

# 100MeV 负氢回旋加速器高频冷模腔的理论及实验研究

纪彬<sup>1)</sup> 赵振鲁 张天爵 邢建升 王修龙 殷治国 侯世刚 夏乐

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 在回旋加速器中, 高频系统为带电粒子加速提供能量, 高频谐振腔作为高频系统中的关键部件, 它性能的好坏直接决定着粒子是否能够被加速, 所以, 高频谐振腔的设计非常关键. 在 100MeV 负氢回旋加速器的设计中, 在空间限制的同时, 要求加速电压从中心区的 60kV 到引出区的 120kV 变化, 这对谐振腔的设计提出了很高的要求. 基于上述条件, 本工作利用有限差分法的软件 CST MICROWAVE STUDIO 设计的双内杆结构 44MHz 高频谐振腔初步设计完成, 根据初步设计的结论, 加工与实际腔体尺寸 1:1 模型, 模型高频参数测量的结果与 CST MICROWAVE STUDIO 的计算相吻合, 结果是可信的.

**关键词** 回旋加速器 高频谐振腔 Dee 电压

## 1 引言

北京串列加速器升级工程, 包括研制一台流强为 200 $\mu$ A, 能量为 100MeV 的强流负氢回旋加速器. 紧凑型回旋有空间限制, 要求充分利用磁铁谷区的空间, 设计的两个腔体完全安放在两个相对的谷区中, 其高频参数满足下面的要求:

- 1) 谐振频率  $f$ : 43MHz—45MHz;
- 2)  $Q$  值:  $>8000$ .

加速电压分布: 物理设计要求和, 中心区为 60kV, 大半径区域应该约为 120kV<sup>[1]</sup>

## 2 设计方法与设计软件

100MeV 的高频腔体, 结构复杂, 在设计中需要调节大量的结构参数, 需要对腔体的谐振模式和场分布的进行分析, 需要确定腔体的功率损耗分布, 需要了解腔体可能存在的其它高次振荡模式, 用数值计算模拟的方法可以更方便更准确地确定腔体的结构<sup>[2]</sup>, 因此, 在此设计中, 采用数值计算模拟法, 应用有限差分计算软件 CST MICROWAVE STUDIO.

## 3 双内杆腔体的计算

通过对单内杆腔体的计算, 发现单内杆的腔体谐

振频率可以满足要求, 但是不能同时满足 Dee 电压分布的需要和腔体机械稳定性的要求, 为了解决这一问题腔体采用双内杆结构, 其结构示意图见图 1.

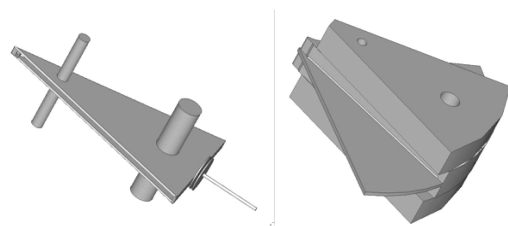


图 1 双内杆腔体结构示意图

### 3.1 腔体频率、Dee 电压随内杆位置变化规律

前内杆的圆心固定不动, 移动后内杆位置, 得到腔体频率、Dee 电压分布随后内杆位置变化的规律, 见图 2<sup>[3]</sup>.

由图 2 可以得出, 当第一个内杆固定不动, 随着第二个内杆向外移动, 腔体的频率升高, Dee 电压分布整体提高.

后内杆的圆心固定不动, 移动前内杆位置, 得到腔体频率、Dee 电压分布随后内杆位置变化的规律, 见图 3<sup>[3]</sup>.

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: jibin100@163.com

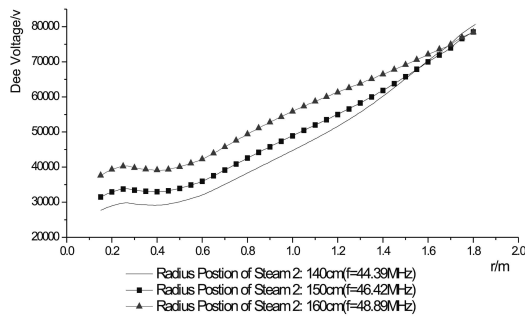


图 2 频率、Dee 电压分布随第二个内杆位置变化规律图

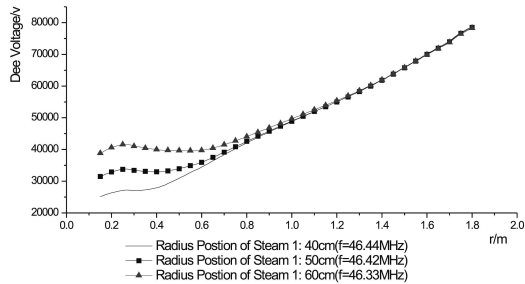


图 3 频率、Dee 电压分布随第一个内杆位置变化规律图

由图3可以得出,当第二个内杆固定不动,随着第一个内杆向外移动,腔体的频率变化不明显,在 $r < 0.8\text{m}$ 的部分Dee电压分布有明显提高,在 $r > 0.8\text{m}$ 的部分Dee电压分布变化不明显。

### 3.2 双内杆腔体基本结构的确定

通过对腔体内杆等结构的调整,可以确定满足谐振频率和Dee电压分布的要求的和Dee电压分布的双内杆腔体结构,其中间平面的电场分布图见图4。

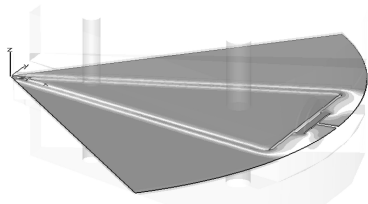


图 4 中间平面电场分布图

## 4 双内杆腔体的优化设计

从上面的计算中发现,在电容板处的电场分布不合理,因此需要进行优化设计.在优化设计中,加入耦合电容,放置在Dee板尾部的中间位置,将微调电容板由一个变为一对,分别放置在耦合电容板的两侧.修改后,原来集中在电容板之间的能量分布到加速间隙中.在调节电容结构的同时,对内杆位置,Dee板结构,腔体高度等也进行了调整。

优化设计之后的中间平面的电场分布图和Dee电压分布图见图5。

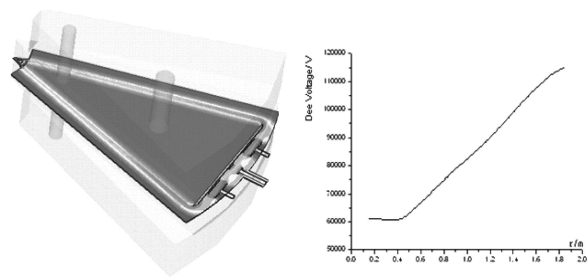


图 5 频率、Dee 电压分布随第一个内杆位置变化规律图

优化设计之后,腔体的频率为44.32MHz,满足设计要求.  $Q$  值为10600, Dee电压分布从中心区到引出区为60kV到120kV,满足设计要求. 一对腔体的总功率损耗由原来的73kW降低到57kW,损耗大大降低,减轻水冷的设计的压力。

## 5 双内杆腔体的冷模实验

根据双内杆腔体的优化设计,制作了一个内表面贴铜皮的木模实验腔,并对该实验腔进行了一些高频参数的测量,包括:腔体的本征谐振频率、Dee电压分布等。

### 5.1 双内杆冷模实验腔谐振频率测量

将耦合电容板的间距调整为50mm,固定不变,调节微调电容板的间距,得到木模腔体频率随微调电容间距变化的曲线,与模拟计算所得到的结果绘制在一起,见图6。

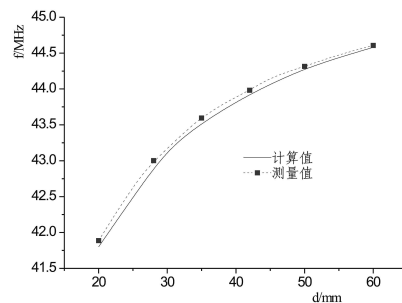


图 6 频率随微调电容变化计算值与测量值的比较

从图中可以看到,腔体的频率随微调电容间距变化的计算值与测量值吻合得非常好,误差在1%以内。

### 5.2 双内杆冷模实验腔 Dee 电压分布测量

将微调电容片的间距固定在55mm,调节耦合电容,达到临界耦合,此时的腔体频率为44.27MHz。

在这种情况下,固定腔体的微调电容板、耦合电容板之间的间距,用小电容在腔体的加速间隙取信号,得到从中心区到引出区的电压分布曲线,将网络分析

仪得到中心区的信号的值按比例设定为1, 得到图7所示的曲线.

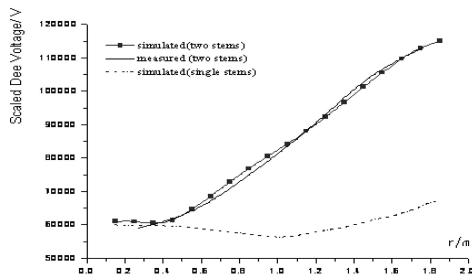


图7 腔体Dee电压计算值与测量值的比较

从图7可以看到, 木模腔体的Dee电压分布从中

心区到引出区约为1/2的关系, 与模拟计算值的比例吻合.

## 6 结论

在此项设计工作中, 腔体结构采用了不同于传统高频腔体的双内杆结构, 分别采用基于有限元方法的计算软件ANSYS和基于有限差分法的计算软件CST MICROWAVE STUDIO进行设计, 并将两者进行对比, 最终完成了用于100MeV回旋加速器的双内杆高频谐振腔的物理设计, 频率与Dee电压分布等均满足物理要求. 在尺寸为1:1腔体木模型实验中, 得到实验结果与计算结果拟合的很好, 证明理论计算的结果是可信的.

## 参考文献(References)

- 1 WANG Xiu-Long et al. CYC2004, 2004
- 2 JI Bin et al. Atomic Energy Science and Technology, 2004,

38(2): 121 (in Chinese)

(纪彬等. 原子能科学技术, 2004, 38(2): 121)

- 3 WANG Xiu-Long et al. Proc. of CARRI 2006 and NIM-B, 2006

# Theoretical and Practical Study on RF Model Cavity of 100MeV $H^-$ Cyclotron

JI Bin<sup>1)</sup> ZHAO Zhen-Lu ZHANG Tian-Jue XING Jian-Sheng WANG Xiu-Long  
YIN Zhi-Guo HOU Shi-Gang XIA Le

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** In a cyclotron, the RF cavity is the key device to accelerate ions. The RF cavity design for the 100MeV  $H^-$  cyclotron is very complex since the space is narrow and the Dee voltage is 60kV at the center and 120kV at the extraction region. CST MICROWAVE STUDIO is used in the design, and a real model has been made. The test result on the model is in good agreement with the simulation result.

**Key words** cyclotron, RF cavity, Dee voltage