

BEPC II 超导高频腔输入耦合器 结构及特性研究

钟娟¹⁾ 潘卫民

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 在高频加速系统中, 加速腔的输入耦合器是至关重要的部分之一, 其性能直接影响高频功率的耦合和加速腔的特性. 北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)中的高频系统中, 超导高频加速腔采用的是同轴天线型功率输入耦合器, 这是首次在国内采用的500MHz频率的大功率耦合器. 本文中对这种超导腔耦合器的二次电子倍增效应情况、传输系数、热分布情况三方面的特性进行了研究. 研究表明, 耦合器在多个功率点存在二次电子倍增效应, 必需采取相应的措施来改善其对耦合器的不利影响; 通过对耦合器结构尺寸的优化使其在BEPC II工作频率(499.8MHz)下能更有效地传输功率; 通过模拟计算, 得到了耦合器内外导体的热分布图象, 为校核和改进冷却设计和布局的合理性提供了重要的依据.

关键词 BEPC II 耦合器 MP现象 传输特性 热分布

1 引言

高频加速腔高功率耦合方式一般有两种: 电耦合和磁耦合. BEPC II 超导高频腔采用的是日本KEKB超导高频腔所用的同轴式天线耦合器^[1], 即电耦合. 由发射机输出的高频功率在WR1800矩形波导中传输, 通过一个门钮式转换器转入到同轴耦合器中, 由此馈入到腔内. 此耦合器是参照日本KEKB功率耦合器研制的, 因为其工作频率为508MHz, 而BEPC II的工作频率为499.8MHz, 作为BEPC II超导高频腔的输入耦合器使用, 是否存在某些问题? 对原结构尺寸需做哪些优化和改进才能更适于BEPC II超导高频腔功率馈入? 这些都需要进行研究.

本文将对耦合器的多项参数进行分析, 并根据分析结果提出改进方案. 首先计算模拟耦合器的二次电子倍增效应(MP)^[2]; 然后计算耦合器在500MHz频率下的传输系数和带宽并提出结构改进意见, 最后通过模拟计算分析耦合器内外导体的热分布, 为耦合器的冷却系统的设计提供依据.

2 耦合器的二次电子倍增效应(MP)

MP现象不仅在高场强的超导高频腔中发生, 在各种高功率的高真空器件中也很常见. 例如在高频腔输入耦合器及其陶瓷窗存在的MP现象, 其影响程度甚至超过超导高频腔腔体. MP现象不仅破坏输入耦合器真空度, 而且由于其产生大量电子轰击腔壁, 当温度过高时, 腔壁上的铜溅射到陶瓷窗片上, 由于存在溅射的铜层, 当高功率通过陶瓷窗时使窗片局部过热, 严重时将导致陶瓷窗破裂.

为了降低MP对输入耦合器及其陶瓷窗的危害, 本文运用Multipac程序^[3]对耦合器的二次电子倍增情况进行了模拟计算(图1(a), (b)), 从图中可以看出在传输功率190kW处, 次级电子(第20次)撞击能量与初级电子撞击能量比值接近于1, 这说明耦合器在190kW处可能存在MP现象.

目前处理MP现象有几种方案, 一种是高功率老练(即逐渐提高输入功率, 遇到某功率点存在打火情况, 控制系统自动切断输入, 重新开始输入功率, 直到

2006-01-09 收稿

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

此功率能顺利通过耦合器). 在日本 KEK 实验室, 对 BEPC II 超导高频腔耦合器的样机进行了高功率测试, 图 1(c) 显示了耦合器高功率老练结果. 由图 1(c) 可以看出, 耦合器在 25kW 和 190kW 附近存在 MP 效应. 实际上, 为了消除或减轻这种效应, 测试中进行了较长时间的多次老练.

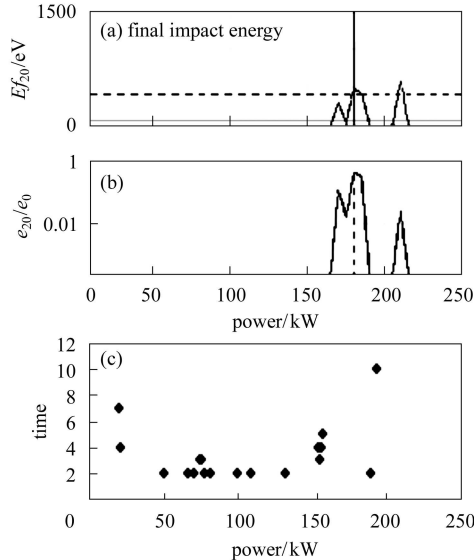


图 1 耦合器内二次电子倍增效应情况

(a) Multipac 程序最后一次计算的电子撞击腔壁的能量; (b) Multipac 程序计算的腔内二次电子倍增情况——最后一次计算的电子撞击能量与最初电子撞击能量比值; (c) 2004 年 10 月对耦合器进行高功率老练测得的数据图.

除了高功率长时间反复老练外, 还有其他抑制耦合器中 MP 现象的方法, 例如在耦合器内外导体上加偏压等, 在耦合器的实际老练测试中均被采用.

同时, 由测试结果可以看出, 模拟计算与实际测量有些出入, 这是因为程序计算是在理想情况下进行的, 未考虑到加速腔反射回来的功率, 因此未能计算出较小功率点的 MP 效应情况.

3 耦合器转换门钮的改进

KEKB 超导高频腔耦合器的转换门钮是高频功率从方波导至同轴波导的转换部件, 其剖面形状类似于一阶梯式波导过渡器. 波在方波导中以 TE₀₁ 模传输, 经转换门钮进入到同轴波导, 经过波导渐变在同轴波导中以 TEM 模式传播(由于同轴波导上端 TE 模和 TM 模截止频率都高于 499.8MHz, 所以 499.8MHz 频率的波能通过转换门钮转换成 TEM 模在同轴波导

里传播). 最后将高频功率馈入到超导高频腔腔体中, 为电子加速提供功率. BEPC II 超导高频腔耦合器是参照 KEKB 超导高频腔耦合器设计的, 由于两者频率相差约 9MHz, 为了检验所采用的结构设计参数在 BEPC II 高频频率下的可行性和合理性, 用 HFSS 程序^[4] 计算了 KEKB 超导高频腔耦合器在各频率点的传输系数, 结果如图 2 所示.

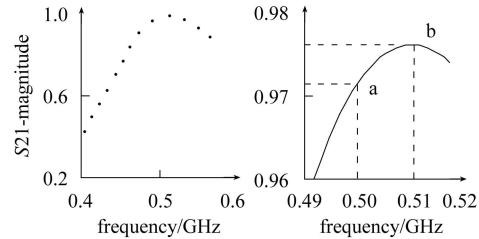


图 2 KEKB 耦合器传输系数

a 点处频率为 499.8 MHz, S_{21} 传输系数为 0.971;
b 点处频率为 510.5 MHz, S_{21} 传输系数为 0.976.

由图 2 可以看出, 传输中心频率(最佳匹配点)在 510MHz 附近, 与 KEKB 超导高频腔所使用的频率相近, 但与 BEPC II 所使用的 499.8MHz 的频率相差有 10MHz, 若完全采用此结构设计参数, 功率传输损耗将较大. 因此我们需要对转换门钮的结构尺寸做必要的修改, 使其传输中心频率在 499.8MHz 附近, 并在该频率下达到最佳匹配, 损耗功率降至最低. 通过研究耦合器转换门钮结构与传输系数的关系, 决定重点对以下两个地方进行模拟和调整: 1) 转换门钮上端尺寸 h ; 2) 陶瓷窗位置 d (见图 3(a)).

由图 3(b) 可以看出, 当 h 值增大时, 中心频率(最佳匹配点)向频率轴左端移动; $h=96.35$ 时, 中心频率移至 506MHz 附近; $h=97.35$ 时, 中心频率移至 500MHz 附近. 因此, 调整 h 值大小对中心频率影响较大, 但改变 h 值的同时还需调整其他尺寸, 使得耦合器传输达到最佳匹配.

改变陶瓷窗位置 d 也可改变传输的中心频率. 由图 3(c) 可看出, 改变 d 值, 传输带宽的中心频率将产生变化, 同时, 传输系数也变化较大. 在 $d=68\text{mm}$ 时的传输系数幅值虽然比原设计参数即 $d=66\text{mm}$ 时要小一些, 但中心频率更靠近所要求的频率, 并且较 $d=67\text{mm}$ 时的传输系数幅值要大一些. 因此可以得出结论, 调整陶瓷窗的位置可调整耦合器的匹配状态, 选择合适的陶瓷窗位置可以使得耦合器达到或接近最佳的匹配.

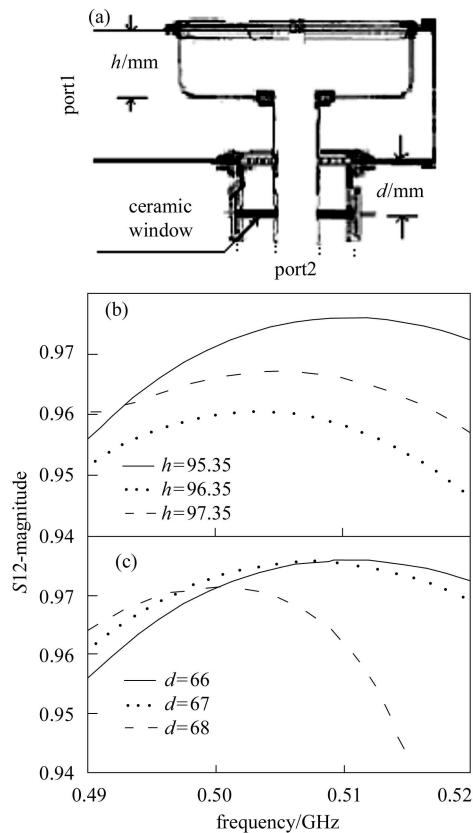


图3 耦合器传输系数与转换门钮结构尺寸的关系 (a) KEKB耦合器转换门钮结构图; (b) 改变门钮上端高度 h , 不同 h 值的 S_{21} 传输系数; (c) 改变陶瓷窗位置 d , 不同 d 值的 S_{21} 传输系数. 其中 h 和 d 的单位均为mm.

综合以上两点, 对耦合器转换门钮结构的调整提出了一套方案: 逐步改变门钮高度 h 值和微调陶瓷窗的位置 d 观察传输系数曲线的变化, 最终使最佳匹配点在499.8MHz附近, 且耦合器也接近最佳匹配. 由此, 最终计算出最佳匹配点即当 $h=97.35$, $d=70$ 时的传输系数曲线(见图4).

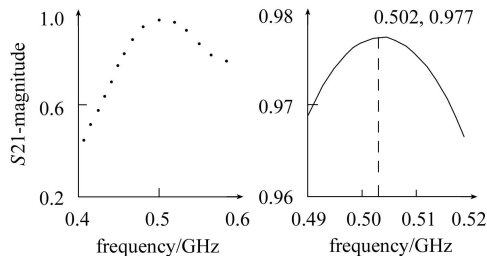


图4 结构改进后的耦合器传输曲线

4 耦合器内导体纵向热分布情况

当高功率在耦合器中传输时, 部分功率被导体壁吸收, 高频功率损耗将使内外导体壁温度升高, 产生

热分布, 其分布状况信息将为冷却系统的设计提供重要依据. 参照KEKB耦合器的设计, BEPC II 超导高频腔耦合器已有一套冷却系统, 为了证实这套系统设计的合理性和是否需要对此系统做必要的局部补充和加强, 运用ANSYS程序^[5, 6]计算了BEPC II 耦合器导体壁沿传输方向的纵向热分布.

由图5看出, 耦合器内主要功率损耗即生热部分是同轴波导段的内导体部分. 高温点也几乎都集中于内导体上, 所以内导体的热分布是研究的重点.

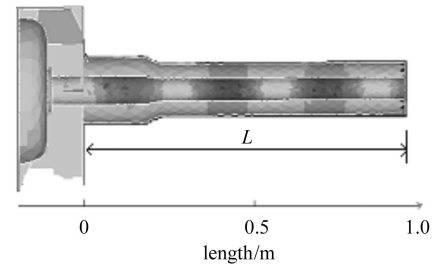


图5 耦合器内外导体热分布图

设定不同的短路面和一定的损耗功率, 并假定耦合器在谐振模式下传输功率, 计算了各点的热分布情况, 图6显示了对应3个不同短路面 $L=0.945$, $L=0.96$, $L=0.975$ 时的耦合器同轴线内导体热分布曲线.

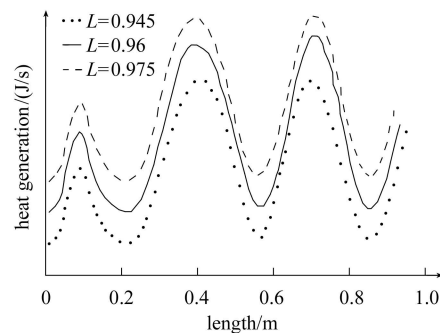


图6 不同短路面的沿轴热分布(横坐标起点见图5)

从这些曲线可以看出不论短路面在哪个位置, 第一个峰值的位置几乎是相同的, 即在沿轴0.1m处(此处距离陶瓷窗很近), 第二个峰值位置也很接近, 在0.39—0.42m之间, 第三个峰值在0.7—0.8m之间. 因此, 在设计耦合器冷却系统时, 要重点考虑耦合器内导体峰点区域的冷却, 可以在上述0.1m, 0.4m以及0.75m处施加特殊的冷却措施. 实际采用的冷却系统设计基本满足模拟结果的要求.

5 结论

对BEPC II 超导高频腔耦合器特性的模拟研究结果表明, 若直接采用KEKB超导高频腔耦合器的结构

设计参数, 传输带宽的中心频率和 BEPC II 的要求存在偏差, 传输效率将受到影响, 我们通过大量模拟计算对其结构参数进行了调整, 使耦合器在 BEPC II 频率下的传输性能有了较大的提高. 同时, 对耦合器内

的二次电子倍增效应和功率损耗所引起的温度分布作了模拟研究, 取得了具有实际意义的结果, 据此, 可作为将来实际工作的理论依据, 也可作为后续研究的参考.

参考文献(References)

- 1 Kijima Y, Mitsunobu S, Furuya T et al. Input Coupler of Superconducting Cavity for KEKB. Proceedings of EPAC 2000. Vienna, Austria, 2000. 2040—2042
- 2 Geng R L, LEPP. Multipacting Simulations for Superconducting Cavities and RF Coupler Waveguides. Invited Talk at the 2003 Particle Accelerator Conference. Portland, OR, May 12—16, 2003; http://w4.lns.cornell.edu/~grl/pac2003/SRF030520_14.pdf
- 3 Yla-Oijala P, Lukkarinen J et al. MultiPac2.1 Manual. 2001
- 4 Ansoft High Frequency Structure Simulator. A Handbook of HFSS 8.0. January 2001
- 5 Xiaofeng-Studio. Up-to-Date Classical ANSYS and Workbench Tutorial. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004 (in Chinese)
(小飒工作室编. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程. 北京: 电子工业出版社, 2004)
- 6 TANG Xing-Lun, FAN Qun-Bo, ZHANG Cao-Hui et al. ANSYS Project Application Tutorial—Calorifics and electromagnetics. Beijing: China Railway Publishing House, 2002 (in Chinese)
(唐兴伦, 范群波, 张朝辉等. ANSYS 工程应用教程——热与电磁学篇. 北京: 中国铁道出版社, 2002)

Study on the Performance of the Input Coupler for the BEPC II Superconducting RF Cavity

ZHONG Juan¹⁾ PAN Wei-Min

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

Abstract The input coupler for the accelerator cavity is one of the most critical parts in the RF accelerating system, its performance directly influences the RF power coupling to cavity, therefore, directly influences the cavity's quality. In the RF system of the BEPC II, an antenna coaxial input coupler based on the design of KEKB superconducting (SC) cavity's coupler will be used. It's first to use this kind of high power coupler under the frequency of 500MHz in China. Some studies on this RF coupler have been done, which includes the multi-pacting (MP) effect, the transmission performance and the thermal layout simulation. The results show that (1) there are several serious MP points exist in this kind of coupler and some necessary ways must be taken to protect the coupler from destroying; (2) the transmission performance under BEPC II operation frequency can be improved by optimizing the configuration of the coupler; (3) the heat-distributing pattern of the coupler from the simulation provides the important information for the cooling system design.

Key words BEPC II, coupler, MP-phenomenon, transmission performance, heating distribution