

# 会聚X射线圆柱形直导管特性研究\*

李玉德<sup>1)</sup> 林晓燕 王大椿

(北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室 北京 100875)

(北京师范大学低能核物理研究所 北京 100875)

(北京市辐射中心 北京 100875)

**摘要** 计算了圆柱形直导管会聚区域的功率密度增益 $K$ 和等效距离 $L_{eq}$ 随导管长度和导管内径的变化值. 实验上测量了能量为8.04keV的X射线经过半径为0.54mm的直导管的 $K$ 和 $L_{eq}$ 以及会聚位置的光强分布, 并和计算结果进行了对比. 结果表明: 圆柱形直导管在小尺寸样品X射线衍射领域具有良好的应用前景.

**关键词** 圆柱形直导管 功率密度增益 等效距离 光强分布

## 1 引言

20世纪90年代发展起来的导管X射线光学和以它为基础的X光聚束系统得到迅速发展和广泛应用<sup>[1-3]</sup>. X光单导管是最简单的一种X光聚束系统, 有圆柱形直导管、圆柱形弯管、圆锥形直导管、旋转椭球管、旋转抛物体管等几种形式. 圆锥形直导管和旋转椭球管由于具有良好的会聚X射线的作用, 在导管X射线光学研究的初期就被人们用在X射线微束荧光分析领域<sup>[4, 5]</sup>.

现有的几种形式的整体X光透镜是由圆柱形直导管或复合圆柱形直导管拉制而成, 圆锥形直导管等其他形式的X光单导管也是由圆柱形直导管制作出来的. 由于X射线在圆柱形直导管中传输时有简单明了的轨迹, 人们常用它研究X光导管的传输特性和检验X光导管传输理论的正确性<sup>[6, 7]</sup>. 除了瑞典的A. RINDBY<sup>[8]</sup>曾用它来测量不同能量的X射线在光滑玻璃内表面的全反射临界角外, 圆柱形直导管没有像圆锥形直导管那样具体而广泛的应用.

通过对圆柱形直导管传输特性的理论研究, 发现圆柱形直导管 also 具有很强的会聚X射线的作用; 经过实验测量得到了和理论计算相一致的结果, 提出了圆柱形直导管新的应用方向.

## 2 圆柱形直导管会聚特性的理论分析

圆柱形直导管的会聚作用是由于进入导管的单能X射线在导管光滑内表面发生一次全反射后共同集中到某一小区域引起的. 图1是点光源发出的X射线经过圆柱形直导管的传输示意图, 可以直观地说明圆柱形直导管会聚X射线的原理和特点. A点表示一个点光源, 光源到导管入口端的距离用 $f_1$ 表示, 管长为 $L$ , 导管半径为 $R$ . 当 $R \leq f_1 \tan \theta_c$ 时, 其中 $\theta_c$ 是全反射临界角, X射线在导管入口端满足全反射条件, DE段是发生全反射后的X射线集中的会聚区域, 长度为 $2L$ . 点光源是一种理想的情况, 对于实际使用的X光源, 会聚区域的长度随光源尺寸的增大而略微变长.

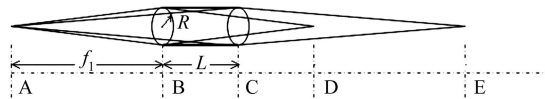


图1 光线传输示意图

可以用功率密度增益和等效距离来描述X光导管的会聚特性. 功率密度增益定义为:  $K = \frac{j_2}{j_1}$ ,  $j_1$ 是无导管时由X光源发射到某一距离处的X光功率密度,  $j_2$ 是有导管时同一距离处的X光功率密度. 若无导

2005 - 12 - 12 收稿

\* 北京市优秀人才培养专项经费资助

1) E-mail: liyude@bnu.edu.cn

管时离X光源较近的某一点处的X光功率密度等于有导管时距离X光源较远 $L$ 处的X光功率密度, 则把该点到X光源的距离定义为导管的等效距离 $L_{eq}$ . 由于X光功率密度和到X光源的距离平方成反比, 所以

$$L_{eq} = \frac{L}{\sqrt{K}}.$$

根据光线追迹理论建立了X射线在几种单导管中传输的计算模型, 使用MATLAB语言编写了模拟程序. 以下是能量为8.04keV的X射线在圆柱形直导管

中传输的理论计算结果.

### 2.1 $K$ , $L_{eq}$ 随接收孔到导管出口端距离 $f_2$ 的变化

直导管半径 $R=0.3\text{mm}$ , 管长 $L=40\text{mm}$ , X光源到导管入口端的距离 $f_1=100\text{mm}$ . 表1是使用直径为0.1mm的接收圆孔的功率密度增益和等效距离随接收圆孔到导管出口端的距离 $f_2$ 变化的计算结果. 其中 $K_1$ ,  $L_{eq1}$ 是X光源半径 $r_1=0.05\text{mm}$ 的计算结果,  $K_2$ ,  $L_{eq2}$ 是光源半径 $r_2=0.1\text{mm}$ 的计算结果.

表1 直径0.1mm接收孔的 $K$ 和 $L_{eq}$

$f_2/\text{mm}$	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$K_1$	23.1	33.9	40.4	43.7	44.8	43.3	38.9	31.9	23.2
$L_{eq1}/\text{mm}$	41.6	36.1	34.6	34.8	35.9	37.9	41.6	47.8	58.1
$K_2$	14.9	18.6	21.8	23.9	24.5	23.2	20.5	17.1	14.1
$L_{eq2}/\text{mm}$	51.8	48.6	47.0	46.9	48.4	51.9	57.4	65.1	74.4

可以看出: 圆柱形直导管的 $K$ 和 $L_{eq}$ 在会聚区域都存在着极值,  $K$ 为极大值,  $L_{eq}$ 为极小值,  $K$ 和 $L_{eq}$ 的极值点在不同的 $f_2$ 处; 随着光源尺寸的变大, 圆柱形直导管的 $K$ 值明显减小,  $L_{eq}$ 值则明显增加.

### 2.2 $K$ , $L_{eq}$ 随导管长度 $L$ 的变化

计算采用的光源半径是0.05mm, 光源到导管入口端的距离 $f_1=100\text{mm}$ , 固定光源到接收孔的距离为220mm. 表2是 $K$ ,  $L_{eq}$ 随导管长度变化的计算结果, 其中 $K_1$ ,  $L_{eq1}$ 接收孔直径为0.05mm的计算结果,  $K_2$ ,  $L_{eq2}$ 是接收孔直径为0.3mm的计算结果.

表2  $K$ ,  $L_{eq}$  随导管长度的变化

$L/\text{mm}$	40	50	60	70	80	90
$K_1$	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
$L_{eq1}/\text{mm}$	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2
$K_2$	10.41	11.45	11.83	11.91	11.92	11.93
$L_{eq2}/\text{mm}$	68.18	65.02	63.96	63.73	63.72	63.72

可以看出: 对一个确定尺寸的X光源, 当接收孔直径较小时,  $K$ 和 $L_{eq}$ 不随导管长度的变化而变化, 只有当孔径增大到一定程度时, 改变导管长度才会引起 $K$ 和 $L_{eq}$ 的变化.

### 2.3 $K$ 和 $L_{eq}$ 随导管半径 $R$ 的变化

计算采用的光源半径是0.05mm, 光源到导管入口端的距离 $f_1=100\text{mm}$ , 直导管长 $L=60\text{mm}$ , 接收孔直径0.05mm, 接收孔到管出口端的距离 $f_2=60\text{mm}$ . 图2显示了 $K$ 和 $L_{eq}$ 随导管半径 $R$ 的变化规律.

可以看出: 圆柱形直导管的 $K$ 值和导管半径 $R$ 成正比关系;  $L_{eq}$ 和导管半径 $R$ 成近似反比关系.

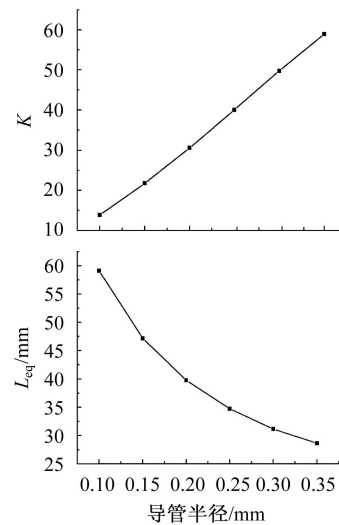


图2  $K$ 和 $L_{eq}$ 随导管半径的变化曲线

## 3 实验结果和讨论

为了验证圆柱形直导管的会聚特性以及理论计算结果的可靠性, 用照相法和小孔扫描法进行了实验测量. 实验用德国RTW公司生产的MCBM50-0,6B型铜靶X光源, 光源尺寸为0.05mm×0.05mm. 在光源出口加Ni片来获得单能X射线.

### 3.1 光强分布的照相

导管参数及实验条件: 导管长度 $L=80\text{mm}$ , 导管半径 $R=0.54\text{mm}$ , 光源到导管入口端的距离 $f_1=80\text{mm}$ . 分别在 $f_2=50\text{mm}$ ,  $120\text{mm}$ 处用医用X胶片照相, 结果如图3所示, 对应的光斑直径约为1.45mm和1.99mm. 图4是相同条件下的计算结果, 对应的光斑直径为1.43mm和1.92mm.

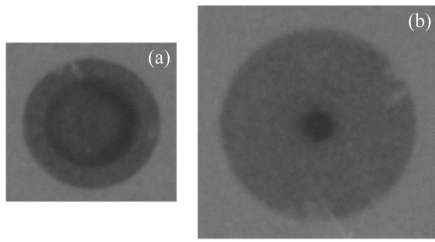


图3 在不同 $f_2$ 处的光强分布照片  
(a)  $f_2=50\text{mm}$ ; (b)  $f_2=120\text{mm}$ .

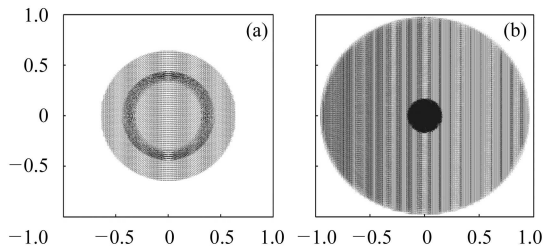


图4 在不同 $f_2$ 处的光强分布模拟图  
(a)  $f_2=50\text{mm}$ ; (b)  $f_2=120\text{mm}$ .

对比图3和图4可以看出:理论和实验符合得较好,圆柱形直导管具有会聚X射线的作用.

### 3.2 $K$ 值的测量

分别用直径为0.05mm和0.1mm的接收孔测量了圆柱形直导管在会聚区域的功率密度增益 $K$ .表3是接收孔直径为0.05mm的结果,其中 $K_1$ 是理论结果, $K_2$ 是实验结果.

表3 接收孔直径为0.05mm的理论和实验结果

$f_2/\text{mm}$	130	135	140	145	150	155
$K_1$	76.5	104.4	119.6	124.5	117.4	97.4
$K_2$	65	73	82	97	86	83

可以看出:实验和理论结果有一定偏差,原因是实验所用圆柱形直导管非理想导管,沿导管轴心方向的内径和垂直导管轴心平面的导管圆度都会和理想情况有偏差,都会造成X射线在某一会聚点的发散,接收孔径越小,影响会更明显.即使这样,工作距离( $f_1+L+f_2$ )为300mm左右功率密度增益接近一百的实验结果也是出乎人们预料的.

表4是接收孔直径为0.1mm的结果,其中 $K_1$ 是理论结果, $K_2$ 是实验结果.

表4 接收孔直径为0.1mm的理论和实验结果

$f_2/\text{mm}$	130	135	140	145	150	155
$K_1$	46.3	60.3	70.1	72.6	67.0	56.0
$K_2$	66	70	69	64	53	50

可以看出,实验和理论的最大值不在同一位置.如果将实验值后移5—10mm,实验和理论结果会符合

得很好.原因同上,即实验所用圆柱形直导管非理想导管,漫散射对较大接收孔径的 $K$ 值影响不大,但影响会表现在前后位置的偏移上.

### 3.3 会聚区域的小孔横向扫描

用直径为0.05mm的接收孔横向扫描测量了圆柱形直导管在 $f_2=145\text{mm}$ 处的光强分布,实验用电压电流分别是20kV和 $5\mu\text{A}$ ;用直径为0.1mm的接收孔测量了圆柱形直导管在 $f_2=135\text{mm}$ 处的光强分布,实验用电压电流分别是20kV和 $1\mu\text{A}$ .实验结果和相同条件下的理论结果如图5所示,0.05mm的接收孔条件下,实验和理论的横向扫描曲线的半高宽分别是0.13mm和0.10mm;0.1mm的接收孔条件下,实验和理论的横向扫描曲线的半高宽分别是0.13mm和0.09mm.

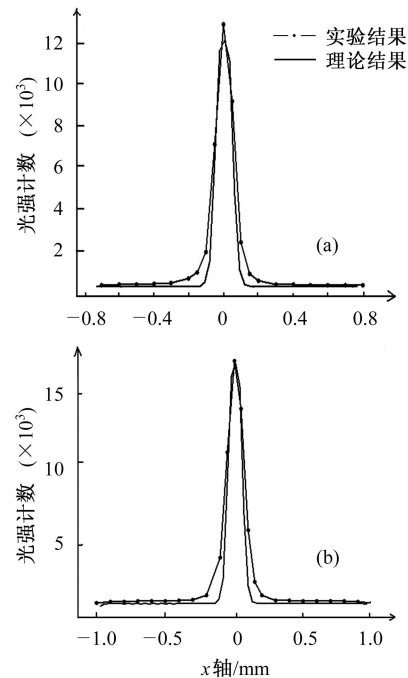


图5 小孔横向扫描实验和理论结果的比较  
(a) 小孔直径0.05mm; (b) 小孔直径0.1mm.

与理论结果相比,两种尺寸的小孔横向扫描测量的光强分布都略有展宽,同样也是由非理想导管造成的漫散射引起.

## 4 结论

从理论和实验两方面证明了圆柱形直导管具有良好的会聚X射线的作用.与圆锥形直导管相比,圆柱形直导管长度可以短至几十mm,非常容易制作出接近理想状态的圆柱形直导管.此外圆柱形直导管会聚区域可以远离导管出口,在使用时不像圆锥形直导管

那样实验样品必须紧靠导管出口, 导管和样品之间有足够空间, 给实际应用带来很大方便。

综上所述, 圆柱形直导管在生物大分子衍射<sup>[9]</sup>和

高压相变研究<sup>[10]</sup>等方面具有良好的应用前景, 小尺寸样品衍射领域是圆柱形直导管应用的新努力方向。

### 参考文献(References)

- 1 Wroblewski T, Bjeoumikhov A. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A538**: 771—777
- 2 Mroczka R, Zukocinski G, Kuczumow A. J. Alloy Compd., 2004, **382**: 311—319
- 3 Dabagov S B, Marcelli A, Cappuccio G et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **B187**: 169—177
- 4 Janssens K, Vekemans B, Vincze L et al. Spectrochim Acta, 1996, **B51**: 1661—1678
- 5 Attaelmanan A, Voglis P, Rindby A et al. Rev. Sci. Instrum., 1995, **66**: 24—27
- 6 CHEN Bao-Zhen. Acta Physics Sinica, 2000, **49**: 1933—1937(in Chinese)  
(陈宝振. 物理学报, 2000, **49**: 1933—1937)
- 7 Furuta K, Nakayama Y, Shoji M et al. Rev. Sci. Instrum., 1993, **64**: 135—142
- 8 Rindby A. Nucl. Instrum. Meth., 1986, **A294**: 536—540
- 9 CHEN Jun, HE Ye-Jun, LI Yu-De et al. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2000, **36**: 32—35 (in Chinese)  
(陈俊, 赫业军, 李玉德等. 北京师范大学学报(自然科学版), 2000, **36**: 32—35)
- 10 WANG Li-Jun, CHEN Liang-Chen, LI Feng-Ying et al. Chin. Phys. Lett., 1998, **15**: 284—286

## Study on the Convergent Function of a Cylinder Capillary Transmitting X-Ray<sup>\*</sup>

LI Yu-De<sup>1)</sup> LIN Xiao-Yan WANG Da-Chun

(The Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education,  
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

**Abstract** The power density gain and equivalent length of cylinder capillary with different lengths and radii are calculated with a simulation program. In experiment, with 8.04keV X-ray source the power density gain and equivalent length of cylinder capillary are measured and the experiment results are compared with the simulation. The conclusion is drawn that a cylinder capillary has great application prospect on crystal diffraction.

**Key words** cylinder capillary, power density gain, equivalent length, intensity distribution

Received 12 December 2005

\* Supported by Foundation of Outstanding Person, Beijing

1) E-mail: liyuede@bnu.edu.cn