

# 气体放电中的 X 射线诊断\*

陈素和 王大伦 崔高显 王 玫 傅依备  
(西南核物理与化学研究所 成都 610003)

张信威 张武寿  
(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

**摘 要** 用气体放电法研究含氙金属异常现象时,发现有 X 射线产生. 因此用吸收法、特征 X 射线法和 NaI 闪烁计数器测量了 X 射线能量,用<sup>7</sup>Li 热释光片估测了 X 射线强度. 吸收法测出的 X 射线平均能量为(26.9±2.2) keV 和 NaI 闪烁计数器测出的(26.0±2.4)keV 单能 X 射线在测量误差内相符.

**关键词** 常温核聚变, 气体放电, X 射线.

## 1 引 言

A. B. Karabut 用气体放电法研究常温核聚变现象时,用 Ge-Li 探测器和 X 光胶片测量了气体放电中的 X 射线,指出 X 射线平均能量在 15~20keV 间,强度约 10<sup>4</sup> n/s<sup>[1~2]</sup>. 我们在用气体放电法研究常温核聚变现象时,也测到了 X 射线,并用三种方法对 X 射线的能量作了诊断测量. 证实 X 射线存在,其能量为单能. 在 11keV 放电时,X 射线能量为 27keV,强度约是中子强度(10<sup>4</sup>n/s)的 10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup> 倍,X 射线能量高于放电电压并且是单能的,这和常规 X 射线相矛盾. 因此确切诊断这种 X 射线是首要的.

## 2 X 射线的诊断

考虑到气体放电中的电磁干扰,首先选用<sup>7</sup>Li 热释光片结合吸收法测量了气体放电中的 X 射线能量. 当测出平均能量为 27keV 的 X 射线后,即刻使用特征 X 射线法验证上述测量结果. 经分析认为,这种 27keV 的 X 射线可能是单能的,并用 NaI 闪烁计数器做进一步测量. 三种方法的测量结果是自洽的.

### 2.1 吸收法

对一批经选择后的<sup>7</sup>Li 热释光片进行灵

敏度刻度,对照射后的热释光片的计数做灵敏度归一和本底修正. 用吸收法测量气体放电中产生的 X 射线平均能量. 如果所用热释光片的厚度相同和密度均匀,可根据 X 射线穿过吸收片之前的计数  $N_0$  和穿过吸收片后的计数  $N_t$  求得吸收片的总质量衰减系数  $\mu_m$  (总)(cm<sup>2</sup>/g)

$$\mu_m(\text{总}) = \frac{1}{\rho \cdot d} \ln \frac{N_0}{N_t} \quad (1)$$

式中  $\rho$  和  $d$  分别为吸收片的密度和厚度. 由实验测出的  $\mu_m$  (总)按已知  $\mu_m$  (总)和 X 射线能量关系,用内插法给出待测 X 射线的能量.

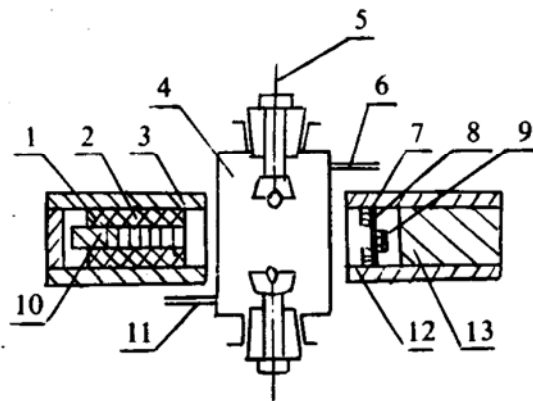


图1 热释光片和吸收片照射的布置. 1<sup>7</sup>Li 热释光片,2 聚四氟乙烯套,3 铅屏蔽筒,4 放电室,5 电极,6 进气管,7 $N_0$  热释光片,8 吸收片,9  $N_t$  热释光片,10 堵头,11 至真空,12 铅屏蔽筒,13 铅塞块

\* 国家自然科学基金和中科院院基金资助课题  
本文 1994 年 5 月 13 日收到.

### 2.1.1 不同吸收片的测量

选用铜、聚乙烯、镭及氟化锂作吸收片. 照射布置见图 1. 四种吸收片测出的 X 射线能量列于表 1.

表 1 四种吸收片测出的 X 射线能量

测量条件	充氖(D <sub>2</sub> )气, 钽电极, 放电电压 11kV			
吸收材料	铜	镭	聚乙烯	氟化锂
X 射线平均能量(keV)	27.7 ± 1.2	28.2 ± 1.1	28.1 ± 1.8	26.6 ± 2.4

### 2.1.2 探测器的自吸收测量法

以 <sup>7</sup>Li 热释光片的自身材料既作 X 射线探测器又作 X 射线的吸收体. 将  $n$  个 <sup>7</sup>Li 热释光片按图 1 方式排成一串照射. 第  $n$  片热释光相应的计数为  $N_n$  (第一片为  $N_1$ , 其余类推), 这样  $\mu_m$  (总) 可表示为

$$\mu_m(\text{总}) = \frac{1}{\rho \cdot d} \ln \frac{N_{n-1}}{N_n} \quad (2)$$

用 <sup>7</sup>Li 热释光片的自吸收法测出的 X 射线能量见表 2.

表 2 自吸收法测出的 X 射线能量

测量条件	放电电压 11kV, 钽或钛电极, 充氖(D <sub>2</sub> )气							
实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
X 射线平均能量(keV)	28.0 ± 2.4	28.2 ± 4	29.5 ± 2.6	26.2 ± 4.3	24.4 ± 4	28.8 ± 8	27.2 ± 5.8	29.3 ± 3.6
实验序号	9	10	11	12	13	14	15	16
X 射线平均能量(keV)	29.1 ± 3.6	26.7 ± 3	22.5 ± 9.7	25.4 ± 6.2	23.6 ± 5.9	28.6 ± 6.1	26.0 ± 4.6	
平均值	26.9 ± 2.2							

用吸收法测量了钽、钛、钡、铋、锆及铁作电极的气体放电中产生的 X 射线能量. 测量结果列于表 3

表 3 不同吸收材料放电中产生的 X 射线能量

测量条件	放电电压 11kV, 充氖(D <sub>2</sub> )气					
材料	钽	钼	钡	铋	锆	铁
X 射线平均能量(keV)	26.8 ± 2.2	27.4 ± 1.6	27.8 ± 3.2	28.2 ± 4.3	28.1 ± 5.8	26.8 ± 4.7

表 4 两种放电电压下产生的 X 射线能量

实验条件	钛电极, 充氖气	
放电电压(kV)	9.3	11.0
X 射线平均能量(keV)	26.5 ± 2.4	27.8 ± 1.3

表 5 不同成份放电气体产生的 X 射线能量

实验条件	钽电极, 放电电压 11.5kV			
放电气体	D <sub>2</sub> 气	H <sub>2</sub> 气	3/4D <sub>2</sub> + 1/4H <sub>2</sub>	≥99.9%D <sub>2</sub> + ≤1%H <sub>2</sub>
X 射线平均能量(keV)	26.9 ± 4.6	26.8 ± 5.3	28.2 ± 5.3	27.5 ± 4.7

用吸收法测量了不同放电电压下和不同成份的放电气体产生的 X 射线能量. 结果见表 4 和表 5.

### 2.2 特征 X 射线法

镭的 X 射线特征吸收能量为 26.7keV. 此能量附近光子的质量吸收系数突然减小. 利用这一特点可鉴别气体放电产生的 X 射线能量是否是 27keV? 如果是, 那么 0.5mm 厚的铜可基本吸收掉 X 射线, 而 0.5mm 厚的镭不能完全挡住这种能量的 X 射线(镭和铜的密度分别为 8.65g/cm<sup>3</sup> 和 8.93g/cm<sup>3</sup>, 两者对光子的衰减效应可以比较). 将 <sup>7</sup>Li 热释光片分别用 0.5mm 厚的铜和镭包上, 置于气体放电产生的 X 射线场中照射. 实验结果见表 6.

表 6 包镭和包铜的 <sup>7</sup>Li 热释光片的计数

实验条件	包 0.5mm 厚镭	包 0.5mm 厚铜	本底
<sup>7</sup> Li 热释光片计数(mGy)	0.412 ± 0.167	0.031 ± 0.004	0.018 ± 0.002

其结果证实了上述估计, 表明气体放电中有

一种约 27keV 的单能 X 射线存在.

### 2.3 NaI 闪烁计数器的测量

用吸收法测出的  $(26.9 \pm 2.2)$ keV 能量的 X 射线是平均能量. 这种 X 射线是单能还是连续谱分辨不出. 因此又使用 NaI 闪烁计数器测量了气体放电中的 X 射线. 在  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  三种放大倍数下, X 射线(通过光电效应)在 NaI 闪烁计数器上产生的脉冲高度谱见图 2. 使用精密产生器测量 X 射线测量系统的线性和零点. 用  $^{243}\text{Am}_\gamma$  源标定能量. 用  $^{243}\text{Am}$  源测出的脉冲高度谱见图 3.

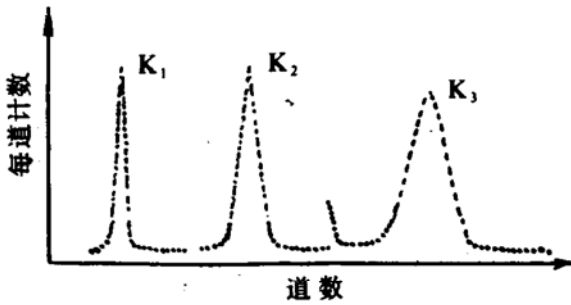


图2 气体放电的 X 射线谱

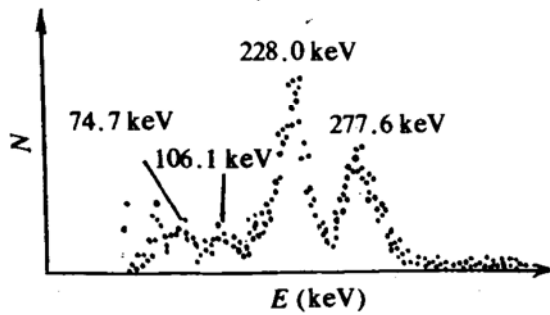


图3  $^{243}\text{Am}$  源脉冲高度谱

经线性和零点修正后, 由图 3 得到道数和能量的关系, 由图 2 的结果给出 X 射线的能量.

在放电电压为 11kV 时, 测出了气体放电产生的 X 射线能量为  $(26.0 \pm 2.4)$ keV. 这和吸收法测出的  $(26.9 \pm 2.2)$ keV 在实验误差内相符.

### 3 X 射线强度的估测

为了对 X 射线的产额作出估计, 将气体

放电中 X 射线的发射等效于点源, 这样 X 射线的产额与注量有如下关系

$$A = 4\pi R^2 \psi / t \quad (3)$$

其中:  $A$  为 X 射线产额 (n/s);  $R$  为探测器至等效点源间的距离 (cm);  $\psi$  为 X 射线的注量 ( $\text{n}/\text{cm}^2$ );  $t$  为照射时间 (s). X 射线的注量, 通过  $^7\text{Li}$  热释光片的吸收剂量  $D$  的测量得到. 对于 27keV 的 X 射线, 在体实验的条件下,  $\psi$  与  $D$  有如下关系

$$\psi = 8.68 \times 10^9 D \quad (4)$$

$D$  正比于  $^7\text{Li}$  热释光片的计数  $B$ . 比例系数  $C$  用已知强度的  $^{137}\text{Cs}$  源刻度. 按刻度出的  $C$  值得到

$$D = 2.64 \times 10^{-2} \times B \quad (5)$$

将  $^7\text{Li}$  热释光片置于气体放电中产生的 X 射线场中照射, 由 (3)、(4)、(5) 式及测到的中子产额可知 X 射线产额是中子产额的  $10^5 \sim 10^6$  倍.

## 4 讨论

完成气体放电中产生的 X 射线诊断之后, 可得到以下几点认识: (1) 气体放电中存在着能量高于放电电压 (11kV) 的 27keV 能量的 X 射线. 这种 X 射线是单能的 (见图 2), 其强度约是中子强度 ( $10^4 \text{n/s}$ ) 的  $10^5 \sim 10^6$  倍. 效应的重复性为 100%; (2) X 射线能量大小和电极材料无关 (见表 3); (3) X 射线能量和放电气体无关 (见表 5). (4) X 射线是怎样产生的? 是正常的 X 射线还是异常的 X 射线? 这有待于进一步的实验研究.

### 参 考 文 献

- 1 Karabut A B, et al. Phys. Lett., 1992, A170 : 265
- 2 TSAREEV V A, et al. Fusion Technology, 1992, 22 : 138
- 3 王大伦等. 强激光与粒子束, 1993, 5(3) : 333
- 4 王大伦等. 原子与分子物理学报, 1993, 10(3) : 2789

(下转 39 页)

- |   |   |
|---|---|
| 3 Knoth J, et al. Spectrochim. Acta, 1993, (48B) : 285    | 9 Utaka T, et al. X-ray Anal. ,1992, (35B) : 933                              |
| 4 Berneike W. Spectrochim. Acta, 1993, (48B) : 269        | 10 Strelci C, et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. ,<br>1993, (334) : 425 |
| 5 Horluchi T, et al. Spectrochim. Acta, 1993, (48B) : 137 | 11 Wobrauschek P, et al. Spectrochim. Acta, 1993,<br>(48B) : 143              |
| 6 Hedge R I, et al. Sci. Technol. , 1993, (All) : 1692    | 12 田宇统等. 核电子学与探测技术 1992.12(1)   |
| 7 Kamei M, et al. J. Appl. Phys. ,1992, (31) : 1326       |   |
| 8 Noma T, et al. J. Appl. Phys. , 1992, (31) : L900       |   |

## Application of Total-reflection X-ray Fluorescence Analysis

Tian Yuhong    Wang Ruiguang

(Department of Yantai University, Yantai 264005)

Tan Jilian

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** In recent years a remarkable development has been achieved in total-reflection X-ray fluorescence (TXRF) analysis techniques. The trace and ultra-trace analysis of elements has been made out from surface and near-surface layer to depth and depth profiling as well as layered structures. Absolute detection limits has come to pg-level and the least detection limits of  $10^8$  atoms/cm<sup>2</sup> can be reached for surface contamination on Si wafers. The basic theory, characteristic, recent international advancement and prospect of TXRF are summarized in this paper.

**Key Words** total-reflection, glancing angle, detection limits, trace analysis.

(上接 60 页)

## X-ray Diagnostic in Gas Discharge

Chen Suhe    Wang Dalun    Cui gaoxian    Wang Mei    Fu Yibei

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

Zhang Xinwei    Zhang Wushou

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

**Abstract** X rays were observed to create when the anomalous phenomenon in the metal loaded with deuterium studied by the gas-discharge method. Therefore the X-ray energy spectra were measured by the absorption method, the specific X-ray approach and the NaI scintillation counter, while X-ray intensity was estimated by using <sup>7</sup>Li thermoluminescent foils. The X-ray average energy measured by the absorption method is  $27.6 \pm 2.1$  keV, which is fitted within the error extent to  $26.0 \pm 2.4$  keV monoenergetic Xrays measured by the NaI scintillation counter.

**Key Words** nuclear fusion at normal temperature, gas discharge, X-ray.