

5F 软 X 光胶片响应特性研究

杨家敏 丁耀南 郑志坚 易荣清 王耀梅 唐道源
(西南核物理与化学研究所, 610003 成都)

摘 要 提出了 5F 软 X 光胶片对低能 X 射结响应的数学模型, 模型中部份参数由厂家提供, 其余参数由在 183 eV 和 933 eV 两能点实验标定的胶片响应曲线确定。数学模型及参数有有效性用 282 eV 能点处 5F 软 X 胶片的实验响应曲线进行了初步检验。

关键词 5F 软 X 光胶片, 响应曲线, 数学模型, 光学黑密度, X 射线曝光量。

1 引 言

软 X 光胶片由于其很好的空间分辨和较宽的动态范围, 被广泛应用于软 X 光能谱的测量。在惯性约束聚变研究的 X 光能谱测量中, 它也是一种重要的测谱记录工具^[1, 2], 但要用软 X 光胶片对软 X 光作定量测量, 必须了解其响应特性, 而胶片的响应特性除依赖于胶片种类外, 还与胶片的冲洗条件有关。因此, 国内外已有多人对 X 光胶片的响应特性在自己的使用条件下进行过实验标定和理论研究^[3~ 5]。

对在惯性约束聚变研究中使用的 5F 软 X 光胶片, 利用同步辐射源对 276 eV 和 933 eV 两能点的 X 光响应特性进行过相对标定, 并将标定结果应用在光栅衍射效率标定的数据处理中; 但要用 5F 软 X 光胶片进行软 X 光能谱的绝对测量, 还必须进一步研究 5F 软 X 光胶片的绝对响应特性。根据 5F 软 X 光胶片生产厂家提供的该胶片的类型提出了适当的胶片响应特性数学模型, 该模型不同于 Henke 的胶片响应曲线半经验公式^[4], 而是按各能点入射 X 光的强度范围分三段分别给出带未知参数的响应曲线函数; 采用厂家提供的 5F 软 X 光胶片的部份参数和西南核物理与化学研究所在 183 eV 和 933 eV 两能点实验标定的响应曲线, 拟合出 5F 胶片响应数学模型中其余参数; 利用这些参数和响应曲线表达式, 就可计算得到 5F 胶片其余能点的响应曲线。

2 5F 软 X 光胶片结构

5F 软 X 光胶片属无保护膜胶片, 它是将溴化银颗粒和明胶按一定比例混合, 然后将混合物涂布在透明片基上形成感光区, 感光区厚度基本均匀。5F 软 X 光胶片结构简图如图 1 (a) 所示。

3 5F 软 X 光胶片响应数学模型

3.1 5F 软 X 光胶片记录 X 射线原理

用胶片记录 X 射线时, X 射线与胶片感光区中 AgBr 颗粒发生作用, 对能量在 0.1~10 keV 范围内的 X 射线, 每个 AgBr 颗粒吸收一个光子就能使该 AgBr 颗粒感光^[4]。在冲洗胶片时, 感光颗粒通过与药液的化学作用形成具有一定截面 S 的黑色银颗粒, 截面 S 由胶片本身和冲洗条件决定。冲洗好的胶片在黑密度计上扫描给出的黑密度值定义为:

$$D = \log(1/T) \quad (1)$$

式中 T 为胶片对黑密度计扫描可见光的透过率。

3.2 5F 软 X 光胶片黑密度 D 与入射 X 光强度 I 的关系

按胶片感光区中 AgBr 颗粒大小 d 将感光区分为若干层 (每层厚度为 d), 每层单位面积含有 AgBr 颗粒数为 M_0 , 如图 1 所示。当单位面积入射的 X 光光子数 I 很小时, 胶片感光区表面层感光的 AgBr 颗粒数较少 ($\leq M_0$), 随着 I 增大, 表面层感光 AgBr 颗粒数增多, 当 I 达到 I_s 时 (I_s 值见(4)式), 表面层 AgBr 颗粒全部感光, 表面层达到饱和, 这时继续增大 I , 表面层感光颗粒不会增多, 该层对黑密度 D 的贡献不变, 但表面以下各层感光的 AgBr 颗粒数会增多直至也依次达到饱和 (M_0), 如图 1 中所示 X_a 逐渐增大; 进一步增大 I 到 I_{\max} 时 (I_{\max} 值见(14)式), 胶片感光区中所有 AgBr 颗粒都感光, 胶片完全饱和。由此, 按照入射 X 光的强度 I 分三段建立 5F 软 X 光胶片对 X 光的响应曲线。

3.2.1 $I \leq I_s$ 情况

当入射到 X 光胶片表面的 X 射线强度为 I (即胶片表面单位面积的 X 光光子数) 时, 到达胶片表面以下第 k 层感光区的 X 光光强为:

$$I_k = \exp[-\mu'(k-1)d] \quad (2)$$

式中 μ' 为 AgBr 颗粒与明胶混合物对 X 射线的线性吸收系数。

第 k 层感光区中单个 AgBr 颗粒吸收 X 光光子的几率为:

$$P_k = VI_k[1 - \exp(-\mu_l d)]/M_0 \quad (3)$$

式中 V 为 AgBr 颗粒占混合物的体积比。 μ_l 为 AgBr 颗粒的线性吸收系数。

当 $P_k = 1$ 时, 平均地说, 第 k 层中每个 AgBr 颗粒都吸收一个 X 光光子而感光, 第 k 层达到饱和。表面层刚达到饱和而表面以下未曝光饱和时, 由(2)、(3)式得:

$$I_s = M_0/V[1 - \exp(-\mu_l d)] \quad (4)$$

表面以下第 k 层单位面积内感光的 AgBr 颗粒为:

$$M_k = VI_k[1 - \exp(-\mu_l d)] \quad (5)$$

在用黑密度计扫描读出感光胶片黑密度时, 第 k 层感光区对扫描可见光的透过率为:

$$T_k = 1 - M_k S = 1 - VSI[1 - \exp(-\mu_l d)] \exp[-\mu'(k-1)d] \quad (6)$$

式中 S 为胶片感光冲洗后形成 Ag 颗粒的截面。整个感光区总的透过率表示为:

$$T = \prod_{k=1}^N T_k \quad (7)$$

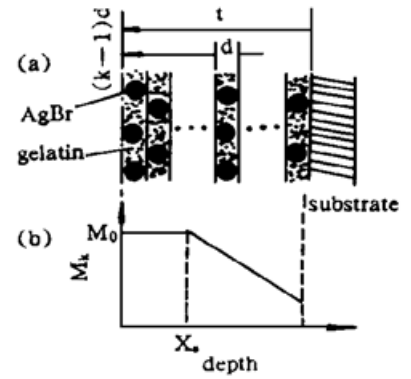


Fig. 1 Model for calculation of response curves of film 5F to soft X-ray. a, Schematic configuration of film 5F; b, Number of developed AgBr grain in film 5F versus the depth x after it was exposed to soft X-ray with the intensity of I ($I_s \leq I \leq I_{\max}$)

式中 N 为感光区所含 AgBr 颗粒的层数;

由(1)、(7)式得到在 $I \leq I_s$ 时胶片黑密度 D 与 X 光光强 I 的关系:

$$D = -0.4348 \sum_{k=1}^N \ln \{1 - VSI[1 - \exp(-\mu_1 d)] \exp[-\mu'(k-1)d]\} \quad (8)$$

由(8)式知, 当 I 很小时, $D \sim aI$, X 光胶片黑密度 D 与入射 X 光强度 I 成近似线性关系。

3.2.2 $I_{\max} \geq I \geq I_s$ 情况

如图 1 所示, 当 $I \geq I_s$ 时, 感光区中表面以下一定深度 X_s 内的 AgBr 颗粒将达到感光饱和, 由(2)式易得到该深度:

$$X_m = (1/\mu') \ln(I/I_g) + d \quad (9)$$

达到感光饱和的单层感光区的黑密度 D_{s1} 可表示为:

$$D_{s1} = -0.4348 \ln(1 - M_0 S) \quad (10)$$

厚度为 $X_m k$ 的感光饱和区的黑密度由下式给出:

$$D_s = D_{s1}(X_s/d) \quad (11)$$

对感光饱和区以下 $t - X_s$ 厚的未饱和区(分为 L 个 AgBr 颗粒单层)的黑密度贡献由(8)式得:

$$D_2 = -0.4348 \sum_{k=1}^L \ln \{1 - VSI_s[1 - \exp(-\mu_1 d)] \exp(-\mu'kd)\} \quad (12)$$

因此, 在 $I_{\max} \geq I \geq I_s$ 时, 5F 胶片整个感光区的黑密度为:

$$D = D_s + D_2 \quad (13)$$

3.2.3 $I \geq I_{\max}$ 情况

进一步增大入射 X 光强度 I , 达到感光饱和的感光层厚度不断增大, 最后 5F 胶片整个感光区的 AgBr 颗粒全部感光, 由(4)、(9)式易得刚好达到全部感光时入射 X 光强度:

$$I_{\max} = M_0 \exp[\mu'(t-d)] / \{V[1 - \exp(-\mu_1 d)]\} \quad (14)$$

当入射 X 光强度达到 I_{\max} 后, 再进一步增大 X 光强度, 由于 AgBr 颗粒已全部感光, 5F 胶片黑密度不会增加, 而保持为黑密度完全饱和值:

$$D_{as} = D_{s1} t/d \quad (15)$$

3.3 5F 胶片感光区混合物对 X 光的线性吸收系数 μ' 的计算

感光区中一个 AgBr 颗粒单层混合物对 X 射线的吸收衰减因子可表示为:

$$f = \exp(-\mu' d) \quad (16)$$

分别计算混合物中 AgBr 颗粒和明胶的衰减因子, 并取各自所占体积比为权重, 混合物的衰减因子 f 也可表示为:

$$f = V \exp(-\mu_1 d) + (1 - V) \exp(-\mu_0 d) \quad (17)$$

式中 μ_0 为明胶对 X 射线的线性吸收系数。

由(16)、(17)式可得到混合物对 X 光的线性吸收系数:

$$\mu' = \mu_0 - (1/d) \ln \{1 - V[1 - \exp[-(\mu_1 - \mu_0)d]]\} \quad (18)$$

这与文献[4]中结果一致, 本文计算中 μ_0 和 μ_1 采用文献[5]中数值。

4 5F 胶片响应模型中参数的确定

采用 5F 胶片生产厂提供的胶片感光区 AgBr 颗粒与明胶的重量比, 可推得 AgBr 颗粒所占的体积比 V ; 感光区厚度 t 也采用厂家提供数值; 而其它参数 d , M_0 和 S 由下面确定。

4.1 AgBr 颗粒大小 d 的确定

5F 胶片对中等强度的亚千 X 光的响应特性由 (12) 式知: 由于其有较厚的感光区 D_2 近似为常量, 所以其黑密度值 D 与入射 X 强度 I 在较大一范围呈近似对数线性, 斜率为:

$$K = - (1/2.3 d\mu') \ln (1 - M_0 S) \quad (19)$$

利用加速器产生的高能质子打击不同材料的靶所产生的不同能点的单能质子荧光作 X 光源, 对 5F 胶片在几个能点的绝对响应曲线进行了实验标定, 其绝对 X 光源强度用正比计数管测量, 5F 胶片采用 D-19 配方药液冲洗, 典型响应曲线见图 2, 从图 2 可见: 黑密度 D 与 X 光强 I 的对数确定呈近似线性; 用在 183 eV 和 933 eV 两能点处响应曲线实验标定的结果求得两能点处响应曲线的斜率比值, 通过 (18)、(19) 式可定出 Ag-

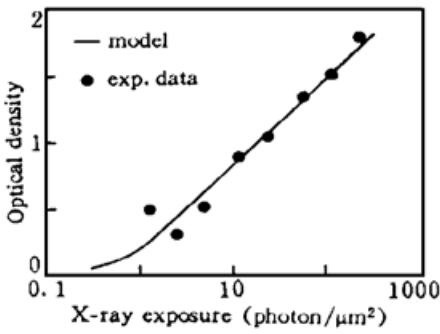


Fig. 2 Comparing experimental D -versus- I plots for film 5F at energy of 183 eV with D -versus- I curve fitted by the mathematical model

Br 颗粒大小 d 值。

4.2 参数 M_0 , S 的确定

由 183 eV 能点处实验标定的响应曲线及已确定的 d 值, 通过用模型计算的该能点处的响应曲线去进行最佳拟合, 从而可确定出 M_0 和 S 值。

5F 胶片对软 X 光的响应数学模型中所有参数如表 1 所列。

Table 1. Parameters for film 5F

parameter	t (μm)	V	d (μm)	M_0 (μm^{-2})	S (μm^2)
film 5F	20	0.21	0.37	0.36	1.1

5 5F 胶片响应模型及参数的有效性

为考察引入的 5F 胶片响应模型及参数的有效性, 用该模型及确定的胶片参数计算了 5F 胶片在 282 eV 能点处的响应曲线, 并与实验标定结果进行了比较, 如图 3 所示, 计算结果与实验结果符合较好。用该模型计算的 5F 胶片对应于 $D = 1.0$ 和 $D = 0.5$ 两种情况下在 100 ~ 3000 eV 能量范围的灵敏度曲线如图 4 所示。灵敏度曲线上几个突变点分别对应于 5F 胶片感光区混和物中 C , N , O 的 K 吸收边。

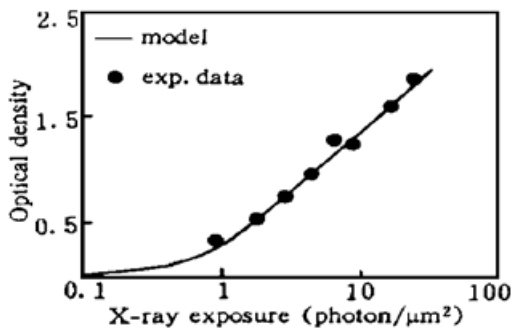


Fig. 3 Comparison of experimental D -versus- I for film 5F at energy of 282 eV with those predicted by model

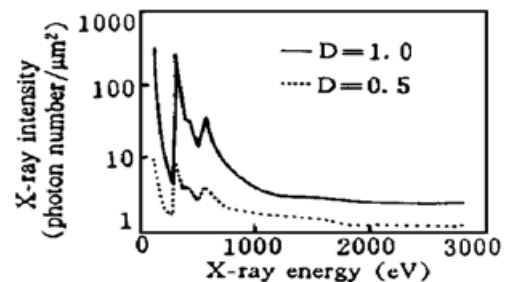


Fig. 4 The X-ray intensity required to establish optical density of 1.0 and 0.5, respectively, for film 5F in the energy range 100 eV to 3000 eV

结 论 引入的 5F 胶片响应特性模型较好地描写了 5F 胶片对 X 光的响应特性。5F 胶片对低能 X 光的响应曲线按 X 光强度分三段: 在 X 光强度很小时, 黑密度 D 与 X 光强度 I 成近似线性关系, 随 X 光强度增大, 黑密度 D 逐渐趋于与 X 光强度 I 的对数成近似线性; 进一步增大 X 光强度, 黑密度值 D 将逐渐达到完全饱和。对不同波长的 X 光其三段响应曲线对应的 X 光强度范围及相应黑密度范围不一样, 由于 5F 胶片感光区厚度较大, 在图 2, 3 中的响应曲线的 X 光强度范围还未见 5F 胶片感光饱和的趋势, 可见该胶片具有较宽的记录 X 光动态范围。

对该胶片的响应特性模型及参数这里只进行了初步的检验, 特别是还有部份参数采用了厂家提供数值, 因此, 还有必要通过更多的实验标定结果进一步对所有参数进行更细致的检验; 同时, 模型中参数 S 直接与胶片的冲洗条件有关, 用在特定冲洗条件下标定结果确定出的参数只适用于在相同冲洗条件下使用的 5F 胶片的数据处理。

温树槐研究员仔细阅读了全文, 提出许多修改意见, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 易荣清, 唐永健, 董玉来等, 时间积分透射光栅谱仪. 强激光与粒子束, 1992, 3(4): 498~ 503
- [2] K. Eidmann, T. Kishimoto, *et al.*, Absolute soft X-ray measurements with a transmission grating spectrometer. *Laser and Particle Beams*, 1986, 4(3/4): 521~ 530
- [3] 张启仁, 何 安, SWR 底片极紫外波段的在位相对标定. 惯性约束聚变与强激光技术, 1992, 2: 84~ 87
- [4] B. L. Henke *et al.*, Low-energy X-ray response of photographic films. I. Mathematical models. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1984, 1(6): 818~ 827
- [5] B. L. Henke *et al.*, Low-energy X-ray response of photographic films. II. Experimental characterization. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1984, 1(6): 828~ 849

Study of Response of Film 5F to Soft-X-Ray

Yang Jiamin Ding Yaonan Zheng Zhijian
Yi Rongqing Tang Daoyuan Wang Yaomei

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

(Received 10 February 1996; revised 3 June 1996)

Abstract A mathematical model was introduced to determine the optical density of film 5F as a function of low-energy X-ray exposure and its wavelength. Parameters in the model were determined by experimental response curves for film 5F at energy of 183 eV and 933 eV. Validity of the model and its parameters were checked by experimental response curve at energy of 288 eV.

Key words film 5F, response curve, mathematical model, optical density, X-ray exposure.