

14 M eV 医用驻波加速管的微波调试*

靳清秀 童德春 林郁正 杨越 孙敬清

(清华大学工程物理系, 北京, 100084)

介绍了 14 M eV 医用驻波加速管的微波调试情况。该加速管的加速能量与束流多档可调, 可提供 ≤ 15 M V 两档 X 射线和 6—14 M eV 五档的电子线。该加速管总长 1.45 m, 采用轴耦合双周期 $\pi/2$ 模驻波结构。利用峰值 2.6 MW 的脉冲磁控管为功率源, 工作频率为 2998 MHz, 脉冲宽度 4 μ s, 重复频率为 250 ys。通过调节入口微波功率、电子枪的注入电压、电流等参数, 实现加速管的能量调变。

关键词 医用驻波加速管 长腔链 微波调试

近几年来, 我国放射医疗事业迅速发展, 促进了国内放射医疗设备的研制和生产, 如低能医用驻波电子直线加速器目前已形成批量生产能力, 技术已趋于成熟。随着我国医疗科学水平的提高及对放疗设备日益增长的需求, 国家在“八五”期间制定了研制中能医用驻波电子直线加速器的攻关计划。14 M eV 驻波加速管是其核心部件。这里介绍所研制的该管的微波调试工作。

1 加速管简介

为研制中能双光子医用驻波电子直线加速器, 要求利用峰值 2.6 MW 的脉冲磁控管为功率源, 工作频率为 2998 MHz, 设计出一支长约 1.4 m 的驻波加速管, 仅靠调节入口微波功率、电子枪的注入电压、电流等参数, 便可提供能量 6—14 M eV 多档可调的电子束及 X 射线(表 1)。为满足上述要求, 首先进行精心的物理设计, 通过粒子动力学计算及腔形优化, 最后选用的方案为: 整个腔链从聚束段到光速段相速 β 值及电场幅值 E_z 分为 3 个均匀段; 采用轴耦合双周期结构 $\pi/2$ 模工作方式, 腔链总长为 1.45 m, 谐振回路数达 59 个。为了整管有较高的分流阻抗, 以确保束流最高能量可达 14 M eV, 选取的驻波加速管的束流孔径小到只有 ϕ_7 mm, 所设计的加速管, 不用外加聚焦磁场, 依靠驻波加速腔中射频场本身的聚焦作用, 使出口束斑可控制在 ϕ_2 —3 mm 内。加速腔链与馈电波导之间的耦合度 β_c 兼顾各档束流负载情况后定为 1.7。

* 国家“八五”科技攻关项目

收稿日期: 1996-02-15 收到修改稿日期: 1996-05-20

表 1 14MeV 加速管各档工作参数

Table 1 Operating parameters for several energies

射线	能量/MV	注入电压/keV	注入电流/mA	脉冲功率/MW	束流/mA
X 射线	6	15	800	1.80	120
	15	7	130	2.2	35
电子束	6	10	45	0.9	5
	8	10	36	1.0	5
	10	10	26	1.1	5
	12	10	17	1.5	5
	14	7	17	2.2	5

2 加速管的腔链调谐及微波测试

加速管实际能达到的工作水平与加工、焊接工艺、微波测试及调谐密切相关。研制 1.45 m 长的腔链在国内尚属首次进行, 需要精心摸索调配技术。

2.1 长腔链微波特性分析

为了研究加速管的微波特性, 在工程上通常采用耦合谐振腔链的等效电路理论进行分析^[1,2]。双周期轴耦合驻波加速腔链等效电路示于图 1。ω_a、ω_c、Q_a、Q_c 分别表示加速腔及耦合腔的谐振角频率和品质因数, k₀ 为加速腔及耦合腔间的邻近耦合系数, n 是腔序编号 (0, 1, 2, ..., N), 加速腔编号为 a_{2n}, 耦合腔编号为 c_{2n+1}; 双周期腔链总腔数为 (2N + 1)。按照等效电路分析的结果, 在 π/2 模工作条件下, 色散的模式间隔为 $\frac{k_0\pi}{2N}$ 加速腔中场的幅值降落为:

$$\frac{|X_{2n}|}{|X_0|} = \frac{2n^2}{k_0 Q_a Q_c} \quad (1)$$

端腔失谐和禁带对场分布的影响为:

$$|X_{2n}| = \left(1 + n^2 \frac{2}{k_0^2 Q_a Q_c} - \frac{n}{2} \Delta_0 \Delta_s\right) |X_0| \quad (2)$$

$$\Delta\Phi = \frac{N \Delta_0}{k_0 Q_c} + \frac{N^2 \Delta_s}{k_0 Q_a} \quad (3)$$

式中: $|X_{2n}|$ 、 $|X_0|$ 是正比于场幅值的相关量; ΔΦ 为整管的相移量; Δ₀、Δ_s 分别为端腔失谐和禁

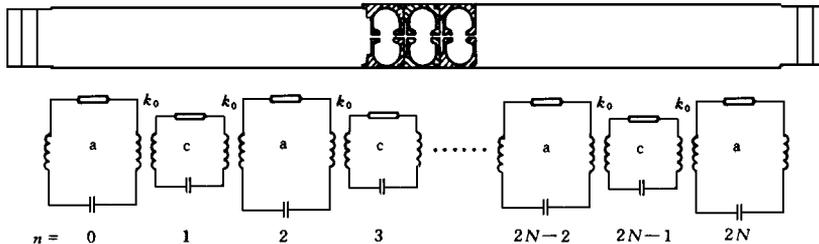


图 1 轴耦合驻波加速结构及等效电路示意图

Fig. 1 On-axis (SW) accelerator structure and its equivalent circuit
a——加速腔; c——耦合腔

带。

从以上结果可以看出, 腔链的色散特性、场的幅值降落、禁带等对场分布影响均与腔链回路个数 N 、腔间耦合系数 k_0 有关, 故需在调谐长腔链时注意以下问题。

2.1.1 腔间耦合系数 k_0 值的确定 要使加速器能稳定工作, 就必须保证腔链色散的模式间隔足够大, 而模式间隔又与腔链的回路个数 N 有关。长腔链回路个数多, N 值较大, 相应的 k_0 值也应增加。提高 k_0 值实际上就是要扩大腔壁上的耦合孔, 这样所带来的问题是: 可能引起 Q_0 值的减小并导致分流阻抗 ZT^2 的下降, 并可能会加大次邻近耦合, 引起色散曲线畸变。经实验研究, 选择较合适的耦合孔尺寸, 最后将 k_0 值定为略大于 3%。

2.1.2 输入耦合器位置的确定 需要说明的是: 前面提到的式 (1) — (3) 仅适合于输入耦合器放在腔链端腔的情况。输入耦合器放在不同腔号的位置, 腔链的通带特性及场的平坦度均会有所变化, 对于长腔链更为明显。利用按等效电路理论自编的计算程序 PPDW, 模拟了当耦合器放在不同位置时腔链的通带特性曲线和场分布曲线。配合加速器整机的机械设计方案, 选择了

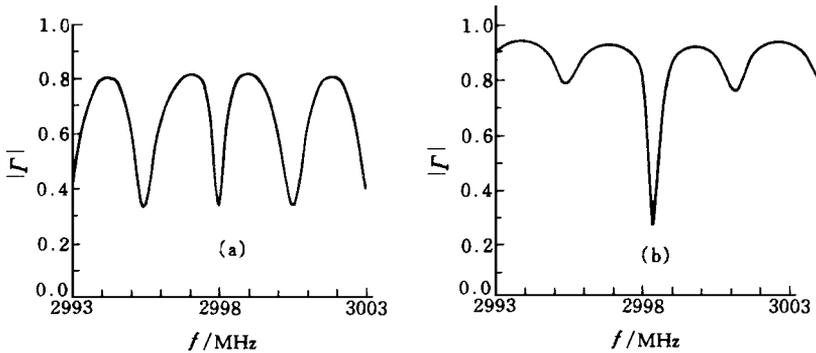


图 2 加速腔链的通带特性曲线

Fig. 2 Module of complex reflection vs RF frequency

(a) —— 输入耦合器在 a_0 腔; (b) —— 输入耦合器在 a_{22} 腔

耦合器放在 a_{22} 加速腔, 这时腔链的通带特性曲线示于图 2(b)。图 2 显示出了输入波导中反射系数 $|\Gamma|$ 的通频带曲线。在选定 $k_0 = 3\%$ 的条件下, 功率源 10 MHz (2992—3002 MHz) 频带范围内只有 3 个谐振峰; 耦合器放在 a_{22} 给场分布带来的好处不仅使腔内的电场分布从功率馈送口到腔链终端的幅值降落减小, 同时还可使 $f(\pi/2)$ 工作模式邻近的两个模耦合减弱, 这给调机带来方便。

2.2 加速腔链与馈电波导之间 β 的调配

在实际工作中, 焊前将长腔链组装起来调配输入耦合器会很不方便。利用 PPDW 程序可求解相应于整管耦合度达 β 时耦合器单腔的输入耦合度 β_{in} , 因此可以方便地利用短腔链来完成长腔链耦合器的调配工作。

2.3 整管场分布曲线的测量及调整

2.3.1 场分布曲线的调整 按物理设计, 从聚速段到光速段, 加速管内轴向电场强度 E_z 变化分为 3 个台阶形。据等效电路分析^[3], 图 1 所示均匀的双周期腔链, 是假设各加速腔与耦合腔之间邻近耦合系数 k_0 值相同, 在 $\pi/2$ 模工作条件下, 各加速腔场幅值也相同; 要实现加速腔场

的阶跃变化,可通过调整与相邻耦合腔的耦合系数来实现。如调整 a_0 、 a_2 与 c_1 的邻近耦合系数 k_0 分别为 k_{01} 、 k_{12} , 对于加速腔形相同的情况, $\frac{E_0}{E_2} = \frac{k_{12}}{k_{01}}$ 关系成立; 若腔形不同, 储能因子 X_2^n 不同, 则需要加修正系数, $\frac{E_0}{E_2} \cdot \frac{X_0}{X_2} = \frac{k_{12}}{k_{01}}$ 。根据所选腔形确定了修正系数后, 调配腔间耦合系数, 使整管场分布实现了设计要求。

2.3.2 场分布曲线的测量 为检验腔链调谐的状态及实测整管有效分流阻抗, 需要检测整管场分布曲线。用谐振微扰法^[4,5]测长腔链场分布的难度在于: 模式间隔近, 要求微扰频偏 $\Delta f(z)$ 要足够小, 不致因模式重叠造成测试曲线畸变, 因此要求有高精度、高分辨率的频偏测试系统。此外, 为避免室温变化影响测量结果, 要求快速测量。为此建立一套自动锁相频率跟踪及计算机控制采集数据的系统(图 3), 测频精度、测试步长均可调。对 14 M eV 加速管的测量, 选用微扰体的最大频偏 Δf 约为 300 kHz, 测量精度为 0.1 kHz, 步长为 0.5 mm, 仅用 6 min 就完成了长约 1.5 m 整管的测量。图 4 为理论和实际场分布测量曲线并由此求出的整管的分流阻抗。实测场分布曲线的不平坦度 $< 3\%$, 焊前整管平均有效分流阻抗为 86 M Ω /m, 焊后达 89 M Ω /m, 为理论值的 85%, 达到工程预计效果, 很好地满足了设计要求。

3 热测出束结果

14 M eV 驻波加速管整管的管内真空度达 10^{-6} Pa, 真空泵断电 24 h 以上, 泵电源的起动电流在 8 μ A 以下。表 2 列出了本加速管在热测出束中的部分直束热测数据。

表 2 实测结果与理论值的比较

Table 2 Comparison of experimental with theoretical results

射线	束线能量/M eV		脉冲束流强度/ μ A	
	理论	实测	理论	实测
X 射线	6	6.2	120	160
电子束	14	15	5.0	28

热测出束表明, 不用外加聚焦磁场, 直束束斑小于 ϕ_3 mm, 各档束流经 270 偏转后, 都能双聚焦成 $< \phi_2$ mm 的束斑。

14 M eV 医用驻波电子直线加速管的研制成功, 标志着我国驻波加速管的水平迈上了 1 个新台阶。目前, 已制作的 2 只加速管在整机上运行性能良好, 同行专家评议认为它的技术指

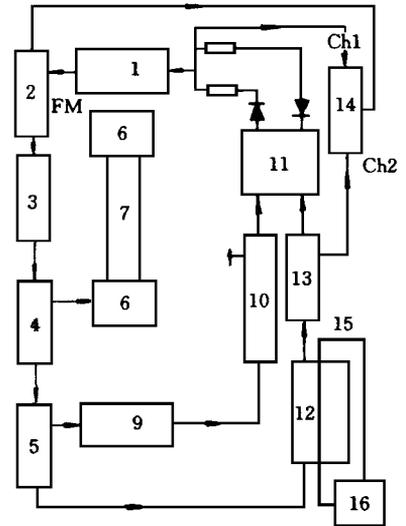


图 3 场分布测量系统框图

Fig. 3 Set-up for electric field distribution
1——反相积分器; 2——扫频仪; 3——隔离器;
4, 5——定耦器; 6——计算机; 7——HP-B 总线;
8——频率计; 9——波导移相器; 10——可变衰减器; 11——微波电桥; 12——被测腔列;
13——定耦器; 14——示波器; 15——拉线;
16——马达

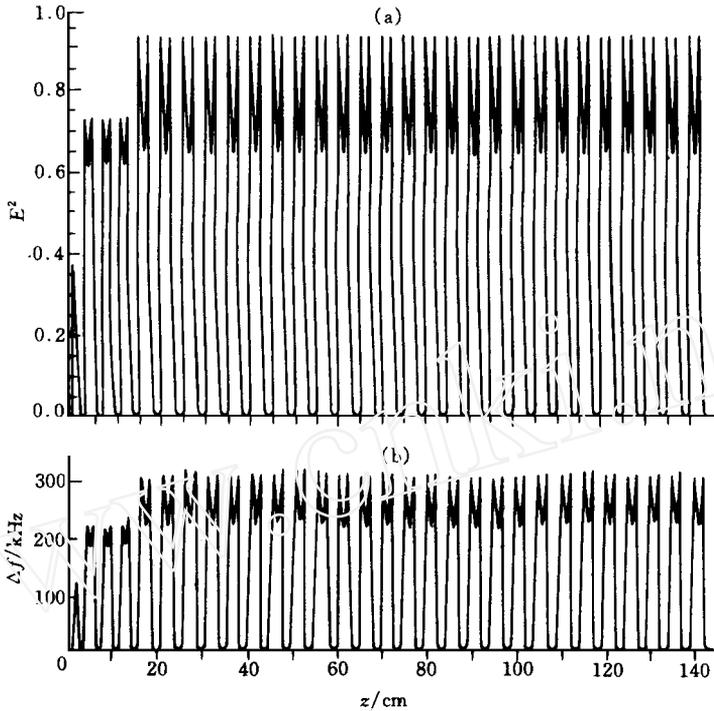


图 4 整管场分布曲线

Fig 4 Electric field distribution of the accelerating guide

a——理论计算; b——实测曲线

标已达到 80 年代末世界先进水平。

参 考 文 献

- 1 Nagle DE, Knapp EA, Knapp BC. Coupled Resonator Model for Standing Wave Accelerator Tanks. Rev Sci Instrum, 1967, 38(11): 1583
- 2 成秀奇. 驻波加速结构的等效电路分析. 北京医疗器械研究所资料. BM ER I 79-01.
- 3 Tanae E, Meddough G. Variable Energy Standing Wave Linear Accelerator Structure. In: Jameson RA, Taylor LS, eds. Proceedings of the 1981 Linear Accelerator Conference LA-9234-C Conference 194
- 4 Marier Jr LC, Slater JC. Field Strength Measurements in Resonant Cavity. J Appl Phys, 1952, 23: 68
- 5 Amato JC, Hermann H. Improved Method for Measuring the Electric Field in Microwave Cavity Resonator. Rev Sci Instrum, 1985, 56(5): 696

M ICROWAVE MEASUREMENT AND ADJUSTMENT ON 14 M eV STANDING WAVE GUIDE FOR MEDICAL ACCELERATOR

Jin Qingxiu Tong Dechun Lin Yuzheng Sun Jingqing

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

ABSTRACT

A 14 MeV, on-axis coupled, S-band standing waveguide for medical accelerator is described. The guide is designed for dual photons, X-ray energies of 6, 15 MV and electron beam energies from 6 to 14 MeV. The guide is a single section 1.45 m long, operated in the $\pi/2$ mode at 2998 MHz. The tube is driven by a S-band magnetron which delivers a 2.6 MW peak power, 4 μ s width at 250 ns. Energy range is obtained by varying RF power, injection voltage and injected current. In the paper, the microwave cold test process is described and the tuning result is given.

Key words Medical standing waveguide Long cavity chain Microwave cold test

第九届全国反应堆结构力学学术交流会在京举行

第九届全国反应堆结构力学学术交流会于 1996 年 10 月 28 日至 11 月 1 日在北京召开。会议由反应堆结构力学专业委员会主办, 中国原子能科学研究院承办。力学学会副理事长余寿文教授代表力学学会到会祝贺, 中核总科技委常委曹关平同志代表中核总发表了讲话。他指出, 本次会议是在我国核动力装置迅速发展的形势下召开的, 力学在分析设计及安全审评方面发挥着越来越重要的、不可替代的作用。会议特约美国阿贡国家实验室陈水生博士报告了与核电厂寿命密切相关的流致振动的最新进展; 特约清华大学陆明万教授就长期围绕设计人员的应力分类问题报告了分析设计的一次结构法。交流报告反映了近两年来力学工作者结合我国核动力装置在计算力学、结构静力及动力分析、流固耦合、疲劳、断裂、地震分析、试验力学和燃料元件等方面取得的进展, 并且针对我国与其它国家在核动力装置设计和制造方面迅速增加的合作, 探讨了国际上一些主要规范及其差别。

会议期间 MARC 和 MAG 公司的代表分别讲解了大型通用力学程序 MARC 和 ANSYS 在核工业中的应用并作了演示。

本次会议首次设立了青年优秀论文奖, 并为两位获奖青年力学工作者颁发了奖金。

中国原子能科学研究院反应堆工程研究设计所栾霖、陈洪有供稿。