

# 吸收材料对超导高频腔高次模抑制的实验研究\*

林志刚<sup>1,1)</sup> 周霖<sup>1</sup> 陈怀璧<sup>1</sup> 赵振堂<sup>2</sup>

1(清华大学工程物理系加速器实验室 北京 100084)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 束流粒子通过加速腔的基模加速,以达到所需的能量值.由于腔本身的多谐性,束流在超导腔里面会激发起高次模,其中其电场分布对粒子加速起到负面作用的,称之为有害高次模.减小或抑制有害高次模是加速腔研究的一个重要环节.利用铝模型腔对超导腔的高次模抑制进行研究,给出测量结果.研究表明:铁氧体是很好的微波吸收材料.对于所研究的超导体内的高次模有着良好的吸收效果.

**关键词** 高次模 铁氧体 超导体

## 1 引言

从抑制的角度来看,高次模可分为两种:一种可以自由传播到腔外,另一种不能自由传播到腔外,只能存在于腔体中.对于前者,目前常见的抑制方法是在引出端加载吸收材料,如碳化硅(SiC),铁氧体<sup>[1-3]</sup>等.对于后者,可以在腔体内装载高次模耦合器,或者将其引导出来予以吸收<sup>[1,2]</sup>.例如:1997年日本的KEK为其光子工厂储存环的高亮结构开发了一种阻尼结构射频腔,在腔中设计了一个高次模耦合器,同时在其引出端加载了碳化硅吸收材料,有效地减小了9种危险模式中的6种<sup>[4]</sup>.而KEKB对超导体高次模的抑制则单纯采用了铁氧体吸收材料,为了解决铁氧体拉伸度小不易固定的问题,他们开始研究用热均衡处理技术将铁氧体固定在铜管内表面<sup>[5]</sup>.本文就铁氧体吸收材料在高频腔内对高次模的吸收特性进行了实验研究.

## 2 实验装置

实验用的是铝制800MHz超导模型腔.所有实验都在室温空气中进行.吸收材料为片状的铁氧体

材料.测量仪器是型号为83620A的扫描仪(8360 Series Synthesized Sweeper)和型号为8757D的网络分析仪(Scalar Network Analyser).图1为实验测量装置示意图.

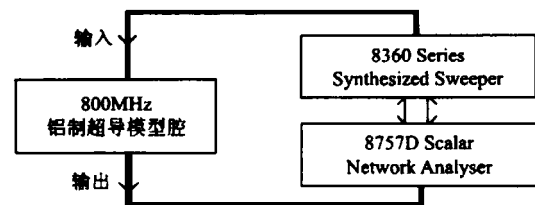


图1 测量装置图

## 3 模式识别

有影响的高次模集中在三倍频以内,即800MHz—2.4GHz频域范围内. $Q$ 值或者 $R/Q$ 值较大的模式应更为关注.在此范围内,用MAFIA程序计算并识别腔内存在的各模式.同时,测出腔内实际存在的模式,将计算结果与测量值一一对应.

### 3.1 极次的判别

根据微扰理论<sup>[6]</sup>,在电场集中的区域,用 $\epsilon_r > 1$

2002-11-19收稿,2003-02-18收修改稿

\* 国家自然科学基金(1987065)资助

1) E-mail: linzg01@mails.tsinghua.edu.cn

的电介质或金属微扰,则谐振腔的谐振频率降低.为实验方便,在该腔体两侧对称地各打了 12 个小孔,每两个孔之间间距  $30^\circ$ ,如图 2 所示.从孔中插入金属棒,当该区域电场较强时,对应的频率降低,在网络分析仪上的观察结果是相应波峰向左发生小的频移;当在电场较弱的地方扰动时,波峰的变化不明显.据此,用金属棒在各孔插入,可以区分单极子模、双极子模和四极子模.

具体的判别过程分别是:激励探针在  $0^\circ$  方向输入,在另一侧由测量探针输出观察波峰变化.用金属棒在各个角度微扰,如果波峰都有明显的频移,且频移幅度大致相当,则认为它是单极子模;如果波峰

只在两个角度有明显的频移,且这两个角度相差约  $180^\circ$ ,则认为它是双极子模;如果波峰在四个角度有明显的频移,且这四个角度两两相差约  $90^\circ$ ,则认为它是四极子模.据此可将所有波形一一判别.

### 3.2 模式的识别

用 MAFIA 程序计算出来的单极子模、双极子模和四极子模各 15 个,分布在  $0.8\text{--}2.7\text{GHz}$  之间.根据 MAFIA 程序计算得到的电磁场图形将这些模式一一识别出来,结合实际测量结果,就可以得到对应于各理论值的实际存在模式.表 1 给出了各模式的计算值和实际测量值及其模式.

表 1 MAFIA 计算值和测量值及其模式

	单极子模			双极子模			四极子模		
	理论值	测量值	模式	理论值	测量值	模式	理论值	测量值	模式
1	0.79861	0.79985	TM <sub>010</sub>	1.02706	1.0261	TE <sub>111</sub>	1.47442	1.4732	TM <sub>211</sub>
2	1.55422	1.55361	TM <sub>001</sub>	1.082	1.0821	TE <sub>122</sub>	1.49965	1.4981	TM <sub>211</sub>
3	1.56433	1.56376	TM <sub>012</sub>	1.22745	1.2263	TE <sub>112</sub>	1.96077	1.9599	TE <sub>222</sub>
4	1.61312	1.61352	TM <sub>013</sub>	1.26424	1.2625	TE <sub>113</sub>	1.9715	1.9709	TE <sub>222</sub>
5	1.64681	1.64712	TM <sub>014</sub>	1.35846	1.3572	TE <sub>114</sub>	2.02293	2.0231	TE <sub>233</sub>
6	1.71515	1.71563	TM <sub>015</sub>	1.44734	1.4444	TE <sub>115</sub>	2.06626	2.0655	TE <sub>234</sub>
7	1.80492	1.80318	TM <sub>023</sub>	1.53592	1.5326	TE <sub>116</sub>	2.13241	2.1302	TE <sub>235</sub>
8	1.87032	1.8698	TM <sub>024</sub>	1.65519	1.6514	TE <sub>117</sub>	2.22502	2.2217	TE <sub>236</sub>
9	2.02502	2.02203	TM <sub>027</sub>	1.72438	测不出		2.28529	2.2833	TE <sub>237</sub>
10	2.05951	2.05775	TM <sub>028</sub>	1.87039	1.8683	TE <sub>138</sub>	2.31389	2.3152	TE <sub>216</sub>
11	2.22099	2.21986	TM <sub>029</sub>	1.88102	1.8877	TE <sub>139</sub>	2.42364	2.4202	TE <sub>238</sub>
12	2.27275	2.26856	TM <sub>0,2,10</sub>	1.98197	1.9802	TE <sub>124</sub>	2.44594	2.4454	TE <sub>247</sub>
13	2.39558	2.39359	TM <sub>0,2,11</sub>	2.03845	2.0357	TE <sub>1,3,10</sub>	2.49705	2.4947	TE <sub>249</sub>
14	2.46941	2.46585	TM <sub>0,2,12</sub>	2.064	2.063	TE <sub>148</sub>	2.61038	2.6046	TE <sub>2,3,10</sub>
15	2.53406	2.53513	TM <sub>0,2,13</sub>	2.10495	2.0997	TE <sub>1,4,11</sub>	2.69211	2.6961	TE <sub>2,3,11</sub>

## 4 铁氧体对高次模的吸收

实验所用的铁氧体  $B_s = 1500\text{Gs}$ ,介电常数  $\epsilon$  分别为 14 和 16,呈片状.实验时用透明胶布将铁氧体片贴在引出端束流管道上,测出其中存在的模式及其  $Q$  值大小.改变铁氧体的贴法,可以得到一系列测量结果.

用铁氧体 A 进行了四组实验,用 B 进行了两组实验.六次实验中铁氧体的贴法基本相同,如图 2 所示.

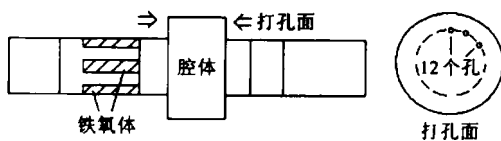


图 2 铁氧体安装位置图

## 5 吸收效果研究

### 5.1 铁氧体 A 和铁氧体 B 对高次模的吸收效果 (以下就铁氧体 A 的吸收情况进行讨论)

对于单极子模:主要分布在  $0.7\text{--}2.6\text{GHz}$  范围内.如图 3,同样输入条件下,加载铁氧体吸收材料后,15 个特定的单极子模只剩下 4 个(基模除外).被吸收掉的模式有 TM<sub>001</sub>, TM<sub>013</sub>, TM<sub>015</sub>, TM<sub>024</sub>, TM<sub>028</sub>, TM<sub>029</sub>, TM<sub>0,2,10</sub>, TM<sub>0,2,11</sub>, TM<sub>0,2,12</sub>, TM<sub>0,2,13</sub>.依然存在的模式为 TM<sub>012</sub>, TM<sub>014</sub>, TM<sub>023</sub>, TM<sub>027</sub>,但它们的  $Q$  值普遍下降.基模频率约为  $0.8\text{GHz}$ ,且加载前后  $Q$  值的变化在误差范围内可认为不变.由图 3 可知基模不受影响,这正是我们所期待的.

对于 TM<sub>012</sub>,加载铁氧体 A 和 B 吸收效果都不很

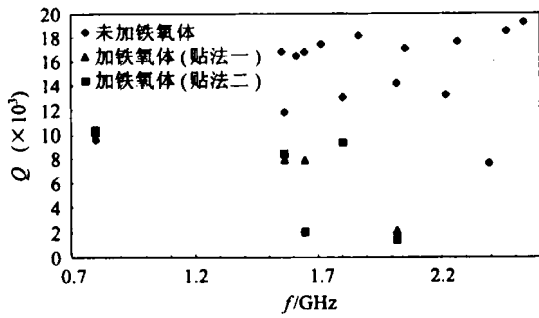


图 3 单极子模的吸收

明显,计算出来的  $R/Q$  和  $Q$  都比较大,需要重点考虑.而对于  $TM_{014}$ ,除贴法一外  $Q$  值都能降到 2000 左右,且其他的高次模的吸收效果相当.  $TM_{023}$ ,其  $Q$  值从 13000 左右降到 9500 左右,吸收效果不大,但是用铁氧体 B 时基本可以完全吸收( $Q$  值 300 以下,未给出图例),且对其他的高次模吸收效果相当.因此可以考虑用铁氧体 B 来吸收.

对双极子模:主要分布在 1.0—2.1GHz 范围内.如图 4,同样输入条件下,加了铁氧体吸收材料后,15 个特定的双极子模只剩下 2,3 个.被吸收掉的模式有  $TE_{122}, TE_{112}, TE_{113}, TE_{114}, TE_{115}, TE_{116}, TE_{117}, TE_{138}, TE_{139}, TE_{1.3.10}, TE_{1.4.11}$ .依然存在的模式为  $TE_{111}, TE_{124}, TE_{148}$ ,但其  $Q$  值普遍下降了一个量级,最大不超过 3000,可以认为已经完全吸收,加铁氧体 B 亦如此.这说明所加铁氧体对这 15 个特定的双极子模吸收效果非常明显.

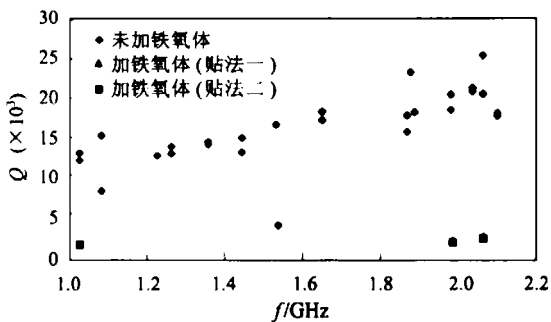


图 4 双极子模的吸收

对于四极子模:主要分布在 1.4—2.8GHz 范围内.如图 5,同样输入条件下,加了铁氧体吸收材料

后,15 个特定的四极子模只剩下 4 个.被吸收掉的模式有  $TE_{222}, TE_{233}, TE_{236}, TE_{237}, TE_{216}, TE_{238}, TE_{247}, TE_{249}, TE_{2.3.10}, TE_{2.3.11}$ .依然存在的模式为  $TM_{211}, TE_{234}, TE_{235}$ ,它们的  $Q$  值也有明显下降.这说明所加铁氧体对这 15 个特定的四极子模吸收效果明显.

依然存在的 3 个模式: $TM_{211}, TE_{234}, TE_{235}$ ,加载铁氧体 A 或 B,  $Q$  值下降不明显,其机理有待进一步探讨.

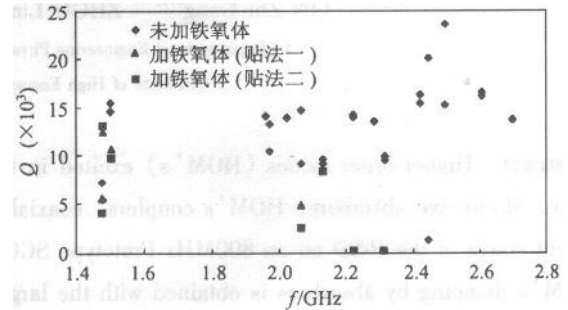


图 5 四极子模的吸收

### 5.2 对于铁氧体位置及参数变化得到的一些结论

铁氧体位置的改变对大部分所关心的有害高次模的吸收影响不甚明显,但是对一些特定的模式如  $TM_{014}$  有较大影响;改变铁氧体介电常数  $\epsilon$  对某些特定的模式也有较大影响,如  $TM_{023}$ ;被吸收的有害高次模是那些可以从腔内自由传播出来的模式,要消除那些在腔内不能传出来的模式,可以考虑加载高次模耦合器.

## 6 结论

铁氧体是一种很好的微波吸收材料.对于实验中用到的两种铁氧体来说,总的吸收效果非常明显.所用铁氧体,在面积变化不大的情况下改变安装位置,个别模式的吸收效果变化较大,改变吸收材料面积,得到相同结论.实验用到的铁氧体  $\epsilon$  值非常接近.

为了更好地研究介电常数  $\epsilon$  和吸收效果之间的关系,有必要进行大范围  $\epsilon$  内的测量研究.

## 参考文献 (References)

- 1 Koseki T, Izawa M, Kamiya Y. PAC, 1995, 3:1794—1796
- 2 Moffat D, Barnes P, Kirchgessner J et al. PAC, 1993, 2:977—979
- 3 Koseki T, Izawa M, Kamiya Y. PAC, 1993, 2:930—932
- 4 Izawa M, Sakanaka S, Takahashi T et al. PAC, 1999, 2:904—906
- 5 Tajima T, Asano K, Furuya T et al. PAC, 1995, 3:1620—1622
- 6 ZHANG Ke-Qian et al. Microwave & Photo Guided Wave Tech., 1994, 8(9):311—315(in Chinese)  
(张克潜等. 微波与光导波技术, 1994, 8(9):311—315)

Suppression of HOM's on a Prototype Superconducting Cavity by Absorbers<sup>\*</sup>LIN Zhi-Gang<sup>1,1)</sup> ZHOU Lin<sup>1</sup> CHEN Huai-Bi<sup>1</sup> ZHAO Zhen-Tang<sup>2</sup><sup>1</sup> (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)<sup>2</sup> (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** Higher-order modes (HOM's) excited in the Superconducting Cavity (SCC) can be damped through many ways. Microwave absorbers, HOM's couplers, coaxial waveguides and other devices are used to achieve this aim. The recent status of the R&D on an 800MHz Prototype SCC being developed is presented in this paper. For the cavity, the HOM's damping by absorbers is obtained with the large beam duct. A low power measurement on a prototype cavity has been carried out and the  $Q$ -values of HOM's are confirmed to be drastically reduced. Two types of ferrite as absorbers are investigated to achieve the function of damping the HOM's. The modes we concerned focus in the range of 0.8—2.7GHz. By means of changing the parameters of the ferrite used in the cavity, a conclusion about the damping is acquired. Measurements indicate that most of the HOM's in this range are effectively absorbed and damped at the presupposition that the basic mode is not affected. A few special modes are pointed out, which cannot be absorbed by means of absorbers because they cannot propagate out of the cavity. The two types of ferrite used in this project have similar property with the same value of  $B$ , equal to 1500Gs and the different values of  $\epsilon$  equal to 14, 16 respectively. In order to study the relation between the parameters of ferrite and the damping effect, further research will be carried out sequentially.

**Key words** higher-order modes, ferrite, superconducting cavity

Received 19 November 2002, Revised 18 February 2003

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(1987065)

1) E-mail: linzg01@mails.tsinghua.edu.cn