

场发射闪光X射线管*

于祖哲 刘光诒 张 奇
王培刚 王月坡 尹元昭

提 要

本文介绍了1000kV、400kV场发射闪光X射线管的研制。着重叙述了场发射管的原理、结构和性能。也概述了场发射阴极的机理。该管配上400kV和1000kV脉冲Marx发生器电源,可产生约50毫微秒的脉冲X射线。在X射线高速摄影(如在弹道学研究、爆炸力学的研究)中应用获得了成功。

一、引 言

场发射闪光X射线管,又称冷阴极X射线管,早在1948年就研制成功了。不过那时的X射线管剂量小、寿命短、可靠性差。后来经过不断地研究,对继场发射而产生的真空电弧机理^[1,2]有了较深入的了解,改进了管子设计,性能亦逐步提高,到六十年代初期已在弹道学的研究中获得成功的运用^[3-5]。

近年来我们也进行了这方面的研究,先后研制出400kV、1000kV和1.5MV三种闪光X射线管,配备上脉冲X射线机,在弹道学研究、爆炸力学研究和辐射效应等方面的使用中得到初步结果。下面仅就400kV、1000kV闪光X射线管的原理、结构、性能等问题分别加以叙述。

二、场发射阴极的原理及构造

在热电子发射和光电发射中,必须给电子足够的能量,电子才能越过金属表面的位垒。但在场致发射情况下,在极强的外电场作用下使金属表面位垒变形,以致未激发的电子也能穿透它,即产生所谓的“隧道效应”。1928年Fowler和Nordheim用量子力学理论导出了矩形势垒的场发射公式。发射电流为:

$$I = K_1 A F^2 \exp(-K_2/F) \quad (1)$$

$$K_1 = 6.2 \times 10^{-6} (W_F/\phi)^{1/2} / (W_F + \phi) \quad (2)$$

$$K_2 = 6.85 \times 10^7 \phi^{3/2} \quad (3)$$

式中 W_F 和 ϕ 分别为费米能级(eV)和逸出功(eV), F 为阴极的表面电场(V/cm), A 为阴极的发射面积(cm^2),发射电流用安(A)表示。在阴极表面,电场强度与外加阳极电压有

* 1978年8月12日收到。

如下的关系:

$$F = \mu V \quad (4)$$

式中 μ 是结构因子, 由阴极形状和二极管结构来决定. 对于双曲线近似的阴极, 结构因子为:

$$\mu_H = \frac{2}{r \ln 4D/r} \quad (5)$$

对于抛物线近似的阴极, 结构因子为:

$$\mu_P = \frac{2}{r \ln 2D/r} \quad (6)$$

其中 r 为阴极表面的曲率半径, D 为阳—阴极间距.

从公式(1)可知, 当电场强度为 $(3-6) \times 10^7 \text{V/cm}$ 时, 电流密度可达 10^5-10^6A/cm^2 . 为达到场发射所需电场, 阴极尖端的曲率半径必须在 $10^{-3}-10^{-5} \text{cm}$ 范围内. 尽管发射密度很高, 但因尖端阴极的发射面积很小, 总电流亦很小. 采用多尖端场发射阴极, 发射电流可达到实用的水平. 到六十年代初期, 由于高压毫微秒技术的发展, 研制出了场发射阴极的真空电弧管. 这时管电流可达几千安以上. 这一事实, 采用等离子体阴极的假设可得到解释.

在闪光 X 射线管阳极加上高压脉冲电压后, 阴极尖端表面产生极强的电场, 从而产生场发射电流. 随着阳极电压升高, 阴极尖端温度也随着升高, 阴极材料被熔化蒸发, 蒸汽被高压电离, 中和空间电荷. 当脉冲场超过临界值 $(5-8) \times 10^7 \text{V/cm}$, 相应的电流密度超过 $(4-7) \times 10^7 \text{A/cm}^2$ 时, 引起发射尖端蒸发爆炸, 形成阴极闪光^[8,9]. 许多闪光的迅速合并形成等离子体鞘, 它覆盖着整个阴极面, 并以恒定的速度向阳极扩展. 而场发射公司的 DyKe 等人则称之为真空电弧^[4]. 不管叫阴极闪光或称真空电弧, 都是以等离子体为基本实质的. 等离子体鞘和阳极间的距离为:

$$D = D_0 - vt \quad (7)$$

式中 D_0 为阴—阳极间距, t 为等离子体开始向阳极运动所记的时间(s), 而 v 是等离子体速度, 其值一般在 $(2-5) \times 10^6 \text{cm/s}$ 范围.

近年来由于对大电流的要求, 阴极多采用球面或平面. 这时阴极表面的宏观电场约为 10^5-10^6V/cm , 达不到场发射的要求. 实际上大面积阴极的表面从微观上看是不平的, 有许多凸起, 凸起的顶部电场增强. 设阴极表面的宏观电场为 F_0 , 则凸起的电场为:

$$F = \beta F_0 \quad (8)$$

其中 β 为电场增强系数, 它远大于 1. 根据 Alpert 等人^[10,11]的报道, 场增强系数在 100—300 范围内. 这时式(1)可写为:

$$I = K_1 A (\beta F_0)^2 \exp(-K_2/\beta F_0) \quad (9)$$

于是场发射公式的对数形式如下:

$$\ln(I/F_0^2) = [\ln K_1 + \ln A + 2 \ln \beta] - K_2/\beta F_0 \quad (10)$$

如果二极管电流是场发射, 那么 $\ln(I/F_0^2)$ 对 $1/F_0$ 的曲线将是一条直线^[12]. 在对数轴上的截距为 $\ln K_1 + \ln A + 2 \ln \beta$, 其斜率为 $-K_2/\beta$.

综上所述, 二极管在加上脉冲电压的最初几个毫微秒内, 属于纯场发射. 此后电流迅

速增加是由于产生了等离子体。因此在场发射闪光 X 射线管中,场发射起着起动作用,而等离子体对于产生大电流具有决定性作用。

我们在 400 kV、1000 kV 的 X 射线管中采用了两种阴极,即阵列式多尖阴极和环形刀边阴极。

阵列式多尖阴极,是在一块无氧铜基金属上均匀分布着两排钨尖,犹如一把梳子(图 1)。根据需要每块阴极上包含 50—100 个钨尖。钨丝直径为 0.1 mm,行间距为 0.6 mm,尖间距为 0.35 mm,尖端曲率半径约为 1—3 微米,用电解腐蚀制成。

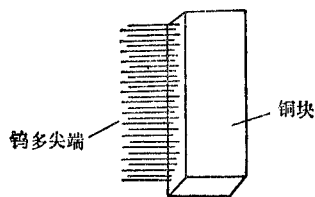


图 1 阵列式多尖阴极

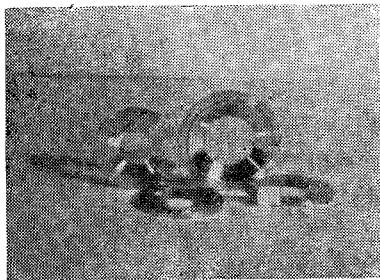


图 2 环形刀边阴极

环形刀边阴极由不锈钢车制而成(图 2),内刀口曲率半径应在 10^{-3} — 10^{-5} cm 范围内。刀口内角小于 15° 。车制时,刀口要求尽量锋利,而其他部分要求极为光滑。

三、场发射闪光 X 射线管的原理和结构

场发射闪光 X 射线管,是一个典型的二极管,其外形照片如图 3 所示。其阴极是阵列式多尖阴极或环形刀边阴极。阳极是薄的钨靶或钨圆锥形靶。管壳上设有透射性能好的可伐箔输出窗。

二极管加上脉冲电压后的几毫秒时间内,随着强的场发射的产生,钨尖蒸发乃至爆炸,形成等离子体。在这一过程中二极管电流迅速上升。增长着的电子在二极管区域构成空间电荷,发射电流受空间电荷限制。基本上符合 Child-Langmuir 的空间电荷限制流公式^[12]:

$$I = 2.335 \times 10^{-6} \frac{A}{D^2} V^{3/2} (A) \quad (11)$$

式中 A 为阴极面积 (cm^2), D 为极间距 (cm), V 是二极管电压 (V)。二极管的导流系数为:

$$P = I/V^{3/2} = 2.335 \times 10^{-6} A/D^2 \quad (12)$$

考虑到等离子体的运动,极间距经过修正的导流系数为:

$$P = 2.335 \times 10^{-6} A/(D - vt)^2 \quad (13)$$

式(11)—(13)是从平行平面二极管推导出来的公式,对于用多尖阴极的二极管,由于等离子体覆盖着整个多尖阴极,形成活动阴极向阳极运动,因此,仍然可用它们来近似地估算

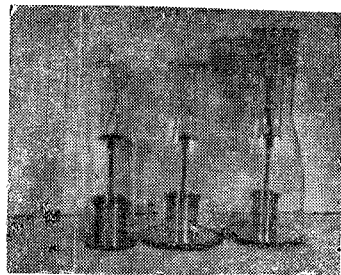


图 3 400kV、1000kV (左一) X 射线管外形图

二极管电流和导流系数。

发射的电子流在阳—阴极间得到加速,高速运动的电子打在阳极上,受到阻滞即产生 X 射线,电子撞击钨靶时, X 射线辐射强度在空间的分布与外加电压大小有关^[13],其规律如图 4 所示。我们以此作为选择管结构的依据。在电压小于 1 MV 时,利用垂直于电子束方向所发生的 X 射线较为合理;而在 1 MV 或更高电压下,使用与电子束运动方向相同的 X 射线束较为合理。据此,我们试制的 400 kV 的场发射 X 射线管采用圆锥靶结构(又称反射靶结构)。

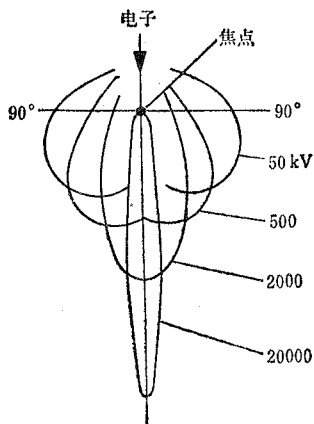


图 4 X 射线分布与电压的关系

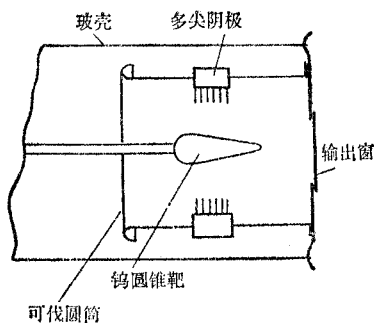


图 5 400kV 管结构简图

在这种结构中,阳极是半锥角为 7° 的钨圆锥,其四周对称地安装四个多尖阴极块,或安装环形刀边阴极。为减弱可伐圆筒末端电场分布,筒末端卷成圆弧状。管结构如图 5 和图 6 所示。

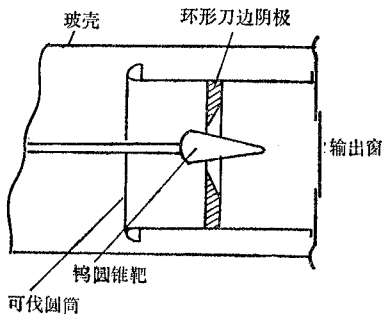


图 6 1000 kV 管结构简图

这种结构的优点在于,本身具有静电聚焦作用,无需聚焦磁场。电子打在圆锥靶面上,最强的 X 射线辐射方向与电子方向垂直,即沿管轴方向。管子的焦点大小主要取决于钨圆锥的直径和半锥角。钨圆锥的最大直径为 5mm;半锥角为 7° 。

当电压在 1MV 以上时,需采用透射靶结构。阳极是薄的钨片,放置在阴极的前面。X 射线从靶的另一面沿电子束方向发射出来。这种结构的优点在于,在同样高的电压下,它较反射靶有更大强度的 X 射线。但用于高速摄影时,必须加磁场聚焦。为了使用的方便,我们仍采用圆锥靶结构。

四、场发射 X 射线管性能测试结果

由于我们缺乏测试设备,测试手段也不完善,所以仅对二极管的电压、电流、X 射线剂量、穿透本领、X 射线源焦点以及辐射场进行了测试,而对电子的能谱和 X 射线光谱都没有测试。这两种 X 射线管的性能列于表 1 中。现分别加以叙述。

表 1

类别	脉冲电压 (kV)	脉冲宽度 (ns)	脉冲峰值 电流(A)	剂量(毫伦)		穿透本领 (相距1 米处穿透 钢厚度) (mm)	管子焦点 (mm)	寿命(放 电次数)	匹配阻抗 (Ω)
				距靶 半米处	距靶 1 米处				
1	400	50	4000	60—70	~20	30	~ $\phi 4$	≥ 100	100
2	1000	50	4000		40—50	80—90	$\phi 4$	≥ 100	250

(一) 电压电流的测量

因脉冲电压源的阻抗一定,为了得到最好的输出波形,必须使 X 射线管的阻抗与电源阻抗匹配。为此,一是改变阴极尖端的曲率半径,一是改变极间距。如果发射尖端的曲率半径较小,或极间距离较小,则管子的动态阻抗就偏低,阴—阳极之间没加到足够高的电压就放电了。反之,若发射尖端曲率半径较大,或极间距离较大,动态阻抗就较大,管电流会下降。我们通过选择阴极形状和调节极间距离来实现管子的阻抗与电源匹配。对于多尖端阴极的 400 kV X 射线管,测得的电压电流波形如图 7。从图 7 可知,电流比电压滞后约 6 ns,相当于管子从加上电压到产生场发射、阴极蒸发、发射尖端爆炸并形成等离子层所需的时间。脉冲前沿约 6 ns,脉冲宽度约为 50 ns。

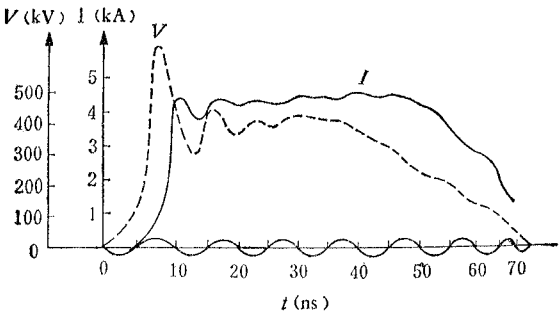


图 7 400 kV 闪光 X 射线管电压、电流波形图

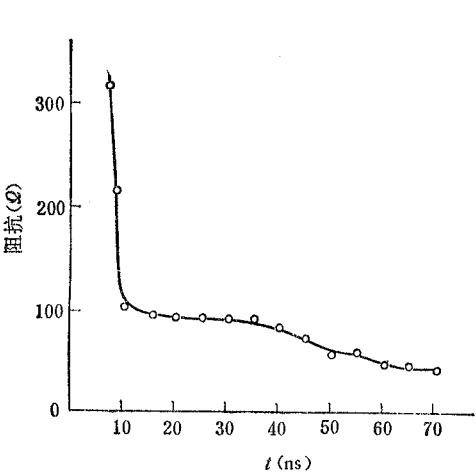


图 8 400 kV X 射线管的阻抗曲线

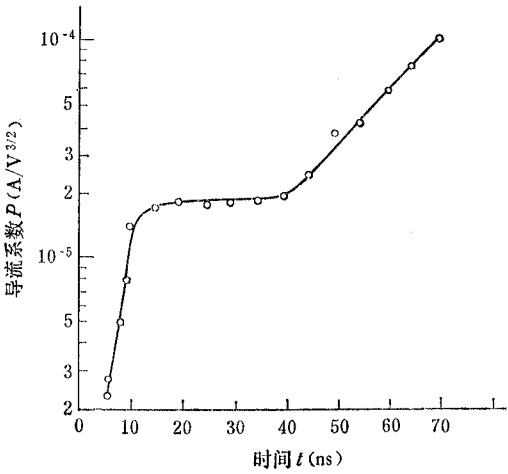


图 9 400 kV X 射线管的导流系数曲线

从图 7 计算的管子阻抗曲线和导流系数曲线如图 8、图 9 所示。由于电压、电流随时间变化,因之管子的阻抗和导流系数也是时间的函数。管子的阻抗在测到电流的前 5 ns 时间内,从无穷大降到稳定值(约 100Ω)。而后由于等离子体向阳极扩展,阻抗缓慢地下降。

从式(12)可知,经典的导流系数是与时间无关的,而图 9 所示的导流系数与修正的导流系数公式(13)一致。这就说明闪光 X 射线管中的确存在等离子体运动。

(二) X 射线强度

X 射线剂量测量结果如表 1 所示。为了提高剂量一般有两途径,即提高脉冲电压幅度和增大电子流。电压在 2 MV 以下,剂量大小与电压峰值平方成正比。图 10 是 400 kV 5# 管测试结果。直流充电电压为 20—29 kV,输出电压计算值为 320—465 kV。为了增加电子流必须减小脉冲电源的阻抗,对 X 射线管来说,就要增大发射面积和缩小极间距。

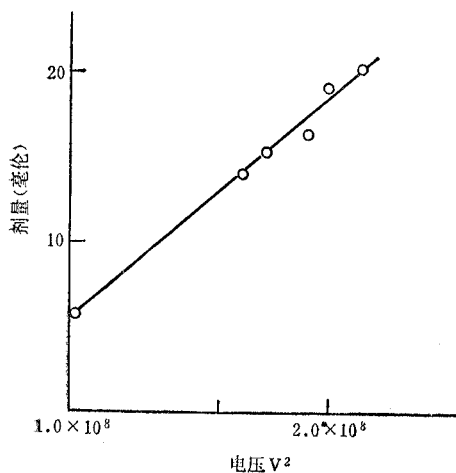


图 10 X 射线剂量与电压平方的关系

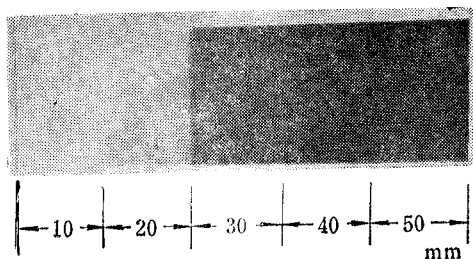


图 11 400 kV 管穿透钢阶的照片(30mm)

(三) 穿透本领

在实际应用中,为在被辐射物体背后得到清晰图象,要求 X 射线有一定的穿透本领。穿透本领与电子束的能量和密度有关。一般由脉冲电压和脉冲电流之积表示。400 kV 的 X 射线管单次脉冲在 1 m 处能穿透 30 mm 厚的钢(图 11)。

(四) X 射线管焦点大小

在高速摄影中,对光源焦点大小有着严格的要求。为减小高速运动物体的边界模糊,焦点要尽量小。在圆锥靶情况下,焦点大小由锥体直径和半锥角大小来决定。我们采用小孔成象法对 400 kV 型 X 射线管进行测试,8# 管和 9# 管结果一致。对于小焦点 X 射线管,焦点的大小由下式表示(图 12)

$$F = \frac{L_1}{L_2} F' - \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right) d$$

式中靶至铅屏之距 $L_1 = 30$ cm, 铅屏至底片之距 $L_2 = 60$ cm, 小孔直径 $d = 1$ mm, 从底片实测焦点图象尺寸 $F' = 11$ mm(图 13), 经计算得焦点 $F = 4$ mm。

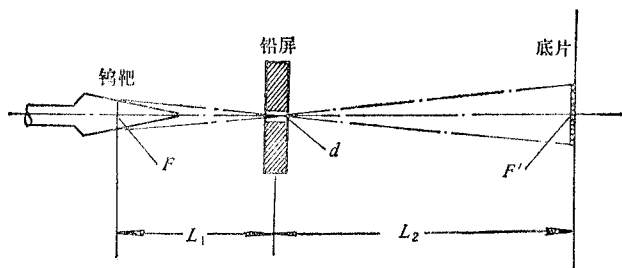


图 12 测量焦点的小孔成像法

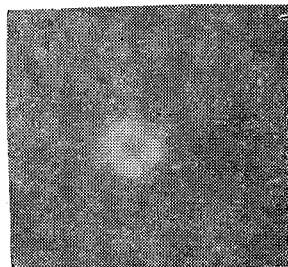


图 13 X 射线管焦点图象照片

(五) X 射线管的寿命

因脉冲电压的持续时间极短,管子的寿命以放电次数来表示.通过实验可知,400 kV、1000 kV 闪光 X 射线管的寿命都在 300 次以上.图 14 为 400 kV 的 5# 管测试曲线.放电 100 次后未发现剂量下降,以后的放电,未画入图中.影响管子寿命的因素大致如下:

1. 真空度变坏

我们做的封离式 X 射线管的真空度为 1.5×10^{-7} 托量级.若电极去气不彻底,放电时电极受电子流轰击而放气,真空度变坏, X 射线剂量就下降.

2. 发射尖端的损坏

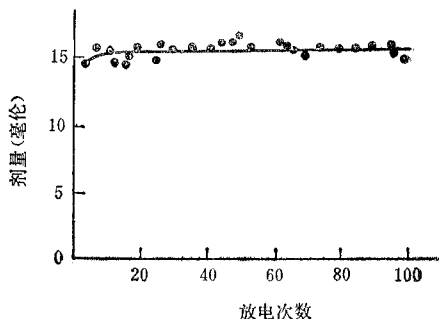
对于钨多尖端阴极,放电时,有时会使尖端熔化形成小球.因此,有效的发射尖端随放电次数的增加而逐渐减少.减少到一定程度后,剂量就显著下降.

3. 钨靶质量不良

X 射线管靶面要求光滑密实,否则经过多次放电后,就出现高低不平的斑点,使 X 射线散射.

(六) X 射线辐射场

X 射线管射线辐射场以圆锥半角 θ 表示.我们对 400 kV 的 5# 管进行了测试,在半锥角 22° 的立体圆锥内, X 射线剂量下降不大于 20%.

图 14 400 kV 的 5# 管寿命测试曲线
(剂量为距靶一米处测)

五、闪光 X 射线管的应用

我们研制的 400 kV、1000 kV 闪光 X 射线管与毫微秒高压脉冲发生器配合使用^[14],产生约 50 ns 的 X 射线脉冲,脉冲电压峰值分别为 400 kV 和 1000 kV. 经过几年的实验证明,这两种 X 射线管在使用中是满意的.其主要用途简述如下:

(一) 研究辐射效应

采用高功率、高剂量率和强剂量的 X 射线脉冲,模拟核爆炸产生的 γ 射线辐射,用来研究生物、各种材料及电子元器件的抗辐射能力.

(二) 高速摄影

毫微秒 X 射线脉冲可使高速运动的物体清晰成象,加之它具有一定的穿透能力,所以被广泛地用于弹道学、爆炸力学的研究,以及用于探伤透视等方面。详细情况请参阅文献 [14, 15]。这里不再赘述。

参 考 文 献

- [1] W. P. Dyke, *Phys. Rev.* **91**(1953), 1043.
- [2] P. T. G. Flynn, *Proc. Phys. Soc. Section B*, **69**(1956), 748.
- [3] F. J. Grundhauser, *J. SMPTE*, **70**(1961), 435.
- [4] W. P. Dyke, *J. SMPTE*, **71**(1962), 82.
- [5] F. J. Grundhauser, *7th Inter. Congress on High-Speed Photo-Graphy*, (1965).
- [6] Fied Emission Corporation, *Rev. Sci. Instr.* **37**(1966), 692.
- [7] W. P. Dyke, *Scientific American*, **210**(1964), 108.
- [8] G. A. Mesyats..., *Proc. 4th Intern. Symp. Discharge and Electrical Insulation in Vacuum*. (1970), p. 82.
- [9] С. П. Быраев ..., *Ж.Т.Ф.*, **Т. 37** (1967), 2206.
- [10] D. Alpert, ..., *J. Vac. Sci. Technol.* **1**(1964), 35.
- [11] T. Utsumi, *J. Appl. Phys.* **38**(1967), 2989.
- [12] R. K. Parker, *Record of the 11th Symposium on Electron, Ion, Laser Beam Technology*. (1971), 453.
- [13] В. К. Шмелев, *Рентгеновские Аппараты* (1953).
- [14] 张奇等, 400kV 高速 X 射线摄影机, *电子学通讯* **1**(1979), 56.
- [15] F. Jamet and G. Thomer, *Flash Radiography*, *Elsevier Scientific Publishing Company*, (1976).