

消毒灭菌用电子直线加速器物理设计

冯光耀¹⁾ 裴元吉 孙红兵

(中国科技大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 介绍了杀灭邮件中携带炭疽菌用2MeV电子直线加速器的物理设计过程,其中包括加速结构设计和束流动力学的计算:加速结构基本参数、纵向相运动、能量增长情况以及束流能谱、聚焦线圈设计和束流横向聚焦计算等.该加速装置经过测试各项指标已达到设计要求.

关键词 行波直线加速器 发射度 螺线管 束流包络 炭疽菌

1 引言

美国“9·11”事件后,炭疽菌事件再次震惊世界.恐怖分子利用邮件携带炭疽菌等手段危害社会和人们的正常生活,严重损害了邮政系统的正常运转.

以电子加速器产生的高能电子束用来灭菌的方法正在成为发展趋势.其原理是加速器电子枪发射电子束,在加速管中吸收功率源供给的高功率电磁波能量获得加速,被加速电子束经过扫描磁铁被扫描成帘状束,当传输链上的被照射物品通过高能电子辐照区时吸收一定剂量的电子束,达到足够的剂量后,被辐照物品中的炭疽菌等生物细菌就会被全部杀死.

2 基本原理

中国原子能科学研究院利用加速器和电子辐照技术研制成一种能杀灭邮件中携带炭疽、霍乱、天花、鼠疫等病菌、病毒的电子直线加速器.其基本原理^[1]为采用S波段盘荷波导加速管,由M5125 2MW/2kW的磁控管提供微波功率,采用行波同轴负载结构盘荷波导加速管,由钨钨阴极电子枪发射的电子束通过加速结构后获得一定能量,通过扫描系统辐照邮件,剩余能量用水吸收.

其中直线加速器中加速结构部分由合肥同步辐射实验室设计并完成.

3 设计参数要求

电子束流由电子枪发射,初始能量43keV,束流发射度为 $5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$,加速管入口处束斑尺寸 $\phi 4\text{mm}$.加速管设计为等阻抗加速结构^[2,3],工作在 $2\pi/3$ 模式下,工作频率2998MHz(波长100.07mm).直线加速器末端束流能量2MeV,束流平均功率1kW,束流脉冲流强500mA—1000mA,脉宽4 μs ,最大重复频率250Hz.要求电子束在加速器末端束斑尺寸小于 $\phi 7\text{mm}$.

4 加速结构物理设计

4.1 纵向动力学参数计算

加速结构分为2个等相速度段.以相速段1、相速段2的加速腔数目及各自相速度为可调节参数,保证加速管总长度 L 限制在0.5m以内.初始能量为43keV的电子以不同的初始相位入射,计算在加速管出口处的电子束的能量、能散以及聚相情况,从而得到满足要求的各加速段腔数以及各相速段的平均相速度.

通过优化选择利用电磁场计算软件MAFIA得到一组计算结果^[4]:加速管分为两个等相速段,加速管全长0.45m,加速结构参数如表1所示.

通过计算得到电子束流强为600mA时不同初始相位相运动曲线如图1所示,能量增长曲线如图2所示,电子俘获效率可以达到64%以上.

1) E-mail: fenggy@ustc.edu.cn

表 1 加速结构基本参数

	β_ϕ	α	R_s	Q	腔数
#1	0.70	0.32573	36.349	10261.56	3
#2	0.95	0.24878	59.64	13052.0	12

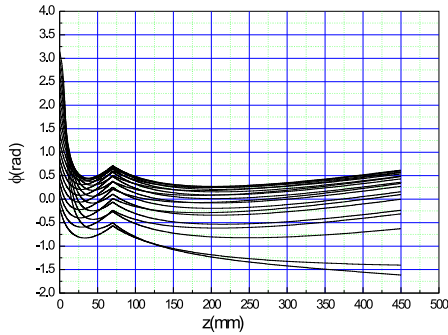


图 1 束流相运动曲线

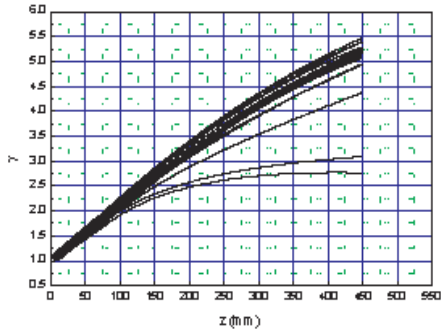


图 2 束流能量增长曲线

考虑束流负载效应^[2]得到电子束能量分布如图3所示, 粒子中心能量为2.095MeV, 束流有效利用率可达85%, 能量分散 $\Delta E/E$ 约为 $\pm 2.5\%$ 左右.

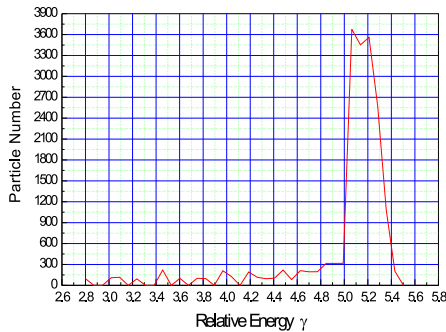


图 3 电子束能量分布图

4.2 横向动力学计算

由于电子能量较低, 加速电场的横向分量、束流自身空间电荷场对粒子横向运动都有影响. 采用螺线管线圈的纵向磁场对束流聚焦^[3].

4.2.1 横向运动计算结果

束流初始物理发射度 $\epsilon_p = 2.092 \times 10^{-6} \pi m_0 c \cdot m$.

共使用4个聚焦线圈, 每个线圈长度为8cm, 线圈从加速管入口处开始, 到距离加速管入口0.32m处终止. 由加速管几何结构确定螺线管内径140mm, 外径220mm.

通过优化计算, 每个螺线管线圈的励磁安匝数(A·turns)如表2所示,

表 2 螺线管励磁线圈安匝数

线圈号	1#	2#	3#	4#
A·turns	2880	3840	4800	960

利用三维电磁场模拟软件Opera-3d计算得到由螺线管产生的纵向磁场分布如图4所示, 最大磁感应强度约为0.052T左右. 利用Parmela软件模拟电子束由电子枪发射以及在整个加速结构中的加速、聚焦过程, 计算得到加速管出口处束流横截面直径为6.9mm, 如图5所示, 束流包络如图6所示

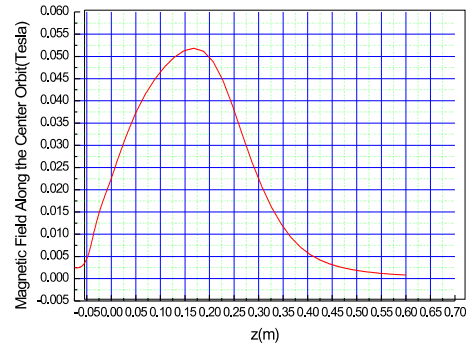


图 4 聚焦线圈磁场分布曲线

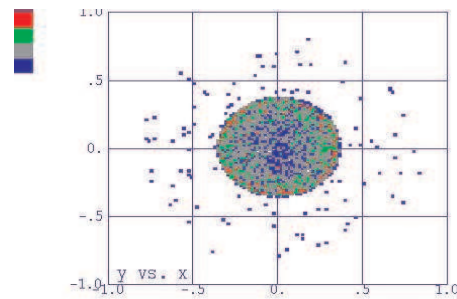


图 5 加速器出口处束流横截面

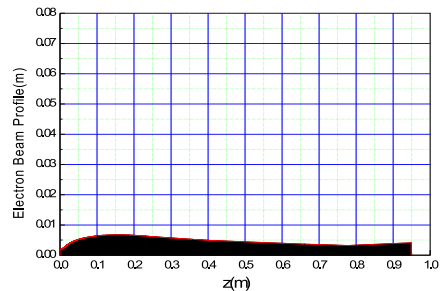


图 6 束流包络图

5 测试结果

整机安装后进行了加速器性能测试, 测试性能参数如表3所示.

国防科学技术工业委员会组织专家对“自屏蔽式电子束消毒灭菌装置”进行了科技成果鉴定, 试验表明, 根据国际标准ISO13409-1996以及国家标准GB16383-1996, 在一定传输速度条件下, 该装置可以

对厚度不大于10mm的普通信件和特快专递进行灭菌, 能够杀灭其中可能含有的炭疽菌孢子和其他病菌子.

表3 直线加速器性能参数

	设计值	测量值
能量/keV	2	2—2.5
平均流强/ μ A	500	494—505
束流功率/W	1000	1000—1200
纵向扫描宽度/mm	250	260
横向扫描宽度/mm	25	25

参考文献(References)

- 1 Helmut Wiedemann. Particle Accelerator Physics. Springer-verlag Berlin Heidelberg New York, 1999. 25—49
- 2 David H. Whittum. Introduction to Electrodynamics Microwave Linear Accelerators, Beijing: China Accelerator Physice School 1998(CAPS98) held at China Center of Advanced Science and Technology, 1998. 77—79, 81—84
- 3 Thomas P. Wangler. Principles of RF Linear Accelerators, Published in Canada, 1998. 78-80, 218—219
- 4 YAO Chong-Guo. Electron Linear Accelerator. Beijing: Science Publisher, 1986 (in Chinese)
(姚充国. 电子直线加速器. 北京: 科学出版社, 1986)

Design of an Electron Linac Applied for Sterilizing Anthrax-Bacillus in Mails

FENG Guang-Yao¹⁾ PEI Yuan-Ji SUN Hong-Bing

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract In the paper, design of a 2MeV electron linac is introduced, which includes calculation about parameters of the accelerator structure, longitudinal and transverse dynamics. This linac is used for sterilizing anthrax-bacillus in mails. Machine test shows that parameters of the accelerator can satisfy the design target.

Key words TW-linac, emittance, solenoid, beam profile, anthrax-bacillus

1) E-mail: fenggy@ustc.edu.cn