

20 kV 射频堆积腔的物理设计

张文志, 陆晓文, 顾 玮, 夏佳文

(中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:分析了重离子束的射频堆积过程。在此基础上,根据兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)内束流流强为 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ s}^{-1}$ 的设计要求,对用于束流射频堆积的高频腔体进行了物理设计。主要设计参数为:腔体长度 1.9 m,铁氧体环尺寸 $\phi 200 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,峰值电压 20.0 kV,频率范围 18.0 ~ 28.0 MHz,铁氧体中磁通量密度 10 mT。

关键词:重离子束;射频堆积;高频腔

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)01-14-06

在兰州重离子加速器冷却储存环主环(CSRm)^[1]的设计中,采用多次多圈注入和射频堆积的方法,将重离子束在横向相空间与纵向相空间进行累积,使环内束流流强达到 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ s}^{-1}$ 。

从注入器(SSC)引出的束流能量为 10 ~ 50 MeV/u,注入到主环中由射频堆积腔捕获并采用移相加速使束流在纵向相空间进行堆积。为获得 100% 的注入效率,注入器与主环的高频频率应达到匹配。CSR主环的注入半径为 SSC 平均引出半径的 8 倍,SSC 的高频频率范围为 6.0 ~ 14.0 MHz。对于不同能量的注入离子,主环采用不同的谐波数对束流进行捕获。主环射频堆积腔的频率范围选为 18.0 ~ 28.0 MHz。在重离子束的射频堆积过程中,堆积效率与初始捕获电压有关。为获得高的堆积效率,腔体的峰值电压设计为 20 kV。腔体由主腔与调谐腔组成,主腔设计为间隙可调的四分之一波长线型谐振腔,通过改变加速间隙的大小来改变谐振频率;调谐腔采用铁氧体加载的二分之一波长线型谐振腔,通过改变绕在其上偏磁线圈的偏磁电流来改变它的谐振频率。

1 工作原理

1.1 注入器(SSC)与主环(CSRm)间的高频匹配

为获得高的注入效率,注入器与主环之间须满足下列匹配条件:

(1) $\frac{F_2}{F_1} = \frac{R_1}{R_2}$ 。其中, R_1 和 R_2 分别表示 SSC 的平均引出半径和 CSRm 的注入半径; F_1

收稿日期:1998-05-05;修回日期:1999-01-04

作者简介:张文志(1966—),男,宁夏盐池人,工程师,博士,加速器物理专业

和 F_2 分别表示粒子在 SSC 和 CSR_m 中的回旋频率。

(2) $N_1 H_1 F_1 = N_2 H_2 F_2$ 。其中, H_1 和 H_2 分别为 SSC 和 CSR_m 相对于粒子回旋频率的高频率的谐波数; N_1 和 N_2 是两个整数。

用 f_1 、 f_2 分别表示 SSC 和 CSR_m 的高频率, 则 $f_1 = H_1 F_1$, $f_2 = H_2 F_2$, 而 SSC 和 CSR_m 之间的匹配效率为 $1/N_2$ 。

注入器 SSC 的频率范围为 6.0 ~ 14.0 MHz (2 次或 4 次谐波加速), 在 CSR_m 的总体设计中, $R_2 = 8 R_1$ 。为使两器之间的匹配效率为 100%, 即 $N_2 = 1$, CSR_m 射频堆积腔的频率范围选为 18.0 ~ 28.0 MHz, 对不同注入能量的粒子采用不同高频谐波数 (32、48、64、96)。

1.2 主环中束流的捕获

从注入器 SSC 中引出能量为 E_s 、动量散度为 P/P 的束流注入到主环中, 被堆积腔的高频稳相区捕获, 所需的捕获电压由下式表示:

$$V_{\text{cap}} = \frac{2 E_s h}{Y^2} \left(\frac{P}{P} \right)^2 \quad (1)$$

其中: $Y = \sqrt{2 \cos \phi_s - (- 2 \phi_s) \sin \phi_s}$, ϕ_s 为同步粒子的相角; h 为高频谐波数; $\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$, β 为粒子的相对论因子; m 为离子的荷质比。

1.3 束流的匹配过程

当注入束流被高频稳相区捕获后, 在高频场的作用下, 在能量-相位纵向相空间作同步相振荡。由于高频电压为非线性力, 粒子作同步相振荡的频率与其初始条件有关。为减少由于丝化所造成的损失, 束团在被移相加速到堆积空间前要使其与高频稳相区相匹配, 即使其变为匹配束。CSR_m 拟采用在控制上易实现的 Voltage-step Matching 方法将注入束团变为匹配束。其过程为: 采用高电压 (远大于对于一定动量散度的束流的捕获电压) 将注入束团捕获; 束团旋转 1/4 个同步相振荡周期后, 将高频电压降至某一值 (与具体的机器及注入束流的初始条件有关); 再经过 1/4 个相振荡周期后, 注入束团在相空间的分布与高频稳相区相匹配。

1.4 加速

当注入束团与高频稳相区匹配后, 将束团从注入空间加速到堆积空间。同步粒子每次经过加速间隙得到 $Z e V_{\text{RF}} \sin \phi_s$ (Z 为带电粒子的电荷态) 的能量增益, 则粒子的单核能随时间的变化关系为:

$$\frac{dE}{dt} = f_{\text{rev}} e V_{\text{RF}} \sin \phi_s \quad (2)$$

由于

$$\frac{f_{\text{RF}}}{f_{\text{RF}}} = \frac{1}{2} \frac{E}{E} \quad (3)$$

$$\frac{df_{\text{RF}}}{dt} = \frac{f_{\text{RF}}^2}{2 h E} e V_{\text{RF}} \sin \phi_s \quad (4)$$

其中: V_{RF} 为高频电压峰值。由式 (4) 给出加速过程中高频频率随时间的变化关系。

1.5 沉积

当移动的高频稳相区接近堆积空间时, 逐渐减小高频电压, 使高频稳相区的面积逐渐与束团的相面积相等或略大于束团的相面积。减小进入堆积区空间的稳相区面积, 提高堆积效率。高频电压的减小应为绝热变化, 以降低束团相面积的增长。根据 Hereward 的理论, 电压绝热

变化时,要保持因子

$$= \frac{1}{4} \frac{d}{s} \frac{d}{dt} \left[\ln \left(\frac{h}{a} \right) \right] \tag{5}$$

为一常数。式(5)中: $a = -\frac{v_{rev} h}{2E}$; $b = -\frac{v_{rev} V_{RF} \cos \phi_s}{2}$; $\frac{2}{s} = ab = \frac{V_{RF}^2 v_{rev} h \cos \phi_s}{2E^2}$, s 为粒子同步振荡的回旋角频率。束团相面积的增长发生在该过程的开始与结束,一个射频堆积过程中束团相面积的增长为:

$$= \frac{1 + \dots}{1 - \dots} \tag{6}$$

电压的绝热变化应使 保持为小常数。经推导,电压随时间的变化为:

$$V_{RF} = \frac{V_{RF0}}{(1 + 2 s_0 t)^2} \tag{7}$$

其中: V_{RF0} 为高频电压绝热变化前的值; s_0 为相应时刻同步相振荡的回旋角频率。

2 高频腔体设计

根据上述射频堆积的工作原理及要求,CSRm 射频堆积腔工作频率为 18.0 ~ 28.0 MHz, 峰值电压 $V_a = 20$ kV,束流孔径 $r = 100$ mm。

图 1 为所设计堆积腔的示意图,腔体由主腔与调谐腔组成。主腔为间隙可调的同轴线型谐振腔,其间隙可调范围为 10 ~ 100 mm,通过调节间隙的大小来改变主腔的谐振频率。调谐腔设计为铁氧体加载的同轴线型谐振腔,改变绕在加载铁氧体材料上的偏磁电流以改变其磁导率,从而改变调谐腔的谐振频率。对于不同能量的注入粒子,选择不同的加速间隙使主腔的谐振频率为粒子回旋频率的整数倍(高频谐波数),此时在调谐腔的偏磁线圈上加以适当的偏

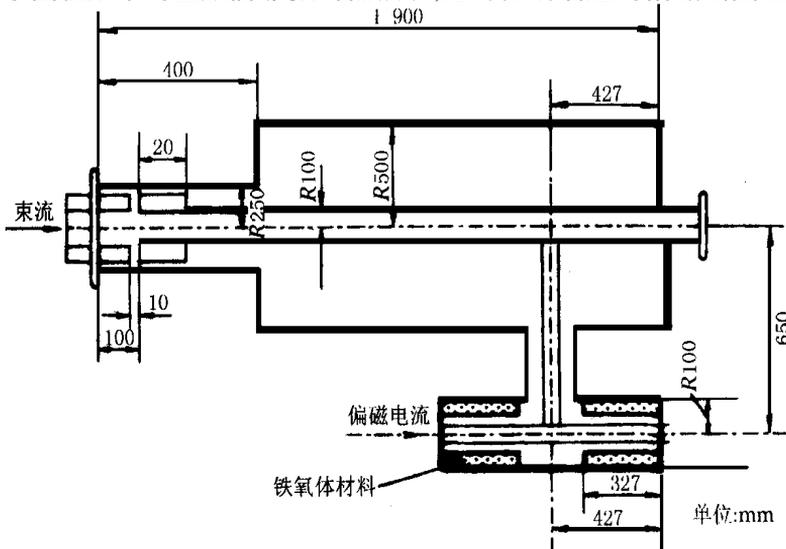


图 1 CSR 主环射频堆积腔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CSRm RF stacking cavity

磁电流,使调谐腔在上述频率下相当于二分之一波长线,相对于主腔为短路,使整个腔体工作于主腔的谐振频率,以保证在注入过程中使注入器与主环达到高频匹配;当注入束团与高频稳相区匹配后,改变调谐腔铁氧体上所加的偏磁电流,改变调谐腔的谐振频率,从而改变整个堆积腔的谐振频率,使注入束团从注入轨道加速到堆积轨道的顶部。在一个射频堆积的周期内,所设计的 CSR 主环从注入轨道至堆积轨道的顶部动量接收度为 $P/P = 1.8\%$, 对应于粒子回旋频率的变化为 $f/f = 2.0\%$, 即在一个射频堆积周期内,堆积腔的频率调谐范围 2.0% 。

2.1 等效电路分析

图 2(a) ~ (e) 为堆积腔等效电路。其中,各段等效阻抗为:

$$\begin{cases} Z_i = 60 \ln(R_2/R_1) \\ Z_4 = 60 \sqrt{\mu_e/\epsilon_e} \ln(R_2/R_1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z_i 代表 Z_g, Z_y, Z_1, Z_2, Z_3 ; R_2 和 R_1 分别为该段同轴线的外径与内径; μ_e, ϵ_e 为加载铁氧体材料的有效磁导率与有效介电常数。各等效电感为:

$$\begin{cases} L_g = \frac{Z_g}{c} \tan(\beta l_g) & L_2 = \frac{Z_0}{c} \tan(\beta l_2) \\ L_y = \frac{Z_y}{c} \tan(\beta l_y) & L_3 = \frac{Z_0}{c} \tan(\beta l_3) \\ L_1 = \frac{Z_0}{c} \tan(\beta l_1) & L_4 = \frac{Z_4}{c} \tan(\beta l_4) \end{cases} \quad (9)$$

$$L_e = L_a + L_c = (L_g + L_y + L_1) + \frac{L_2(L_3 + L_4)}{L_2 + L_3 + L_4} \quad (10)$$

其中: $\beta = \omega/c, \omega = 2\pi f, c$ 为光速。

(1) 注入时,调谐腔相对于主腔短路,它本身相当于二分之一波长线,即

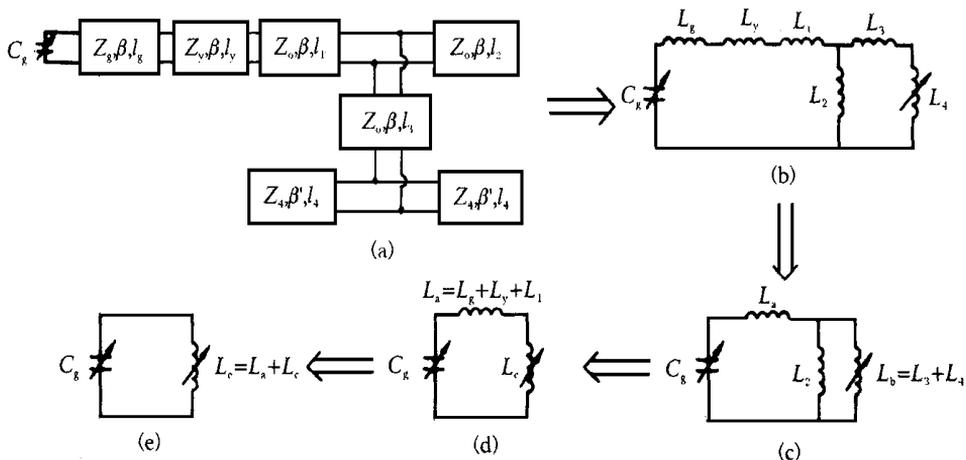


图 2 CSR 主环射频堆积腔等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of CSRm RF stacking cavity

$$\left\{ \begin{aligned} &= \sqrt{\mu_e} \frac{e}{c} = \sqrt{\mu_e} \frac{e}{c} \\ l_4 &= \sqrt{\mu_e} \frac{e}{c} l_4 = \sqrt{\mu_e} \frac{e}{c} l_4 = \frac{e}{c} l_4 = \frac{e}{c} l_4 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

(2) 移相加速时,有

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{C_g(L_a + L_2)}{\sqrt{C_g \left[L_a + L_2 \left(1 - \frac{L_2}{L_3 + L_4} \right) \right]}} = \frac{1}{2} \frac{L_2^2}{(L_a + L_2)(L_3 + L_4)} = 2\% \quad (12)$$

上式假定 $L_2 + L_3 \gg L_a$ 时成立。

由式(11)和(12)可得到在一个射频堆积的周期里调谐腔所加载的铁氧体材料磁导率的变化范围。

2.2 腔体物理参数

由上述传输线理论计算设计了堆积腔,然后将堆积腔的主腔与调谐腔分开处理,用 SUPERFISH 二维计算程序分别计算主腔与调谐腔,得到了它们的主要物理参数(图3)。

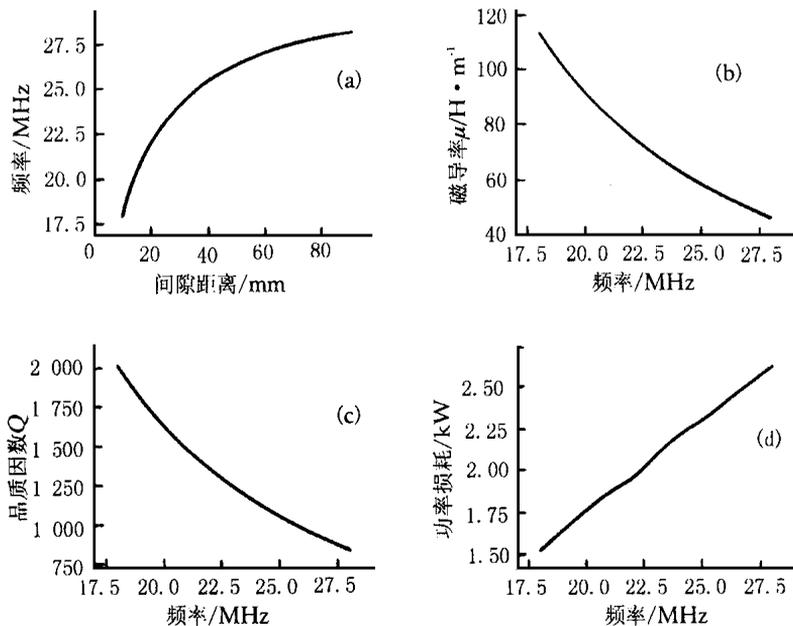


图3 腔体主要参数计算结果

Fig. 3 Calculated results of main parameters of RF stacking cavity

- (a) ——主腔谐振频率随间隙大小的变化; (b) ——加载铁氧体磁导率的变化范围;
(c) ——堆积腔品质因数随频率的变化; (d) ——堆积腔体功率损耗随频率的变化

2.3 射频堆积腔的主要设计参数

经过物理分析和计算,20 kV 射频堆积腔的主要设计参数如下。

腔体长度:1.9 m;

铁氧体环尺寸: $\phi 200 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$;

主腔间隙调节范围:10 ~ 100 mm;

功率损耗:2.8 kW;

峰值电压:20.0 kV;

频率范围:18.0 ~ 28.0 MHz;

铁氧体磁导率变化范围:10 ~ 140 $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$;

铁氧体中磁通量密度:10 mT。

参考文献:

- [1] Xia JW, Rao YN, Yuan YJ, et al. HIRFL Status and HIRFL-CSR Project in Lanzhou [A]. Proceedings of the First Asian Particle Accelerator Conference (APAC) [C]. Tsukuba, Japan: KEK, 1998. 343 ~ 348.

Conceptual Design of 20 kV RF Stacking Cavity

ZHANG Weir-zhi, LU Xiao-wen, GU Wei, XIA Jia-wen

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: RF stacking process for heavy ions is analyzed in HIRFL cooler storage ring (HIRFL-CSR). A RF cavity for heavy ions stacking is designed according to the requirement of the stacking processes. Its frequency range is 18.0 ~ 28.0 MHz and peak RF voltage is 20.0 kV. The other main parameters of the cavity are obtained by using transmission line theory and SUPERFISH code.

Key words: heavy ion beam; RF stacking; RF cavity