用的相干散射和光电吸收效应,同时,电子、光子的截断能量为 1 keV。为获得比较稳定的统计记录结果,采用指向概率方法和照射量响应函数来计算照相平面上的照射量及其分布,取样步长为 0.2 mm。

数值模拟获得了无网栅条件下成像平面的直穿照射量和散射-直穿比(SDR)分布,如图 4 所示。结果显示,成像平面最深穿透点(铝球内界面投影点)的直穿 X 光照射量达到 2.4 mR,超过底片平均 1 mR 的探测灵敏度^[26];沿光轴径向半径 4.5 cm 范围内散射 X 光照射量均大于直穿 X 光照射量,最深穿透点的散射-直穿比甚至达到 3.5。数值模拟证明,在无网栅条件下,采用上述实验方案得到的被照样品芯部空腔及铝球内的照射量及散射-直穿比与典型的中高能闪光照相实验^[27]相当。

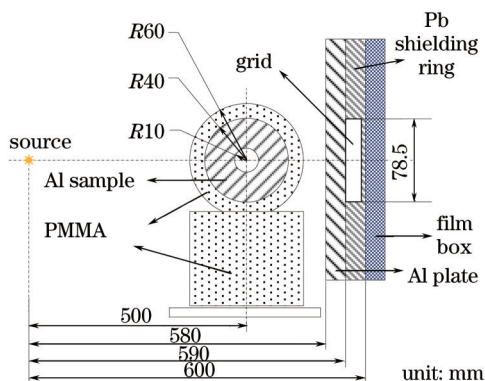


图 3 中能闪光照相网栅降散射实验设计示意图

Fig.3 Schematic of MEFR experimental setup

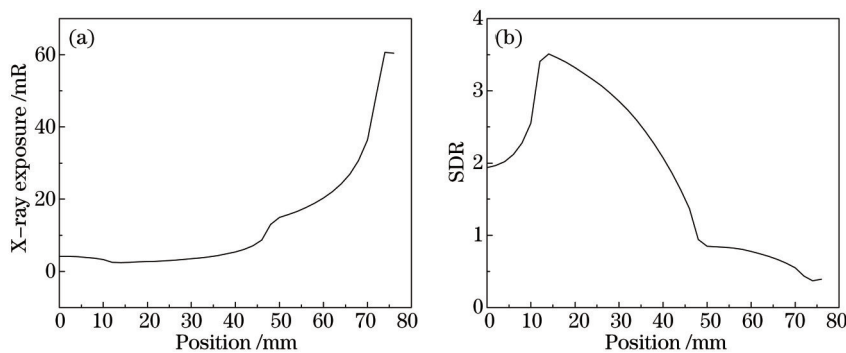


图 4 无网栅条件下中能闪光照相蒙特卡罗模拟结果。(a) 直穿照射量分布; (b) 散射-直穿比分布

Fig.4 Monte Carlo simulation of MEFR experiment without anti-scattering grid.

(a) Distribution of direct X-ray exposure; (b) distribution of SDR

3 网栅降散射实验及数值模拟结果分析

3.1 实验结果及分析

基于前文设计的实验方案,开展无网栅、有网栅两种状态下的闪光照相实验,两种状态下铅质屏蔽环安装状态如图 5 所示,获得的原始底片图像如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出,在无网栅条件下铝球芯部空腔无法通过肉眼识别;而在有网栅条件下,底片图像中铝球内界面边界清晰、芯部空腔完整[图 6(b)]。这一结果初步证明,降散射网栅在有效吸收中能散射 X 光的同时,

能够保证足够的直穿 X 光照射量实现被照样品的底片成像。

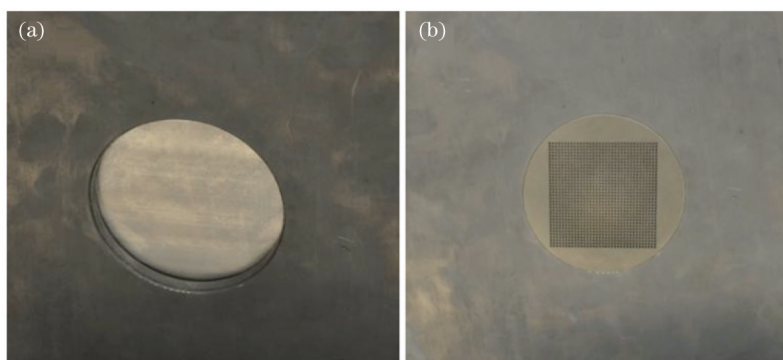


图 5 铅质屏蔽环。(a) 无网栅状态; (b) 有网栅状态

Fig.5 Lead shielding ring. (a) Without anti-scattering grid; (b) with anti-scattering grid

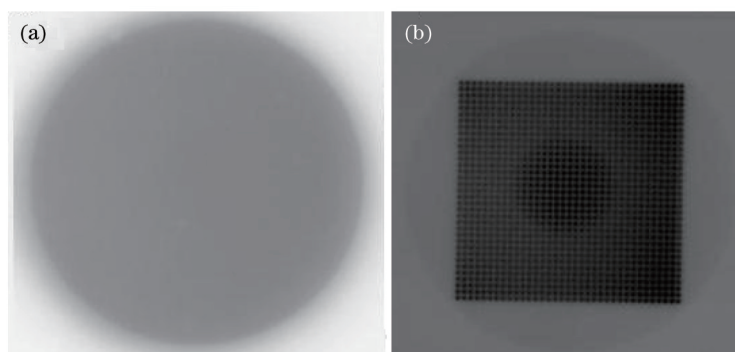


图 6 网栅降散射实验原始底片图像。(a) 无网栅; (b) 有网栅

Fig.6 Original photographs of MEFR experiments. (a) Without anti-scattering grid; (b) with anti-scattering grid

进一步采用滤波降噪、灰密度调节和反色(黑白反置)等技术手段对底片图像进行处理,以提升图像质量,达到最佳信噪比下的优化图像,如图 7 所示。由图 7 可知,经过图像优化处理后,未加网栅的底片图像中铅球内界面可以分辨但均匀性较差,且仍未达到有网栅底片图像中的界面清晰度。这一结果表明,对实验底片的后期处理无法弥补散射 X 光对成像质量的影响,进一步证实网栅的使用能够显著降低到达底片的散射 X 光照射量并大幅提升成像质量。另一方面,从图 7(b)可以看出,在使用降散射网栅条件下,网栅通孔的非连续特性在样品图像上得到体现,导致后期无法直接获得完整的界面和密度数据。对此,可采用神经网络插值修补法^[28]扣除网栅图像并对缺失信息进行插值复原。基于此方法,得到图 7(b)的最终复原图像,如图 7(c)所示。结果显示,复原图像中芯部空腔信号完整、界面连续,且信噪比和边界锐度仍远高于无网栅图像。

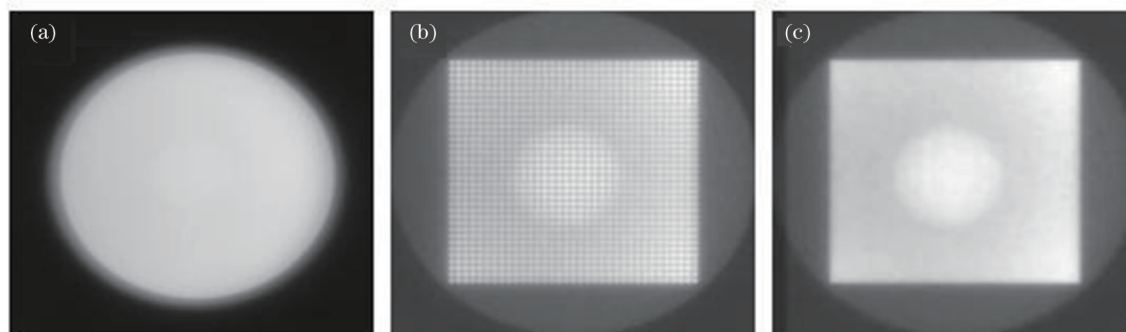


图 7 网栅降散射实验图像处理结果。(a) 无网栅图像; (b) 有网栅图像; (c) 最终复原的有网栅图像

Fig.7 Modified photographs of MEFR experiments. (a) Without anti-scattering grid; (b) with anti-scattering grid; (c) restored image of Fig.7(b)

3.2 数值模拟结果分析

为进一步验证网栅降散射实验获得的结论,采用 MCNP 程序开展相同光源参数和照相布局条件下的数

值模拟(数值模拟参数与前文相同),分别获得了无网栅和有网栅条件下铝球纵轴上的归一化底片灰度分布,如图8所示。由图8可知,在底片灰度分布方面,有无网栅条件下直穿X光和散射X光在光轴垂直方向上均呈现不同的趋势,直穿X光在光轴高度上下具有高度的对称性而散射X光在靠近有机玻璃支撑位置灰度偏高。由此可见,除沿光轴对称分布的主要散射源(贴近底片的铝板)外,支撑铝球的有机玻璃底座对散射灰度有额外贡献。由图8(a)可知,无网栅条件下,铝球内 ± 3 cm范围内散射X光灰度均大于直穿X光,最深穿透点(铝球内界面)的散射灰度与直穿灰度之比约为2.57。有网栅条件下[图8(b)],散射X光相对灰度显著降低,铝球内任意位置的散射灰度均低于直穿灰度,最深穿透点处的二者比降低为0.65,较无网栅状态下降低了约74.7%。此外,与实验结果类似,直穿X光由于网栅的遮挡损失了部分信息,导致直穿灰度剖面呈现阶跃性分布,但轮廓趋势并未改变,对此亦可通过线性插值进行包络线复原。

综上所述,数值模拟结果肯定了中能闪光照相实验中网栅的降散射能力,与图7中的实验结果形成了很好的对应关系。

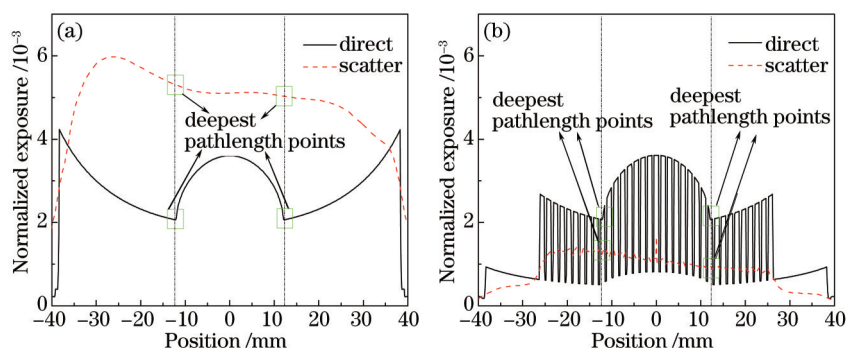


图8 铝球纵轴归一化底片灰度分布。(a)无网栅;(b)有网栅

Fig.8 Normalized gray distribution of films along the ordinate axis. (a) Without anti-scattering grid; (b) with anti-scattering grid

4 结 论

1) 设计了一种适用于中能闪光照相实验的降散射网栅,网栅为钨制通孔单膜片型,幅面满足中能闪光照相基础物理实验的成像要求;

2) 以450 kV商用X光机为光源,利用蒙特卡罗模拟技术提出了中能降散射网栅的实验验证方法;

3) 针对研制的网栅样机开展了450 kV网栅降散射实验和数值模拟研究,结果表明降散射网栅的应用可有效提高实验样品的成像质量,铝球内界面的信噪比显著提升;数值模拟结果显示,使用降散射网栅后,样品芯部最大穿透点位置图像散射灰度与直穿灰度之比可降低约74.7%。

参 考 文 献

- 1 Watson S A, Lebeda C, Tubb A. The design, manufacture and application of scatter reduction grids in megavolt radiography[R]. Los Alamos National Laboratory, 1999, LA-UR-99-1011.
- 2 Watson S A, Kauppila T, Morrison L, *et al.*. Pulsed high energy radiographic machine emitting X-rays (PHERMEX) flash radiographic camera[C]. SPIE, 1997, 2869: 920-928.
- 3 Watson S A. Contrast in radiography: The princess and the pea[R]. Los Alamos National Laboratory, 2005, LA-UR-05-0950.
- 4 Watson S A, Appleby M, Klinger J, *et al.*. Design, fabrication and testing of a large anti-scatter grid for megavolt γ -ray imaging[C]. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005, 2: 717-721.
- 5 Harsh J F, Hull L, Mendez J, *et al.*. Shot H3837: Darht's first dual-axis explosive experiment[C]. Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, 2012, 1426(1): 361-363.
- 6 Morris C L, Ables E, Alrick K R, *et al.*. Flash radiography with 24 GeV/c protons[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(10): 104905.
- 7 Tang C M, Fischer E K, Guckel H. Anti-scattering X-ray grid[J]. Microsystem Technologies, 1998, 4(4): 187-192.
- 8 Fahrig R, Mainprize J G, Robert N, *et al.*. Performance of glass fiber antiscatter devices at mammographic energies[J]. Medical Physics, 1994, 21(8): 1277-1282.
- 9 Bucky G. An improved device for obtaining rontgen ray exposures[P]. US Patent 1164987, 1915.

- 10 Makarova O V, Yang G H, Amstutz P T, *et al.*. Fabrication of antiscatter grids and collimators for X-ray and gamma-ray imaging by lithography and electroforming[J]. *Microsystem Technologies*, 2008, 14(9-11): 1613-1619.
- 11 Kafi M A, Maalej N, Naqvi A A. Scatter dose calculation for anti-scatter linear grids in mammography[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67(10): 1837-1841.
- 12 Tang C M, Makarova O V. Anti-scatter grid and collimator designs and their motion, fabrication and assembly[P]. US Patent 20030026386 AL, 2003: 6252938.
- 13 Tromans C E, Diffey J, Brady S M. Investigating the Replacement of the Physical Anti-Scatter Grid with Digital Image Processing[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 205-212.
- 14 Coleman N J, Cowen A R, Parkin G J S. Effect on mammographic CR image quality of removing the anti-scatter grid[J]. *Radiography*, 2000, 6(3): 199-204.
- 15 Lehmann V, Ronnebeck S. MEMS techniques applied to the fabrication of anti-scatter grids for X-ray imaging[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 95(2-3): 202-207.
- 16 Guckel H, Skrobis K J, Christenson T R, *et al.*. Micromechanics for actuators via deep X-ray lithography[C]. SPIE, 1994, 2194: 2-10.
- 17 Guckel H, Skrobis K J, Klein J, *et al.*. Micromechanics via X-ray assisted processing[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1994, 12(4): 2559-2564.
- 18 Wang Shaogang, Wang Sucheng, Zhang Lei. Application of high resolution transmission X-ray tomography in material science[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(8): 897-910.
王绍钢, 王苏程, 张磊. 高分辨透射X射线三维成像在材料科学中的应用[J]. *金属学报*, 2013, 49(8): 897-910.
- 19 Ji Xing, Luo Xian, Yang Yanqing, *et al.*. Research progress of nondestructive testing for continuous fiber-reinforced metal-matrix composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(S2): 401-405.
吉幸, 罗贤, 杨延清, 等. 连续纤维增强金属基复合材料无损检测研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(S2): 401-405.
- 20 Shi Shaomeng, Chen Rongchang, Xue Yanling, *et al.*. X-ray microscopic imaging of low Z material wrapped by strongly absorbing medium[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6319-6328.
师绍猛, 陈荣昌, 薛艳玲, 等. 强吸收介质内部低Z材料结构的X射线显微成像研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(10): 6319-6328.
- 21 Liu Lixiang, Du Guohao, Hu Wen, *et al.*. Application of quantitative imaging to elimination of scattering effect on X-ray in-line outline imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(12): 6387-6394.
刘丽想, 杜国浩, 胡雯, 等. 利用定量相衬成像消除X射线同轴轮廓成像中散射的影响[J]. *物理学报*, 2006, 55(12): 6387-6394.
- 22 Chen Yongtao, Tang Xiaojun, Li Qingzhong. Phase transition and influence of phase transition on spall in α phase Fe-based alloy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 493-501.
陈永涛, 唐小军, 李庆忠. Fe基 α 相合金的冲击相变及其对层裂行为的影响研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 493-501.
- 23 Chen Yongtao, Ren Guowu, Tang Tiegang, *et al.*. Experimental diagnostic of melting fragments under explosive loading[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(11): 393-398.
陈永涛, 任国武, 汤铁钢, 等. 爆裂加载下金属样品的熔化破碎现象诊断[J]. *物理学报*, 2013, 62(11): 393-398.
- 24 Liu Jun, Liu Jin, Guan Yonghong, *et al.*. Design of MeV anti-scatter grid in flash radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8): 2047-2051.
刘军, 刘进, 管永红, 等. 闪光照相中MeV级网栅的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(8): 2047-2051.
- 25 Briesmeister J F. MCNP - a general Monte Carlo N-particle transport code, version 4B[R]. Los Alamos National Laboratory, 1997, LA-12625-M.
- 26 Liu Jun, Liu Jin, Shi Jiangjun. Monte-Carlo research of flash radiography about FTO at 3 m to the target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(9): 1210-1214.
刘军, 刘进, 施将君. FTO客体3 m闪光照相的Monte-Carlo研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(9): 1210-1214.
- 27 Li Biyong, Shi Jiangjun, Liu Jin, *et al.*. Numerical simulation of distribution of scattered exposure and reduced scatter in flash radiographic system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(5): 788-792.
李必勇, 施将君, 刘进, 等. 闪光照相系统的散射分布与降散射的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(5): 788-792.
- 28 Jing Yuefeng, Liu Jun, Guan Yonghong. Inpainting method for flash radiographic anti-scatter grid image based on neural networks[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3): 751-754.
景越峰, 刘军, 管永红. 基于神经网络的闪光照相网栅图像修补[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(3): 751-754.