

BEPC II 超导腔静态热负荷和无载品质因数 Q_0 的测量

边琳 李少鹏¹⁾ 刘亚萍

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 超导腔的静态热负荷和无载品质因数是表征超导腔低温恒温器以及超导腔性能好坏的最重要参数. BEPC II 超导腔采用的是液氮浸泡冷却方式, 对两个超导腔在测试站分别进行了降温调试, 在超导腔达到超导状态并稳定运行后, 对其静态热损耗进行了测定. 此外, 超导腔 Q_0 的测量主要是采用热力学的方法测量其高频损耗然后经计算得出 Q_0 . 介绍了 BEPC II 超导腔静态热负荷和无载品质因数的测量原理及方法, 并且给出了两个超导腔在不同高频加速电压下的测试结果. 此测试结果已作为 BEPC II 超导腔验收测试的重要依据.

关键词 BEPC II 低温 超导腔 热负荷 品质因数

1 引言

为了建成当前国际上最先进的双环对撞机, 实现亮度提高两个数量级的目标, 北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPC II 采用了两个频率为 500MHz 的单 cell 超导纯铌腔作为加速腔, 每环各一个, 按位置分别称东、西超导腔. 两个超导腔在安装入储存环隧道之前, 先后在超导腔测试站进行了离线水平测试. 超导腔的静态热负荷和无载品质因数是表征超导腔低温恒温器以及超导腔性能好坏的最重要参数. 由于超导腔是高 Q 腔, 带宽窄, 通常的微波测试方法很难进行其品质因数的准确测量, 因此, 在水平测试中, 我们采用热力学的方法对超导腔的静态热负荷及其品质因数进行了测试, 此测试结果已作为 BEPC II 超导腔验收测试的重要依据.

2 测量原理与方法

BEPC II 超导腔是根据日本 KEKB 型超导腔改频设计的. 纯铌腔放置在一个由真空隔绝的 290L 液氮容器中, 外面还有一个液氮冷却的 80K 冷屏, 还有 μ 金属的地磁屏蔽以及多层防辐射绝缘层, 最外层为室温真空罩^[1]. 其中低温管道包括: 氮的输入和回流管道、安全泄压管道、液氮输入和回流管道、耦合器

(Coupler) 冷却回路.

超导腔采用液氮浸泡冷却方式, 在加高频电压运行状态下, 液氮池中的液面必须高于铌腔赤道顶, 此时液氮容积必须大于氮池总容积的 85%, 液面波动需控制在 $\pm 1\%$ 范围. 超导腔在升腔压的过程中, 总热负荷将从原来的静态热负荷基础上增加高频壁损耗的动态热负荷, 为了使低温系统总热负荷恒定, 在液氮池中安装一个自动连锁的可调节加热功率的 KAPTON 薄膜式电加热器对超导腔动态损耗进行补偿. 由于高 Q 超导腔是压力敏感设备, 因此超导腔液氮池的饱和氮气压力应低于 1.25bara, 波动控制在 ± 3 mbar 范围内.

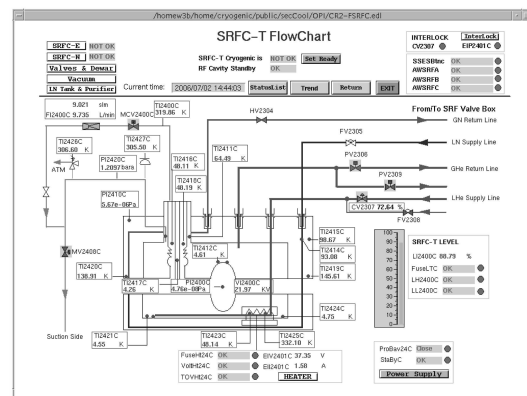


图 1 超导腔测试站控制界面图

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: lisp@ihep.ac.cn

两个超导腔在安装入隧道之前, 在超导腔测试站进行了水平测试. 水平测试的低温管道为多通道输液管, 管道长度约为 20m^[1]. 图 1 所示为超导腔在测试位置包含低温传输管线、阀门、液位计、电加热器、流量控制器等设备的操作界面. 图 2 所示为超导腔侧低温系统包含分配阀箱、杜瓦以及传输管线的操作界面. 通过在 2000L 杜瓦和超导腔氦池之间建立压力差, 从而使液氦从 2000L 杜瓦通过低温传输管线导入超导腔氦池.

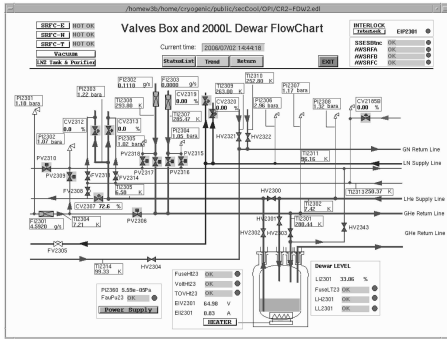


图 2 2000L 杜瓦、阀箱控制界面图

2.1 热负荷测量原理

超导腔的静态热负荷以及加有高频电压时的总体热负荷是用热力学的方法测定的. 其基本原理是: 在热平衡状态下, 热负荷直接反应出来的是液氦的损耗, 因此只要测试液氦消耗情况即可计算热负荷. 在超导腔的正常工况 1.2bara, 4.4K 情况下, 1W 的漏热对应约每小时 1.498L 的液氦蒸发^[2, 3], 通过测量氦池内液氦消耗体积以及加热器功率, 即可根据以下两式计算出总功率损耗和超导腔静态热负荷.

$$P_{\text{total}} = \frac{\Delta V(L) \times 3600(\text{s})}{\Delta t(\text{s}) \times 1.498}, \quad (1)$$

$$P_{\text{static}} = \frac{\Delta V(L) \times 3600(\text{s})}{\Delta t(\text{s}) \times 1.498} - P_{\text{heater}}, \quad (2)$$

其中 ΔV — Δt 时间内的液氦消耗体积 (L); P_{total} — 总热负荷 (W); P_{static} — 静态热负荷 (W); P_{heater} — 加热器功率 (W).

2.2 热负荷测量方法

将超导腔液面注入到 98%, 此过程中逐渐升高加热器功率到设定值, 液面 98% 之后进液阀 CV2307 (如图 1 所示) 自动连锁关闭, 直到液面降至 85%, 之后调

取数据记录系统超导腔液面随时间下降的有关数据, 完成一次测量过程. 通过改变加热器功率设定值多次测量, 而后查询 BEPC II 超导腔氦池液位-体积对应表^[4], 根据式 (2) 计算得出相应热负荷.

2.3 Q_0 测量原理

超导腔无载品质因数 Q_0 的值可根据公式 (3) 得出^[5]:

$$Q_0 = \frac{V_{rf}^2}{P_C \times R_S / Q_0} = \frac{V_{rf}^2}{P_C \times 95.3}, \quad (3)$$

其中 BEPC II 超导腔的 R_S / Q_0 为 95.3, V_{rf} 为所加的高频电压 (V); P_C 为高频损耗 (W).

恒温器总体热负荷、静态热负荷、腔的高频损耗以及加热器功率之间的关系如式 (4) 所示:

$$P_C = P_{\text{total}} - P_{\text{static}} - P_{\text{heater}}. \quad (4)$$

在超导腔加有高频电压, 并加有一定加热器功率的情况下, 测得相应高频电压下的总体热负荷 P_{total} . 根据式 (3), (4) 即可计算得出相应高频电压下无载品质因数 Q_0 .

2.4 测量过程中需注意的问题

测量中需记录超导腔氦池液面、压力随时间的变化, 还需对加热器进行标定. 一轮测试完毕之后要进行系统恢复准备下一轮的测试. 由于在测试过程中入口阀门 CV2307 处于关闭状态, 2000L 杜瓦与超导腔之间的低温传输管线没有氦流经过从而有所升温, 因此恢复系统的过程包括对入口传输线的降温以及对液氦池的积液过程, 方法是逐步开启 CV2307. 在撤销 CV2307 连锁信号时, 要密切注意氦池压力变化, 避免因入口阀门开度大而造成热管线中热氦气进入氦池引起氦池压力骤升, 严重者可能导致机械弹簧安全阀开启, 甚至爆破膜动作.

3 测量结果

根据以上介绍的测量方法, 分别对东、西超导腔在正常工作状态下进行了静态热负荷的测量和计算.

东超导腔的静态热负荷进行了详细的测量, 见表 1. 结果表明, 东超导腔静态热负荷平均值为 29.8W. 按照同样的方法, 测得西超导腔静态热负荷为 27.2W.

表 1 东超导腔静态热负荷测试结果

加热器功率/W	经历时间	初始液面/体积	结束液面/体积	消耗体积	静态热负荷/W
0	2322s	96%/262.15L	86%/234.35L	27.8L	28.8
22.3W	1242s	96%/262.15L	86%/234.35L	27.8L	31.5
45.4W	863s	96%/262.15L	86%/234.35L	27.8L	32.0
54.7W	787s	96%/262.15L	86%/234.35L	27.8L	30.2
73.3W	658s	96%/262.15L	86%/234.35L	27.8L	28.2
82.4W	605s	96%/262.15L	86%/234.35L	27.8L	28.0

3.1 Q_0 的测量

依据测得的静态热负荷值, 测量和计算得出了 BEPC II 东、西超导腔的 Q_0 - V_C 关系曲线(见图 3、图 4)。

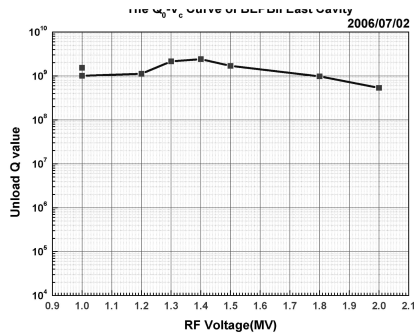


图 3 东超导腔 Q_0 - V_C 关系曲线图

4 结论

本文采用热力学的方法对 BEPC II 超导腔恒温器

的静态热负荷以及超导腔无载品质因数分别进行了直接和间接的测量和计算。

结果表明, BEPC II 东超导腔低温恒温器的静态热负荷为 29.8W, Q_0 值达到 5×10^8 以上; 西超导腔低温恒温器的静态热负荷为 27.2W, Q_0 值为 10^9 量级; 此测试结果已作为 BEPC II 超导腔验收测试的重要依据。

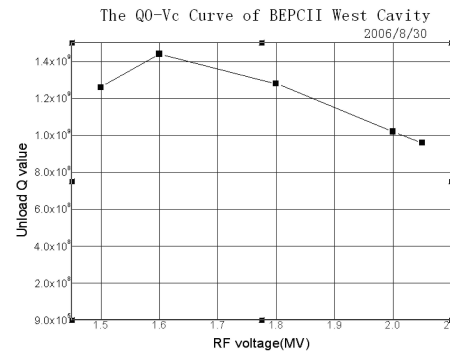


图 4 西超导腔 Q_0 - V_C 关系曲线图

参考文献(References)

- 1 Engineering Design Report on BEPC-II Cryogenic System. Institute of Cryogenic and Superconductivity Technology, Harbin Institute of Technology, 2005.8
- 2 Software Product: HEPAK. Version 3.40. Horizon Technologies. 25-JANUARY-2007
- 3 ZHENG De-Qing, YUAN Xiu-Ling. The Chart of Thermophysical Properties of Fluids. Beijing: Mechanical and Industrial Publication, 1982 (in Chinese)
- 4 LIU Ya-Ping. Collation Table of Liquide Helium Level and Volume for BEPCII Superconducting Cavity. Internal Report of Cryogenic Group, Institute of High Energy Physics, CAS, China, 2006.6 (in Chinese)
- 5 (刘亚萍. BEPC II 超导腔氦池液位-体积对应表. 中国科学院高能物理研究所加速器中心低温组, 2006.6)
- 5 Hasan Padamsee, Jens Knobloch, Tom Hays. RF Superconductivity for Accelerators. Cornell University, Ithaca, New York. 1998

Measurements of Static Heat Loss and Unloaded Q_0 on the BEPC II SRF Cavities

BIAN Lin LI Shao-Peng¹⁾ LIU Ya-Ping

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The static heat loss and unloaded Q_0 are the most important values for both the cryogenic and the RF systems. The BEPC II SRF cavity operates in a liquid helium bath contained in a vacuum insulated, liquid nitrogen cooled radiation shielded vessel. During the horizontal test at the test station, thermodynamic method is used to measure and calculate the static loss and Q_0 value of the SRF cavity. This paper has briefly introduced the method and process to measure the static loss and Q_0 value of the SRF cavity. The results under different experimental conditions are presented as important data for acceptance test of the SRF cavity.

Key words BEPC II, cryogenic, SRF cavity, heat loss, unloaded Q_0

Received 7 January 2008

1) E-mail: lisp@ihep.ac.cn