

Henke 型软 X 射线源的研制与测试

何其方 龚再仲

摘 要

本文叙述了 Henke 型软 X 射线源的主要特点及研制、测试工作。我们研制的 *Henke* 源采用棱形靶、线焦点、可拆卸式结构。最大阳极电流可达 100mA。本文还介绍了 70 m 真空装置上的软 X 射线接收实验。终端计数率 $> 3 \times 10^4 / \text{s} \cdot \text{cm}^2$ 。

一、序 言

Henke 型软 X 射线源是根据这种源的发明者 *B. L. Henke* 的名字而来的。原理见图 1。

Henke 源采用正高压。壳体是金属的，和栅极及聚焦极相连共同组成聚焦系统。设计上采用可拆卸式的结构。这种结构的优点是做实验时非常方便，可以随时更换阴极灯丝和阳极的靶面。阴极采用纯钨丝制成，直热式加热。阳极靶面加工成刀口形，两面都能发出 X 射线。

Henke 型软 X 射线源的主要特点是由于这种特殊的聚焦系统形成的电位场的偏转作用力，使电子沿图中所示的曲线轨迹轰击靶面。这种方式的优点是可以避免阴极的蒸发物直接污染靶面，从而提高了 X 射线源的单色性。*Henke* 源的焦点是可以调正的。但相对来讲面积较大。工作电压一般为三千至一万伏左右，阳极电流可达 300mA。栅极对阴极有着屏蔽作用，这势必会增加空间电荷区的影响。所谓空间电荷区，按照原子物理学的解释就是电子在阴极附近的堆聚。这将会明显地影响阴极热电子的发射。参考图 1 可知，*Henke* 源的最初设计采用两种措施来减小空间电荷区的影响。一是阳极靶的沿伸部分（资料中称 *skirt*）；另一个是灯丝后方的聚焦极。

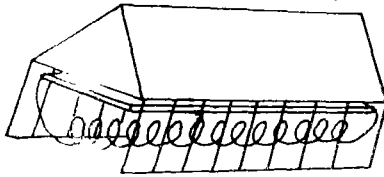


图 2

图 2 是设计者发表的另一种 X 射线源。^[1] 这种源把阳极的沿伸部分加工成栅格的形状。我们分析设计者的本意是提高发射效率，但在这种情况下仍然会有一部分电子直接打到栅格上。虽然这部分电子也能激发出 X 射线，但这些光子无疑是不会由窗口输出的。这部分能量将会在源的壳体内壁上被吸收和散射，损失的程度与栅格的疏密有关。

另一种改进型的 *Henke* 源如图 3 所示^[2-5]。这种源的阳极靶是棱形的，两面对称。当实验用需要调换靶面时只消旋转 180° 即可，方便而又节省材料。顺便指出，这种 *Henke* 源的一个突出优点是强度的均匀性好。我们研制的 X 射线源就是参照图 3 的结构设计的。在国内最早研制 *Henke* 型 X 射线源的是长春光机所的付天有同志。

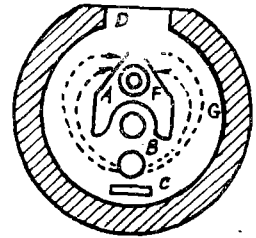


图 1 亨克 X 射线管的结构
A. 阳极结构； B. 阴极；
C. 聚焦极； D. 管窗；
E. 管室； F. 阳极冷却水管；
G. 电子发射径迹。

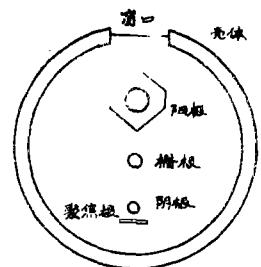


图 3

二、Henke 型软 X 线源的研制

(一) 电子轨迹的分析

一般的 X 线源不一定要考虑电子轨迹。但是 Henke 源电子是沿一条曲线轰击靶面。电子的聚焦位置及焦点的尺寸取决于源的各种几何参数。

由于计算电子轨迹的工作量相当大，我们准备通过实验来确定电子束在靶面的落点。下面我们来分析各个电极对电位分布及电子轨迹的影响。为了方便起见，把 Henke 源的平面图画成图 4 形式。由电磁学的知识不难画出等位面。见图 5。

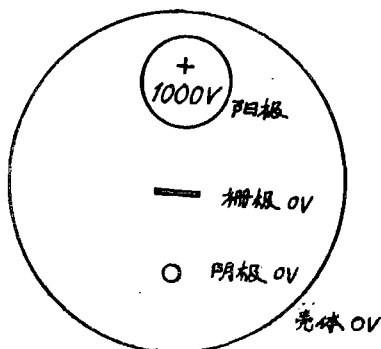


图 4

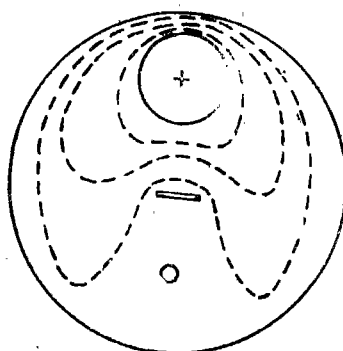


图 5

电子在静电场中的运动轨迹决定于下式⁽⁶⁾

$$\frac{\sqrt{V_1}}{\sqrt{V_2}} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}$$

如图 6 所示，当 $V_2 > V_1$ 时，也就是当电子向高电位方向运动时，轨迹的切线和等位面法线的夹角会逐渐减小。最后将有 $\alpha = 0$ ，即电子以垂直的方向轰击靶面。这一点下面还要用到。

参考这个公式，我们可以定性地画出电子轨迹。

由图 5 可知，当阳极位置定下来之后，焦点（电子的落点）取决于栅极和阴极。图 7 和图 8 是两种极端的情况。我们在实验中就是通过前后移动栅极和改变栅极的宽度来调整电子的轨迹。

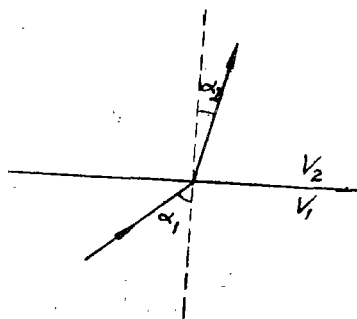


图 6

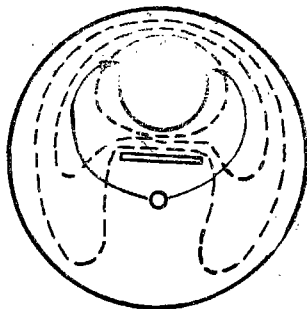


图 7

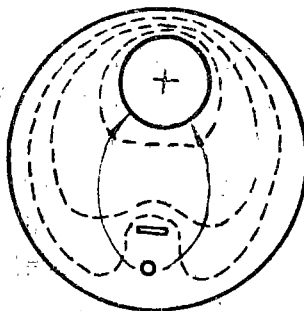


图 8

以上的分析可以为设计 X 线源提供参考。

(二) 散热的问题

高速电子的动能转换为 X 线的效率 n 是很低的。电子和物质相互作用的情况如图 9 所示⁽⁷⁾

当电子加速轰击靶面时，99%以上的能量转化为热能。其余部分转化为图 9 所示的各种信号。所以一般认为 X 线源的效率 $n < 1\%$ ，有的资料甚至认为 n 的数量级为千分之一⁽⁸⁾。上述热量由于 X 线源的聚焦作用，主要集中在靶面的焦点上。另外阴极灯丝的热辐射也会使靶面的温度升高。故在研制高强度（尤其是高亮度）X 线源时，散热是主要的技术困难。

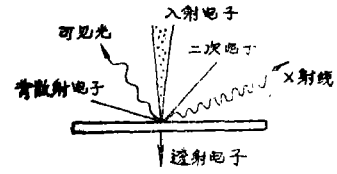


图 9

下面分别讨论灯丝的热辐射及电子束对靶面温度升高的影响。计算热辐射可用下式⁽⁹⁾

$$P = \frac{\sigma T^4 A_1 A_2}{\pi r^2}$$

式中 P 为黑体辐射源辐射到物体上的功率； T 为辐射源的绝对温度； r 为源—物间的距离； $\sigma = 5.673 \times 10^{-12} \text{W/cm} \cdot T^4$ 是斯忒藩系数； A_1 和 A_2 分别是辐射源和物体的有效面积。

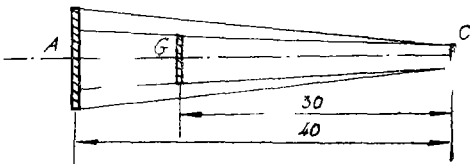


图 10

图 10 是 Henke 源用于热辐射计算的示意图。把我们设计的 X 线源的实际数据代入上式。 $A_1 = 0.75 \text{cm}^2$ ； $A_2 = 8 \text{cm}^2$ ； $r = 4 \text{cm}$ ；灯丝的额定温度为 2700K。故有

的额定温度为 2700K。故有

$$P = \frac{5.673 \times 10^{-12} \times 2700^4 \times 8 \times 0.75}{3.14 \times 4^2} = 37 \text{(W)}$$

电子束引起的靶面温度升高可以用 Muller 公式来计算。这是一个经验公式，出处见文献 10。

$$P_{\max} = 17.8 \times K \times (T_m - T_0) \times \mu(\delta_1, \delta_2)$$

Muller 公式可以计算出阳极靶允许的最大功率 P_{\max} 。我们引用这个公式是因为一般公式都只适用于圆形焦点，而 Muller 公式适用于椭圆形焦点。Henke 的焦点是线焦点，可近似看做椭圆。故采用 Muller 公式是合适的。

上式中 K 为导热系数；

T_m 和 T_0 分别是靶的熔点及初始温度 (°C)， δ_1 和 δ_2 分别是椭圆的长、短轴。

$\mu(\delta_1, \delta_2)$ 由下式决定：

$$a_1 = (\delta_1 + \delta_2) / 2$$

$$b_1 = \sqrt{\delta_1 \delta_2}$$

$$a_2 = (a_1 + b_1) / 2$$

$$b_2 = \sqrt{a_1 b_1} \dots \dots$$

$$a_n = (a_{n-1} + b_{n-1}) / 2$$

$$b_n = \sqrt{a_{n-1} b_{n-1}}$$

$$\mu(\delta_1, \delta_2) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$$

可见 $\mu(\delta_1, \delta_2)$ 等于 a_n 和 b_n 的几何平均值和算术平均值的极限。为了计算各种线焦点，用 Basic 语言编写了一个简单的程序。当给定初值 K 、 T_m 、 T_0 、及 δ_1 和 δ_2 ，计算机就可以打印出相应的结果 P_{\max} 和 $\mu(\delta_1, \delta_2)$ 。

实际上 n 不一定很大，对我们的 X 线源的焦点来说，只消几十步就够了。

计算程序如下:

```

10 INPVT A,B,K,T1,T2          70 IF A=B THEN 90
20 S=0                          80 GOTO 30
30 S=S+1                          90 PRINT"S=",S
40 A1=(A+B)/2                  100 P=17.8*K*(T2-T1)*A
50 B1=SQR(A*B)                110 PRINT"M(A,B)=",A,"P=",P
60 A=A1;B=B1                  120 END
    
```

如果阳极使用铝靶 ($K=0.48, T_m=668^\circ\text{C}$) 室温下 $T_0=20^\circ\text{C}$, 并设 $\delta_1=20\text{mm}$, $\delta_2=0.5\text{mm}$, 输入程序, $P_{max}=2\sim 3\text{kW}$ 。

必须指出, Muller公式是在相当大的靶上得出的经验公式。即 $\delta_1\delta_2 \ll d$ (靶厚)。这在应用上当然是做不到的。实际上我们的Henke源的功率很难超过一千瓦。这主要是我们实验室的阳极冷却是采用油冷装置, 冷却效率比较低。今后准备改用去离子水冷却。预计会使这一问题有所改善。

(三) 设计

在分析和估算了电子轨迹, 散热等问题之后, 就可以着手设计X线源了。

X线源的体积不宜过大, 否则会给加工带来困难, 同时也不经济。但是各电极之间又要有充裕的空间。因为X线源的工作电压较高, (一万伏左右) 必须注意极间放电的问题。另外从上述散热的问题来讲, 体积太小也不合适。

为了提高X射线线的输出, 阳极应当尽量的靠近窗口, 并且需要合理的选取阳极靶的曲度和窗口的尺寸。

下面来分析和计算阳极靶角度和窗口尺寸的最佳值。

我们知道, X射线是在靠近阳极表面的一个薄层内发射出来的。如图11所示

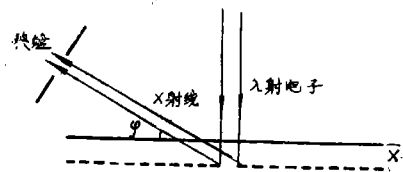


图 11

设 \bar{x} 为薄层的平均厚度。用一个狭缝接收阳极表面发射的X射线。当狭缝很窄时, 可以认为接收的是平行的光子束。由图11可知, 阳极表面上只有 $S = S_0/\sin\varphi$ (S_0 为狭缝的面积) 的一部分表面上产生的X射线才能通过狭缝被接收。如果再考虑到薄层的吸收, 则有

$$I \propto \frac{S_0}{\sin\varphi} \exp\left(-\frac{\mu \bar{x}}{\sin\varphi}\right) \quad (1)$$

其中, I 表示X线的强度; μ 为阳极的线吸收系数。当 S 和 μ, \bar{x} 为定值时, 强度只和 φ 有关。不妨把(1)式改写为

$$I = \frac{I_0}{\sin\varphi} \exp\left(-\frac{\mu \bar{x}}{\sin\varphi}\right) \quad (2)$$

从上式可以看出, $I_0/\sin\varphi$ 随 φ 的增加而减小; 指数项随 φ 的增大而增大。(设 $\varphi \leq \pi/2$)。对(2)式求导数

$$\frac{\partial I}{\partial \varphi} = I_0 \frac{\cos\varphi}{\sin^3\varphi} (\mu \bar{x} - \sin\varphi) \exp\left(-\frac{\mu \bar{x}}{\sin\varphi}\right)$$

令 $\partial I/\partial \varphi = 0$, 即得出:

$$\sin \varphi = \mu \bar{X} \quad \text{或} \quad \varphi = \sin^{-1} \mu \bar{X} \quad (3)$$

(3) 式的物理意义是当 $\varphi = \sin^{-1} \mu \bar{X}$ 时, I 取极大值。例如我们用纯铝靶 ($\mu_p = \frac{\mu}{\rho} = 396$); 工作电压为八仟伏; 根据卡斯坦公式^[11]。

$$\bar{X} = 0.033 (V_o^{1.7} - V_x^{1.7}) \frac{A}{PZ} \quad (4)$$

其中 A、P、Z 分别原子量, 密度和原子序数。V_x 为激发电位。可得出:

$$\bar{X} = 0.033 \times (8000^{1.7} - 1400^{1.7}) \times 26.98 / (13 \times 2.7) = 0.8 (\mu\text{m})$$

$$\therefore \varphi = \sin^{-1}(0.8 \times 10^{-4} \times 396 \times 2.7) = 4.9^\circ$$

可见在上述工作条件下, 与靶面成 4.9° 的方向上 X 线的强度最大。一般资料上都给出 $\varphi = 6^\circ$ 时 I 取极大值。这是因为书中往往指的是硬 X 射线。由于硬 X 线的情况下管工作电压较高, 故由 (4) 式可知 φ 的数值也较大。

为了确定窗口的尺寸, 定义上述强度的最大值为 I_m。窗口应使强度大于 1/2 I_m 的 X 线都能输出。设当 $\varphi = \varphi_0$ 时, $I = 1/2 I_m$ 。则有:

$$\frac{1}{2\mu x} e^{-1} = \frac{1}{\sin \varphi_0} \exp\left(-\frac{\mu x}{\sin \varphi_0}\right)$$

解出: $\varphi_{01} = 2.3^\circ$; $\varphi_{02} = 27.7^\circ$ (仍用上
述数据)

如图 12 所示, 阳极靶的顶角 α 应为 $2\varphi_{02}$,

设靶面上的焦点中心到顶点的距离为 L, 窗口的宽度应满足 $d \geq 2L \sin \varphi_{02}$ 实际上我们设计的 X 线源 $\alpha = 60^\circ$;

$d = 10\text{cm}$ 。这样选择数据是为了设计加工的方便。并留有一定的余量。

下面是 X 线源的总装配图, 实物照片和导轨示意图。

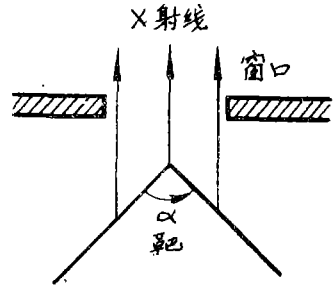


图 12

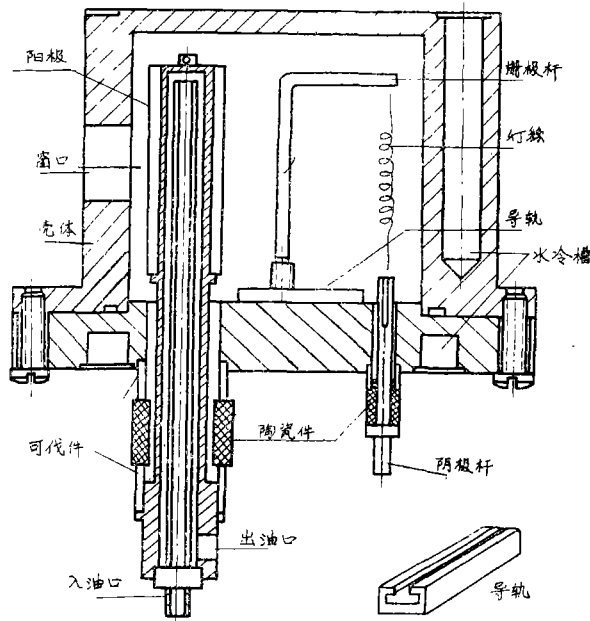


图 13

a) 阳极靶是采用套接的方式与油冷管连接的。油冷管是用紫铜棒钻孔而成。(采用紫铜是考虑到它的质密性,真空性能好) 上端有一销孔,防止靶脱落。内径为 $\phi 10$, 里面还有一个 $\phi 7$ 的进油管与其焊为一体。油冷管通过陶瓷件与壳体绝缘。

b) 陶瓷封接件是长春市半导体厂加工的。具体工艺是:先在九五陶瓷管上涂钼、锰膏,在氢气炉中高温处理。使瓷管的边缘形成金属层;然后用银铜焊料把瓷管和可伐金属管在高温炉中焊接。

c) 导轨是为了调整电子轨迹而设置的。不同臂长的栅极杆可以在上面滑动。根据具体实验确定杆的位置。

d) 壳体亦用紫铜加工,壁上铣出水冷槽通循环水。

e) 阴极灯丝用 $\phi 0.3\text{mm}$ 的纯钨丝绕成螺旋形状。约 45~60 匝。

三、测 试

(一) 实验装置

下面是我们实验装置的方框图。

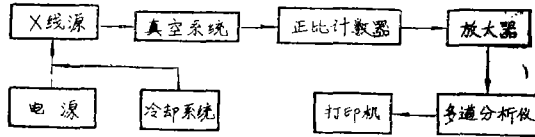


图 14

1. 软 X 线的光路

当波长 $\lambda > 7\text{\AA}$ 时 (SiK_α), 必须使用真空光路。倘若在空气当中, 经过几厘米的距离软 X 线光子的能量就会损失殆尽。真空光路还具有其它优点, 如减少气体分子对 X 线的散射, 避免由于空气密度变化引起的测量误差等等。但在真空状态下, 探测器窗口的薄膜必须用网支撑, 以免抽气时破裂。

2. 正比计数器

由壳体和阳极丝组成。壳内充有惰性气体氩和甲烷。窗口对 X 线有波长选择作用。当 X 线光子进入正比计数器后会使气体电离而产生电子—离子对。电子由于电场的作用而撞击阳极丝, 从而产生一系列的电脉冲。电脉冲的幅值与光子的能量成正比, 数目与光子的强度成正比。

3. 预放器

由于正比计数器输出的电脉冲通常只有毫伏甚至微伏数量级, 所以必须将信号放大后再输入到多道分析器。预放器的主要指标是稳定、线性好和低噪声。

4. 多道分析器

其性能是把正比计数器输出、经电荷灵敏放大器(预放器)放大的一系列电脉冲按幅度大小分成不同的道数。实际上多道分析器的主体部分是用电平幅度鉴别器组成的一系列“电子窗”。不同道数中的脉冲个数代表不同波长的光子数目。常用的多道分析器有 256 道、512 道、1024 道等。

其它设备还有高压电源和冷却系统等。

(二) 电子轨迹的调整

在测试 X 线源的过程中, 首先要测定和调整焦点。这不仅是因为焦点尺寸是 X 线源的重

要指标之一，还由于电子束的聚焦情况关系到X线源的发射效率。具体方法是在阳极靶面上涂一层荧光粉。当电子轰击阳极时会产生光斑，我们可以从窗口观察光斑的位置和形状，然后通过调整栅极在导轨上的位置来确定合适的焦点。

(三) 波长的标定

对我们的工作来说，X线源的阳极材料是已知的。我们这里所说的波长标定只不过是有多道分析器上“认明”仪器显示的信号是不是我们所要求的特征谱线。

最简单的方法是用放射性同位素⁵⁵Fe做标准。已知⁵⁵Fe的波长为2.1Å，光子能量为5.9 keV。用它做信号源在同一工作条件下测得其在多道分析仪上的道数。假设为100道，则若X线源使用铝靶时，AlK_α的谱线应当在：

$$N = 1.486 \times 100 / 5.9 \approx 25 \text{ (道)}$$

其它方法还有利用探测器的分辨率进行间接测量等等。

(四) 强度的标定

这里所介绍的是相对强度测量。原则上我们应当测量整个标识峰的积分强度。能量色散法测积分强度是很方便的，多道分析仪可以同时显示出单道和积分计数。

常用的计数方式有两种。a) 预定时间法：把仪器的定时器拨到规定的时间 T ，(T 应足够大，使计数具有较高的统计精度。我们的实验中一般取30秒。)当仪器自动停止计数后，读出积累计数 N ，则计数率 $I = N/T$ (光子数/秒)。b) 预定计数法：在仪器的定标器上预先规定计数值，当达到这一计数值时仪器自动停止并显示出所用的时间 T 。同样可用上式求出计数率。我们采用第一种方法。

标识谱线强度的理论公式如下：

$$I = K i (V - V_x)^n$$

其中 V 和 V_x 分别为工作电压与激发电压； i 为阳极电流； K 为常数；当 $V < 3V_x$ ， $n = 1.7$ ；当 $V > 3V_x$ ， $n = 1$ 。下图是我们的测试曲线。测试距离为1米。由于X线源的强度较高，为避免计数效应的影响，在正比计数器的窗口加了铝膜，中间针孔的直径约为75μm。系统的真空度在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 托之间， $T = 30 \text{ s}$ 。最大计数率为 $1.5 \times 10^8 / \text{s} \cdot \text{cm}^2$ 。

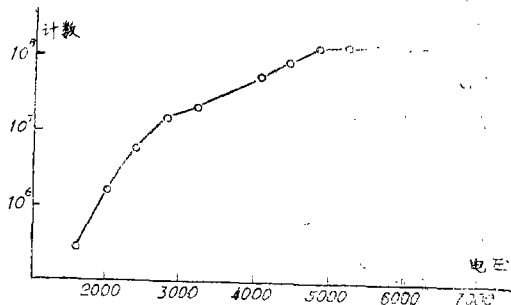


图 15



图16 AlK_α谱线 (1024道多道分析仪摄)

从理论公式上来看，标识谱的强度随工作电压的增加而增加。但这并不是说可以一味通过提高电压来得到所需的强度。首先，阴极发射的热电子是有限的，当电压增至一定的数

值，阳极电流就不会再增加了。另外阳极靶所能承受的功率也是有限的。

下面分析一下影响强度的几种主要因素。

a) 工作电压：当工作电压相当高时，X线的强度反而会逐渐降低。这是由于此时电子作用于阳极靶面的深度加大，X线受靶面表层吸收而衰减的结果。利用前面介绍过的卡斯坦公式，当使用铝靶阳极，工作电压为一万伏时， $\bar{x} \approx 1 \times 10^{-8}(\text{m})$ 。由X射线通过物质的吸收公式：

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho \bar{x}} = I_0 e^{-396 \times 2.7 \times 10^{-4}}$$

$$\approx 0.89 I_0$$

可见这种衰减是很可观的。

b) 污染：其主要来源是X线源内的有机物（如真空脂、氟橡胶垫圈等）和真空系统的扩散泵油。这些污染通常使碳的谱线成分大大增加。文献指出，当阳极材料的原子序数 $Z < 14$ 时，污染的影响最为明显^[12]。

c) 符合损失：当一个X线光子进入正比计数器后，在一段时间内计数器不再工作。这段时间 τ 称为分辨时间。显然，当计数率 I 接近 $1/\tau$ 时，会引起计数误差。这一误差称之为符合损失，例如，当 $\tau = 1\mu\text{s}$ ，最大计数率应满足 $I_m < \frac{1}{\tau} = 10^6/\text{s} \cdot \text{cm}^2$ 。

对于上述三种对强度测量的影响，前两种是强度的实际变化。可以通过合理的选择X线源的工作参数及使用无油真空系统来解决或改善。至于符合损失属于测量误差，一般采用下式来修正：

$$I = I_0 / (1 - I_0 \tau)$$

例如当 $\tau = 1\mu\text{s}$ ， $I = 2 \times 10^4$

$$I = 2 \times 10^4 / (1 - 2 \times 10^4 \times 10^{-6})$$

$$= 20202$$

符合损失约为 1 %。

我们研制的Henke源的灯丝功率为180W。当使用铝靶时，最大阳极电流可达100mA。但由于油冷系统的冷却效率低，平常工作时电流一般不超过60mA，以免烧损阳极靶面。

(五) 强度分布

美国芝加哥大学宇宙X线实验室曾发表过Henke源的强度分布曲线。(使用的是图1所示的三角形阳极X线源) 具体方法是在X线源前方放置一个可移动的狭缝，后面用正比计数器接收X线光子。当狭缝垂直于窗口平面的法线平移时，就可测出不同方向的强度。

由图17可见，三角形阳极的Henke源的强度的空间变化是相当大的。峰、谷两点的相对强度之比约为8。

我们用自行研制的X线源作强度分布的测试。由于一般实验室的小真空系统管道直径只有几厘米，不可能用移动狭缝的方法测量。我们采用的方法见图18。

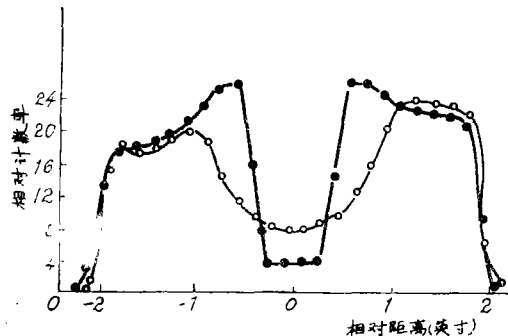


图 17

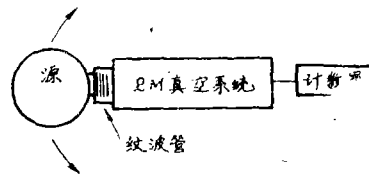


图 18

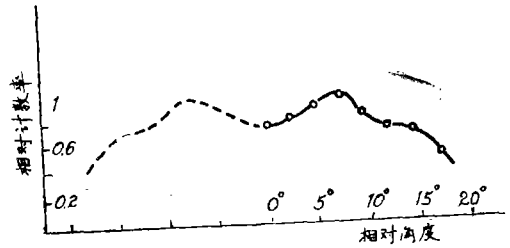


图 19

图19是测试曲线。其结果表明棱形靶X线源的强度均匀性比三角形靶好得多。(峰、谷相对强度比约为1.3)。强度分布的测试结果可以给X线源的应用作参考。原则上应选择强度变化率最小的方向对准接收面，以得到最好的均匀性。

(六) 衰减问题的探讨

软X线与可见光一样，在传播过程中会产生衰减。即使在理想的高真空系统中，还会由于发散而降低其强度。一般用反平方公式来计算这种衰减。

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

反平方公式只限于点源的计算。但 Henke 源是线焦点的 X 线源，并不适用于上述公式。

严格推导 Henke 源的衰减公式是困难的，而且没有普遍意义。但我们可以根据具体情况来确定经验公式。

首先，当距离增加，计数率必然降低。故可认为

$$\frac{N_1}{N_2} \propto \frac{r_2}{r_1}$$

仿照反平方公式，将上式改写为：

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^n$$

已知 r_1 和 r_2 ，又实测出 N_1 和 N_2 ，就可以定出 n

$$n = \log \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

从而估算出距 X 线源 X (米) 处的光子计数率

$$N_x = N_1 r_1^n / x^n = N_2 r_2^n / x^n$$

根据我们推导的经验公式，在 70 米的终端接近面上，X 线光子的计数率应为 $10^4 \sim 10^6 / \text{s} \cdot \text{cm}^2$ 。这一指标与西德地外所发表的数据，数量级相近。因此我们提出了在 70 米真空系统上进行接收实验的计划。

长春光机所第三研究室的付天有老师、崔松鹤老师、杨玉奎同志等和测试中心的同志们在我的工作中给予自始至终的、无私的帮助，并参加全部实验工作。在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] B. L. Henke, Advance X-Ray Analysis, 1961, 4, 244
- [2] B. L. Henke, Advance X-Ray Analysis, 1975, 18, 78
- [3] B. L. Henke, Applied Physics, 1976, 47, 1027
- [4] B. L. Henke, Physical Review, 1979, 19, 3004
- [5] B. L. Henke, J. Applied Physics, 1981, 52, 1509
- [6] 陈立坚等,《实用电子计算公式》 1981,国防工业出版社, 12
- [7] 内山郁等,《电子探针X射线显微分析仪》 1982, 国防工业出版社, 15
- [8] H-J. Queisser,《X-Ray Optics》1977, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 12
- [9] 纪红,《红外技术基础和应用》 1979,科学出版社, 57
- [10] H-J. Queisser,《X-Ray Optics》1977, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 13
- [11] 内山郁等,《电子探针 X射线显微分析仪》 1982, 国防工业出版社, 34
- [12] 内山郁等,《电子探针X射线显微分析仪》 1982,国防工业出版社, 118