

文章编号: 1007-4627(2011)04-0444-04

# 用于 HIRFL-CSRm 纵向压缩高频腔的磁合金环测试\*

梅立荣<sup>1,2</sup>, 许哲<sup>1</sup>, 金鹏<sup>1</sup>, 边志彬<sup>1</sup>, 原有进<sup>1</sup>, 赵红卫<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 在 HIRFL-CSRm 上进行高能量密度物理和等离子体物理的研究需要一个能提供高电压的高频腔来对束团进行纵向压缩, 而磁合金加载腔获得较高的加速场梯度可以满足这一要求, 且腔体不需要调谐, 从而简化了高频控制系统。为了选择磁导率和阻抗较大、 $Q$  值(品质因数)小于 1 的磁合金材料来加载压缩高频腔, 对型号为 V 和 A 的两种磁合金材料进行了测试。测试结果表明: 型号为 V 的材料具有较大的磁导率、阻抗和小于 1 的  $Q$  值, 将被用来加载腔体以获得足够高的加速电场梯度。

**关键词:** 磁合金环; 磁导率; 品质因数

**中图分类号:** TL503.2 **文献标志码:** A

## 1 引言

兰州重离子加速器由兰州重离子研究装置(HIRFL)和兰州重离子加速器冷却储存环(CSR)组合而成(HIRFL-CSR), 是目前我国能量最高的大型重离子研究装置。HIRFL-CSR 包括一个主环(CSRm)和一个实验环(CSR<sub>e</sub>)。根据 HIRFL-CSR 的发展目标, 要在 HIRFL-CSRm 上进行高能量密度物理和等离子物理的研究, 就要求将高流强、短脉冲的重离子束尽可能多地和有效地将能量沉积在试验物质中。为了达到这一目的, 就必须应用足够高的高频电场来对束团进行纵向压缩。高频合金压缩腔就是用来产生足够高的高频电场对束团进行纵向压缩的装置。高频合金压缩腔体是用磁合金(Magnetic Alloy, 简称 MA)材料来加载的同轴谐振腔, 它能获得很高的高频加速电压, 而且腔体不需要调谐, 这样就不需要有复杂的调谐控制系统, 从而简化了高频控制系统。其中磁合金材料的性能在很大程度上决定了高频腔体的性能, 为了选择合适的 MA 材料来加载高频压缩腔, 我们对中国科学院上海应用物理研究所和四川力源电子有限公司提供的 MA 材料进行了测试。主要测试了 MA 材料的磁导率、 $Q$  值(品质因数)及其阻抗, 并从测试数

据中选择磁导率较大,  $Q < 1$ , 阻抗比较大的合金材料来加载腔体<sup>[1]</sup>。

## 2 高频合金腔体的设计

高频合金腔体的设计与计算在文献[2]中已有论述, 腔体采用单间隙、MA 加载的两个终端短路四分之一波长同轴谐振腔结构。两半腔的开路端之间构成加速间隙, 从间隙两端馈送高频功率, 两半腔中产生的高频电场方向相反, 在加速缝隙处形成一轴向高频电场来对带电粒子进行加速或者减速。腔体的结构切面图如图 1 所示, 主要物理指标

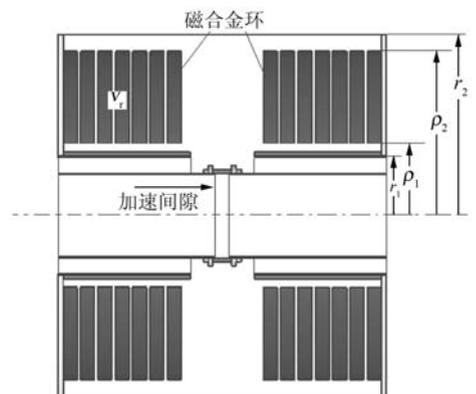


图 1 合金加载腔体的结构切面图

\* 收稿日期: 2010-12-20; 修改日期: 2011-01-31

\* 基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体项目(10921504)

作者简介: 梅立荣(1984—), 男, 贵州兴义人, 博士研究生, 从事高频及相关技术研究; E-mail: lrmei@impcas.ac.cn

如表 1 所列。其中加载的 MA 材料的性能在很大程度上决定了高频腔体的性能，所以为了选择合适的 MA 材料来加载高频压缩腔，我们对 MA 样品环进行了测试。主要测试了 MA 材料的磁导率、Q 值及其阻抗。

表 1 高频合金腔体主要物理指标

名称	参数
腔体加载类型	合金加载
总长/m	0.9
频率范围/MHz	0.8~1.2
高频电压/kV	50
脉冲持续/ $\mu$ s	500
占空比(%)	0.05
峰值功率/kW	500
平均功率/kW	0.05
分路阻抗/k $\Omega$	1

### 3 磁环的导磁率及其品质因数

如果用串联复数磁导率表示磁环的磁导率，则可写成  $\mu = \mu'_s - j\mu''_s$ ，复数导磁率的实部  $\mu'_s$ ，表示物质在磁化过程中储能大小，而  $\mu''_s$  表示损耗的能量，所以磁环的品质因数可表示为  $Q = \mu'_s / \mu''_s$ 。如果用并联复数磁导率表示，则可以写成：

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu'_p} - \frac{j}{i\mu''_p}, \quad Q = \frac{\mu'_p}{\mu''_p}$$

其中， $\mu = \mu'_p$  是 MA 材料的并联导磁率的实部， $\mu''_p$  为对应的虚部。通过化简与变换可以得到串联与并联的关系为<sup>[3-4]</sup>：

$$\mu'_p = \left( \frac{1}{Q^2} + 1 \right) \mu'_s, \quad \mu''_p = (1 + Q^2) \mu''_s$$

### 4 测试方法

测试原理图及实测图如图 2 所示。测量的仪器使用的是惠普矢量阻抗仪，型号为：YHP 4193A VECTOR IMPEDANCE METER (0.4 ~ 110 MHz)，它能提供频率为 0.4~110 MHz 的高频信号。测试前经校准，工作正常。绕有线圈的 MA 环形成电感，如果在其线圈上并联电容则可形成一个并联谐振回路。应用矢量阻抗仪可以测出该谐振回路的谐振频率  $f_0$  和谐振阻抗  $R_s$ 。根据已知的并联电容  $C$  和读出的谐振频率可以计算谐振回路的电感为

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \tag{1}$$

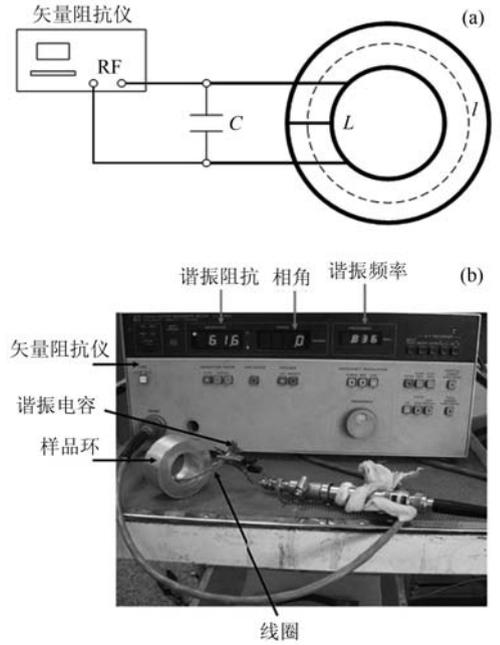


图 2 合金环特性的测试原理图(a)及实测图(b)

对于 MA 环，它的电感也可以由下式计算：

$$L = \frac{\mu_0 \mu'_p}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} d \tag{2}$$

所以由式(1)和(2)可以得到

$$\mu'_p = \frac{1}{2\pi\mu_0 f_0 C \ln \frac{r_2}{r_1} d} \tag{3}$$

式中： $r_1$  和  $r_2$  是 MA 环的内径和外径； $d$  是 MA 环的厚度； $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m，是空气的导磁率。

对于并联谐振回路，它的品质因数  $Q$  为

$$Q = 2\pi f_0 R_s C \tag{4}$$

在得到  $Q$  值后，就可由

$$\mu'_p = \left( \frac{1}{Q^2} + 1 \right) \mu'_s \tag{5}$$

求出串联磁导率的实部  $\mu'_s$ ，再由  $Q = \mu'_s / \mu''_s$  求出  $\mu''_s$ 。从而通过上述方法可以测出 MA 材料的导磁率  $\mu = \mu'_s - j\mu''_s$ 。改变电容的大小，谐振回路的谐振频率也随之改变，从而可以测得 MA 环导磁率、品质因数、并联阻抗等随  $f$  的变化关系<sup>[5-6]</sup>。

### 5 测试结果

我们对中国科学院上海应用物理研究所和四川

力源电子有限公司提供的型号为 V 和 A 的 MA 样品环进行了测试。V 和 A 是由两种不同的材料绕成的样品环，V 的饱和磁通密度为 1.2 T，A 的饱和磁通密度为 1.25 T。V 环的尺寸是外直径为 65 mm、内直径为 35 mm、厚度为 30 mm，A 环的尺寸是外直径为 65 mm、内直径为 35 mm、厚度为 25 mm。通过测试得到的结果如图 3 所示。

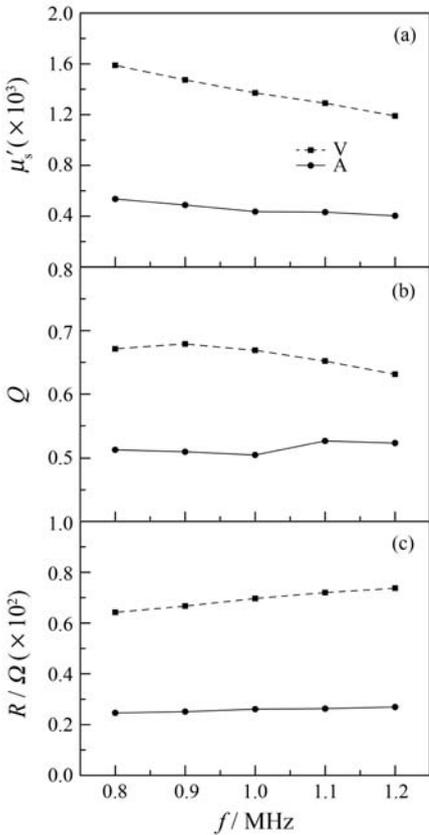


图 3 V 和 A 的磁导率实部(a)，Q 值(b)阻抗 R(c)随频率  $f$  的变化关系

从图 3(a)中可以看出，型号 V 的导磁率在 0.8 ~ 1.2 MHz 的范围内都比 A 的大。从图 3(b)中可以看出，型号 V 和 A 的 Q 值在 0.8 ~ 1.2 MHz 的范围内都小于 1，都能满足我们对 Q 值的要求。从图 3(c)中可以看出，型号 V 的阻抗在 0.8 ~ 1.2 MHz 的范围内都比 A 的大。从上述比较可见，V 这种材料的性能要比 A 的好，可以选用它来加载压缩腔体。

## 6 结论

利用对 MA 材料测试得到的结果，可以计算频率为 0.8 ~ 1.2 MHz 之间要达到 50 kV 的峰峰值电压所要求功率源提供的功率大小。图 4 给出了功率随频率的变化关系。从图 4 中可以很明显地看出，在选用 V 这种材料时，只要功率源提供 250 kW 的功率就能达到要求。而选用 A 的话则需要提供 550 kW 的功率才能满足要求。所以我们选择 V 这种型号的材料来加载高频腔体，以获得足够高的加速电场梯度来对通过腔体的重离子束团进行纵向压缩，以便能在 HIRFL-CSRm 上进行高能量密度物理和等离子体物理的研究。

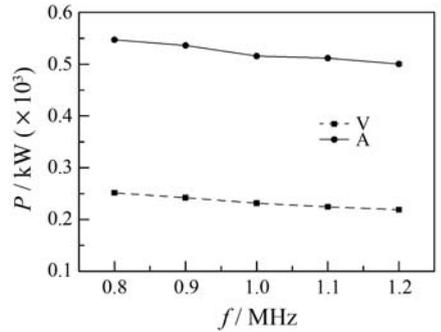


图 4 V 和 A 功率源功率随频率的变化关系

## 参考文献 (References):

- [1] Xu Zhe, Wang Chunxiao. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(9): 1431(in Chinese).  
(许哲, 王春晓. 强激光与粒子束, 2005, **17**(9): 1431.)
- [2] Mei Lirong, Xu Zhe, Yuan Youjin *et al.* Chinese Physics C, 2010, **34**(8): 1132.
- [3] Ohmori C, Kanazawa M, Noda K, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2005, **A547**: 249.
- [4] Saito K, Hirota J I, Noda F. Nucl Instr and Meth, 1998, **A402**:1.
- [5] Xu Zhe, Duan Yajuan, Zhao Hongwei, *et al.* Nuclear Physics Review, 2008, **25**(3): 249(in Chinese).  
(许哲, 段亚娟, 赵红卫, 等. 原子核物理评论, 2008, **25**(3): 249.)
- [6] Watanabe M, Chiba Y, Katayama T, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2004, **A532**: 503.

# Measurement of MA Core for HIRFL-CSRm Loaded RF Compression Cavity\*

MEI Li-rong<sup>1, 2, 1)</sup>, XU Zhe<sup>1</sup>, JIN Peng<sup>1</sup>, BIAN Zhi-bin<sup>1</sup>, YUAN You-jin<sup>1</sup>, ZHAO Hong-wei<sup>1</sup>

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** A high-voltage RF cavity is required to compress the beam bunch in the longitudinal for high energy density physics and plasma physics research at HIRFL-CSRm. A magnetic alloy (MA)-loaded cavity which has high acceleration gradient and without tuning loop (can simplify the RF control system), can meet the requirement. In order to select a proper MA material with higher permeability and shunt impedance,  $Q < 1$  value to load the RF compression cavity, two different MA materials V and A have been tested. The results indicate that the material V will be better for the construction of the RF cavity than material A because of its higher permeability and shunt impedance,  $Q < 1$  value.

**Key words:** magnetic alloy core; permeability; quality factor

---

\* **Received date:** 20 Dec. 2010; **Revised date:** 31 Jan. 2011

\* **Foundation item:** Science Fund for Innovative Research Group of National Natural Science Foundation of China(10921504)

1) E-mail: lrmei@impcas.ac.cn