

文章编号: 0253-2239(2005)10-1429-4

# CsI:Tl 晶体对高能 X 光照射量的响应关系研究

江孝国 王 伟 吴建华 王婉丽

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 在 X 光探伤系统中使用效率较高的 CsI:Tl 晶体作为 X 光转换体。CsI:Tl 晶体对 X 光的响应关系是精密图像处理、定量测量所需的一项重要参量,理论上已经推导了 CsI:Tl 晶体对 X 光的响应呈现线性关系,并针对性地设计了在<sup>60</sup>Co 放射源上的定量测量实验,所获数据不仅充分证明了理论推导的正确性,还证明了相应系统的这种线性关系的线性度非常好。

**关键词:** X 射线光学; CsI:Tl 晶体; 赫特-德里菲尔德曲线; CCD; <sup>60</sup>Co; 线性度

中图分类号: O72 文献标识码: A

## Study on the Response Characteristic of CsI:Tl Crystal to High-Energy X-Ray Radiation

Jiang Xiaoguo Wang Wei Wu Jianhua Wang Wanli

(Institute of Fluid Physics, the China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract:** High efficiency CsI:Tl crystal is used as X-ray converter in the detection system. The response characteristic of CsI:Tl crystal to X-ray is very important in precision image processing. It is difficult to obtain a stable H-D curve of X-ray film because of some uncontrollable factors in its processing. The response of CsI:Tl crystal to X-ray has been theoretically proved to be linear. Some experiments on the <sup>60</sup>Co X-ray source are performed to prove the linear of the response and the quantificational H-D curves of the CsI:Tl crystal with different width are obtained. These H-D curves definitely show that the response is linear and that the linearity is very good. The linearity of less 0.15% is obtained from the experiment. This solves some unconquerable problems such as obtaining a stable, repetitive H-D curve which have existed for a long time in a X-ray film system.

**Key words:** X-ray optics; CsI:Tl crystal; Hutter-Driffield curve; CCD; <sup>60</sup>CO; linearity

### 1 引 言

利用 CCD 作为图像记录的 X 光探测系统中,所用 CsI:Tl 晶体的作用是将 X 光转换为可记录的可见光,其各项性能直接影响后面的图像处理结果。CsI:Tl 晶体的 X 光响应特性研究包括两个方面:响应关系形式和响应关系的定量标定<sup>[1]</sup>。在胶片记录技术的研究中,该项工作遇到了较大的困难,首先在理论上还未明确系统在工作范围内的黑密度对 X 光照射量的关系形式(存在线性关系和对照射量取对数后呈现线性的两种说法)<sup>[3]</sup>;其次,胶片冲洗为底片、再转换为数字图像的过程不容易控制,受到各方面因素的影响(包括人为操作、药液浓度、冲洗时

间、胶片批次等)。其中的一些因素还不可以控制,造成不确定的影响,重复性也不是很好,很难提供出精密图像处理所需的赫特-德里菲尔德(H-D)曲线<sup>[3]</sup>。而使用 CCD 的接收系统具有性能稳定、容易测量和标定的特点,工作不受人为因素影响,因此可以认为是一种较好的接收系统;而理论研究结果已证明这种系统对 X 光的响应呈线性<sup>[4]</sup>,本文设计了用<sup>60</sup>Co 放射源作为  $\gamma$  光子源来对系统的响应特性作定量研究的实验,该实验获得了成功,所获数据证明了理论结果,也证明了该系统具有线性度极好的响应特性且可稳定测量,为进一步的图像处理奠定了良好的基础。

作者简介: 江孝国(1968~),男,中国工程物理研究院流体物理研究所副研究员,主要从事 CCD 测量系统设计及应用研究。E-mail: j\_xg\_caep@sohu.com

收稿日期: 2004-11-17; 收到修改稿日期: 2004-12-23

## 2 采用 CsI:Tl 晶体的 X 光探测系统的响应

图1为探测系统。CsI:Tl 晶体在入射 X 光的激发下发射可见光,经反射镜折反后由光学镜头成像于 CCD 表面;反射镜的作用是将可见光反射成像到位于 X 光路外的 CCD 上。按照实际系统的参量和应用要求,可以近似地将 CsI:Tl 晶体上的发光单元看作点光源;由于光学系统的景深设计得如此之深以至于在 CsI:Tl 晶体厚度  $d$  以内产生的所有图像都能被较清楚地成像在 CCD 芯片表面上;因此,一个 CCD 像元接收到的可见光光子数  $N_p$  为发光单元  $dA \cdot d$  所发射的可被光学系统收集到的可见光

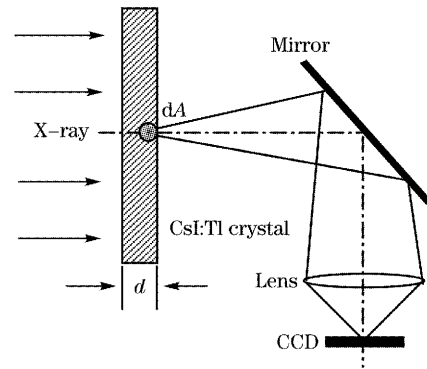


图 1 探测系统

Fig.1 The structure of the detection system  
光子数的总和,可由下式表示<sup>[4]</sup>:

$$N_p = \int_0^d \frac{1}{16} (D/f)^2 \cdot T \cdot R \cdot \eta_{vp} \cdot \epsilon \cdot dA / (1 + \beta^2) \cdot X_i \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot z} d(-\mu \cdot \rho \cdot z), \quad (1)$$

式中  $D$  为镜头的直径,  $f$  为焦距,  $T$  为系统的总透过率,  $R$  为系统中全反射镜的反射率,  $\beta$  为光学系统的横向放大率,  $\epsilon$  为照射量转换因子<sup>[5]</sup> [单位为  $\text{MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{R})$ ],  $\eta_{vp}$  为转换屏的光效率<sup>[6]</sup> (MeV),  $\mu$  为 CsI:Tl 晶体的质量吸收系数 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $\rho$  为 CsI:Tl 晶体的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); 其中的  $\epsilon, \eta_{vp}, \mu$  值与入射 X 光光子能量相关。在实际系统中,  $T, R, \beta$  的变化非常小, 可近似为常量; CCD 的输出信号  $N_E$  (光电子数) 可简化为

$$N_E = N_p \cdot Q_E = \frac{1}{16} (D/f)^2 \cdot T \cdot R \cdot \eta_{vp} \cdot \epsilon \cdot dA \cdot Q_E / (1 + \beta^2) \cdot X_i \cdot [1 - \exp(-\mu \cdot \rho \cdot d)], \quad (2)$$

式中的  $Q_E$  为 CCD 的量子效率, (2) 式基本上代表了系统的响应关系。从该式可以看到 CCD 的输出信号  $N_E$  与入射 X 光的照射量  $X_i$  成正比关系, 并且在系统的实验条件已定的情况下, 线性系数仅与 CsI:Tl 晶体厚度有关。

## 3 $^{60}\text{Co}$ 放射源作高能 X 光源的特点及实验装置

采用  $^{60}\text{Co}$  放射源作高能 X 光源有下列原因: 第一,  $^{60}\text{Co}$  源体积小, 可作点源看待, 消除了面源的不良影响; 第二,  $^{60}\text{Co}$  源产生的  $\gamma$  光子能量较单一, 只有 1.333 MeV 和 1.173 MeV 两种, 并且能量又达到 MeV 级以上, 具有实际意义; 第三, 该  $^{60}\text{Co}$  源的半衰期达到 5.27 年, 衰变过程稳定, 表明释放  $\gamma$  光子的速率在实验时间段内是恒定的, 易于计算其绝对照射量; 第四,  $^{60}\text{Co}$  源引起的环境散射较弱, 可以忽略, 可避免散射对实验结果的影响及 X 光机工作时对系统的干扰; 第五,  $^{60}\text{Co}$  源使用相对方便。

$^{60}\text{Co}$  源的性能如表 1 所示。在理论计算中,  $\gamma$  光子能量可取为 1.25 MeV。图 2 是实验系统的结构。其中的 5 cm 铅墙用于防护 CCD 相机。为了降

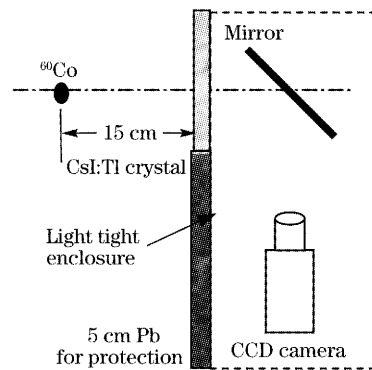


图 2 CsI:Tl 晶体实验装置

Fig.2 Experimental setup of CsI:Tl crystal

低图像记录系统的噪声对弱信号的影响和提高记录系统响应的灵敏度, CCD 相机采用了 PI 公司的科学级 CCD 相机, 型号为 CCD-1024SB, 这款相机采用了 Site 公司的背照明 CCD 芯片, 图像阵列为  $1024 \times 1024$ , 像素尺寸为  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ , 具有很高的灵敏度和很低的噪声, 动态范围较大。其峰值量子效率不小于 80%。在 50 kHz 的读出速度下, 系统噪声不到 10 个等效电子; 由于个别照射时间达到小时量级, 很小的背景光都将产生巨大的影响, 因此整个系统置于暗室之中, 以防止背景光线影响。为

为了提高照射量率,将 $^{60}\text{Co}$ 源与 CsI:Tl 晶体之间的距离定为 15 cm, $\phi 1$  mm 端面正对着 CsI:Tl 晶体平面。因此,在 CsI:Tl 晶体表面中心处的照射量率  $X_e$  为  $2.481 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ ,那么,所形成的 X 光

照射量  $X_i$  与照射时间  $t$  的关系为

$$X_i = X_e \cdot t. \quad (3)$$

在实验中以曝光时间来计算 X 光照射量。

表 1  $^{60}\text{Co}$  放射源参量

Table 1  $^{60}\text{Co}$  radiation source parameters

Shape /mm	Active region size /mm	Main ray	Half life /year	Activity /mCi	irradiation rate(at 1 m) /( $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ )
$\phi 5 \times 7$	$\phi 1 \times 2$	$\gamma 1.333 \text{ MeV}$ (100%) $\gamma 1.173 \text{ MeV}$ (100%)	5.27	10	$5.5814 \times 10^{-10}$

## 4 数据处理及实验结果

### 4.1 CCD 相机输出图像灰度成份分析

根据 CCD 输出信号及实验环境、CsI:Tl 晶体结构的情况,输出图像灰度数据中至少应包括下式所含的成份:

$$G = G_0 + G_s + G_E + G_I + G_{\text{off}}, \quad (4)$$

式中的  $G$  为输出的图像灰度数据, $G_0$  为 CsI:Tl 晶体响应的真实发光图像灰度数据, $G_s$  为 CsI:Tl 晶体内散射响应的图像灰度数据<sup>[6]</sup>, $G_E$  为背景光响应的图像灰度数据, $G_I$  为 CCD 暗电流积分引起的图像灰度数据, $G_{\text{off}}$  为偏置的影响,系统状况不变时,该项是一常数。测量实验设计的一个目的就是要避开散射  $\gamma$  射线的影响,故采用了 $^{60}\text{Co}$ 源作为照射源。因它所引起的散射  $\gamma$  射线的影响较小。在(4)式中未予考虑这部分对图像灰度的贡献。

### 4.2 各图像灰度成份的影响规律

系统输出图像灰度中包含有多种成份。其中的  $G_0$  是所需的真实的响应灰度,其他的成份实际上都形成了干扰,在处理中应剔除。因 CsI:Tl 晶体的结构引起的散射影响  $G_s$  可以看作  $G_0$  的一部分。如果 $^{60}\text{Co}$ 照射位置、CsI:Tl 晶体固定, $G_s$  实际上与  $G_0$

是线性关系,它们之间存在一个散射系数  $K_s$ <sup>[7]</sup>:

$$G_s = K_s \cdot G_0, \quad (5)$$

暗电流及背景光的影响在工作条件、环境稳定的情况下也是恒定的,影响程度与时间成线性:

$$G_E = K_E \cdot t, \quad (6)$$

$$G_I = K_I \cdot t. \quad (7)$$

通过对系统输出数据进行处理,消除各种影响,可以获得所需的 CsI:Tl 晶体对 X 光照射量的响应关系

$$G_0 = f(X_i) = f(X_e \cdot t). \quad (8)$$

### 4.3 实验处理结果

该数据必须对应于 $^{60}\text{Co}$ 源垂直照射 CsI:Tl 晶体的狭小区域。由于 $^{60}\text{Co}$ 源离 CsI:Tl 晶体较近,源与 CsI:Tl 晶体上各点的距离变化较明显。根据照射量的距离平方的反比关系,源在 CsI:Tl 晶体上各点形成的照射量差别是相当大的。所以在数据处理时应注意这个问题。通过对实验数据进行处理后,获得了 10 mm 和 20 mm 厚的 CsI:Tl 晶体对 $^{60}\text{Co}$ 源产生的能量在 MeV 级的  $\gamma$  光子的响应特性,如图 3 所示。由图可知,在这种条件下的实验数据与线性拟合直线符合的程度相当高,足以证明响应关系的

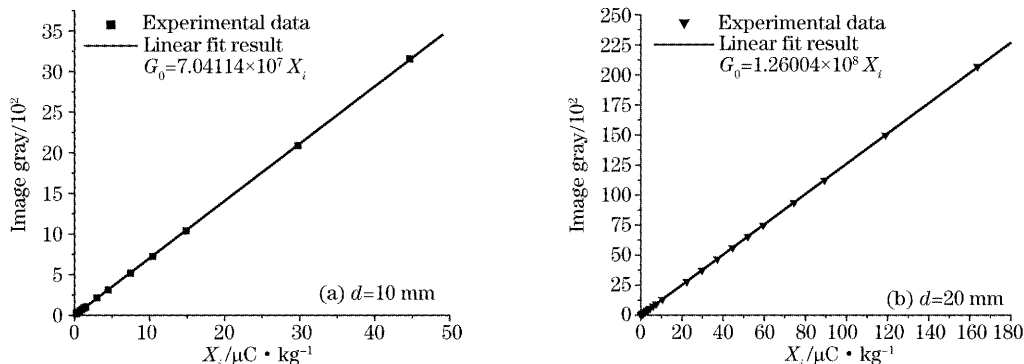


图 3 厚度为 10 mm (a), 20 mm (b) 的 CsI:Tl 对 X 射线的影响

Fig. 3 The response of CsI:Tl with thickness of 10 mm (a), 20 mm (b) to X-ray

良好线性。

在系统的实验条件已定的情况下,线性系数仅与 CsI:Tl 晶体厚度有关。实验结果表明 20 mm 厚的 CsI:Tl 晶体的响应度是 10 mm 的 1.790 倍;而 CsI:Tl 晶体的密度为  $4.5 \text{ g/cm}^3$ ,当  $\gamma$  光子能量为 1.25 MeV 时,根据质量组成成份<sup>[3,6]</sup>可以计算出 CsI:Tl 晶体的质量吸收系数为  $0.0522 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,按照(2)式可以得到 20 mm 厚的 CsI:Tl 晶体的响应度与 10 mm 厚的响应度的比值为 1.791,说明理论推导结果与实验结果是非常相符的;同时说明由于  $\gamma$  光子能量单一,单能等效的作法<sup>[3]</sup>是非常适合用来计算本文所述情况。

表 2 列举了在相同条件下对同一照射量的多次测量结果,充分说明了测量的可重复性和稳定性,表中数据为系统输出的灰度值。

表 2 同一放射源重复测量结果

Table 2 The repeated measurement results for the same irradiation

$X_i/(\text{nC} \cdot \text{kg}^{-1})$	24.81	124.05	248.1	744.3	2977.2
	15	28	43	105	379
	15	28	43	105	379
Image gray	15	28	43	105	380
	15	28	43	105	380
	15	28	43	105	380

## 5 结 论

为了获得准确的测量结果,本实验采用了  $^{60}\text{Co}$  放射源作高能 X 光源,解决了高能放射源照射量稳定性、可测量性及光子能量的单一性问题<sup>[8]</sup>,满足了数据处理和理论研究的条件,并获得了准确的测量结果;所获得的两条响应曲线均证明了 CsI:Tl 晶体对入射 X 光照射量的响应呈良好的线性关系,响应特性的线性是明确的,并且系统响应的起点很低,没有 X 光胶片响应的趾部区域,线性响应范围较宽,解决了胶片记录一直无法获得稳定、重复的 H-D 曲线(包括定标问题)的难题,为图像处理提供准确的 H-D 曲线

参量。本文工作的第一步是要获得响应关系的线性证明。只有在有了线性响应关系的前提条件下,下一步对探测系统受到的各种散射照射量的消除才有实验数据和理论基础。并且由于  $^{60}\text{Co}$  放射源的照射量率非常稳定且可测量(或计算),本文图 3 实际上也提供了对应系统响应关系的绝对测量值。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Jingwen. *X-Ray and VUV Radiation Sources and Their Metrical Techniques* [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2001, 12: 342~405 (in Chinese)  
孙景文. X 射线与真空紫外辐射源及其计量技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2001, 12: 342~405
- 2 Gao Hongyi, Xie Honglan, Chen Jianwen *et al.*. Experimental research on hard X-ray phase-contrast imaging [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, 32(2): 167~169 (in Chinese)  
高鸿奕,谢红兰,陈建文等. 硬 X 射线相位衬度成像的实验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 167~169
- 3 Wu Shifa. *The Recent Image Formation and Process Technology* [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1997, 3: 7~27 (in Chinese)  
吴世法. 近代成像技术与图象处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1997, 3: 7~27
- 4 Jiang Xiaoguo, Tan Zhao, Wang Wei *et al.*. Study on the luminous emittance of CsI:Tl converter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(Z2): 321~326 (in Chinese)  
江孝国,谭肇,王伟等. CsI:Tl 转换屏的发光灵敏度研究[J]. 光子学报, 2002, 31(Z2): 321~326
- 5 Shi Jiangjun. *The Leading Statement for High Energy Radiography* [M]. Mianyang: Science and Technology Series of CAEP, 1998. 56~60,193~194 (in Chinese)  
施将君. 高能闪光照相引论[M]. 绵阳:《中国工程物理研究院流体物理研究所科技丛书》第 05 号, 1998. 56~60,193~194
- 6 Scott Watson, Todd Kauppila, Louis Morrison *et al.*. The pulsed high-energy radiographic machine emitting X-rays (PHERMEX) flash radiographic camera [C]. *Proc. SPIE*, 1997, 2896: 920~928
- 7 Jiang Xiaoguo, Tan Zhao, Wang Wanli *et al.*. Study on image contrast affected by scattering from the back side of a convertor [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(1): 29~32 (in Chinese)  
江孝国,谭肇,王婉丽等. 转换屏背底散射对图像对比度的影响研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 29~32
- 8 Jiang Xiaoguo, Wang Wei, Wang Wanli. Conversion efficiency of the CsI:Tl crystal excited by X-ray [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2): 203~205 (in Chinese)  
江孝国,王伟,王婉丽. X 射线激发 CsI:Tl 晶体的转换效率[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(2): 203~205