

射频超导谐振腔中的电磁场研究

郝建奎¹⁾ 黄森林 朱凤 全胜文 赵夔

(北京大学重离子物理教育部重点实验室, 北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 由高纯铌制成的射频超导谐振腔在高场时会出现 Q 值下降现象, 这是高场下超导体表面局部磁场增强所致. 为研究高场下超导体表面的电磁场特性, 用单 cell 超导体设计了腔表面峰值磁场的研究实验. 通过对单 cell 超导体表面峰值磁场的测量, 可以确定超导体焊缝及 iris 附近表面是否存在缺陷, 以便进一步进行腔的处理来改进腔的性能.

关键词 射频超导 Q -slope 临界磁场

1 引言

用于加速器的射频超导谐振腔大多由高纯铌制成. 这些高纯铌的残余电阻比 (RRR) 比较大, 一般大于 200, 以增大铌材的热导, 避免超导体过早的由于热量堆积而失超. 这些超导体在腔的品质因数 (Q 值) 和加速梯度 E_{acc} 的关系方面有着共同的特性, 随着加速梯度的增大, 腔的 Q 值缓慢减小, 称为 Q -slope, 而在加速梯度高到一定值后, 在没有场致发射的情况下 Q 值突然下降, 称为 Q -drop^[1-3].

引起 Q -drop 的原因是超导体表面局部磁场增强, 超过临界磁场后使得这部分腔体变成正常态, 引起损耗增大. 由于超导体的赤道及 iris 处均为电子束焊接, 因而最有可能存在缺陷. J. Knobloch 给出了一种模型^[4], 认为超导体的赤道焊接区域晶格边界的磁场增强使得这一区域失超.

为测量腔内电磁场对超导体性能的影响, 用单 cell 超导体设计了实验来测量腔的表面磁场. 由于 TM_{010} 模式在赤道处磁场最强, 而 TE_{011} 模式在 iris 附近磁场最大, 因此对基模 TM_{010} 和高阶模 TE_{011} 两种模式的磁场均进行了实验研究.

2 磁场测量原理

实验中采用了 TESLA 单 cell 超导体. 超导体中

表面峰值磁场的测量原理如下:

2.1 对 TE_{011} 模式

射频超导加速腔的无载品质因数为

$$Q_0 = \frac{\omega U}{P_0}. \quad (1)$$

加速腔的加速梯度为^[5]

$$E_{acc} = \frac{\sqrt{P_0 \cdot Q_0 \cdot R/Q}}{l \cdot n}, \quad (2)$$

其中 $\omega = 2\pi f$, f 为谐振频率, U 为腔内储能, P_0 为腔壁损耗功率, R/Q 是只与加速腔几何形状有关的一个参量, l 为腔的有效加速长度, n 为加速腔的单元数, 对单腔来说, $n = 1$.

对于 TE_{011} 模式, 电场没有轴向分量. 由于电场和磁场的对称互易性, 对于加速腔的表面峰值磁场, 有如下的类似关系

$$B_{s,pk} = \alpha \sqrt{P_0 Q_0} = \alpha \sqrt{\omega U}, \quad (3)$$

从而

$$\alpha = \frac{B_{s,pk}}{\sqrt{\omega U}}, \quad (4)$$

其中 $B_{s,pk}$ 为表面峰值磁场, α 为一系数. 与加速梯度类似, 表面峰值磁场有如下关系

$$B_{s,pk} = \frac{\sqrt{P_0 \cdot Q_0 \cdot (R/Q)^*}}{l \cdot n}, \quad (5)$$

2004-11-25 收稿

1) E-mail: jkhao@pku.edu.cn

其中 $(R/Q)^*$ 为与 R/Q 对应的参量,这里称其为等效 R/Q .由(3)和(5)式得

$$\alpha = \frac{\sqrt{(R/Q)^*}}{l \cdot n}, \quad (6)$$

$$(R/Q)^* = (\alpha \cdot l \cdot n)^2. \quad (7)$$

α 值可依据(4)式由电磁场计算程序得出,进而得到 $(R/Q)^*$. P_0 和 Q_0 由实验测得,由(5)式即可得到加速腔的表面峰值磁场.

2.2 对 TM010 模式

人们对加速腔性能研究最多的是对加速梯度 E_{acc} 的研究,按照(2)式通过实验进行测量,其中 R/Q 由电磁场计算程序得到.电磁场计算程序同时得到表面峰值磁场与加速梯度的比值 $B_{s,pk}/E_{acc}$,因此通过 E_{acc} 可以得到 TM010 模式的表面峰值磁场.

3 加速腔内电磁场分布的模拟计算

实验中功率馈入和提取都是从两端束管法兰处,超导腔为旋转对称结构,因此可以通过 Superfish 程序进行电磁场分布模拟.对 TM010 模式,可以直接进行电磁场模拟.而对于 TE011 模式,由于轴向没有电场,需要根据电磁场的对称性,先把电场 E 和磁场 H 的作用互换^[6],再把模拟结果中的电场和磁场变换回原来的数值.

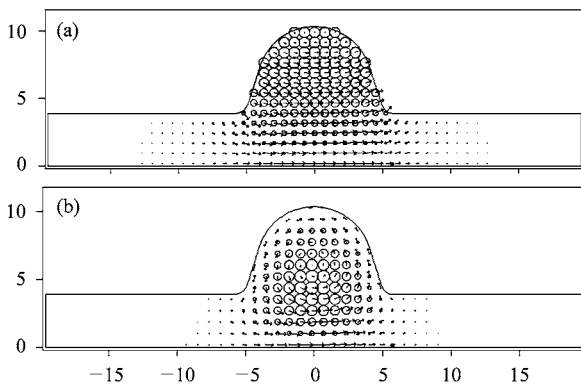


图 1 单 cell 超导腔内电磁场分布
(a) TM010 模式:箭头为电场,圆环为磁场;
(b) TE011 模式:箭头为磁场,圆环为电场.

TESLA 单腔中两个半腔尺寸采用的是 TESLA 9-cell 超导腔设计的端部半腔 2 结构^[7],赤道半径为 103.3mm,加速长度为 114.6mm.用 Superfish 计算得到的 TM010 模式和 TE011 模式的电磁场分布如图 1 所示.对于 TE011 模式,由于程序计算的特殊性,磁

场线为箭头表示,电场线由圆环表示.

Superfish 计算得到的 TESLA 单 cell 超导腔的参数见表 1.

表 1 TESLA 单 cell 超导腔模拟参数

	TM010	TE011
频率 f/GHz	1.3014	2.4753
$(E_{pk}/\text{SQRT}(U))/((\text{MV}/\text{m})/\text{J}^{1/2})$	14.9	—
$(B_{pk}/\text{SQRT}(U))/(\text{mT}/\text{J}^{1/2})$	34.4	40.8
几何因子 $G(\Omega)$	278	838
品质因数 Q_0 (常温)	29521	64582
$(B_p/E_{acc})/(\text{mT}/(\text{MV}/\text{m}))$	4.62	—

对 TE011 模式,由(4)式得 $\alpha = 3.272 \times 10^{-7} \text{ T}/(\text{Hz} \cdot \text{J})^{1/2}$. 从而有 $(R/Q)^* = 1.41 \times 10^{-15} (\text{T}^* \text{ m})^2/\text{W}$.

4 实验结果与分析

为研究超导腔内电磁场对超导腔性能的影响,对超导腔进行了大量研究,在低温下对 TM010 模式和 TE011 模式的磁场进行了测量.下面分别进行介绍和讨论.

4.1 TM010 模式的测量

实验中对多只超导腔(包括单 cell 和 9-cell 超导腔)进行了处理和性能测量.对其中的超导腔 1AC1,除了对基模 TM010 模式进行测量外,还进行了一系列 TE011 模式的测量.下面给出这只腔的一些测量结果.

图 2 给出了超导腔 1AC1 的 TM010 模式下品质因数 Q 和表面峰值磁场 $B_{s,pk}$ 的曲线.其中曲线(1)为电抛光 $80\mu\text{m}$ 和高压水清洗(HPR)后测得的曲线,在高场时有明显的 Q -drop.(2)为 120°C 烘烤后测得的曲线,由于超导腔低温热处理^[8]的作用, Q -drop 应该有明显的改善,但由于存在很强的场致发射(FE),其 Q -drop 仍然很大.(3)为经干冰(CO_2)清洗后的结果,由于干冰清洗^[9]去掉了腔体表面的场致发射体,因而 Q -drop 有显著提高.测量曲线(4)时,腔的功率馈入天线和提取天线处的法兰均镀上了一层铌膜,以减少束管(特别是 TE011 模式)中的损耗.(5)为 TE011 模式测量时,同时测得的 TM010 模式 Q - $B_{s,pk}$ 曲线图.图中所有的 E_{acc} 都受到失超(Quench)的限制,即由于腔体局部存在缺陷,这一部

分的磁场超过临界磁场引起温度升高所致.理论上铌的临界磁场为 0.24mT.从测量结果看,处理后的超导腔表面峰值磁场都没有超过 160mT,这与超导腔的表面性能有关,只要进一步对超导腔表面进行处理,腔的性能还有提高的可能.

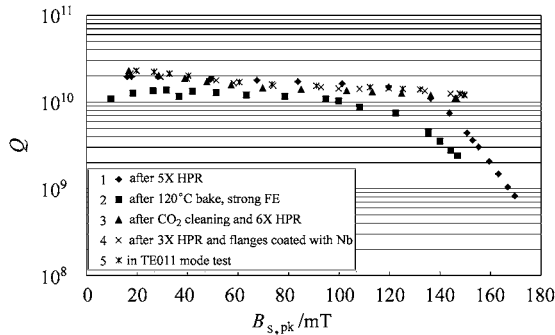


图 2 TM010 模式 Q 值与表面峰值磁场曲线

4.2 TE011 模式的测量

对 TE011 模式进行测量时,采用的功率馈入天线和提取探针在端部均呈弯钩状,以便激励和提取 TE011 模式信号.在 4.2K 时 TE011 模式附近共有 3 个谐振频率,2469MHz, 2470MHz, 2472MHz.由程序模拟知 TE011 模式的 Q 值比较高,大约为其他两个模式的 2 倍,由此得到 TE011 模式在 4.2K 的谐振频率为 2472.8MHz.对 TE011 模式进行降温,测量 $Q-T$ 曲线.降温至 2.0K 稳定后,进行 $Q-B_{s, pk}$ 测量.图 3 为几次测量的 $Q-B_{s, pk}$ 曲线.

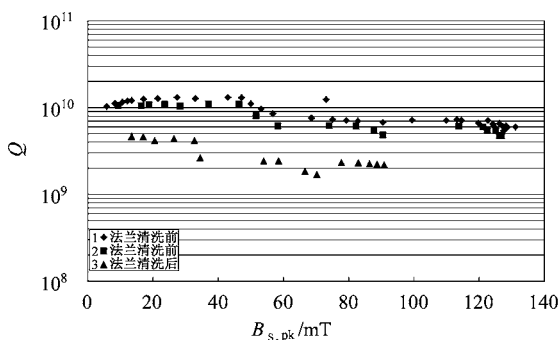


图 3 TE011 模式 Q 值与表面峰值磁场曲线

测得的最大表面峰值磁场为 130mT,受到 RF 功率源的限制,没有测到失超点,因而实际失超点的表面峰值磁场还要大些.曲线 3 中 Q 值有所降低,可能的原因是实验前对腔重新进行了清洗,其中对镀铌的法兰进行了超声清洗,由于镀的铌膜不是很牢固,超声清洗时铌膜有所剥落,引起束管的损耗增加.

4.3 TM 模和 TE 模表面峰值磁场的比较

图 4 为超导腔 TM 和 TE 模式中表面峰值磁场的比较.由图可见,经过 120°C 低温烘烤后, TM 和 TE 模式 Q vs B 曲线中都还没有出现 Q 值下降.

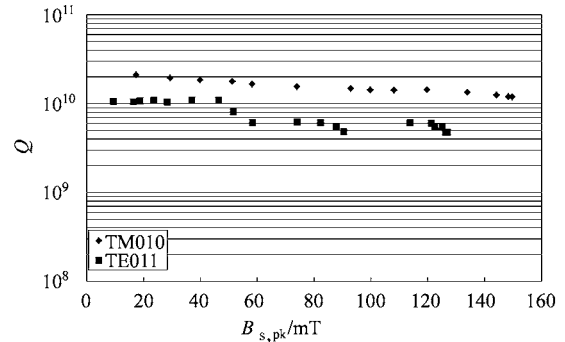


图 4 TM010 和 TE011 模式 Q 值与表面峰值磁场曲线

TM010 模式出现了失超,而 TE011 模式还没有出现失超.两个模式的不同产生于两方面,一是在进行 TE011 模式测量中,受到 RF 功率源的限制,没能测量到失超点,另一方面是由于两种模式峰值场的分布地点不同.图 5 是超导腔中两种模式的表面磁场分布曲线.图中显示, TM010 模式的磁场峰值比 TE011 模式的磁场峰值更靠近赤道. TM010 模式的失超表明腔表面的缺陷位于靠近赤道的区域,而 TE011 模式的测量结果表明在所测量范围内,远离赤道的区域还没有发现缺陷.

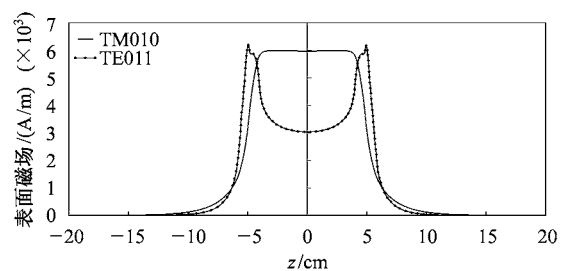


图 5 TM010 和 TE011 模式表面磁场分布

5 讨论

通过对单 cell 超导腔磁场的测量,可以对超导腔的性能有更加深入的了解.根据超导腔中 TM010 和 TE011 模式表面峰值磁场分布的不同,可以初步判断腔中缺陷的位置.对单 cell 超导腔实验,结果表明,腔的失超点位于赤道附近.

为更加全面地研究超导腔的失超磁场,对下一

步实验条件进行改进. 改进功率馈入耦合器, 以便在 TE011 模式下馈入更多的射频功率, 希望测量到失超点, 以分析缺陷的位置. 可以采用 2-cell 或 3-cell 超导腔进行测量, 因为多 cell 超导腔中表面峰值磁场的分布与单 cell 不同, 可以在超导腔表面的大范围内研究其性能.

通过超导腔中磁场的研究来获取有可能存在的缺陷信息, 进而对超导腔进行改进及后处理来消除其影响, 有助于提高超导加速腔的性能. 提高超导腔的梯度是当前射频超导谐振腔发展的前沿热点. 目

前多 cell 超导腔所能达到的加速梯度为 45MV/m, 是康奈尔大学通过改进赤道和 iris 附近的结构实现的^[10]. 这种改进, 可以减小表面峰值磁场与加速梯度的比值, 使超导腔不易失超. 测量超导腔赤道和 iris 附近的表面峰值磁场大小, 能够检验这种改进的可行性, 对超导腔高梯度的获得具有重要应用价值.

感谢德国电子同步辐射中心 (DESY) 的 D. Reschke 提供实验条件和在工作中的帮助和指导.

参考文献 (References)

- 1 Visentin B et al. Cavity Baking: a Cure for the High Accelerator Field Q0 Drop. In Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity. USA: Los Alamos National Laboratory, 1999. 198
- 2 Halbritter J. IEEE Trans. on Appl. Supercond., 2001, 11: 1864
- 3 Safa H. High Field Behavior of SCRF Cavities. In Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity. Tsukuba: KEK, 2001. 279—286
- 4 Knobloch J et al. High Field Q Slope in SC Cavities Due to Magnetic Field Enhancement at Grain Boundaries. In Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity. USA: Los Alamos National Laboratory. 1999. 77
- 5 Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for Accelerators. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. 47
- 6 Young L, Billen J. User's Guide of POISSON SUPERFISH Codes. USA: Los Alamos National Laboratory, 2002. 160
- 7 Brinkmann R, Floettmann K, Rossbach J et al. TESLA Technical Design Report. Hamburg: DESY, 2001, II-24
- 8 HAO Jiankui et al. Low Temperature Heat Treatment Effect on High Field EP Cavities. In Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity. Trarantunde: DESY, 2003. MoP16
- 9 Proch D et al. Dry Ice Cleaning for SRF Applications. In Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity. Tsukuba: KEK, 2001, 463—466
- 10 Geng R L et al. Testing the First 1300MHz Reentrant Cavity. SRF Reports of Cornell University: SRF 041108-05

Researches on the Electromagnetic Field in RF Superconducting Cavities

HAO Jian-Kui¹⁾ HUANG Sen-Lin ZHU Feng QUAN Sheng-Wen ZHAO Kui

(MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Q-drop phenomenon usually occurs in RF superconducting cavities made from high pure niobium at high field level. This is caused by the enhancement of local magnetic field at the surface of the niobium cavities. To study the electromagnetic performances of the superconducting cavities at high field, a series of experiments are designed with single cell niobium cavity. By the measurements of the peak surface magnetic field of the cavity, the defects in the cavity can be located with special method. Effective treatments can be used to improve the properties of the superconducting cavities.

Key words RF superconductivity, Q-slope, critical magnetic field