

# $\beta = 0.45, f = 350 \text{ MHz}$ Spoke 腔的设计\*

朱凤<sup>1)</sup> 全胜文 王莉芳 赵夔 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

**摘要** 近几年来,低 $\beta$ 超导管(例如 spoke 型, re-entrant 型, CH 型)作为质子或者离子在中低能段的加速结构成为研究的热点. 许多实验结果表明 spoke 腔在低能段是很好的选择,在中能段跟椭球腔相比也很具有竞争实力,为此,北京大学开展了 $\beta = 0.45$ ,频率为 350MHz 的 spoke 型质子超导加速腔研究. 本文详细阐述了这种腔的结构及电磁场的设计,从射频参数  $Q, r/Q$ ,最大表面电磁场和加速效率的计算结果来看,它具有很好的加速性能.

**关键词** spoke 超导管 射频参数 MAFIA 程序

## 1 引言

散裂中子源、对撞机、新型光源等大型项目要达到高亮度,高流强的目的都需要一系列加速腔,而且不同的速度范围采用的加速结构也不相同. 对速度很低( $\beta < 0.1$ )的质子、重离子来说,通常采用 RFQ 常温加速结构,在速度很高 $\beta > 0.5$ 时,超导椭球腔以结构简单、加速效果良好的特点而被采用. 自从美国 Argonne 国家实验室(ANL)的 $\beta = 0.29$ 和 $\beta = 0.4$ 的两个 spoke 超导管测试达到 $12.4 \text{ MV/m}^{[1]}$ 和 $11.5 \text{ MV/m}^{[2]}$ 的最大加速梯度以来,spoke 腔成为连接 RFQ 加速结构和椭球腔加速结构的最具潜力的桥梁. 但由于它是一种新型加速结构,许多问题诸如 Multipacting、高阶模等都需要进一步研究,自 2003 年开始北京大学超导加速器实验室开始了这种超导管的研究.

## 2 Spoke 超导管的优点

首先,跟常温腔相比,超导管具有高效性(腔壁损耗几乎可以忽略,射频功率几乎可以全部传给束流),已成为大型加速器的主流加速结构.其次,椭球

腔与 spoke 腔进行比较. 当 $\beta < 0.4$ 时,椭球腔不能被使用,而 spoke 腔在实验上已经取得良好的加速效果,例如美国 Los Alamos 国家实验室(LANL)一个 $\beta = 0.175$  spoke 腔在 4K 温度下的加速梯度达到了 $11.6 \text{ MV/m}^{[3]}$ . 但 $\beta$ 值为 0.5 附近时,两种加速结构都可以采用. 比较两者,spoke 腔具有机械性能稳定;相同频率下尺寸小、结构紧凑;更稳定的场形分布;可以工作在 4.2K,椭球腔因为频率较高只能工作在 2K 下;spoke 腔具有更高的分路阻抗,可以大大降低制冷热载. 由于 spoke 腔具有以上优点,以及国际上还没有 $\beta = 0.45$ 的 spoke 腔,我们实验室决定开展 $\beta = 0.45$ ,频率 350MHz spoke 腔的研究(见图 1).

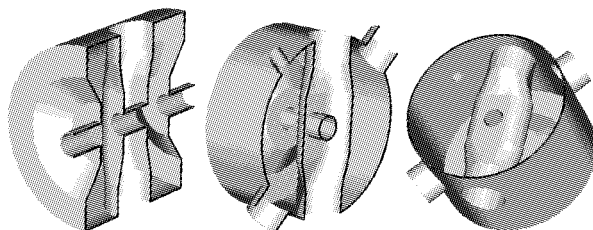


图 1  $\beta = 0.45$ ,频率 350MHz 的 spoke 腔的剖面图

2004-05-31 收稿

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB713600)资助

1) E-mail: zhufeng77726@yahoo.com.cn

### 3 腔的设计

#### 3.1 腔的基本要求

在进行腔的优化设计前,先选取腔的一些基本尺寸. 由于在高功率工作下频率为 350MHz 的速调管比较容易得到,所以 spoke 腔的频率选取为 350MHz. 研究中  $\beta$  腔的加速特性,是否可以替代  $\beta_g = 0.5$  附近的椭球腔,腔的几何  $\beta_g$  定为 0.45. 采用一个 spoke 横条、两个加速间隙的设计. spoke 腔属于  $\lambda/2$  加速结构,它的直径约为  $\lambda/2 = 428\text{mm}$ . 定义两个加速间隙的中心距  $g = \beta_g \lambda/2$ ,腔的有效长度  $L_{\text{cav}} = 2/3\beta_g \lambda = 257\text{mm}$ . 为得到较小的  $E_p/E_{\text{acc}}$ ,腔的束管口径为 60mm.

#### 3.2 spoke 腔的优化设计

spoke 腔的电磁场参数的优化设计是通过 MAFIA 计算的. 优化的主要目标就是最小化表面场,从而得到更高的加速电场.

##### 3.2.1 spoke 的形状

假定腔体是一个圆筒,spoke 也是一个圆筒,但两个圆筒的轴向相垂直. 首先,研究在腔的长度一定的情况下 ( $L_{\text{cav}} = 257\text{mm}$ ),spoke 的直径  $d_s$  对腔的电磁场参数的影响. 计算中选取腔体的直径为 450mm. 图 2 是电磁场参数随 spoke 直径  $d_s$  的变化曲线. 从图 2 中看到从最大表面电场和分路阻抗来说,  $d_s/L_{\text{cav}}$  的最佳值应在 0.3 和 0.4 之间;而最大表面磁场与加速场强的比值当  $d_s/L_{\text{cav}}$  在 0.3—0.5 的范围内最低. 在以下的模拟计算中取  $d_s/L_{\text{cav}} = 1/3$ .

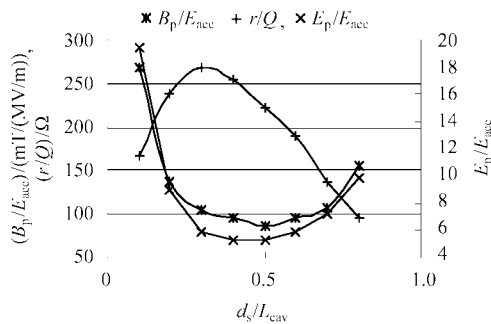


图 2 腔的电磁场参数随  $d/L_{\text{cav}}$  的变化

—\*—  $B_p/E_{\text{acc}}$ , —+—  $r/Q$ , —x—  $E_p/E_{\text{acc}}$

spoke 横截面的形状由圆形分别改变为椭圆形和跑道形,而保持腔体仍是圆筒. spoke 沿腔体轴向

上的厚度为  $t = 1/3L_{\text{cav}}$ ,改变另一方向上的半轴长或跑道宽度,计算腔的电磁场参数. 计算表明 spoke 横截面为圆形时,  $B_p/E_{\text{acc}}$  最小值可以小于 90G/(MV/m),但  $E_p/E_{\text{acc}}$  的最小值常常大于 5;当横截面为椭圆形或跑道形时,  $E_p/E_{\text{acc}}$  的最小值可以小于 3,但此时的  $B_p/E_{\text{acc}}$  却很大. 由于最大表面磁场在 spoke 与腔体外壁相连的地方,所以 spoke 的两端应为圆柱形;而最大表面电场在 spoke 与束管相连的地方,所以 spoke 的中心当采用截面为椭圆形或跑道形的柱体. 从加工方面考虑,采用截面为跑道形的 spoke.

此外,从机械性能的稳定性的考虑,腔的两壁采用内凹的结构(见图 1).

##### 3.2.2 超导腔的几何尺寸

由于 spoke 腔具有对称结构,模拟计算是取腔的 1/4(见图 3),这样网格可以划分更细,计算结构更精确,实际计算是采用 3000000 个网格点进行的.

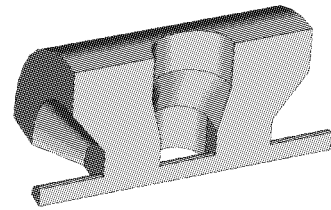


图 3 用于 MAFIA 程序计算的腔的 1/4

腔的有效长度  $L_{\text{cav}}$  和 spoke 中心处的厚度  $t$  已经确定,而腔的大约直径已知且对腔的电磁场参数影响很小,所以腔的几何尺寸的优化主要是优化

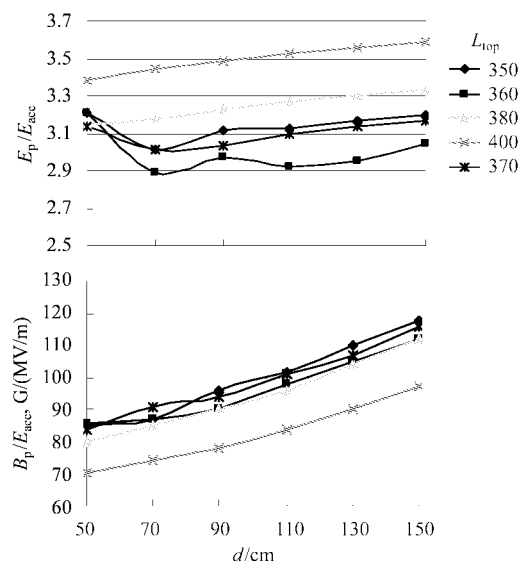


图 4 腔的电磁场参数随 spoke 中心宽度  $d$  的变化曲线

spoke 与腔体外壁相连处圆柱的直径  $db$  (腔的整体长度  $L_{top} \cong 3db$ ) 和 spoke 中心处的宽度  $d$ . 图 4 显示了腔的电磁场参数与腔的长度  $L_{top}$  和 spoke 中心宽度  $d$  的关系. 由图可见, 在  $L_{top}$  一定时,  $E_p/E_{acc}$  随  $d$  的增大而先减小后缓慢增大 ( $L_{top} < 380\text{mm}$ ) 和缓慢增大 ( $L_{top} \geq 380\text{mm}$ ),  $B_p/E_{acc}$  随  $d$  的增大而增大. 在  $d$  一定时,  $E_p/E_{acc}$  随  $L_{top}$  的增大而先减小后增大,  $B_p/E_{acc}$  随  $L_{top}$  的增大而减小. 最后为得到正确的频率, 可以通过调节腔的直径  $d_{cav}$  得到补偿. 图 5 和表 1 给出优化后 spoke 腔的主要尺寸.

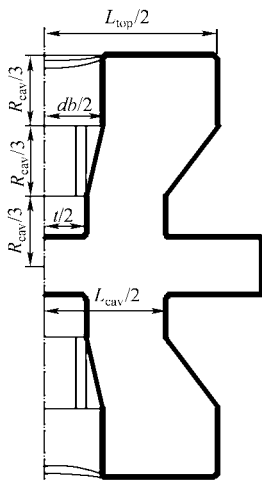


图 5 半个 spoke 腔的横截面

表 1 spoke 腔的主要尺寸和频率

Cavity length ( $L_{cav}$ )/mm	257
Top cavity length ( $L_{top}$ )/mm	358
Flange to flange length ( $L_{fl}$ )/mm	450
Gap center to gap center ( $g$ )/mm	193
Radius of the beam tube (rbm)/mm	30
Spoke thickness at center ( $t$ )/mm	85.7
Spoke width at center ( $d$ )/mm	70
Spoke diameter at base ( $db$ )/mm	120
Cavity radius ( $R_{cav}$ )/mm	218
Frequency /MHz	352

### 3.2.3 超导腔的射频参数

腔的初步设计完成之后, 在腔体上增加直径分别为 103mm 的耦合器端口、抽真空端口和 38mm 的提取信号端口. 整体腔不再具有对称性, 它的模拟计算是采用 MAFIA 5000000 个网格点进行的, 加速场强由腔的有效长度  $L_{cav}$  决定. 表 2 列出了  $\beta = 0.45$  spoke 超导腔的主要射频参数.

表 2  $\beta = 0.45$  spoke 超导腔的射频参数

$F/\text{MHz}$	$E_p/E_{acc}$	$B_p/E_{acc}$ $G/(\text{MV/m})$	$(r/Q)/\Omega$	$T@ \beta = 0.45$	$Q(R_s = 60\text{n}\Omega)$	$P_{cw}(4\text{K})@$ $7.5\text{MV/m}$
350	2.90	87	251	0.852	$1.65 \times 10^9$	8.99W

渡越时间因子  $T$  是通过两个积分的比值得到的.

$$T = \frac{E_{acc}}{E_0} = \frac{\frac{1}{L_{cav}} \int Ez(x=0, y=0, z) e^{iuz/\beta c} dz}{\frac{1}{L_{cav}} \int Ez(x=0, y=0, z) dz} \quad (1)$$

腔在超导情况下的品质因数  $Q$  与正常态下的品质因数  $Q_n$  满足下面的关系:

$$Q \cdot R_s = Q_n \cdot R_{sn}, \quad (2)$$

$$Q_n = \frac{2\pi f U}{P} = \frac{2\pi \times 3.5 \times 10^8 \times 4.42 \times 10^{-12}}{4.80 \times 10^{-7}} = 2.02 \times 10^4, \quad (3)$$

$$R_{sn} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi \times 3.5 \times 10^8 \times 1.26 \times 10^{-6}}{5.8 \times 10^7}} = 4.89 \times 10^{-3} \Omega. \quad (4)$$

其中  $U$  和  $P$  分别为腔的储能和腔壁消耗的功率, 以上数值由 MAFIA 计算而得.  $\mu_0$  为真空中的磁导率,  $\sigma$  为电导率. 如果腔在 4K 下的表面电阻  $R_s$  为  $60\text{n}\Omega$ , 则超导情况下的品质因数  $Q$  为  $1.65 \times 10^9$ . 腔的  $r/Q$  定义为  $V_{acc}^2/(2\pi f U)$ . 连续波条件下, 某一加速场强时消耗的功率为

$$P_{cw} = \frac{(E_{acc} \cdot L_{cav})^2}{Q \cdot Q} \quad (5)$$

表 3  $\beta = 0.45$  spoke 腔与  $\beta = 0.47$ , 6-cell 椭球腔的电磁场参数

	频率 $f/\text{MHz}$	$G/\Omega$	$(r/Q)/\Omega$	$E_p/E_{acc}$	$B_p/E_{acc} (G/(\text{MV/m}))$
$\beta = 0.45$ 单 spoke 腔	350	99	251	2.90	87
$\beta = 0.47$ , 6-cell 椭球腔	805	137	160	3.4	69

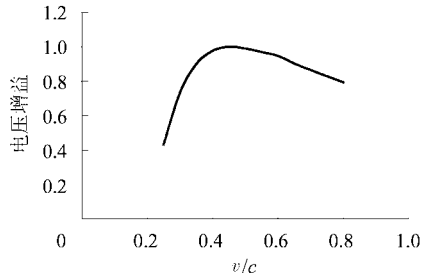


图 6 归一化的电压增益随粒子速度的变化曲线

表 3 给出了具有相同  $\beta$  值的 spoke 腔和 6-cell 椭球腔的电磁场参数. 从最大表面电磁场来看, spoke 腔同样具有很好的加速效果; 从低一倍的频率来看, spoke 腔不仅可以工作在 4.2K, 而且可以有很宽的速度接受范围 (见图 6); 此外, 单个 spoke 腔的分路阻抗已经比 6-cell 椭球腔的高, 可见 spoke 型腔

比具有相同  $\beta$  值相同加速单元的椭球腔有高得多的分路阻抗, 从而可以大大降低腔的微波损耗, 减少系统热载.

## 4 总结

一个  $\beta = 0.45$ ,  $f = 350\text{MHz}$  的 spoke 超导腔的设计已经完成, 其中包括耦合器、提取信号、抽真空端口对整个腔的影响. 模拟计算结果表明它是一个性能良好和具有高加速梯度潜力的超导低  $\beta$  加速腔. 目前模型腔的加工正在进行, 下一步的工作是模型腔的初步调试, 腔的场形分布和性能参数的测量.

作者对提供 MAFIA 和 MICROWAVE STUDIO 程序的德国同步电子辐射中心 (DESY) 表示感谢.

## 参考文献 (References)

- 1 Tajima T, Chan K C D et al. Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity, 2001. 81—83
- 2 Kelly M P, Shepard K W et al. Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conference, 2001. 2: 1047—1049
- 3 Tajima T, Edwards R L et al. Proceedings of the 21st International LINAC Conference, 2002. 2—4

## Design of a $\beta = 0.45$ , $f = 350\text{ MHz}$ Spoke Cavity\*

ZHU Feng<sup>1)</sup> QUAN Sheng-Wen WANG Li-Fang ZHAO Kui CHEN Jia-Er  
(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** Recently intensive studies have been done on superconducting cavities (e.g. spoke cavity, reentrant cavity, and CH cavity), which are used as accelerating structures in the low and medium energy part of high power high intensity proton or ion accelerators. Many experiments have shown that spoke cavity is a good candidate for low energy part. It is also promising to be used for the medium  $\beta$  area. So a  $\beta = 0.45$  spoke cavity is being studied at Peking University. In this paper, the structural and electromagnetic design of a  $\beta = 0.45$ ,  $f = 350\text{MHz}$  spoke cavity is reported in detail. The calculated RF parameters (e.g.  $Q$ ,  $r/Q$ , peak surface fields and dissipated power) indicate a potential of good acceleration.

**Key words** spoke cavity, RF parameters, MAFIA program

Received 31 May 2004

\* Supported by Major State Basic Research Development Program (2002CB713600)

1) E-mail: zhufeng77726@yahoo.com.cn