

40 万伏电子高压倍加加速器

丁 家 林

本文介绍了我们设计制造的 40 万伏电子高压倍加加速器的结构、运行情况及特点。加速得到了 8 毫安的电子流。在距靶 5 厘米的工作地点得到了 12000 伦/分的低能 γ 射线。

进行防护材料辐射性能的研究，辐射化学研究以及各种对 γ 灵敏的探测器或剂量计的 γ 补偿、空气当量校准等工作，均需要能量低、功率和剂量率大、照射面宽的辐射源。为了满足这些需要我们设计制造了电子高压倍加加速器。这个加速器的高压部分是和加速氘核的高压倍加器共用的。

结构与設計

在确定总体安排的时候，我们集中考虑了两种方案。第一种方案是电子枪放在上部，并处在负高压下，射出的电子由上向下加速打到接地的靶上。它的好处在于被照射样品的调换、搅拌及被照射样品各种电热参量的测量比较容易。缺点是电子枪灯丝加热电源必须与地隔开，使上部高压极结构复杂化。重要的是它要求改变现有高压倍加器的极性，从而要改变现有离子加速系统的极性。另一种方案则相反，电子枪处于下部地电位，射出电子由下而上加速，打到处于正高压的靶上。它的缺点就在于使工作样品的处理困难一些。它的好处是无需更动高压倍加器结构及离子加速系统。[高压极部分结构简单，可以不用附加绝缘支柱而直接用加速管本身支持。]综上所述并考虑到同时加速离子、电子及离子加速系统已经建成，我们决定采用后一方案。其结构见图 1, 图 2。

基本参量的确定

1. 高压电源的最大容量受倍加线路中高压变压器的额定功率(见图 3) 5 仟瓦的限制。最高能量的最大负载电流 y 应满足

$$400 \times 1000 \times y = 5 \times 10^3 \text{ 瓦}$$

即

$$y = 0.0125 \text{ 安} = 12.5 \text{ 毫安}$$

最大加速电子流小于 12.5 毫安。

2. 剂量率的估计: 剂量率的大小决定于加速电子的能量及靶子材料的原子序数, 同时与加速电子流强度成正比。对于能量为 2 兆电子伏的电子束打到金靶 ($Z = 79$) 上, 每 100 微安在距靶 1 米处(零度方向)的剂量率 $P_{1*} = 47$ 伦/分。我们假定同样流强下剂量率与能量三次方成比例, 则当能量为 0.4 兆电子伏, 强度为 100 微安的电子束打到金靶上时, $P_{1*} = 0.37$ 伦/分。设最大负载电流的一半 (6.25 毫安) 加速落到靶上, 则距离靶子一米处的剂量率将达 23.6 伦/分, 折合到工作地点(距离靶 5 厘米)剂量率 $P_{5*} = 9450$ 伦/分。

3. 满载时靶子消耗功率达

$$400 \times 1000 \times 6.25 \times 10^{-3} = 2500 \text{ 瓦}$$

4. 靶子的冷却: 经过计算进出口温差为 50°C , 流速为 1850 毫升/分的油冷系统可以满足要求。

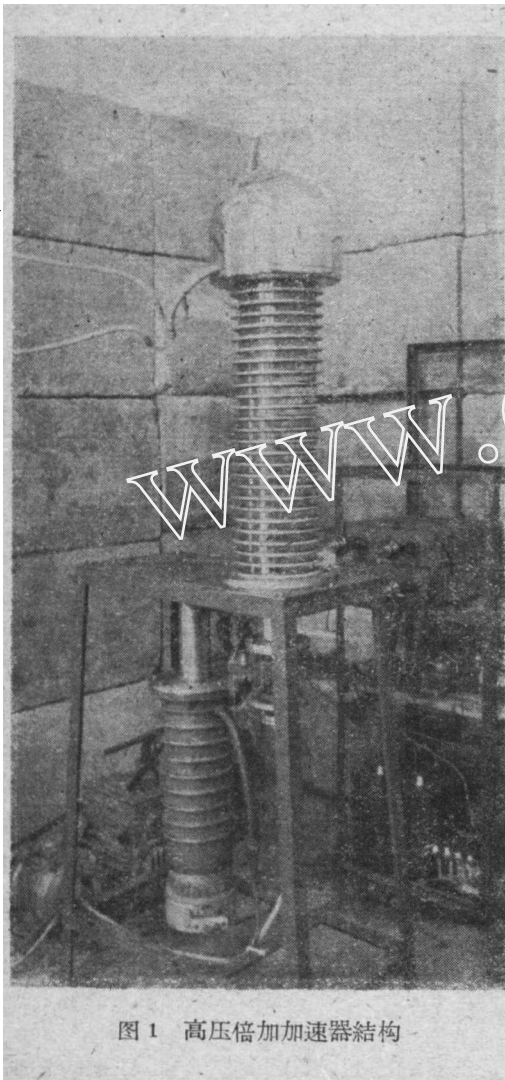


图1 高压倍加加速器结构

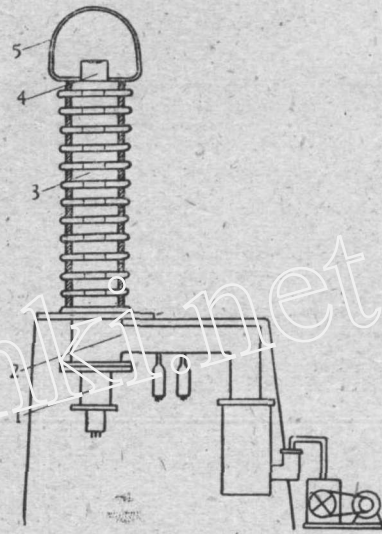


图2 四十万伏电子高压倍加加速器结构图

- 1. 电子枪; 2. 真空管道; 3. 加速管;
- 4. 靶室; 5. 高压极。

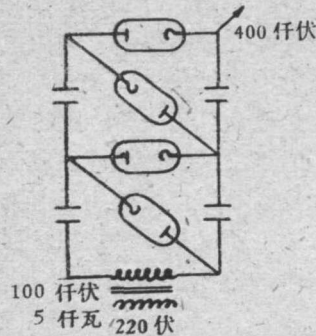


图3 高压倍加器线路

电 子 枪

我們采用三电极系统的电子枪(图4), 1是电子枪座, 2是灯丝, 固定在电子枪座1上。3是位置可調的聚焦极, 并有一套口径不同的聚焦极以备調換使用。4是吸出电极, 它用瓷质支杆5来固定。6是金属蛇形管, 用来在不破坏真空的情况下調节电子枪灯丝与聚焦极的相对位置。聚焦极位置的改变可調节吸出极与聚焦极的相对位置。为使吸出电压可調, 同时也为了能用上强聚焦磁透镜, 我們使电子枪座、灯丝、聚焦极、金属蛇形管均处在同一負高电压上, 它們与地电位的吸出极之間用玻璃筒7及支杆5絕緣起来。

电子枪灯丝用直径为0.15—0.20毫米的鎢絲繞成平直螺旋形, 螺旋直径1—1.5毫米, 长6—7毫米, 一段繞十六圈左右。

电极最好不用銅质元件, 因在电子与离子轰击下銅质元件会放出大量气体, 而影响加速器的真空度。由于电子枪部分发热比較厉害, 絕緣支杆5最好用瓷质支杆(胶木会因蒸发而损坏)。

电子枪座的设计, 考虑到废旧电离泡JM-2及热偶泡JT-2的利用(图5), 切去JM-2或JT-2上半部玻璃壳留下引綫杆即成电子枪座。也可直接吹制, 如图6所示。

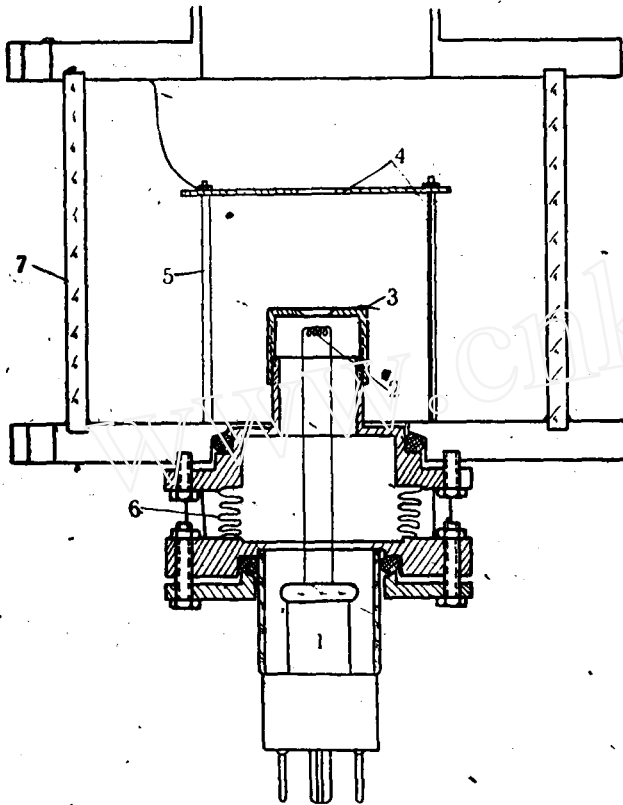


图 4 电子枪结构图

- 1. 电子枪座; 2. 灯丝; 3. 聚焦极; 4. 吸出极;
- 5. 绝缘支杆; 6. 金属蛇管; 7. 玻璃筒。

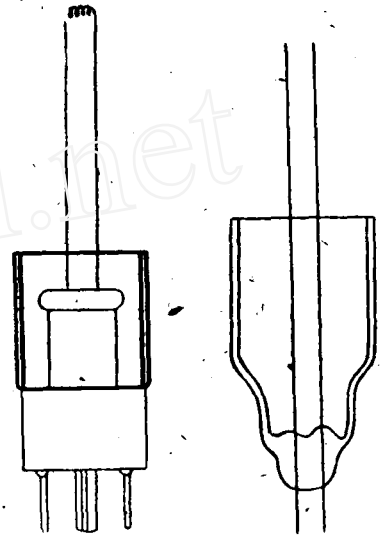


图 5 用电离泡改制成的电子枪座

图 6 电子枪座

加 速 管

为缩短加速距离,我们决定采用均压装置。如不用均压装置,则会在加速管两端形成电场集中,而容易发生击穿。要耐压 400 仟伏,则加速管长度至少大于 1 米。我们决定采用均压片来分压,均压片由厚 7 毫米的铝板制成,两铝片间用直径为 175 毫米、高 20 毫米的玻璃环隔开,形成一均压单位。玻璃表面可看成处于均匀电场中,由文献 [1] 查得玻璃表面空气闪络电压为 28 仟伏。这样仅需 20 个均压单元即可承受 400 仟伏的高压。除增加均压单元提高均压效果外,并用可调电晕针来改善加速管均压性能(见图 7)。当针尖与均压片平板之间距离为 10 毫米时,26 个均压单元上承受了 336 仟伏的直流高压,平均每一单元耐压达 13 仟伏。仔细调节针尖与平板之间距离,耐压能力还可进一步提高。

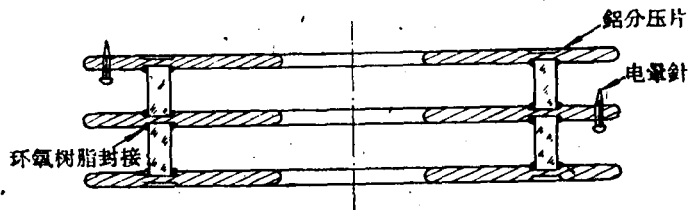


图 7 均压片与电晕针

靶室及其冷却设备

由于靶子上消耗功率很大,自然冷却或强迫风冷均无济于事,必须采用液体冷却。由于靶室处于高压,就对冷却液体的绝缘性能提出了要求。普通水由于有较高的电导率不合用,蒸馏水、重蒸水或变压器油可考虑应用。由于蒸馏水保存不易,使用寿命不长,容易溶入杂质而变坏绝缘性能,水箱需要密封等原因,相形之下变压器油较好,故决定用油冷。

为使片状靶与靶室顶部密合,我们采用了图8所示的靶子固定机构,可以保持较好的热交换条件。

油冷系统组成见图9,其中1是储油器(12.5升);2是由来回各三米的塑料管形成的油管,除作输送变压器油之用外,并可将压头为三米的油泵3与高压电极绝缘开;4是油套,工作体积为212毫升;5是水油热交换器。

安装运行情况表明:油流速为960毫升/分,在平均靶流5毫安下运转112分钟后,油的温度上升为46℃。冷却性能还需改进。

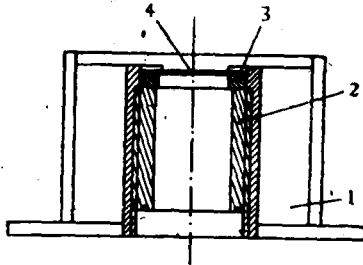


图8 靶室及靶子固定方法
1. 油套;2. 压紧螺帽;3. 压紧环;4. 靶。

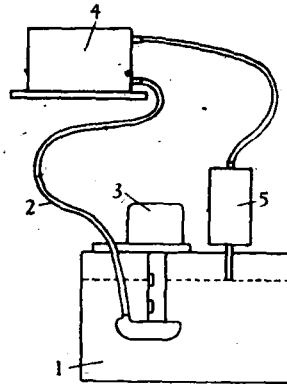


图9 油冷系统
1. 储油器;2. 油管;3. 油泵;
4. 油套(靶室);5. 水油热交换器。

运行情况

1. 电子枪灯丝加热电流增加,发射电流随之增加,同时真空度下降较多。这是因为加热电流的增加,使更多的电子打到聚焦极或散落到吸出电极上。在电子轰击下,各电子枪元件因发热而放出气体,致使工作真空度下降较多。发射电流增加时真空度降低,离子对电子枪灯丝轰击加剧会大大影响灯丝的使用寿命,故电子枪灯丝加热电流不宜过高。一般在3—3.2安最佳。

2. 电子枪灯丝相对于聚焦极的位置及吸出极相对于聚焦极的位置,对吸出电子流及电子束的聚焦性能影响较大。原拟用强聚焦磁透镜来加强束线聚焦。运转情况表明,不用磁透镜,加速电子束也可聚焦得很好。靶上粒子束直径小于5毫米。

3. 加速电压及灯丝加热电流一定的情况下,加速电子流、剂量率与电子枪吸出电压的关系如图10及表1所示。

可以看出,电子枪吸出电压有一最佳数值。这是因为吸出电压除影响拉出的电子流大小以外,并且也影响着被拉出电子束的聚焦情况。当吸出电压增加时,被拉出电子流增加,因此靶流及剂量率均增加。当吸出电压超过3.3千伏时,拉出电子流虽然增加,但由于聚焦情况变坏,因而加速电子流并未增加相反还有所降低。剂量率自然也是这样。真空度的一直下降说明了有更多的电子打到吸出极上而使真空度变坏。

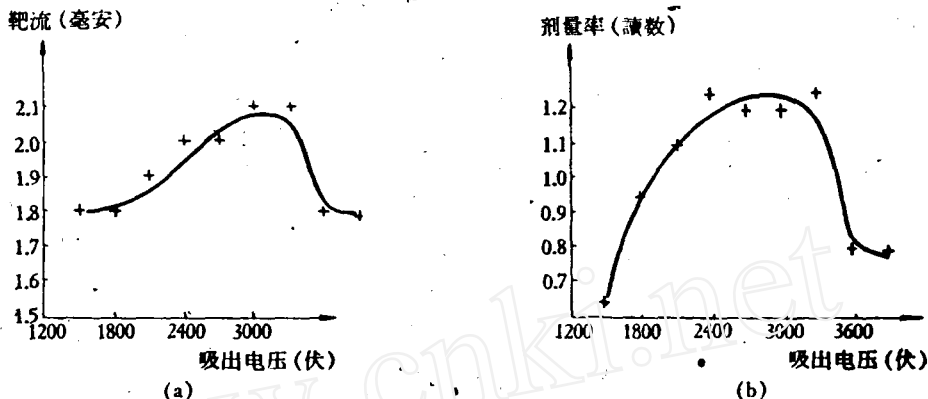


图 10

a) 靶流 I_M 与电子枪吸出电压 V 的关系; b) 剂量率 D 与吸出电压 V 的关系。

表 1 加速电子流、剂量率与电子枪吸出电压的关系

吸出电压 (伏)	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300	3600	3900
加速电子流 I_M (毫安)	1.8	1.8	1.9	2	2	2.1	2.1	1.8	1.8
剂量率 D (指示)	0.65	0.95	1.1	1.25	1.2	1	1.25	0.8	0.8
真空度 $P(10^{-6}$ 毫米水银柱)	6.4	6.4	6.4	6.6	6.6	6.8	6.8	7	7.2

4. 单位加速电子流、剂量率与加速高压(电子能量)的关系如图 11 所示。由图可以看出靶致辐射强度与能量之间的关系。能量的提高对剂量率的提高有很大意义。

目前各基本参数达到的水平与原设计指标的比較见表 2。

5. 防护方面: 根据初步估计所得到剂量率水平计算需用混凝土防护墙厚 1 米, 高 2.5 米, 这里只考虑到直接透射射线的防护。运转情况表明, 在 $0-90^\circ$ 方向内, 向上 γ 射线在天花板上的反射对工作地点剂量的贡献很大。因此在进行剂量防护计算时应当考虑到反射与散射的效应。

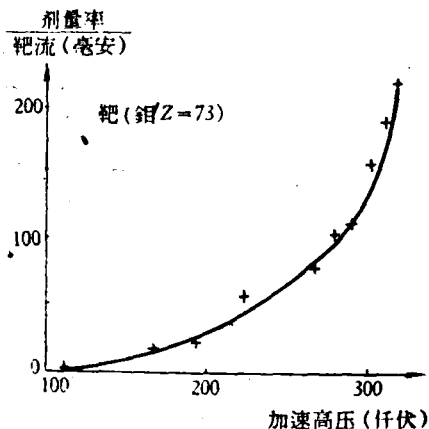


图 11 单位加速电子流、剂量率与加速高压的关系

表 2 原设计与已达到水平的比較

	加速器管耐压 (千伏)	加速电流 (毫安)	P_0 厘米 (伦/分)	电子枪寿命 (小时)
原 设 计	400	6.25	9450	—
已 达 到	336	8.2	12000	15 小时以上

簡 短 結 論

运行过程中各部件性能良好。从表 2 可以看出主要的基本参量已超过设计指标。通过电压的调节, 最高加速电压可望进一步提高。这一加速器的特点是简单, 运行可靠。除高压电源靶子而外, 并不需要特殊的器材及加工技术。从原理上看, 它相当于一个具有动态真空、

油冷阳极的X光管。由于它耐压高,阳极可以更换,就使它具备了其它X光管所不可能具有的特点:1)剂量率大,由图11可以看出,在同样电流下,若能量由20万电子伏提高到30万电子伏则剂量率可增加4倍以上;2)功率大,靶子可以更换。

参 考 文 献

[1] 西洛琴斯基:高压工程第一卷 p. 157. 电力工业出版社, 1956年版。

(上接 240 页)

数特殊情况下,才有解析解,现在多用数字法近似地求解。

3. 严格说来,由于温度效应的存在, f 除与时间有关外,还与功率密度 ρ 有关。这样,求解方程系(5)就更为麻烦,一般都采用近似方法来求解。

反应堆动态计算:用模拟计算机是很适宜的,特别是当时间为独立变数时,用模拟计算机能把整个随时间变化的过程模拟出来。当然,如要求更高的精确度的解,须采用数字电子计算机。

反应堆计算的新方法——蒙特-卡罗(M. C.)方法

蒙特-卡罗方法是一种直接模拟物理现象的数学方法。在很多问题中,尤其是那些物理过程清楚,但是不能列出数学方程的问题,用蒙特-卡罗方法来处理是比较适当的。

中子或 γ 射线对物质的相互作用,问题虽较复杂,但物理过程是清楚的。象这种问题,都可利用蒙特-卡罗方法来计算。采用这种方法时,人们需要随机地跟踪大量的中子或光子的历史,而对每个中子或光子都应从其产生一直跟踪下去,直到被吸收为止。其中每一种物理过程——散射、吸收、裂变等——的概率分布是由随机抽样来确定的。当跟踪了大量的中子或光子后,进行平均就可得到所需的结果。但是蒙特-卡罗方法的精确度是以所跟踪的粒子数来决定的,与所跟踪的粒子数的平方根成反比。因之,为了要得到更精确的结果,就必须跟踪更大量的粒子,这样就需要大量的计算。所以蒙特-卡罗方法的发展是与快速数字电子计算机的发展紧密联系着的。

蒙特-卡罗方法是反应堆计算方法中较有效的方法之一。但一般说来,这种方法的计算量较大,所以不便滥用。目前蒙特-卡罗方法已被广泛用于反应堆屏蔽的计算中。用蒙特-卡罗方法来计算栅格参数和临界大小,目前也已开始。从已有的结果看来,精确度是相当高的。里其米尔(R. D. Richtmyer),凡诺尔顿(R. Van Norton)和华尔夫(A. Wolfe)^[1]用蒙特-卡罗方法计算某反应堆的共振几率,得到 $p = 0.8566 \pm 0.0025$,而实验值为 0.838 ± 0.003 。

近来贝尔格(M. G. Berger)和杜盖脱(G. Doggett)^[2]还提出一种半解析蒙特-卡罗方法。在这方法中,把能解析处理的部分都尽量用解析方法处理,它是蒙特-卡罗方法的发展。在计算时间和结果的精确度等方面都较蒙特-卡罗方法更为优越。这种方法在屏蔽问题上已有人应用过。

结 论

从上面的讨论可以看到,在反应堆事业中,数字计算是应用得非常广泛的。并且对于新的问题提出了新的数字计算方法的要求,蒙特-卡罗方法就是一个很好的例子。这些问题的解决,我们还不能认为是最完善的,还必须要进行大量的工作,来改善我们的计算方法。

参 考 文 献

- [1] R. D. Richtmyer, R. Van Norton and A. Wolfe: Proceedings of the second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, (1958) P. 2489, 第16卷, 180.
[2] M. G. Berger and G. Doggett: J. Res. NBS, 56, 89 (1956).