

1.2MeV 电子加速器束流聚焦性能的研究

周俊^{1,1)} 祝大军¹ 刘盛纲¹ 王汉斌² 许州² 刘锡三²

1 (电子科技大学物理电子学院 成都 610054)
2 (中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要 用二维全电磁 PIC 方法模拟了 1.2MeV 电子加速器束流聚焦过程, 分析了计算结果. 特别研究了电子枪结构、阳极结构和极间电压分布等初始条件的影响, 得到了一些有价值的物理规律.

关键词 电子加速器 束流聚焦 PIC 方法

1 引言

工业用大功率电子加速器是一种直流高压型大功率加速器. 它具有效率高, 造价低, 结构紧凑等优点. 在这种加速器的光学系统中, 由于加速器本身没有专门的预聚焦系统, 电子束的聚焦完全靠加速管前面部分的非均匀场来实现, 这与其他辐照加速器是不一样的^[1, 2].

在电子加速器的研制中, 电子束的发射、加速、传输和聚焦的研究占有十分重要的地位. 为了深入了解其物理过程, 为电子加速器的机械设计和物理实验提供理论指导, 必须进行严格的模拟计算.

本文用全电磁 PIC 方法计算了 1.2MeV 脱硫脱硝电子加速器, 得到了电子轨迹以及束流尺寸、能量和发射度等重要参数, 并研究了电子枪结构、阳极结构和极间电压分布对束流聚焦性能的影响, 得到一些有价值的物理规律.

2 加速器结构

该加速器的整体结构如图 1 所示. 电子经电子枪发射后, 在加速管中被加速至 1.2MeV, 然后仅在聚焦磁场的作用下发生会聚, 最后经扫描线圈偏转打在钛窗上. 其中电子枪阴极发射面直径 6mm, 发射束电流 500mA; 整根加速管由一段变梯度加速管和后接的 6 段等梯度加速管组成, 总长约 1.5m; 聚焦线圈位于加速管出口 10cm 处, 距扫描线圈 1m; 扫描线圈距钛窗

1m.

本文模拟了从电子枪至扫描线圈前端的总长约 2.6m 的束流传输段, 在模拟中考虑了电子的空间电荷效应和相对论效应, 并考虑电子打在电极片上产生二次电子发射的影响.

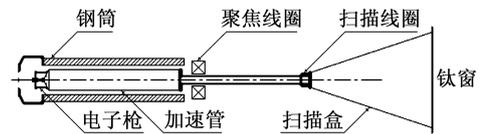


图 1 加速器整体结构简图^[3]

3 数值计算结果

3.1 束流聚焦计算

电子在电场和磁场作用下的运动状态表现为 4 个阶段: (1) 初始电子在阴阳极间电场的作用下被加速, 并在强空间电荷效应的作用下开始发散; (2) 电子经过阳极孔, 在非均匀场形成的电透镜作用下发生第一次聚焦; (3) 电子在加速管中被持续加速, 由于连接法兰对电场分布的影响, 会周期性发散和聚焦^[3]; (4) 电子运动出加速管, 不再被加速, 在聚焦线圈产生的磁透镜作用下发生最后一次聚焦. 图 2(a) 和 (b) 分别是部分电子刚经过阳极孔时刻与束流稳定后的轨迹图 (轴对称, 且在径向被适当拉伸显示). 可以看出, 由阳极孔两侧电场强度差引起的径向电场对束流聚焦起到关键作用, 其物理本质是利用静电场力来抵消空间电

2006 - 02 - 22 收稿

1) E-mail: zhoujun123@uestc.edu.cn

荷斥力, 从而避免束流过早过快发散. 当电子被加速到很高能量时, 还须考虑相对论效应, 并进行相应的修正. 束流最后在聚焦磁场的作用下向中心会聚, 此时有部分轴向动能和横向动能会发生交换.

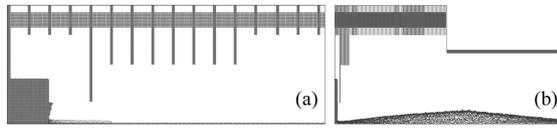


图 2 (a) 部分电子刚经过阳极孔时刻与(b) 束流稳定后的轨迹图

在轴上观测轴向静电场和静磁场的分布, 分别如图 3(a), (b) 所示. 由图中可以明显看出, 第一个电场峰值出现在阳极板右侧, 再逐渐降低直至进入等梯度区, 而后场值在轴向各位置周期性变化, 变化周期为一段等梯度加速管的长度; 磁场在聚焦线圈中心最大, 向两边逐渐减小.

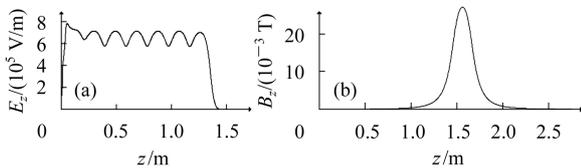


图 3 轴上场分布情况
(a) 轴向静电场; (b) 轴向静磁场.

另外, 重点观测了各个位置束流能量和发射度的值. 模拟中, 为简化计算, 用函数 $f(V_z, V_r, V_\varphi) = \frac{\sqrt{V_r^2 + V_\varphi^2}}{V_z}$ 来等价单个电子的发射度. 图 4(a), (b) 分别表示电子能量和函数 f 的值随 z 坐标值的变化关系. 可以看出, 电子在加速管中被加速到 1.2MeV 后达到稳定, 函数 f 的值在加速管中因加速而逐渐减小, 在聚焦磁场作用下先增大后减小, 最后趋于一个稳定值.

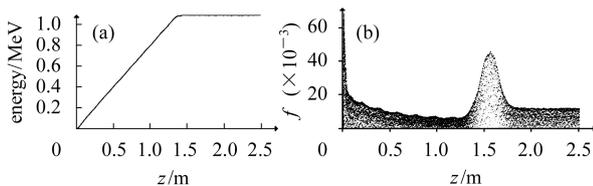


图 4 (a) 电子能量和(b) 函数 f 的值随 z 变化

3.2 电子枪结构的影响

经计算, 在其他条件一致的情况下, 加速管出口处束流尺寸对电子枪结构十分敏感, 主要体现在是否使用鼻锥外套以及对鼻锥倾角的选取上. 图 5 是采用平板外套和鼻锥外套的对比图. 表 1 给出了采用不同鼻锥倾角对计算结果的影响.

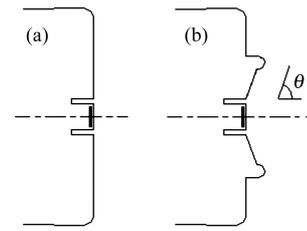


图 5 电子枪结构示意图
(a) 采用平板外套; (b) 采用鼻锥外套.

从表 1 可以看出, 采用合适的鼻锥外套确实能更好地抑制发散, 使聚焦更为明显. 倾角一般应大于 45° , 否则可能出现紊流, 甚至因鼻锥将电场屏蔽而无法引出束流.

表 1 采用不同鼻锥倾角计算结果

鼻锥倾角($^\circ$)	加速管出口	
	电子能量/MeV	束流半径/mm
90(即平板结构)	1.21	18.2
80	1.21	12.5
70	1.21	9.1
55	1.21	8.7
40	得不到稳定的束流	
20	无法引出束流	

3.3 阳极结构的影响

电子加速器结构设计中, 要使电子枪直接处于加速管内, 阴极浸没在加速管所形成的透镜场中, 形成一个浸没物镜. 选用束流稳定且出口处束流半径较为合适的 70° 倾角鼻锥外套的电子枪, 调整阳极板的位置、形状和孔径大小, 进行深入计算, 能总结出以下规律:

- (1) 阳极板位置对结果影响很大. 经计算, 阳极板选在第 4 个极板位置时最为稳定.
- (2) 阳极板的形状对结果影响不大. 比较图 6 所示两种结构的计算结果, 基本无差别.

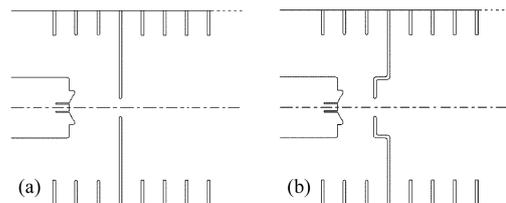


图 6 阳极板结构示意图
(a) 普通平板结构; (b) 调节后的结构.

(3) 阳极孔半径选在 8—20mm 较为合适. 孔径较大时, 达不到聚焦目的; 孔径较小时, 可能有电子打在阳极板上而产生二次电子, 对加速器造成损害, 使加速器性能降低.

3.4 极间电压分布的影响

在研究极间电压分布对束流聚焦性能的影响时,主要是对变梯度段的电压分布进行优化设计. 经计算,在总电势差一定的情况下,调整各极板间电压对结果影响很小. 究其原因,是因为500mA的束流强度所产生的空间电荷效应非常强,且变梯度段长度只占整个加速管长度的七分之一,不适宜用这种方法调整束流.

4 结论

用二维全电磁PIC方法计算了1.2MeV电子加速器束流聚焦过程,分析了电子枪结构、阳极结构以及极间电压分布对计算结果的影响. 从模拟计算结果中总结出来的规律与实验规律相符,并对实验提供进一步参考作用.

参考文献(References)

- 1 YIN Xue-Jun, LIU Zhen-Hao, CHEN Si-Fu. HEP & NP, 2002, **26**(5): 537—542(in Chinese)
(殷学军, 刘振灏, 陈思富. 高能物理与核物理, 2002, **26**(5): 537—542)
- 2 CHEN Si-Fu, YIN Xue-Jun et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(4): 513—516(in Chinese)
(陈思富, 殷学军等. 强激光与粒子束, 2001, **13**(4): 513—516)
- 3 ZHOU Jun, ZHU Da-Jun, LIU Sheng-Gang et al. HEP & NP, 2005, **29**(7): 705—708(in Chinese)
(周俊, 祝大军, 刘盛纲等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(7): 705—708)

Study on the Beam Focusing Property of 1.2MeV Electron Accelerator

ZHOU Jun^{1;1)} ZHU Da-Jun¹ LIU Sheng-Gang¹ WANG Han-Bin² XU Zhou² LIU Xi-San²

1 (School of Physical Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

2 (China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract Using a two-dimension fully electromagnetic Particle-in-Cell(PIC) simulation, the 1.2MeV electron accelerator used for desulfuration and denitrogenation is studied. The results given by the simulation are credible. In addition, the effect of electron gun structure, anode structure and voltage distribution on the work performance have been investigated. With appropriate analysis, some valuable conclusion can be obtained.

Key words electron accelerator, beam focusing, PIC simulation