

BF-5 辐照电子直线加速器的 主要技术特性

顾本广*

(北京医疗器械研究所)

林郁正 童德春

(清华大学, 北京)

本文介绍了BF-5辐照电子直线加速器的设计与调试结果,其主要技术特性为:电子束能量3—5 MeV;平均流强范围0—235 μA ;最大束流功率700 W;辐照厚度1.6—3 cm;扫描宽度5—60 cm。

关键词 辐照, 扫描, 均匀度。

一、设计特点

BF-5辐照行波电子直线加速器是专门用于辐照试验研究及小批辐照加工生产的装置,选择S波段2 MW脉冲磁控管作功率源,输出束流采取扫描方式。

1. 加速管 为简化整机结构,要求在不采用自动稳频等控制系统的条件下能稳定出束,必须使盘荷波导加速管具有较弱的色散特性,圆盘约化孔径 $\frac{a}{\lambda}$ 较大,取在0.115至0.120之间,另外,为使俘获效率较高,聚束器长度选为 4λ 长,其参数经方案比较取为:

$$E_z(z) = \begin{cases} 50 \sin [2 \times 10^{-3} Z^2 + 0.4115] & 0 \leq Z < 24 \text{ cm} \\ 50 & 24 \leq Z \leq 40 \text{ cm} \end{cases}$$
$$\beta_p(z) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \text{tg}^{-1} [5.5 \times 10^{-3} Z^2 + 0.846] & 0 \leq Z \leq 25 \text{ cm} \\ 0.854 + 9.73 \times 10^{-3} (Z - 25) & 25 < Z \leq 40 \text{ cm} \end{cases}$$

其中轴向场强 E_z 之单位为 kV/cm,距离 Z 之单位为 cm,约化相速 $\beta_p = v_p/c$, v_p 为相速, c 为光速, λ 为波长。

当聚束器入口功率为1.8 MW时,入口处场强为50 kV/cm,连同聚束器在内的加速管总长为160 cm,加速管约化群速 $\beta_g = 0.022$,衰减系数 $\alpha = 0.002$ (1/cm),当脉冲电流为220 mA时,计算能量为4.6 MeV,俘获效率为80%。

这样设计的结果,加速管允许输入参数波动范围为:微波工作频率允许波动 ± 500 kHz,加速管温度允许波动 $\pm 2^\circ\text{C}$,调制器电压允许波动 $\pm 1\%$,故可不用AFC,

* 本文图3和4图中曲线是北京市辐照中心完成的,领导此项工作的有[丘建春]、郭凌熙、桂伟燮、刘京等,参加此项工作的还有原北京市电子直线加速器会战组全体成员。

ATC, de-Qing 等自动控制系统。

2. 电子枪 BF-5 采用直热式钨钨铯阴极皮尔斯型电子枪, 由 BJ-10 医用电子直线加速器电子枪改进设计而成, 增大了灯丝直径、阴极面积及阳极孔直径, 可以获得 500mA 以上之脉冲发射电流。电子枪无聚焦透镜, 电子束经阳极孔直接注入加速管。

3. 微波传输系统 BF-5 加速管采用腔式输入及输出耦合器, 驻波比在 1.2 以下的范围达 ± 1.5 MHz。微波传输系统包括 (1) GLS-1 型铁氧体隔离器, 其插入损耗为 0.3 dB, 隔离度为 30 dB; (2) 双十字孔定向耦合器, 其耦合度为 40 dB; (3) 盒式陶瓷波导窗; (4) 水冷吸收负载。

磁控管频率可以在操作台上手动调节, 并且频率值可被腔式波长表所监测。

4. 束流传输系统 BF-5 束流传输系统包括下列几部分:

(1) **聚焦线圈** 分为 4 节, 各节中心磁场强度分别可达 1200, 980, 650, 650 Gs。可满足聚焦调整之需要。线圈用宽 21.5 mm, 厚 0.2 mm 之紫铜带绕成, 层间垫以 0.02 mm 聚酯薄膜。

(2) **导向线圈** 在加速管入口及出口处各安装一对导向线圈, 以校正束流位置, 可调范围为 ± 1 cm。

(3) **扫描磁铁** 用两块 C 形硅钢片铁芯拼成。磁极宽度 50 mm, 磁极间隙 30 mm, 最大扫描磁场为 1320 Gs。

5. 真空系统 BF-5 真空系统全都采用金属密封结构, 特别是大面积钛引出窗 (厚 0.1 mm) 与扫描盒法兰之间的密封亦采用金属丝, 可以防止钛引出窗被吸入真空盒的事故。扫描盒采用 4 mm 不锈钢板作盒体, 外侧焊有加强肋板。

在加速管入口和出口处各安装一台抽速为 30 l/s 之钛离子泵, 另附有一台 300 l/s 钛升华泵作为更换电子枪灯丝后启动真空系统之辅助抽气用。整个真空系统之极限真空度为 10^{-7} Torr。

6. 脉冲调制器 BF-5 采用软管脉冲调制器, 仿真线由 10 级组成, 特性阻抗为 55 Ω , 充电电压 30 kV, 通过 50 Ω 高压高频电缆送往脉冲变压器, 产生 -43 kV 及 -60 kV 之高压脉冲, 分别送往磁控管及电子枪。

7. 电源 BF-5 有 (1) 聚焦线圈直流电源, 是三相桥式可控硅整流电源; (2) 导向线圈直流电源; (3) 扫描磁铁电源, 其电压为方波, 电流为三角波; (4) 钛离子泵电源; (5) 钛升华泵电源; (6) 磁控管及电子枪灯丝电源; (7) 辐照物滚筒及平台之驱动电源; (8) 控制电源。

8. 控制电路 BF-5 控制电路分为操作顺序控制及连锁保护控制两部分, 在连锁保护控制中设有下列两项措施:

(1) **停扫保护** 当扫描电源发生故障时, 为防止大功率电子束灼穿引出窗, 采用了双重保护系统, 第一级为快速封闭调制器闸流管触发脉冲, 阻止高压继续发生; 第二级为切断电子枪灯丝及钛离子泵电源, 防止烧毁电子枪及钛离子泵。

(2) **停运保护** 为防止被辐照物在滚筒或平台停止运动时被束流灼坏, 设有停运保护系统, 当滚筒或平台停止运动时, 切断调制器高压, 束流停止输出。

9. 机架结构 考虑到不同辐照使用要求, 机架设计成可以水平、垂直或倾斜放置, 机架两侧翼板可以自由撑开, 便于维修。磁控管及电子枪这两个高压元件集中安装于机架

尾部，便于馈送高压。

二、测量及调整结果

1. 测量方法

(1) **流强的测量** 扫描电子束用大面积铝接收板进行测量，在低重复频率时，使束流不扫开，用法拉第筒对铝接收板进行校正。束流波形采用双层电磁屏蔽接收器送到示波器上观察。图 1 将实际观察到的调制器电压及束流波形绘在一起，以资比较。

(2) **能量的测量** 在调试中采用以射程法为基础的快速能量测量装置，此装置无机械传动机构，可以在不停机的情况对各种束流负载进行能量的快速测量。图 2 是实际测出的束流负载特性，较理论计算值略低。

(3) **均匀度的测量** 扫描均匀度采用分布铝片法及聚乙烯剂量薄膜法进行测量，两种方法结果相近。图 3, 4 是实际测出的离窗口约 90 cm 处的横向及纵向剂量分布，反映了扫描均匀度。

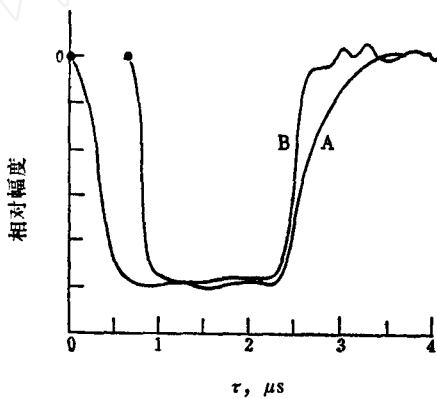


图 1 调制器电压及束流波形
A—调制器电压波形， B—束流波形。

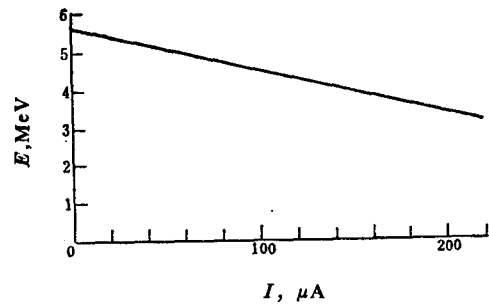


图 2 束流负载特性

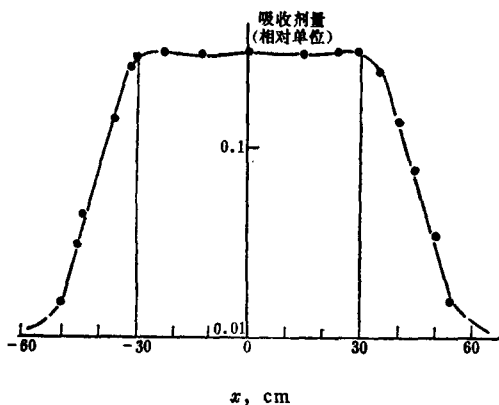


图 3 横向剂量场分布

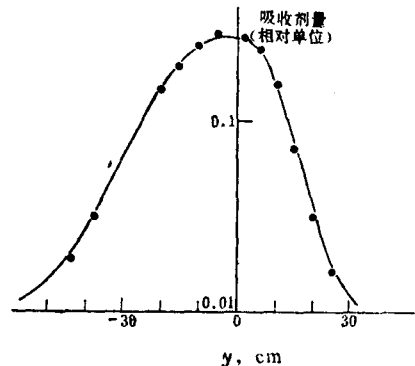


图 4 纵向剂量场分布

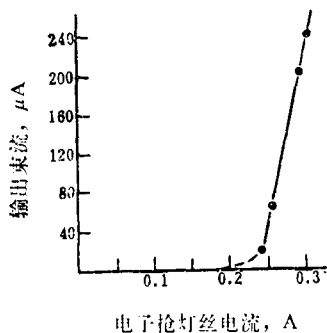


图 5 电子枪灯丝电流对输出束流的影响

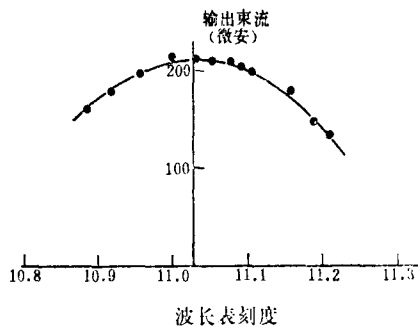


图 6 微波频率对输出束流的影响

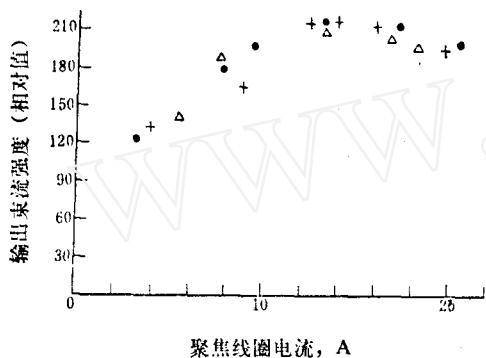


图 7 聚焦线圈电流对输出束流的影响
·——第一组; +——第二组; Δ——第三组。

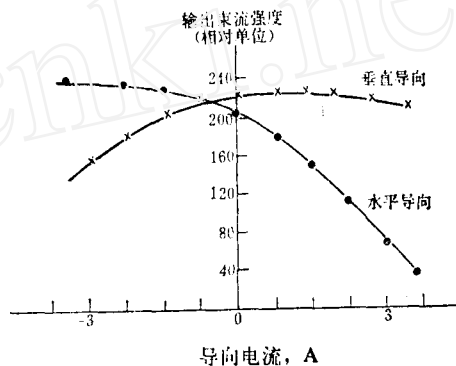


图 8 导向电流对输出电流的影响

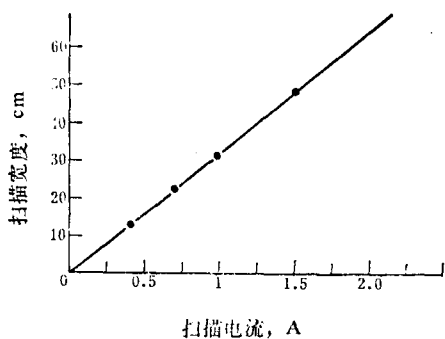


图 9 扫描电流与扫描宽度之关系

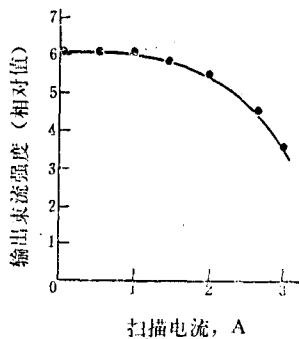


图 10 扫描电流对输出束流强度之影响

2. 各项参数对输出束流的影响

为了进行调整, 测量了各项参数对输出束流的影响, 图 5 是电子枪灯丝加热电流对输出束流的影响。图 6 是频率对输出束流的影响。从图中可以看到 BF-5 允许有较宽的频率变动范围。图 7 是各组聚焦电流对输出束流的影响, 辐照电子直线加速器允许有较大的束斑。图 8 是导向线圈电流对输出束流的影响。图 9 和 10 反映了扫描宽度和扫描线圈电流的关系。随着扫描宽度的增加, 相应地引起一些束流的损失。

BF-5 最大平均输出束流可达 $235 \mu\text{A}$, 对应于脉冲流强 276 mA , 能量约 3 MeV , 空载时能量约 5.5 MeV 。其它各项实际测得的参数如表 1 所示:

表1 BF-5 技术参数

项 目	数 值	项 目	数 值
电子束能量, MeV	3—5	束斑直径, cm	1
平均流强, μA	0—235	束流脉冲宽度, μs	1.7
最大束流功率, W	700	微波脉冲宽度, μs	2
E线剂量率, Gy/min	10^4	微波工作频率, MHz	2998
X线剂量率, Gy/min	2.6	微波脉冲功率, MW	2
辐照厚度, cm	1.6 (单面照)	微波平均功率, kW	1.9
(单位密度物质)	3 (双面照)	引出窗距地高度, cm	100
扫描宽度, cm	5—60	机架倾角	30°
扫描均匀度, %	17 (窗口)	滚筒直径, mm	600
	10 (17cm)	滚筒转速, r/s	5
	9 (90cm)	滚筒电源, kVA	0.6
扫描频率, c/s	4—6	水源, l/min	20
脉冲重复频率, pps	100—500	氮气源, atm	2
扫描电流线性, %	5	总电源, kVA	20

三、辐照应用工作

BF-5 辐照电子直线加速器自 1979 年投入使用后已进行大量辐照试验及小批生产工作, 其中有:

- (1) 辐射消毒研究: 进行了中草药、中成药、医疗器械、人工脏器、票证的辐射消毒工作。
- (2) 辐射育种研究: 对冬小麦、果树枝芽、牛毛草、家蚕卵、抗菌素的辐射引发遗传诱变的研究。
- (3) 辐射保藏研究: 进行了鸡蛋液、冻鸡、板栗、桃子、柿子、草莓等辐射保藏研究。
- (4) 辐射交联研究: 对塑料导爆管、聚乙烯热缩管、电缆绝缘层的辐射交联研究。
- (5) 聚乙烯辐照发泡工艺的中小试验生产。
- (6) 可控硅元件控制开关速度提高的工艺研究。

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF BF-5 LINAC FOR RADIATION PROCESSING

GU BENGUANG

(Beijing Medical Equipment Institute)

LIN YUZHENG TONG DECHUN

(Qinhua University, Beijing)

ABSTRACT

The design feature and adjustment results of an industrial linac model BF-5 are presented. The main performance characteristics are as follows: energy range 3—5 MeV, average beam current 0—235 μA , max. beam power 700 W, irradiated thickness 1.6—3 cm, scanning width 5—60 cm et al.

Key words Irradiation, Scanning, Uniformity.