

# 1.6cell 光阴极微波电子枪冷测及初步高功率实验研究

何小中<sup>1)</sup> 唐传祥 黄文会 郑曙昕 施嘉濡 陈怀璧

杜泰斌 程诚 童德春 林郁正

(清华大学工程物理系加速器实验室 北京 100084)

**摘要** 介绍了清华大学加速器实验室BNL/KEK/SHI型1.6cell微波枪调谐以及老练的初步结果. 调谐过程中, 测量了耦合孔尺寸与外部品质因数之间的关系; 给出了0模和 $\pi$ 模的频率、单腔频率以及场分布. 目前, 该微波电子枪正在进行高功率微波老练, 给出了该枪初步的微波老练的情况及测量结果.

**关键词** 1.6cell 光阴极微波电子枪 调谐 老练

## 1 引言

受自由电子激光、直线对撞机等项目的推动, 高亮度电子束的产生、控制以及诊断是近年来加速器领域的研究热点. 清华大学加速器实验室自2002年开始积极发展基于汤姆逊散射原理的超快X射线源. 光阴极微波电子枪是汤姆逊散射源的关键部件之一, 因此同时开始进行光阴极微波电子枪的研究.

BNL/KEK/SHI型1.6cell光阴极微波腔工作场强度高, 腔形对称化设计, 可以产生高亮度的电子束<sup>[1-3]</sup>. 同时采用内水冷结构, 可以工作在相对较高的重复频率( $\sim 100\text{Hz}$ ). 这种类型的光阴极微波腔在国际上得到广泛应用, 如BNL DUVFEL, LCLS, SHI, 东京大学等<sup>[4-7]</sup>.

目前, 清华大学已经完成了BNL/KEK/SHI型1.6cell微波腔(包括摩擦焊镁阴极盘)的加工和调谐. 调谐及焊接完成后, 建立了一个较简单的高功率测试台, 对我们的1.6cell微波腔进行高功率测试. 经过100h的老练, 约2.5MW的微波功率注入到微波腔中. 进一步的老练尚在进行之中.

## 2 微波腔的微波特性

BNL/KEK/SHI型1.6cell微波腔是由两个腔构

成的不均匀耦合腔链. 使用SuperFish计算了0模频率、 $\pi$ 模频率以及半腔与整腔之间的场强比值、品质因数等参数(见表1).

表1 BNL/KEK/SHI 1.6cell微波腔微波参数

0模频率/MHz	2852.84
$\pi$ 模频率/MHz	2856.09
模半腔整腔场强比值	1.03
$\pi$ 模 $Q_0$	11073
120MV/m所需功率/MW	10.4
半腔频率/MHz	2854.02
半腔 $Q_0$	7829
整腔频率/MHz	2854.79
整腔 $Q_0$	14887

BNL/KEK/SHI型1.6cell微波腔可以等效为如图1所示的LC回路.

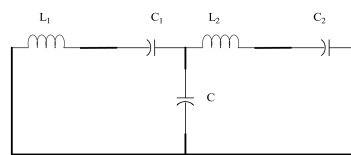


图1 BNL/KEK/SHI型1.6cell微波腔及其耦合电路

图中 $L_1, C_1$ 对应半腔的电感和电容,  $L_2, C_2$ 对应整腔的电感和电容. 记半腔频率为 $f_{10}$ , 场强为 $E_1$ , 整腔频率为 $f_{20}$ , 场强为 $E_2$ . 记耦合度 $k = \frac{2\sqrt{C_1 C_2}}{C}$ , 电

1) E-mail: hxzh97@mails.tsinghua.edu.cn

容比值  $\alpha = \frac{C_1}{C_2}$ , 半腔与整腔的场强比值  $FB = \beta V_1/V_2$ .

在弱耦合条件 ( $k \ll 1$ ) 以及两个腔频率偏差不大的条件下, 根据电路方程可以得到0模频率和 $\pi$ 模频率的表达式:

$$f_0 + f_\pi = f_{10} + f_{20}, \quad (1)$$

$$f_\pi - f_0 = \sqrt{(f_{10}^2 - f_{20}^2)^2 + k^2 f_{10}^2 f_{20}^2} / (f_{10} + f_{20}). \quad (2)$$

还可以得到场强比值的表达式:

$$FB = \frac{-4\beta}{k\sqrt{\alpha}} \frac{f_\pi - f_{20}}{f_{20}}. \quad (3)$$

由SuperFish计算某个 $f_{10}$ ,  $f_{20}$ 对应的 $f_0$ ,  $f_\pi$ ,  $FB$ , 就可以计算出耦合系数 $k$ 和比例因子 $\frac{\beta}{\sqrt{\alpha}}$ . 计算得到耦合系数 $k$ 为0.22%, 比例因子 $\frac{\beta}{\sqrt{\alpha}}$ 为1.30. 从而根据式(1)—(3)可以求出0模频率、 $\pi$ 模频率以及 $FB$ 随单腔频率的变化关系. SuperFish与LC模型计算得到的0模、 $\pi$ 模频率间隔与 $FB$ 的关系、单腔频率间隔与 $FB$ 的关系将在第4节中与测量结果一起给出.

### 3 波导到整腔的耦合

BNL/KEK/SHI腔形原始设计中, 波导到整腔采用1个跑道形的耦合孔耦合, 耦合孔的厚度2.33mm, 宽度9.5mm, 长度为21.0mm. 采用这种尺寸的耦合孔, 需要在波导中插入1个用以匹配的电感或电容销钉<sup>[1]</sup>. 我们希望在调谐过程中测量耦合孔尺寸与耦合特性的关系, 确定不采用电感或电容销钉就可以达到匹配的合适的耦合孔尺寸.

耦合度  $\beta = P_e / (P_{w,h} + P_{w,f})$ , 其中 $P_e$ 为一个周期向外辐射的功率,  $P_{w,h}$ ,  $P_{w,f}$ 为半腔和整腔一个周期内损耗的能量. 定义整腔储能为1, 那么半腔的储能约为 $0.6FB^2$ , 整腔的外品质因数 $Q_{e,f} = 1/P_e$ . 耦合度可以表达成 $\beta = 1 / (Q_{e,f}/Q_{0,f} + 0.6FB^2 Q_{e,f}/Q_{0,h})$ .  $Q_{e,f}$ 仅由整腔的结构和耦合孔的尺寸决定. 而耦合度除了受耦合孔尺寸影响外, 还受腔 $Q_0$ 值和场分布的影响. 由于调谐过程中腔 $Q_0$ 值可能重复性不好以及调谐初期场分布与调谐要求的场分布并不相同, 调节耦合孔的尺寸至 $Q_{e,f}$ 达到要求的值更加合适. 考虑取 $FB$ 为1, 半腔和整腔的 $Q_0$ 如表1, 要使耦合度达到1.1,  $Q_{e,f}$ 应取6320, 如果考虑半腔和整腔的 $Q_0$ 只能达到计算值的90%, 那么 $Q_{e,f}$ 应取5690. 由于调节耦合孔尺寸在改变 $Q_{e,f}$ 的同时会改变整腔的频率, 而改变整腔的内径则几乎不改变 $Q_{e,f}$ . 因此我们在调谐的早期进行 $Q_{e,f}$ 的调节. 失谐半腔的条件下, 可以使用矢量网络

分析仪测量 $Q_L$ 和耦合度, 从而计算出 $Q_{e,f}$ . 使用有限元程序计算的 $Q_{e,f}$ 和调谐过程中测量的 $Q_{e,f}$ 如图2所示. 由于我们调谐过程中测量腔的 $Q_0$ 较计算结果低(有时甚至低40%), 设置 $Q_{e,f}$ 的调谐要求为5000. 调谐完毕耦合孔的长度为24.5mm.

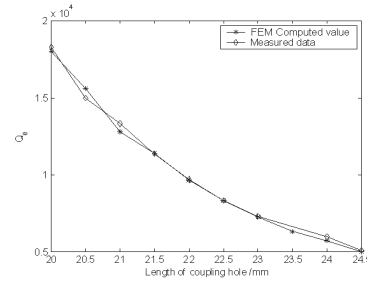


图2 某有限元程序计算的 $Q_{e,f}$ 和调谐过程中测量的 $Q_{e,f}$

### 4 $\pi$ 模频率和场分布的调谐

$\pi$ 模频率和场分布的调谐的目标是将 $\pi$ 模的频率调节至2856.0MHz(换算到真空状态腔的工作温度下), 并且将 $FB$ 调节为约1.0. 调节半腔直径 $R_a$ , 整腔直径 $R_b$ 并且测量微波腔的特性(包括0模频率、 $\pi$ 模频率、场分布、半腔和整腔的单腔频率), 经过几次迭代, 完成调谐过程. 调谐时 $R_a$ ,  $R_b$ 的调节量由单腔频率的测量值与调谐结束时对应的频率值的差决定. 一方面可以直接测量两个单腔的频率. 失谐一个腔, 就可以测量另一个单腔的频率. 另一方面, 还可以测量0模和 $\pi$ 模的频率, 使用耦合电路模型或SuperFish计算结果, 推算出两个单腔的频率. 这种办法对0模 $\pi$ 模频率间隔的误差敏感, 而且难以分辨计算出的频率对应的是哪一个腔的频率. 如果在测量0模和 $\pi$ 模频率的同时, 测量两个腔中的场强比值, 由两个腔中的场强比值计算出两个单腔的频率差, 由0模和 $\pi$ 模

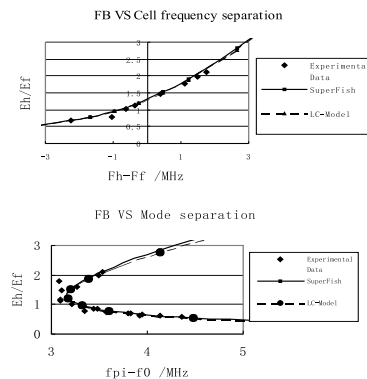


图3 (a) 单腔频率差与 $FB$ 的关系; (b) 模式间隔与 $FB$ 的关系

频率可以计算两个单腔频率的和, 进而可以求出两个单腔的频率, 这样得到的单腔频率对 0 模  $\pi$  模频率间隔的误差就不再敏感. 单腔频率差与场强比值的的关系如图 3(a) 所示. 从图上可以看到, 测量到的数据、SuperFish 计算结果以及等效电路模型计算的结果三者相当一致. 由测量到的  $FB$  计算单腔频率差是

可行的. 模式间隔与  $FB$  的关系如图 3(b) 所示. 图中有几个测量数据可能由于测量时品质因数较低造成模式间隔测量与场分布测量结果符合不好.

调谐完毕、焊接完毕以及最终装配后测量的腔的微波参数如表 2 所示.

表 2 调谐完毕、焊接完毕腔的微波参数

	$\pi$ 模频率(换算到 20°C 大气状态)	品质因数 $Q_0$	耦合度	$FB$
调谐完毕(0号垫圈)	2856.367	10040	1.33	0.92
焊接完毕(0号垫圈*)	2856.584	9601	1.28	0.97
最终装配(1号垫圈*)	2855.984	12464	2.07	0.60

\*调谐时一直使用一个旧垫圈(0号垫圈), 旧垫圈无法保证真空密封, 因此最终装配使用新垫圈(1号垫圈).

## 5 初步老练结果

进行最终装配后, 搭建了一个简单的高功率测试台对微波腔进行高功率测试. 经过 200°C 约 40h 的烘烤

后, 室温下的真空度达到了  $2.5 \times 10^{-7}$  Pa, 开始微波老练. 经过约 100h 的老练, 入射微波功率达到 2.5MW.

采用一个简易的真空内法拉第筒测量暗电流. 在 2.5MW 功率下, 暗电流大小约为 0.7mA. 采用积分电路测量整个宏脉冲期间暗电流的电荷量为 1.3nC.

## 参考文献(References)

- Palmer D T. The Next Generation Photoinjector. PHD thesis. 1998
- Palmer D T. Microwave Measurements of the BNL/SLAC/UCLA 1.6 Cell Photocathode RF Gun. In: Proceeding of PAC95
- [http://www.bnl.gov/atf/systems/rfgun/pi\\_describe.html](http://www.bnl.gov/atf/systems/rfgun/pi_describe.html)
- Rose J, Graves W, Heese R et al. Modeling and Measurements of the DUVFEL Photoinjector Cavity RF Properties In: Proceeding of PAC2001, 2001, 2221—2223
- LCLS Group. LCLS Conceptual Design Report
- YANG J, Sakai F, Yanagida T et al. Experimental Studies of Photocathode RF Gun with Laser Pulse Shaping. In: Proceeding of EPAC 2002, 1828—1830
- Iijima H, Uesake M, Ueda T et al. High Charge Mg Photocathode RF Gun in S-Band Linac at University of Tokyo. In: Proceeding of EPAC2002, 1771—1773

# RF Measurement and High Power Test of a BNL/KEK/SHI Photocathode RF Gun

HE Xiao-Zhong<sup>1)</sup> TANG Chuan-Xiang HUANG Wen-Hui ZHENG Shu-Xin SHI Jia-Ru  
CHEN Huai-Bi DU Tai-Bin CHENG Cheng TONG De-Chun LIN Yu-Zheng

(Department of Engineering Physics of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A BNL/KEK/SHI type 1.6cell Photocathode RF gun has been constructed in Tsinghua university. During the tuning process, the relation of the external quality factor to the length of the coupling iris is measured. Mode frequency, single cell frequency and field balance are also measured. Initial high power test results are also presented in this paper.

**Key words** 1.6cell, RF gun, RF measurement, high power test

1) E-mail: hxzh97@mails.tsinghua.edu.cn