

文章编号: 1007-4627(2009)02-0123-04

SSC 新高频腔设计与分析*

张生虎^{1, 2}, 许哲^{1, 3, #}, 张秋余^{1, 2}, 冯勇¹, 马云¹, 高宜海¹,
吴建强¹, 王贤武¹, 王皓宁¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050;

3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 简要分析了 HIRFL SFC 与 SSC 之间的束流匹配关系, 给出了新高频腔的频率范围。利用经典三维电磁场数值模拟软件 MAFIA 对 SSC 新高频腔体进行了模拟计算, 得出了 SSC 新高频腔体的相关物理参数, 并对频率范围、 Q 值、并联阻抗和电压分布等参数进行了分析。高频腔体的模拟计算结果完全符合 SSC 回旋加速器改造的物理设计及空间结构要求。

关键词: MAFIA; 高频腔体; 模拟计算

中图分类号: TL503.2

文献标识码: A

1 引言

兰州重离子加速器装置 (HIRFL) 由两台回旋加速器组成, 其中注入器 (SFC) 为扇聚焦回旋加速器, 束流引出半径为 75 cm, 加速高频电压频率为

6—18 MHz。主器 (SSC) 为分离扇回旋加速器, 束流注入半径为 100 cm, 加速高频电压频率为 6.5—14 MHz。表 1 列出了两器之间的 4 种匹配模式。

表 1 目前 SFC 与 SSC 两器之间的匹配关系

Mode	h_1/h_2	$E_{SFC}/(\text{MeV/u})$	F_{SFC}/MHz	$E_{SSC}/(\text{MeV/u})$	F_{SSC}/MHz
1	1/2	8.47—3.58	8.52—5.57	100—39	12.8—8.35
2	3/2	3.50—2.53	16.50—14.00	38—27	8.25—7.00
3	3/4	2.44—0.58	13.80—6.72	26—6	13.80—6.72
4	3/6	0.48	6.14	5	9.21

h_1 和 h_2 分别为两加速器的谐波数。表 1 表明当 $h_1/h_2 = 1/2, 3/2, 3/4, 3/6$ 时, 可满足 SSC 引出 5—100 MeV/u 的能量。SFC 与 SSC 之间匹配满足下面关系式: $f_1 r_1 = f_2 r_2, n_1 h_1 f_1 = n_2 h_2 f_2, F_1 = h_1 f_1, F_2 = n_2 f_2, \eta = 1/n_2$ 。这里: f_1 和 f_2 分别是 SFC 和 SSC 的离子回旋频率; r_1 和 r_2 分别是 SFC 的平均引出半径和 SSC 的平均注入半径; F_1 和 F_2 分别是 SFC 和 SSC 的高频频率; h_1 和 h_2 分别是

SFC 和 SSC 的谐波数; n_1 和 n_2 是两个整数, 其比为即约分数; η 为两器之间的匹配效率。只有在 $h_1/h_2 = 3/4$ 时的匹配效率为 100%, 而其余 3 种模式的匹配效率均为 50%。

随着兰州重离子加速器冷却储存环 (CSR) 物理实验的逐步展开, 需要大大提高高能重离子束的流强, 显然 SFC 与 SSC 之间只有 50% 的匹配效率是不能满足上述要求的。为了达到 SSC 引出离子的能

* 收稿日期: 2008-07-18; 修改日期: 2008-10-31

* 基金项目: 国家九五重大科学工程冷却储存环项目 (06HIRFL200)

作者简介: 张生虎 (1971—), 男 (汉族), 硕士研究生, 工程师, 从事高频及其相关技术的研究和应用;

E-mail: zhangsh@impcas.ac.cn

通讯联系人: 许哲, E-mail: zxu@impcas.ac.cn

量在 5—100 MeV/u 的范围，两器之间匹配效率为 100%，我们提出了两器之间 3 种新的匹配方案。参

数见表 2。

表 2 SFC 与 SSC 两器之间新匹配关系

Mode	h_1/h_2	$E_{SFC}/(\text{MeV/u})$	F_{SFC}/MHz	$E_{SSC}/(\text{MeV/u})$	F_{SSC}/MHz
1	1/2	8.47—3.33	8.52—5.50	100—38	25.56—16.50
2	3/4	3.33—1.89	16.50—12.14	28—20	16.50—12.14
3	3/8	2.07—0.48	12.71—6.14	22—5	25.42—12.28

在新的匹配条件下，SSC 的电压利用系数会大大提高。SSC 中的有效加速电压满足以下关系式： $V_{\text{eff}}=4P(V_{\text{dec}} \sin(h\alpha/2))$ ，其中 P 为被加速离子的荷质比， V_{dec} 加速缝高频电压的幅值， α 为高频腔上两加速缝中心线的夹角，SSC 的 $\alpha=30^\circ$ 。从表 1 可以看出，在很宽的能量范围内 $h_2=2$ ， $\sin(h\alpha/2)=0.5$ 这样就导致了有效加速电压降低了一半，不利于离子的注入、加速和引出。从表 2 可见，在新匹配情况下，SSC 的谐波数 $h_2=4$ 和 8， $\sin(h\alpha/2)=0.867$ ，这相对于 $h_2=2$ 的情况，有效电压的幅度增加了约 75%，离子的单圈能量 $\Delta E \propto V_{\text{eff}}$ ，从而离子可以获得更高的能量增益。故 SSC 高频系统的工作频段将由原来 6.5—14 MHz 提高到 12—26 MHz。

竖腔改为直杆式竖腔；频率调谐由波纹板结构改为平板结构。图 1 给出了新旧两种腔体的比较。

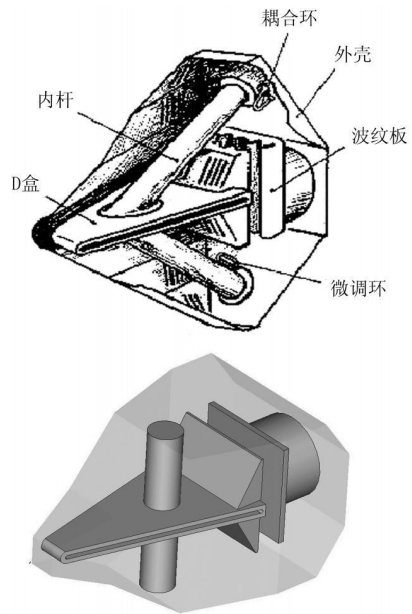


图 1 SSC 新旧两种腔体结构比较

2 腔体结构设计

SSC 回旋加速器的物理设计中高频系统有参数完全相同的两个高频腔，其物理参数见表 3。

表 3 SSC 新型高频腔主要参数

半径/mm	加速电压 /kV	频率范围 /MHz	D 盒张角 /(°)
3200	150—250	12—26	26

根据上述物理参数，对 SSC 新型高频腔进行设计和计算。在 SSC 新型高频腔体的设计中，腔体采用 $\lambda/2$ 波长线的竖腔结构。这种结构腔体的频率改变是通过改变开路端调谐电容板的间隙来实现，频率微调采用微调电感环，而功率耦合采用电感耦合方式来实现。由于原有的真空室结构不能改变，所以在设计中，新腔体的外形尺寸不能大于原高频腔。新旧腔体结构上的差异主要为：腔体由斜杆式

3 高频腔模拟计算结果分析

在加速器高频腔的设计过程中，主要考虑以下几个参量，即腔体的频率范围、 Q 值、功率损耗、并联阻抗及场分布等主要参数。随着三维数值模拟软件的不断发展和完善，设计加速器高频腔体变得方便而快捷，我们利用三维设计程序 MAFIA 对高频腔体进行了模拟计算。

3.1 频率范围

由于腔体表面电导率和机械结构的微小变化会引起腔体谐振频率的变化，利用微扰理论对上述两种情况带来的误差进行估算。

腔体外壁有限电导率对频率的影响。根据微扰

理论, 可得其引起频率的相对改变为

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{1}{2} \frac{\oint_{Z_I} |B_0|^2 d\alpha}{\omega\mu_0 \int |B_0|^2 d\tau} = \frac{1}{Q} \approx \frac{1}{8000},$$

即频率变化为 1.5—3 kHz。

机械棱角光滑所引起的频率改变, 同样根据微扰理论, 有

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\int_{\Delta V} [\epsilon |E_0|^2 - \mu |H_0|^2] d\tau}{\int_V [\epsilon |E_0|^2 + \mu |H_0|^2] d\tau},$$

升高幅度近似为 $\Delta\omega/\omega = \Delta V/V$ 。其中 ΔV 为棱角光滑所增加的体积, 其与电场区总体积的比值至少小于 1/1000, 所以由其引起的频率增加小于 25 kHz。综上所述, 各种因素引起的频率计算误差不会超过 40 kHz。

利用现有高频腔的理论对旧高频腔的谐振频率进行计算的结果和实测数据相比, 两者相差在 5% 以内, 符合设计要求。换言之, 用同样的方法得出 SSC 新型高频腔的计算结果同样能满足设计要求。图 2 给出了新高频腔的数值模拟结果, 当动板

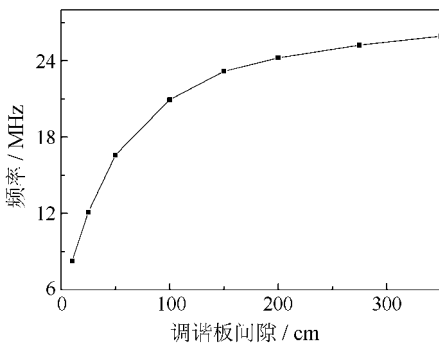


图 2 新高频腔谐振频率曲线

和定板的间隙变化范围为 25—330 mm 时, 频率变化范围为 12—26 MHz。另外, 从现有高频腔的运行来看, 在最低端的 6.5 MHz 情况下, 存在二次电子发射现象, 即“电晕区”。通过脉冲锻炼可以比较容易穿越“电晕区”。加之, 击穿电压随频率的升高而升高, 对新高频腔工作频率低端而言, 加速电压工作在 150 kV, 电晕现象也能克服。

3.2 Q 值、并联阻抗和损耗功率

Q 值表示了腔体的选频特性及损耗的大小, 是腔体的一个重要参数, 一般要求其数值越大越好。

SSC 新型高频腔 Q 值的模拟结果最小约为 8000, 最大约为 12000(见图 3)。与旧腔体的 Q 值基本相同。

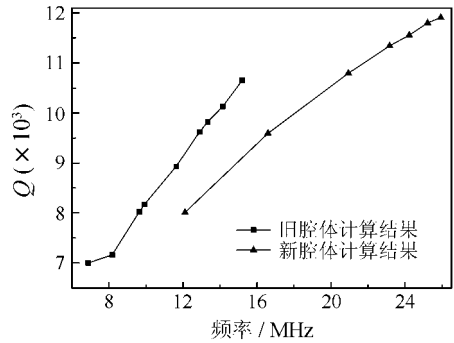


图 3 新旧腔体 Q 值频率关系曲线

并联阻抗也是腔体设计中必须予以足够重视的一个参数, 它在一定程度上反映了腔体损耗的大小, 而且它是联系加速电压和高频功率的纽带, 其数值越大表明在相同电压下, 所要求的功率越小。计算的并联阻抗值如图 4 所示。

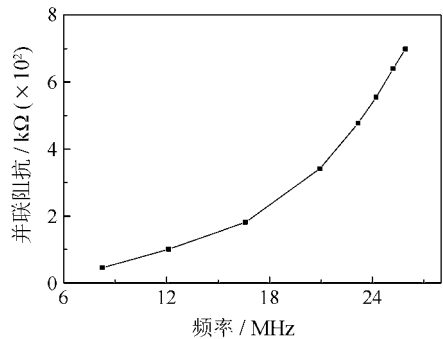


图 4 并联阻抗和频率关系曲线

SSC 新型高频腔损耗功率模拟计算值最大为 50 kW, 由于计算中没有考虑触点影响以及功率传输过程中的损耗、发射机与腔体的匹配不可能完全理想, 以及必须给发射机留一定的余量等因素, 依据 MAFIA 使用者的经验, 发射机功率应在 100 kW 比较合理。

3.3 加速电压径向分布

加速电压的径向分布对高频而言, 不是一个重要的参数。但在束流注入和引出端需要有较高的射频电压, 这样有利于束流注入和引出。图 5 给出了腔体上得到 100 kW 射频功率的情况下加速电压沿加速半径的分布曲线。从图中可以看出, 加速半径上内杆对应位置的射频电压最低, 而在引出端和注

入端的射频电压相对较高, 达到了设计目的。

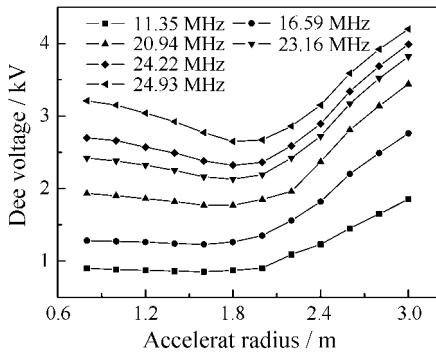


图 5 加速电压径向分布

4 结论

通过对 SSC 高频腔体频段的提高, 可以实现 SFC 与 SSC 之间束流 100% 的匹配, 高频电压的利用率由原来的 0.5 提高到 0.87。另外, 从模拟计算结果分析, SSC 新腔体各项指标均达到或超过加速器物理设计要求, 主要计算参数如表 4 所示。高频腔体结构上也符合 SSC 加速器整体的结构要求, 且新设计的高频腔体结构简单、调整方便。关于腔体频率调谐系统和功率耦合系统这里不做阐述。

表 4 主要参数计算结果

频率范围/MHz	Q 值	加速电压/kV	功率/kW
11-26	7000-12000	150-350	100

参考文献 (References):

- [1] Wang yifang. Chinese Physics, 2008, C32 (1): 223(in Chinese).
(王义芳. 高能物理与核物理, 2008, 32 (1): 223.)
- [2] Li Zhihui, Tang jingyu. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12 (1): 107(in Chinese).
(李智慧, 唐靖宇. 强激光与粒子束, 2000, 12 (1): 107.)
- [3] The MAFIA Collaboration. MAFIA User Manual version 4.0.25. Germany; CST Inc. 2000. <http://www.cst.de>.
- [4] Li Zhihui, Zheng Qiwen, Gao Yihai. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, 29 (1): 91(in Chinese).
(李智慧, 郑启文, 高宜海等. 高能物理与核物理, 2005, 29 (1): 91.)
- [5] Xu Zhe, Duan Yajuan, Zhao Hongwei, et al. Nuclear Physics Review, 2008, 25 (3): 249(in Chinese).
(许哲, 段雅娟, 赵红卫等. 原子核物理评论, 2008, 25 (3): 249.)

Design and Analysis of SSC RF New Cavity^{*}

ZHANG Sheng-hu^{1, 2}, XU Zhe^{1, 3, #}, ZHANG Qiu-yu^{1, 2}, FENG Yong¹, MA Yun¹,
GAO Yi-hai¹, WU Jian-qiang¹, WANG Xian-wu¹, WANG Hao-ning¹

(¹ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

² Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

³ Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Beam matching relationship between the two cyclotrons(SFC and SSC) of HIRFL is briefly discussed, and the frequency band of the new RF cavity is obtained. The new cavity is simulated with the three-dimensional electromagnetic calculation code MAFIA, and the parameters of it such as frequency, Q value, shunt impedance and voltage distribution are worked out and discussed. The simulation results show that the new RF cavity can fully meet the requirements of physics design and space configuration.

Key words: MAFIA code; radio frequency cavity; simulation

* Received date: 18 Jul. 2008; Revised date: 31 Oct. 2008

Foundation item: National Key Science Engineering Project—Cooling Storage Ring(06HIRFL200)

Corresponding author: Xu Zhe, E-mail: zxu@impcas.ac.cn