

# 软X—射线滤光片透过率测试方法

邵桂英 薛立盛\*

## 一、引 言

随着科学技术的飞速发展,在天体物理、空间技术、激光核聚变等研究中,软X—射线辐射特性均需进行测定。星载X—射线望远镜,是观测太阳及天体软X—射线辐射状态的重要仪器,对天文学、国防科学研究都很重要。

软X—射线滤光片,是X—射线望远镜上配用的滤光片,它只透过软X—射线辐射,截掉可见、近紫外辐射。滤光片透过软X—射线的性能,直接影响X—射线望远镜成像质量。因此,滤光片透过软X—射线的性能,必须进行测定。

本文介绍了1nm—6nm软X—射线滤光片透过率测试方法。列举出各类样品测试结果,并对测量结果进行了误差分析。对测量系统的稳定度进行了测量和分析。

## 二、测试方法原理

实验表明,任一X—射线束,通过同一均匀物质时,X—射线强度的衰减与通过物质厚度成比例。根据比耳—兰伯特Beer—Lambert定律<sup>[1]</sup>

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot t}$$

式中:

$I$ ——透过吸收体后的X—射线强度。

$I_0$ ——入射X—射线强度。

$\mu_m$ ——质量吸收系数(与入射辐射波长、物质原子序数有关)。

$\rho$ ——吸收物质密度。

$t$ ——吸收物质几何厚度。

X—射线通过吸收物质后,其透过率定为 $T$ :

$$T = \frac{\text{透过X—射线辐射强度}}{\text{入射X—射线辐射强度}}$$

按比耳—兰伯特定律 $T$ 为:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot t}$$

根据此式,能够计算出不同物质的光谱透过特性。也可计算出透过率 $T$ 随吸收物质 $t$ 变化的特性。

$I$ 、 $I_0$ 是通过吸收物质前后的X—射线辐射强度,能够用实验仪器测量。根据上述原理,可以建立起测量软X—射线辐射强度的装置。测量装置由软X—射线辐射源、传输管道、样

\*: 参加本工作的还有唐健、李大明、崔松鹤同志。

品室、探测器和记录系统组成。

由于软X—射线只能在真空中传播，因此，测量系统必须配高真空抽气系统。工作压力低于 $10^{-6}$ Torr。真空系统应采用无油机组，以防污染。

### 三、测量装置

图1表示测量系统方框结构图。如图所示，X—射线源发射X—射线，经滤光片，通过入射狭缝进入单色仪，X—射线从出射狭缝射出，射入样品室，样品装在齿轮传动的样品槽上，轮流依次进入光路。软X—射线通过样品后，射入正比计数器，在X—射线作用下，正比计数器产生脉冲信号，由低噪声电荷灵敏放大器（前置放大器）、线性放大器（主放大器）放大后，送至1024道脉冲幅度分析器予以记录。

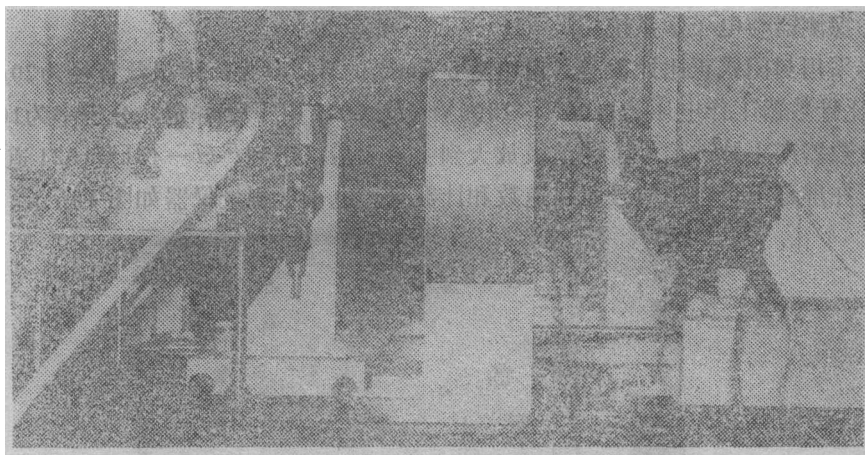
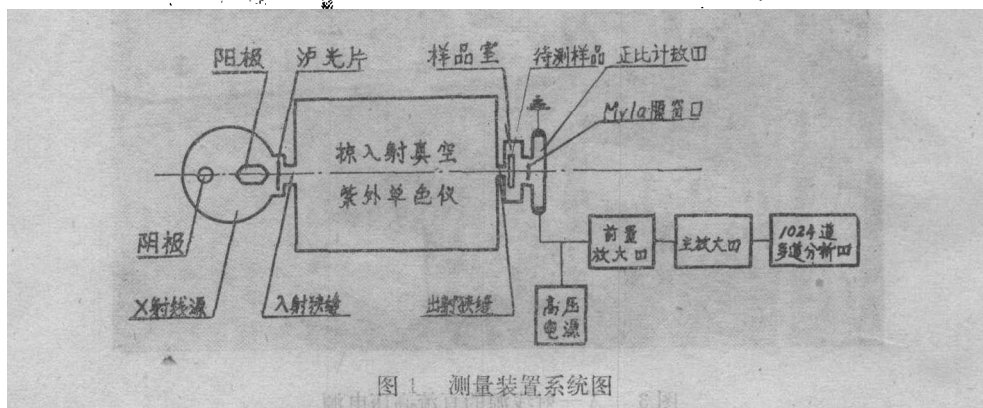


图2是测量装置的外视图，测量装置各部份简介如下：

#### (一) 软X—射线源

该测试装置采用亨克型软X—射线源见图2左侧，优点是污染小，谱线纯。采用固定阳极，配备三个阳极靶，即Al靶(1.48keV)、Cu靶(0.93keV)、C靶(0.277keV)。阴极是钨丝。采用去离子水冷却。射线源最大功率为100W，测量一般采用100W—250W (5000V, 10~50mA)。射线源是我所研制的。图3为X—射线源的直流高压电源。

#### (二) 247M掠入射真空紫外分光仪

该分光仪工作波段为0.1nm—250nm，入射狭缝是固定的，缝宽0~2mm可调，出射狭缝沿罗兰圆扫描，缝宽0—2mm可调。凹面衍射光栅，刻线数为600线/mm，半径为2.17m，闪耀角为2°4′。由丝杆传动实现出射狭缝扫描，波长由计数器指示。整个仪器配有排气系统，前级真空用机械泵，高真空采用油脂润滑的涡轮分子泵。

### (三) 滤光片样品室

样品室与单色仪出射狭缝相连接，设有八个样品槽，每次装入四个待测样品(φ10mm)，四个空槽，样品转换，由真空室外边的手轮转动，传给真空室内的齿轮来完成。转动手轮要求密封良好，转动时确保系统不漏气。

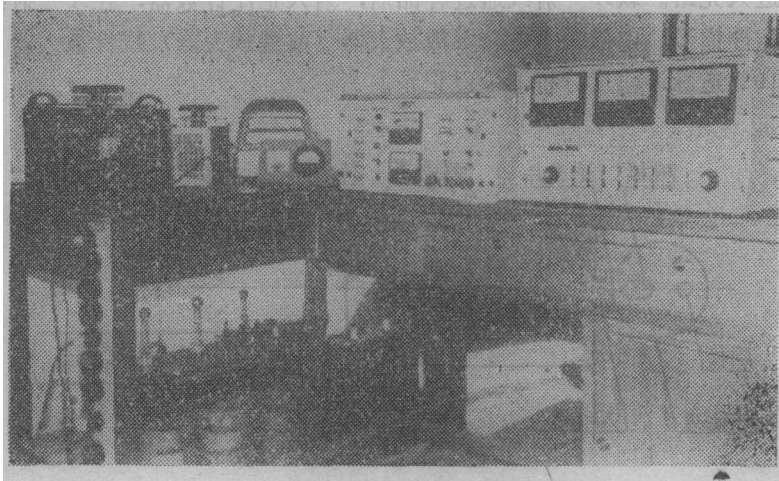


图3 X—射线源的直流高压电源

### (四) 探测器与电子学系统

探测器采用封闭式正比计数器，窗口是5μm厚的Mylar膜，阳极丝直径为20μm，材料为钨丝。正比计数器工作电压为1100V~1300V(D.C)，用Fe<sup>55</sup>标定，分辨率为16%左右。

正比计数器产生脉冲信号，经前级放大到主放大后，送到FH—451型1024道脉冲幅度分析器中，在屏幕上记录出信号所在道数和计数量。电子学测量仪器如图4所示。

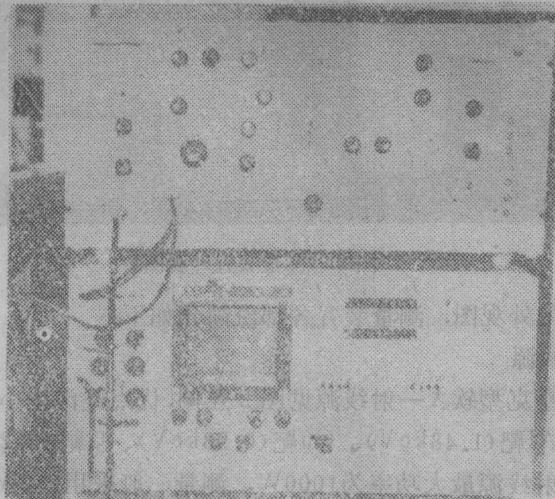


图4 电子学测量仪器图(主放大器、高压电源、FH—451型1024道幅度分析器)

#### 四、测试过程与测量结果举例

测试样品时, 首先选好 $X$ —射线源的阳极靶(确定波长), 用 $Fe^{55}$ 同位素辐射源与 $FH-451$ 型1024道脉冲幅度分析器, 标定好正比计数器所在的道数, 此时, 要选好放大器的放大倍率、微分、积分时间常数。把待测样品装入样品槽里, 空槽与样品槽间隔开排列。之后, 将 $X$ —射线源, 样品槽, 正比计数器等, 一并装到测量装置上, 拧好密封紧固螺钉。方可将整套测试系统进行排气, 当压力达到 $4 \times 10^{-6}$ Torr时, 便可进行测试。表1是几种不同样品测试结果举例。

表1中所列的测试数据, 第一次测量条件是: 阳极靶压为: 4400V, 5000V, 6000V, 对应的阳极电流是 5 mA, 6.6mA, 10.5mA; 分别采三组和两组数, 求其算术平均值。第二次测量条件是: 阳极靶压为 5000V, 阳极电流为10mA, 计数率为 850~1000次/秒, 采八组数, 计算其算术平均值。从两次测量结果的比较, 可以看到, 测量结果重复性比较好。

表1 [Al靶, 1.48keV]

样品 透过率 $T$ 次数	1 $\mu$ m厚聚丙烯薄膜		前置滤光片 (Al150nm + Ni网)		主滤光片 (2 $\mu$ mCH <sub>2</sub> +Al130nm+Ni网)	
	第一次	第二次	第一次	第二次	第一次	第二次
第一次采数	95.4	93.1	80.2	80.7	65.4	65.0
第二次采数	95.9	94.1	80.3	80.6	63.7	66.2
第三次采数	94.4	92.2	81.9	79.7	65.3	65.5
第四次采数	94.3	93.0	80.1	80.7	64.1	67.9
第五次采数	94.7	93.9	82.9	80.7	66.2	68.3
第六次采数	91.7	92.1	82.8	79.6	65.1	66.4
第七次采数	92.8	94.4	81.1	80.1	67.6	68.1
第八次采数	94.3	94.9	82.6	79.4	67.9	67.8
平均	94.1	93.5	81.5	80.2	65.7	66.9
两次 $T$ 之差 $\Delta T$	0.6		1.3		1.2	
理论计算值	94.0		81.6		67.6	

#### 五、测试结果与误差分析

以上介绍的软 $X$ 射线滤光片透过率测试方法, 是相对比测量, 因此, 测量过程中, 瞬间变化因素引起测量结果的变化, 可以在全量和分量的比值中消除。而由于测量系统误差和随机误差, 综合产生的误差, 对测量结果准确度的影响作如下分析:

##### (一) 测试系统相对稳定度

$X$ —射线源阳极流在 $I_a = 10$ mA, 靶压 $V_a = 5000$ V的条件下, 测量 $Al_{K\alpha}$ ,  $C_{K\alpha}$ 线辐射强度随时间变化, 系统连续工作两小时以上, 系统的相对标准差 $< 2\%$ ; 测量是每隔五分钟采一次脉冲计数。求出每半小时内的算术平均值, 然后计算标准差, 计算结果列在表2—*a*与表2—*b*中。

表2中的 $\bar{P}_i$ 为多次重复的脉冲计数的算术平均值， $\bar{P}$ 表示不同时间测得计数率的算术平均值。表中 $\sigma$ 值是按贝塞尔公式计算的标准差<sup>(2)</sup>。

相对标准差应为：

$$\frac{\sigma}{\bar{P}} \times 100\%$$

计算结果见表中各值。

表2-a [AL<sub>Kα</sub>线 1.46keV]

时 间	3:00	3:30	4:00	4:30
$\bar{P}_i$	828	845	856	859
$\bar{P} = \frac{\sum \bar{P}_i}{n}$	847			
$\bar{P}_i - \bar{P}$	-19	-2	9	12
$(\bar{P}_i - \bar{P})^2$	361	4	81	144

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum (\bar{P}_i - \bar{P})^2 = \frac{590}{3} = 196 \text{次/秒}$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum (\bar{P}_i - \bar{P})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{196} = 14 \text{次/秒}$$

$$\text{相对标准差} = \frac{\sigma}{\bar{P}} \times 100\% = \frac{14}{847} \times 100\% = 1.65\%$$

表2-b [C<sub>Kα</sub>线 0.277keV]

时 间	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30
$\bar{P}_i$	813	828	850	845	846
$\bar{P} = \frac{\sum \bar{P}_i}{n}$	837				
$\bar{P}_i - \bar{P}$	-19	-9	21	8	9
$(\bar{P}_i - \bar{P})^2$	361	81	441	64	81

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum (\bar{P}_i - \bar{P})^2 = \frac{848}{4} = 212 \text{次/秒}$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum (\bar{P}_i - \bar{P})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{212} = 15 \text{次/秒}$$

$$\text{相对标准差} = \frac{\sigma}{\bar{P}} \times 100\% = \frac{15}{837} \times 100\% = 1.8\%$$

因为整个系统各仪器未经标定，直流高压电源、灯丝电源均未采取特殊稳定措施，所以，此测量结果仅反应测试系统最后的综合结果。根据统计规律，脉冲涨落允许值为  $n \pm \sqrt{n}$ ，根据表2测量结果，计数率脉冲次数涨落值允许为  $\pm 28$  次/秒，该测试系统的标

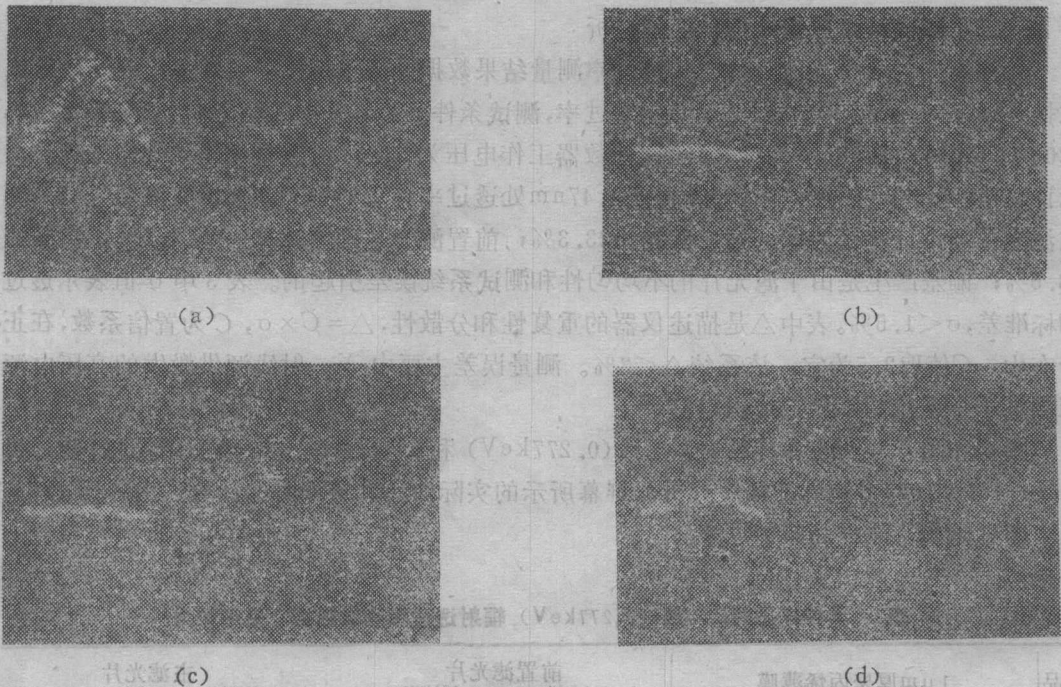


图5 样品对 $C_{K\alpha}$ 线透过的实测曲线的照片

- (a) 无样品全量计数曲线。
- (b) 主滤光片透过计数曲线。
- (c) 前置滤光片透过计数曲线。(Al 200nm厚)
- (d) 前置滤光片透过计数曲线(Al 150nm厚)

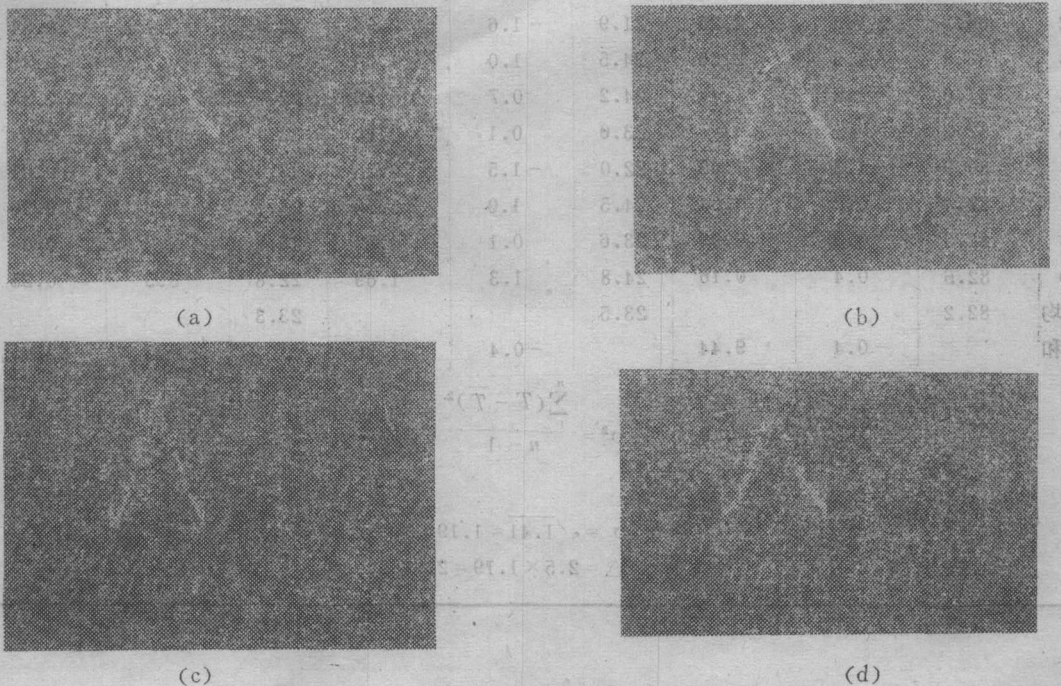


图6 样品对 $Al_{K\alpha}$ 线透过的实测曲线的照片

- (a) 无样品全量计数曲线。
- (b) 主滤光片透过计数曲线。(2 $\mu$ CH<sub>2</sub>+Al 180nm)
- (c) 前置滤光片透过计数曲线(Al 200nm厚)
- (d) 前置滤光片透过计数曲线(Al 150nm厚)

准差为14~15次/秒；小于允许涨落值。因此，该测试系统用于透过率测试是可靠的。

(二) 测试结果数据处理与误差分析

几种不同的X—光滤光片，其透过率测量结果数据处理举例列在表3中，表3中给出的数据是样品对 $C_{K\alpha}$ 线辐射(4.47nm)的透过率，测试条件是：X—射线源靶压为3600V, 5mA；4200V, 6mA；5000V, 10mA，正比计数器工作电压为1284V时测量结果的数据处理。与理论计算值相比较，1 $\mu$ 厚聚丙烯薄膜在4.47nm处透过率计算值是83.9%，实测值是82.2%；主滤光片理论计算值为23.6%，实测为23.3%；前置滤光片理论计算值是24.5%，实测值是23.5%；偏差产生是由于滤光片的不均匀性和测试系统误差引起的。表3中 $\sigma$ 值表示透过率的标准差， $\sigma < 1.5\%$ 。表中 $\Delta$ 是描述仪器的重复性和分散性， $\Delta = C \times \sigma$ ，C为置信系数，在正态分布中，C值取2.5为宜，该系统 $\Delta < 3\%$ 。测量误差主要由X—射线源供激发的高压电源，探测电子学系统的不稳定度引起的。

图5和图6分别是各样品对 $C_{K\alpha}$ 线(0.277keV)和 $Al_{K\alpha}$ 线(1.48keV)的透过计数，摘自FH—451型1024多道脉冲幅度分析器屏幕所示的实际曲线和实测时的计数。由各计数值相比，即可求出待测样品的透过率。

表3 三种样品对 $C_{K\alpha}$ 线(0.277keV)辐射透过率测量数据，表中数为%

样品 次	1 $\mu$ m厚聚丙烯薄膜			前置滤光片 (Al150nm+Ni网)			主滤光片 (2m $\mu$ 厚聚丙烯+Al130nm+Ni网)		
	T	T - $\bar{T}$	(T - $\bar{T}$ ) <sup>2</sup>	T	T - $\bar{T}$	(T - $\bar{T}$ ) <sup>2</sup>	T	T - $\bar{T}$	(T - $\bar{T}$ ) <sup>2</sup>
1	83.3	1.1	1.21	22.0	-1.5	2.25	24.0	0.7	0.49
2	80.7	-1.5	2.25	21.9	-1.6	2.56	23.4	0.1	0.01
3	83.8	1.6	2.56	24.5	1.0	1.00	22.6	-0.7	0.49
4	81.0	-1.2	1.44	24.2	0.7	0.49	22.7	-0.6	0.36
5	82.2	0	0	23.6	0.1	0.01	23.1	-0.2	0.04
6	80.9	-1.3	1.69	22.0	-1.5	2.25	23.4	0.1	0.01
7	82.4	0.2	0.04	24.5	1.0	1.00	23.9	0.6	0.36
8	82.5	0.3	0.09	23.6	0.1	0.01	23.5	0.2	0.04
9	82.6	0.4	0.16	24.8	1.3	1.69	22.8	-0.5	0.25
平均	82.2			23.5			23.3		
求和		-0.4	9.44		-0.4	11.26		-0.3	2.05
$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (T - \bar{T})^2}{n - 1} = \frac{9.44}{8} = 1.18$			$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (T - \bar{T})^2}{n - 1} = \frac{11.26}{8} = 1.41$			$\sigma^2 = \frac{2.05}{8} = 0.26$			
$\sigma = [1.18]^{1/2} = 1.09$			$\sigma = \sqrt{1.41} = 1.19$			$\sigma = \sqrt{0.26} = 0.51$			
$\Delta = 2.5 \times 1.09 = 2.73$			$\Delta = 2.5 \times 1.19 = 2.98$			$\Delta = 2.5 \times 0.51 = 1.28$			

参 考 文 献

[1] 谢忠信等,《X—射线光谱分析》,科学出版社,1982。  
 [2] 肖明耀,《实验误差估计与数据处理》,科学出版社,1981。