

1.2MeV 脱硫脱硝电子加速器的设计与模拟

周俊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 对工业用 1.2MeV 脱硫脱硝电子加速器进行了结构设计与性能分析,并利用 PIC(Particle-In-Cell)模拟方法得到优化后的计算结果.结果显示,加速器的电子光学性能有所提高,基本达到优化设计的目的.

关键词 电子加速器 电子光学 数值模拟

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.在燃煤电站工业废气的脱硫脱硝处理,辐照交联电线电缆绝缘层的改性,工业废水的净化处理,谷物杀菌,汽车轮胎生产中的预硫化,材料的涂层固化等工农业领域有着广泛的应用前景^[1,2].

伴随着电子计算机的高速发展,PIC 模拟方法由于它本身所具有的特点,目前已经成为独立于理论研究和实验研究的第三个物理研究手段,促进了理论和实验研究的进展,缩短了理论和实验研究的周期^[3].本文就是利用 PIC 模拟方法对所设计一种脱硫脱硝电子加速器进行数值模拟,从而更深入地研究它的电子光学性能,并指导实际中的物理与工艺设计.

2 结构设计与性能分析

本文所述 1.2MeV 脱硫脱硝电子加速器的整体结构简图如图 1 所示.

在 2.1 中将详细介绍电子枪的结构,其主要用来发射强流电子束.强流电子束在加速管中被聚焦和加速,并在加速的过程中尽量保持不散焦,加速管的结构将在 2.2 中详细介绍.最后在 2.3 中简要介

绍聚焦线圈.

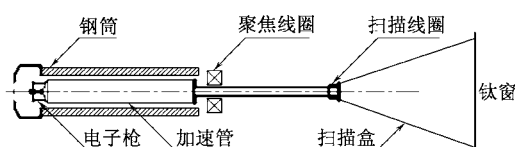


图 1 加速器整体结构简图

2.1 电子枪

加速器的电子枪结构如图 2 所示,LaB₆ 圆片直径为 6mm,阴极外套外径 60mm.其中为了进一步限制出射电子在阴极附近的发散,阴极外套采用鼻锥结构.阴极发射面的结构对阴极附近的等位线分布产生直接影响,也决定了电子束发射后在阴极附近的发散程度.图 3 把采用平面和鼻锥阴极外套时阴极附近的等位线分布进行了对比.

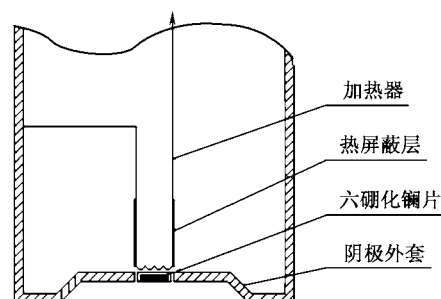


图 2 电子枪结构示意图

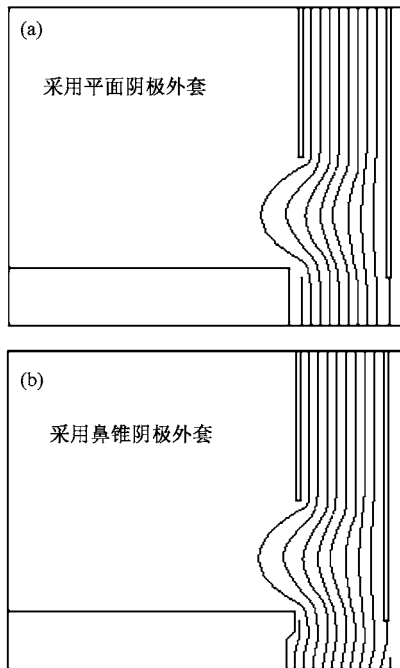


图 3 阴极附近等位线分布示意图
(a)采用平面阴极外套;(b)采用鼻锥阴极外套.

通过对比可知,采用鼻锥阴极外套更好地抑制了发散,使聚束更为明显,但对初始条件有所要求,例如束流发生变化时,要相应调整鼻锥才能达到最好效果.相比之下,平面阴极外套使得阴极发射面前的电场均匀,从而使得加速管的电子光学系统对初始条件不过于敏感,而便于电子枪的替换^[2].在本文中,因为所设计的加速器已给定束流为 500mA,并考虑到聚束对后面整段加速过程的影响,所以采用鼻锥结构.

2.2 加速管

文中的 1.2MeV 加速器的高压加速管部分由一段变梯度加速管和后接的 6 段等梯度加速管组成.变梯度加速管和等梯度加速管结构如图 4 所示.

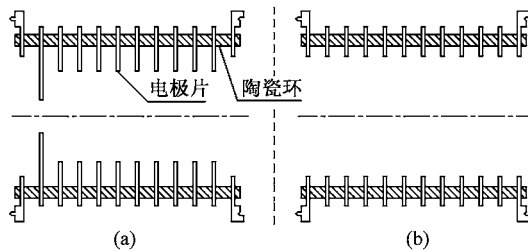


图 4 高压加速管结构示意图
(a)变梯度区加速管;(b)等梯度加速管.

对高压加速管进行结构设计时,作了以下几点

分析:

(1)均压片厚度和陶瓷环高度最佳比例,按照马丁公式应选 1:7,由于与不锈钢封接焊缝要加入无氧铜片,片上开槽,深度 0.4mm,为保证强度不能太薄.因为孔径较大,厚环的电场聚焦在轴线上的贡献很小,故选 2mm,这样陶瓷环高为 14mm.

(2)三结合点:金属、真空、陶瓷三交界处的电场设计为最小(1/5 工作电场),陶瓷体目前用圆柱结构,规范设计应在真空环境取 45°倒角.

(3)孔径选择,为减少杂散电子打到壁上产生二次电子发射.

根据粒子动力学计算,大孔径对强流束传输是可行的,当孔径比达到一定数值后,对轴上电位分布影响就不很明显了.大孔径选择,对系统抽真空也十分有利,研究表明:LaB₆ 阴极最佳发射环境,要求真空度为 10⁻⁴Pa 以上.

(4)耐压,经验表明:稳态情况下,加速管真空界面允许的工作电场强度为 2MV/m,为脉冲情况的 1/5—1/8,本设计选择 0.9MV/m,有 2 倍的安全因子.

(5)根据机械强度要求,以及保证烘烤性能,采用先进的金属与陶瓷的压力扩散焊封接工艺.其核心问题是解决好陶瓷(Al₂O₃ 95 陶瓷)与不锈钢(无磁 1Cr18Ni9Ti)的封接,经过多次试验,采用加一无氧铜垫片的真空压力扩散焊可基本解决这一问题.

2.3 聚焦线圈

聚焦线圈位于距加速管出口 10cm 处,聚焦线圈和扫描盒距离 1m,扫描盒距钛窗约 1.06m.电子束在聚焦线圈所形成磁透镜的作用下发生聚焦,达到扫描盒.

$$\text{根据公式 } Q = \frac{P}{\mu_m S} = \frac{I^2 R}{\mu_m S}$$

其中 P 为线圈损耗功率(W), I 为线圈电流(A), R 为线圈电阻(Ω), μ_m 为散热系数(W/cm²°C), S 为线圈散热面积(cm²).

对线圈进行温升计算,综合考虑,取线圈为 70 层×60 匝, $I = 1.6$ A,线径 1.5mm,假定正常工作时温度 < 65°C,并取参数 $\mu_m = 11.80 \times 10^{-4}$ (W/cm²°C), $\rho_{65} = 0.02$ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$),可计算得到散热面积 $S = 2014$ cm²,线圈电阻 $R = \rho_{65} L/S = 33\Omega$,温升 $Q = I^2 R/\mu_m S = 35.5^\circ\text{C}$,温升计算完全符合要求.

3 数值模拟

经过以上结构设计和性能分析,本文使用 2.5

维 MAGIC^[4]软件对所设计的加速器进行 PIC 数值模拟. MAGIC 是美国 MISSION RESEARCH 公司经过二十余年不断开发完善的一种电磁粒子模拟软件,其求解过程是采用时域有限差分法(Finite Differential Time Domain)联解离散化的 Maxwell's 方程和粒子运动方程,通过合理放置电磁场和粒子,并由电磁场推动粒子运动,粒子运动又与电磁场发生互作用,整体形成自洽的过程.

3.1 连接法兰对加速器性能的影响

相邻两段加速管接近的两电极片间的区域称为连接法兰区,长 15mm,连接法兰两侧的电极片等电位.在模拟中,对等梯度区连接法兰及附近区域进行研究,连接法兰及附近的等位线分布如图 5(a)所示.法兰两侧电极等电位,所以中心电场值最小,由于连接法兰的影响,轴上电场分布呈波浪形,即在每个法兰中心位置都会有一个波谷,如图 5(b)所示.

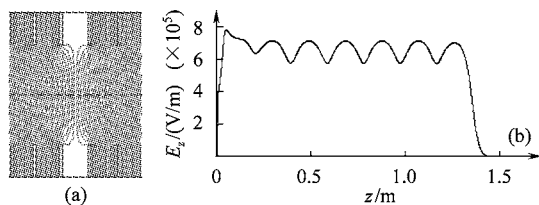


图5 法兰对加速器性能的影响
(a)法兰附近等位线分布;(b)轴上电场分布.

3.2 电子轨迹计算

从轴上电场分布可以看出,电子束经过阳极孔时发生第一次聚束,后面在每一次将到达连接法兰时发生散焦,但经过连接法兰进入下一段等梯度管时又会发生聚束,如此周期性进行散焦和聚束,逐渐调整.最后,电子束穿出加速管,在聚焦线圈形成的磁透镜作用下聚焦到扫描盒.电子束轨迹如图 6 所示.

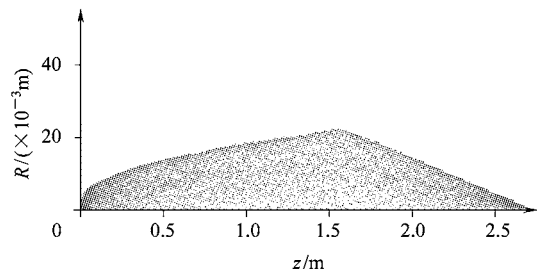


图6 电子束轨迹

3.3 初始条件对加速器性能的影响

在模拟中,改变几种初始条件并观察结果,对加速器进行了进一步研究.

通常电子束初始运动方向与 z 轴一致,初始能量为 1eV.改变电子束初始运动方向和在 1eV 附近调整初始能量后,得到的结果改变不明显,即表明它们对聚焦性能影响很小.

阴极外套上鼻锥取适当大小的时候,聚焦性能比使用平面阴极外套时有所改善.但当鼻锥太突出时,阴极附近束流会发生紊流现象.

4 结论

通过以上数值模拟程序计算出来的结果,可以看出理论分析在数值模拟中的具体体现.数值模拟是实际设计和应用中的重要工具,两者相结合会大大提高效率.

在以上数值模拟中,加速器的性能分析及设计的几个思路都融入其中,并得到很好的体现,证明了设计的初步可行性.从结果显示,所设计的 1.2MeV 脱硫脱硝电子加速器基本达到所要求的指标,并将辅助工程上的实际设计,其具体可信度正在进一步验证之中.

参考文献 (References)

- 1 YIN Xue-Jun, LIU Zhen-Hao, CHEN Si-Fu. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 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 SHAO Fu-Qiu et al. Particle Simulation of Plasma. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)
(邵福球等.等离子体粒子模拟.北京:科学出版社,2002)
- 4 Bruce Goplen. Magic User's Manual. August, 1997

Design and Simulation of a 1.2MeV Electron Accelerator Used for Desulfuration and Denitrogenation

ZHOU Jun¹ 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 This paper presents the structural design and functional analysis of a new kind of 1.2MeV industrial electron accelerator. PIC(Particle-In-Cell) method is used to simulate this accelerator and to optimize the design, the results show that the optics property of this accelerator has been improved. This electron accelerator is used for desulfuration and denitrogenation in environmental industry. This application purifies flue gases of the thermal power station from Sulphurous oxide and Nitrogen oxide in order to reduce the pollution in the air.

Key words electron accelerator, electron optics, PIC simulation