

KB型X射线微聚焦光学系统

王新, 陈亮, 徐捷, 穆宝忠

(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:根据X射线荧光分析的需求,设计了高集光效率X射线掠入射聚焦光学系统.提出了“长物距、短像距”的点对点聚焦KB光学系统构型,系统的集光立体角为 4.5×10^{-6} sr.根据光学结构,设计了反射镜的Pt薄膜,实现了对6.4 keV X射线的高反射,集光效率为 2×10^{-6} ,较直径100 μm 针孔的集光效率提高了1个量级.利用KB实验系统开展了X射线聚焦实验,获得了高亮度的微焦点.

关键词:KB聚焦;集光效率;掠入射;X射线;荧光分析

中图分类号:O434.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.08.006

X射线荧光分析(X-ray fluorescence analysis, XRF)技术是利用初级X射线光子激发待测样品中的原子,使之产生荧光(次级X射线)而进行物质成分分析和化学形态研究的方法,在地质矿产、生物医学、环境科学、材料科学、人文考古和公共安全等领域具有重要的应用^[1].XRF分析也是大学物理理论和实验教学的重要内容^[2].

目前,传统的实验室使用的X射线荧光光谱仪采用直接辐照的方式,即利用放射源或X射线光管发出的初级X射线直接照射样品,产生的荧光光子由闪烁体计数器(波长色散型)或能谱探测器(能量色散型)接收.若采用直接辐照的方式进行微区X射线荧光分析(μXRF),则需要用直径约百微米的针孔来限制光束的辐照范围,从而针对微小区域进行荧光光谱分析.因此,辐照样品的X射线光通量很低,导致光谱信噪比差且检测时间长.近些年来,随着技术的发展,高性能X射线聚焦系统(X-ray focusing system, XFS),例如KB^[3],Montel^[4],Göbel^[5]聚焦系统及毛细管透镜^[6]等,在XRF领域获得应用,提高了光谱的信噪比.例如,利用KB聚焦镜(单块反射镜长度可达几十cm甚至更大)将同步辐射的平行光束聚焦到约1 μm 尺度,可以对许多物质进行 μXRF 分析,将 μXRF 提升到了新台阶^[7].但是,该类

XFS的研制技术难度大且仪器价格很昂贵,因此,多用于同步辐射、加速器等超大型科学装置上,还很难普及应用^[8-9].

因此,针对XRF光谱信噪比低且耗时长的问题,本文开展了KB型X射线微聚焦光学系统的研究.提出了“长物距、短像距”的点对点聚焦KB构型,设计了KB聚焦系统的光学结构以及反射镜薄膜,实现了约 2×10^{-6} 的集光效率,较直径100 μm 针孔提高了1个数量级.利用KB系统开展了X射线聚焦实验,获得了高亮度的微焦点.

1 KB聚焦系统

通过聚焦系统收集由辐射源(X射线光管或放射源)发出的初级X射线,聚焦到样品,可以在样品表面获得尺度很小的高亮度光斑.由初级X射线激发出的荧光光子再由闪烁体计数器或能谱探测器收集,从而形成荧光光谱进行物质分析,如图1所示.因此,高集光效率的聚焦系统是开展 μXRF 研究的关键.

KB结构的光学系统由于子午和弧矢2块球面或柱面反射镜构成,消除了掠入射条件下单块反射镜存在的严重像散,实现了子午和弧矢方向上光束的成像或聚焦,如图2所示.KB光学系统多用于高分辨X射线成像,可实现小于10 μm 分辨

收稿日期:2020-04-28;修改日期:2020-05-16

基金项目:国家重点研发计划项目资助(No.2017YFA0403304, No.2017YFA0403302)

作者简介:王新(1980-),男,山东德州人,同济大学物理科学与工程学院讲师,博士,研究方向为X射线光学及系统. E-mail:wangx@tongji.edu.cn



率的成像,主要用于 ICF 诊断领域^[10]. KB 聚焦系统主要应用于同步辐射装置,采用大型反射镜对平行 X 射线束进行聚焦. 由于实验室 XRF 采用的辐射源均为点光源,因此,基于“点对点”聚焦的需求,在常规 KB 成像结构的基础上设计了“长物距、短像距”的构型,实现对辐射源的缩小聚焦.

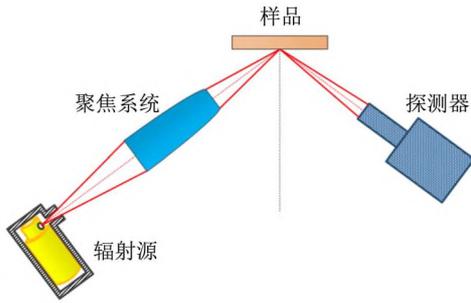


图 1 X 射线荧光分析原理图

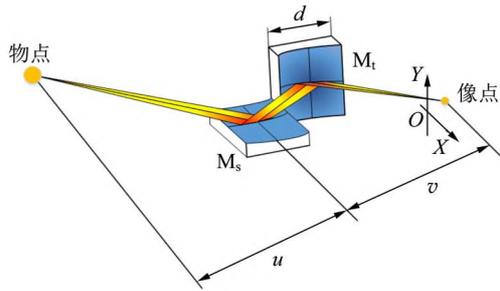


图 2 KB 光学系统原理图

在图 2 中,光轴沿 Z 方向(垂直于 XOY 平面),第 1 块反射镜 M_s 为弧矢镜,工作面位于弧矢面 XOZ;第 2 块反射镜 M_t 为子午镜,工作面位于子午面 YOZ. KB 光学系统在弧矢和子午方向的聚焦公式可以表示为^[10]

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f_1} = \frac{2}{R_1 \sin \theta_1}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{u+d} + \frac{1}{v-d} = \frac{1}{f_2} = \frac{2}{R_2 \sin \theta_2}, \quad (2)$$

式中, u 为物距,表示物点(辐射源)到第 1 块反射镜中心的距离; v 为像距,为第 1 块反射镜中心到像点的距离; d 为沿光轴方向的有效镜长; f_1 和 f_2 分别是第 1 块和第 2 块反射镜的焦距; R_1 和 R_2 分别为第 1 块和第 2 块反射镜工作面的曲率半径; θ_1 和 θ_2 分别为第 1 块和第 2 块反射镜的中心掠入射角.

根据 XRF 实验要求,设计 KB 聚焦系统的光

学结构,参量见表 1 示,其中 L 为反射镜长. 由光学结构决定的系统集光立体角为 4.5×10^{-6} sr. KB 聚焦系统的反射镜均采用柱面镜,在子午方向和弧矢方向的掠入射角分别为 0.52° 和 0.65° ,放大倍率分别为 0.08 和 0.14,即系统将物(辐射源)分别缩小 12.5 倍和 7.1 倍. 子午方向和弧矢方向放大倍率的差异是由 2 个方向物像距不同造成的. 对于常规 X 射线光管,焦斑约为 1 mm,则通过该 KB 系统可以在像面获得约 $100 \mu\text{m}$ 的聚焦 X 射线光斑,可以用来对样品的微区进行 XRF 分析. KB 聚焦系统的总长度仅 480 mm,体积较小,适合实验室应用.

表 1 KB 聚焦系统的设计结果

反射镜	R/mm	L/mm	u/mm	v/mm
M_s	9 250	30	420	60
M_t	7 140	20	445	35

为了检验系统的聚焦性能,构建了 KB 系统的光线追迹模型,仿真了系统的点列图. 图 3 为计算的像面位置系统聚焦像的分布,可以看出,聚焦像在子午方向和弧矢方向的大小分别为 $80 \mu\text{m}$ 和 $35 \mu\text{m}$,放大倍率差异是造成 2 个方向聚焦像不同的原因. 因此,利用该 KB 系统可以在像面实现约 $100 \mu\text{m}$ 尺度的聚焦.

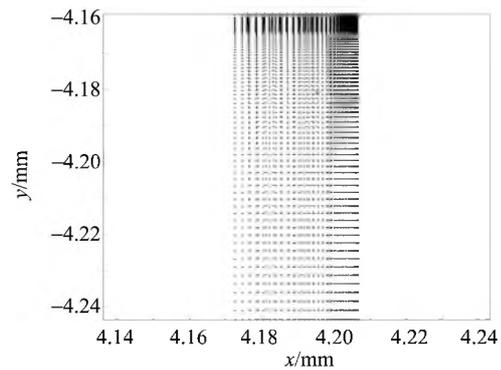


图 3 系统在焦点处的点列图

2 KB 反射镜

KB 聚焦系统的光学元件为超光滑反射镜,表面镀制 Pt 单层膜,实现对 X 射线的高反射. 根据式(1)和式(2),反射镜曲率半径决定了系统的焦距,所以,精确检测反射镜曲率半径对于 KB 系统的装调及 X 射线聚焦实验至关重要. 利用白光

干涉轮廓仪(Bruker)检测了抛光的子午镜 M_1 和弧矢镜 M_2 的表面形貌,如图 4 所示. 白光干涉轮廓仪的放大倍率为 2.5 倍,检测范围为 2.5 mm. 图 4 中横坐标表示镜面的坐标,纵坐标表示反射镜表面的高度,(0,0)点为镜面中心. 根据图 4 的测试结果,计算得到子午镜 M_1 和弧矢镜 M_2 的曲率半径分别为 7 131.7 mm 和 9 314.8 mm,与设计值的偏差分别为 0.1%和 0.7%,对焦点位置的影响可以忽略.

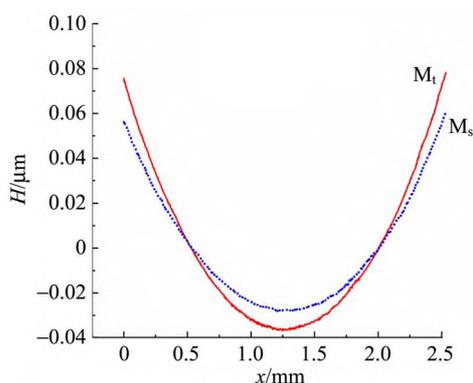
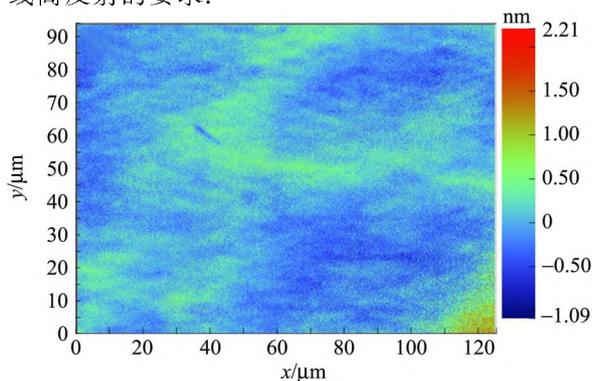
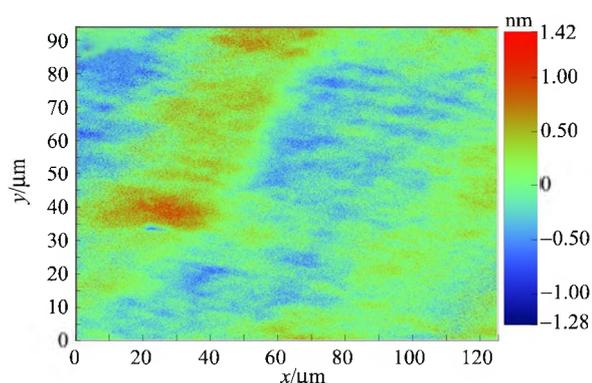


图 4 反射镜的曲率半径检测结果

对于 X 射线光学元件,工作面的表面粗糙度会影响镀制的 Pt 薄膜对 X 射线的反射率,直接决定了系统的集光效率和聚焦光斑的亮度. 对于该系统,要求 2 块超光滑反射镜的表面粗糙度的均方根值达到 0.3 nm. 利用白光干涉轮廓仪的 50 倍镜头检测子午镜和弧矢镜的表面粗糙度,结果如图 5 所示. 图 5 中横纵坐标均表示在反射镜表面的检测范围,分别为 125 μm 和 94 μm . 图中的颜色代表了反射镜表面的起伏. 根据实测结果, M_1 和 M_2 反射镜的表面粗糙度的实测均方根值分别为 0.28 nm 和 0.29 nm,完全满足对 X 射线高反射的要求.



(a) M_1



(b) M_2

图 5 反射镜的表面粗糙度

KB 聚焦系统的工作能点为 6.4 keV(Fe $K\alpha$ 辐射). 为了实现对 X 射线的高反射,需要在光学元件表面镀制 Pt 单层膜,薄膜的厚度为 30 nm. 图 6 为计算得到的 M_1 和 M_2 反射镜的 Pt 薄膜对 6.4 keV 能点 X 射线的反射率,分别为 0.77 和 0.62. 因此,KB 聚焦系统对 6.4 keV 能点 X 射线的透过率为 0.48,集光效率为 2×10^{-6} .

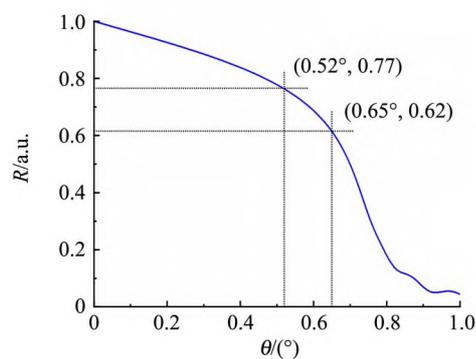


图 6 反射镜 Pt 薄膜的反射率

3 X 射线聚焦实验

利用 KB 聚焦系统开展 X 射线聚焦实验,实验光路结构和实验装置如图 7 和图 8 所示. X 射线源采用 Fe 靶 X 射线光管,焦斑大小为 1 mm \times 10 mm,工作电压为 35 kV,电流为 18 mA. 采用 2 mm 直径的铜质针孔限定 X 射线光束并置于物点位置. KB 物镜安装在高精度六维电控调节台上,精确调整物镜的姿态,使针孔位于 KB 物镜的光轴上. 探测器采用英国 Photonic Science 的 VHR-11M-90 型科学级制冷 X 射线 CCD 相机,其有效探测范围为 72 mm \times 48 mm,像素尺寸为 18 μm . 实验中,探测器每次积分的时间为 5 s.

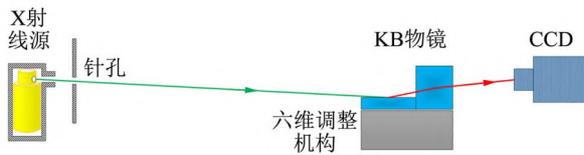


图 7 KB 聚焦实验光路图

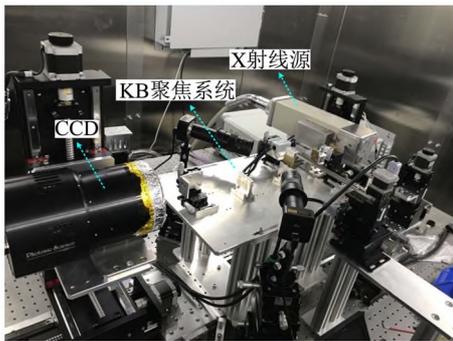


图 8 KB 聚焦实验装置图

由于 X 射线聚焦光斑的亮度很高,为了避免对 X 射线 CCD 探测器造成损伤,CCD 探测器置于 KB 聚焦系统的离焦位置. 图 9(a)和图 9(b)分别为距离 KB 聚焦系统像面 60 mm 和 100 mm 位置采集得到的 X 射线聚焦像. 由图 9 可以看出,聚焦像的分布均匀,由于离焦的原因,聚焦像已近似圆形.



(a)60 mm (b)100 mm

图 9 离焦位置实测的聚焦像

图 10 为聚焦像的强度分布,图中曲线 A 和 B 分别对应图 9(a)和图 9(b). 根据实测结果,在 60 mm 位置的聚焦斑直径为 277 μm ,强度计数为 1 940;在 100 mm 位置的聚焦斑直径为 554 μm ,强度计数为 1 487. 同样的积分时间,未经聚焦系统的直射 X 射线的强度计数约为 900,所以,在 60 mm 位置聚焦像的强度约为直射光的 2 倍. 像面最佳位置聚焦像的尺寸更小,强度相对于直射光的差异会更大.

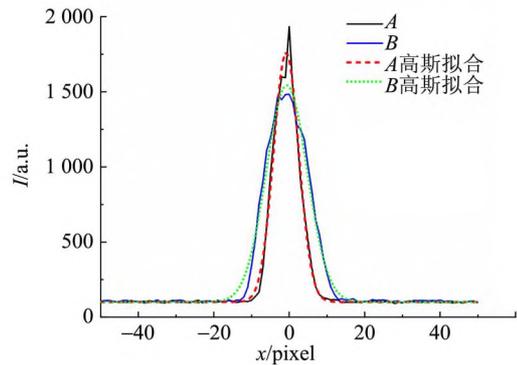


图 10 聚焦像的强度分布

4 结 论

围绕科研和教学 XRF 分析,开展了 KB 型 X 射线聚焦光学系统研究. 提出了“长物距、短像距”的点对点聚焦 KB 构型,设计了 KB 聚焦系统的光学结构及反射镜薄膜,实现了 2×10^{-6} 的集光效率,较直径 100 μm 针孔的集光效率提高了 1 个量级. 利用研制的 KB 系统开展了 X 射线聚焦实验,获得了高亮度的微焦点.

参考文献:

- [1] 吉昂,陶光仪,卓尚军,等. X 射线荧光光谱分析 [M]. 北京:科学出版社,2003:112-197.
- [2] 熊俊. 近代物理实验[M]. 北京:北京师范大学出版社,2017:243-263.
- [3] Liu C, Ice G E, Liu W, et al. Fabrication of nested elliptical KB mirrors using profile coating for synchrotron radiation X-ray focusing [J]. Applied Surface Science, 2012,258(6):2182-2186.
- [4] Liu W J, Ice G E, Assoufid L, et al. Hard X-ray nano-focusing with Montel mirror optics [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2011,649(1):169-171.
- [5] Troussel P, Dennetiere D, Maroni R, et al. Multilayer optics for monochromatic high-resolution X-ray imaging diagnostic in a broad photon energy range from 2 keV to 22 keV [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2014,767:1-4.
- [6] MacDonald C A. Focusing polycapillary optics and their applications [J]. X-ray Optics and Instrumentation, 2010,2010:867049.

(下转 39 页)

- [14] 何博,王祖源,万昆. 基于 WebGL 的三维物理模型设计与开发[J]. 中国教育信息化,2016(3):75-79.
- [15] 蒋逢春,吴杰,张艳萍,等. “停课不停学”背景下大学物理实验及仿真在线开放课程的实践与拓展[J]. 物理实验,2020,40(4):42-46.
- [16] 熊永红,肖利霞,谢柏林,等. 新冠肺炎疫情下教书育人的探索与实践[J]. 物理实验,2020,40(4):27-30.
- [17] 唐艳妮,李雪琴,赵云芳,等. 疫情中的大学物理实验线上教学探索[J]. 物理实验,2020,40(5):31-35.

Online demonstration experiment of fluid mechanics based on WebGL

SONG Xiao-peng, HE Xiu-jin, GU Xiao-min, WU Guo-shan, WANG Bin-wu

(School of Energy and Building Environment, Guilin University of
Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Taking in the class experiment of engineering fluid mechanics as an example, the online demonstration experiment based on WebGL technology had been developed with fast development, easy deployment and low cost, which had realized the functions of online equipment display, demonstration and data collection.

Key words: WebGL; online demonstration experiment; fluid mechanics

[责任编辑:郭 伟]

(上接 35 页)

- [7] Reguer S, Mocuta C, Thiaudière D, et al. Combination of X-ray synchrotron radiation techniques to gather information for clinicians [J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2016,19(11/12):1424-1431.
- [8] Mera M F, Rubio M, Pérez C A, et al. SR μ XRF and XRD study of the spatial distribution and mineralogical composition of Pb and Sb species in weathering crust of corroded bullets of hunting fields [J]. *Microchemical Journal*, 2015,119:114-122.
- [9] Gong Xuepeng, Lu Qipeng, Song Yuan. Mechanical design and performance evaluation of KB mirror system for the ARPES beamline at SSRF [J]. *Precision Engineering*, 2016,46:166-176.
- [10] Li Yaran, Dong Jianjun, Xie Qing, et al. Development of a polar-view Kirkpatrick-Baez X-ray microscope for implosion asymmetry studies [J]. *Optics Express*, 2019,27(6):8348-8360.

X-ray microfocus optical system based on KB configuration

WANG Xin, CHEN Liang, XU Jie, MU Bao-zhong

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The grazing incidence X-ray focusing system with high collected efficiency was developed aimed at the demand of X-ray fluorescence analysis. The configuration of point-to-point KB focused system with long object distance and short image distance was proposed, and the optical structure of the KB system was designed. The solid angle of the system was 4.5×10^{-6} sr. According to the optical structure, the Pt film of the mirrors was designed to achieve high reflectivity for 6.4 keV X-ray, and the collected efficiency was about 2×10^{-6} , which was about an order of magnitude higher than that of the pinhole with 100 μ m diameter. Based on the established system, the X-ray focusing experiments were carried out, and the X-ray microfocus spots with high brightness were obtained.

Key words: KB focusing; collected efficiency; grazing incidence; X-ray fluorescence analysis

[责任编辑:任德香]