

超导腔垂直测量系统中的磁屏蔽

孙虹 赵升初 葛明骐
(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 简要介绍空间磁场对纯铌超导加速腔性能的影响,以及在超导腔垂直测量时对空间磁场进行有效屏蔽的方法. 由于多数磁性材料对应力和温度变化非常敏感,而且国内缺乏在低温下相关磁屏蔽材料性能的数据,为此对 8 种国产铁磁和软磁材料在低温下的初始磁导率进行了测量,并给出了相应的测试结果. 最后介绍了作者研制的 1.3GHz 超导腔垂直测量低温恒温器内置式磁屏蔽装置及其性能.

关键词 磁屏蔽 超导腔 低温恒温器 垂直测量

1 引言

由于低温超导材料铌 Nb 具有良好的机械加工性能和优异的超导电性,因此在粒子加速器领域中也得到了广泛的应用,各种不同类型的超导加速结构和超导磁铁已被世界各主要加速器所采用. 超导高频加速腔多数选用高纯铌材,也有采用铌铜复合材料或铜基溅射铌材的. 通过向其馈入高频功率,在超导状态下能以极低的腔耗在腔内建立起一个极高梯度的高频加速电场,使通过腔间隙的粒子获得能量而得到加速. 超导腔的这一特性得益于它具有极低的腔内表面电阻和极高的无载品质因数 Q_0 ,对于工作在 1.3GHz 频率下的纯铌超导腔在 $<2\text{K}$ 液氦温度下它的无载品质因数 Q_0 可高达 1×10^{10} 以上,此时对应腔内表面电阻约为 $10\text{--}20\text{n}\Omega$. 超导腔极高的 Q_0 ,意味着在相同的加速梯度下,超导腔的损耗极低. 以 500MHz 加速腔为例,同样获得 1MV/m 的加速梯度,与常温铜腔相比,超导铌腔的每米腔耗,几乎要低一个 4×10^4 的因子^[1].

在超导状态下,超导腔周围外部磁场对超导腔的表面电阻有极大的影响,就我们所研究的 $1.3\text{GHz}/\beta = 0.45$ 超导腔而言,单位外磁场导致超导腔表面电阻的增加约为 $0.43\text{n}\Omega/\text{mGs}$,而仅就地磁(北京地区约为 500mGs)所造成腔表面电阻的增加,就高达 $215\text{n}\Omega$. 因此在超导腔工作过程中,必须采取足够的外磁屏蔽,以便将剩余磁场降低到令人满意的水平. 对于一个 $Q_0 \geq 1 \times 10^{10}$ 的超导腔,其所能容忍的剩余

磁场约在 10mGs 以下.

2 空间磁场对超导腔表面残余电阻的影响

理论和实验研究表明,超导腔的表面电阻由 BCS 电阻和残余电阻两部分组成,即

$$R_s = R_{\text{BCS}}(T) + R_{\text{res}}, \quad (1)$$

前者称为 BCS 表面电阻,符合 BCS 超导理论,由下式确定^[2]:

$$R_{\text{BCS}} = A_s \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-1.76 \frac{T_c}{T}\right), \quad (T \leq T_c/2), \quad (2)$$

其中 A_s 为随不同超导材料性能而改变的常数, $\omega = 2\pi F$ 为超导腔工作频率, T 是超导腔工作温度, T_c 为超导体转折温度. 显然,BCS 表面电阻与材料、温度和频率相关. 对于 1.3GHz 铌腔, 4.2K 时 BCS 表面电阻约为 $800\text{n}\Omega$,而在 2K 时则降到 $15\text{n}\Omega$ ^[2].

后一项 R_{res} 称为表面残余电阻,它与温度无关,而与材料本身晶格结构缺陷和所含杂质,以及在腔的机械加工、焊接和表面处理过程中对腔内表面造成的污染有关. 超导材料自身具有的晶格缺陷和杂质是影响表面残余电阻的主要因素之一,它对空间静磁场是非常敏感的. 超导材料中的晶格缺陷和杂质会在材料体内形成磁力线的“钉扎”中心^[3],当温度从室温降到材料的超导转折温度以下(铌的超导转折温度为

9.25K)的过程中,如果此时腔是处在一个外部恒定磁场中(如地磁场),那么部分磁力线就会被俘获在材料中,围绕钉扎中心形成磁力线涡流,阻碍电子的有序运动,从而导致腔表面残余电阻的升高.由超导体俘获外界磁通而产生的残余电阻记为 R_{mag} ,由下式给出

$$R_{\text{mag}} = R_n \frac{H_{\text{ext}}}{2H_{C2}}, \quad (3)$$

其中 H_{ext} 是外部磁场强度, H_{C2} 是超导材料的上临界磁场强度,它的大小取决于超导材料自身的残余电阻比值即RRR值(Residual Resistance Ratio),此值越大表明材料的纯度越高,所含杂质越少, R_n 是常导态表面电阻值.如果铌材的RRR=300,取 $H_{C2} = 2400\text{Oe}$,当超导腔的工作频率 $F = 1\text{GHz}$ 时常导态表面电阻值 $R_n \approx 1.5\text{m}\Omega$,则(2)式可以写为^[4]

$$R_{\text{mag}} = 0.3(\text{n}\Omega)H_{\text{ext}}(\text{mOe})\sqrt{F(\text{GHz})}, \quad (4)$$

因此,如前所说,对于一个 $Q_0 \geq 1 \times 10^{10}$ 的超导腔,须将剩余磁场控制在10mGs以下.

超导腔的表面电阻在较高温度时主要取决于BCS电阻,而随着超导腔工作温度的降低,BCS电阻将迅速减小,剩余电阻将占主导地位,因此除了选择高纯度的超导材料和采取足够的外磁屏蔽之外,还必

须严格控制加工条件和优化腔体表面处理工艺,尽量减少在腔的加工、表面处理和安装过程中对腔内表面的污染.

3 磁屏蔽材料的选择

铁磁材料特别是软磁材料,由于其在常温下优异的磁性能常被用做磁屏蔽材料,因为温度和应力对磁畴形态的影响很大,故它们大多对外界温度和应力的变化很敏感,而超导腔测量所需要的磁屏蔽装置恰恰工作在液氦温区(4.2K—1.5K),并且要屏蔽的是空间地磁场和低温恒温器内胆材料的剩磁构成的弱磁场,这就要求屏蔽材料在低温下仍应具有足够高的初始磁导率.因此了解材料在低温下磁性能的改变是非常重要的,也是选择材料的依据.我们曾对国内外的铁磁材料进行了广泛调研,由于国内几乎找不到液氮温度以下磁屏蔽材料性能的测试数据和应用先例,为此我们先后对5种硅钢材料、2种玻莫合金软磁材料和1种纯铁材料的初始磁导率进行了室温和低温下性能的对比测量(与中国计量院合作完成).测量方法采用的是线圈积分测磁法,测量精度可做到0.01Gs,结果列于表1中.

表1 8种铁磁材料在室温和低温下磁导率的测量结果

样品材料牌号	磁感应强度 $B/(10^{-4}\text{T})$			相对初始磁导率 μ_r		
	300K	77K	4.2K	300K	77K	4.2K
玻莫合金1J85	9.93	10.97	9.62	42863	5914	4150
取向硅钢30QG120	27.09	12.18	10.80	7335	6598	4816
取向硅钢27QG122	17.10	11.52	10.01	2243	2871	2376
取向硅钢27QG110	26.29	9.57	10.69	4562	3322	4533
无取向硅钢J23-50	21.80	9.83	10.81	525	426	390
玻莫合金1J79	39.787	39.367		28735	14833	
取向硅钢30QG110	38.893	33.452		6997	6869	
高频屏蔽用纯铁	27.596	21.234		760	585	

从测量结果看,硅钢Fe-Si材料的磁导率受温度变化的影响较小,但其常温下的初始磁导率基值较低;相反,玻莫合金Fe-Ni材料的磁导率受温度变化的影响较大,但常温下的初始磁导率较高.其中1J79对温度的敏感程度远小于1J85,虽然1J85在常温下是非常优良的磁屏蔽材料,但在低温下它的初始磁导率下降了近一个数量级,而1J79在低温下的磁导率仍能维持在 $\mu_r > 14000$ 以上.综合考虑,最终选用玻莫合金1J79作为磁屏蔽材料.

4 磁屏蔽装置的研制

超导腔垂直测量装置如图1所示.磁屏蔽装置置

于被测超导腔外部液氦槽内.磁屏蔽装置的屏蔽系数 S 被定义为

$$S = H_{\text{ext}}/H_{\text{in}}, \quad (5)$$

H_{ext} 为屏蔽装置外部磁场强度, H_{in} 为内部剩余磁场强度.就本例而言,北京地区地磁约为500mGs,要求内部剩余磁场小于10mGs,考虑到外部其他杂散磁场,如低温恒温器本身剩磁等等,则屏蔽装置的屏蔽系数 S 至少要达到 $>50-100$,此时相应由剩余磁场所引起的腔表面残余电阻 R_{mag} 将小于4nΩ.

为了方便超导腔及其测量装置的安装,低温恒温器采用直筒形金属杜瓦,受此限制磁屏蔽装置也被设计成直筒形,上端开口,底部封死.

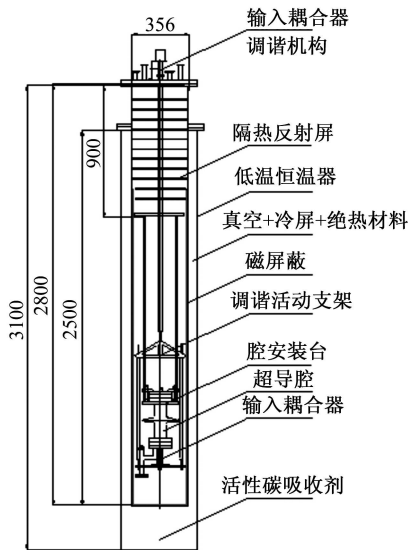


图 1 超导腔垂直测量装置示意图

磁屏蔽系数是对静磁屏蔽作用的一种量度, 它的大小主要取决于材料的初始导磁率、屏蔽装置的形状与体积以及材料的厚度. 对于一无限长圆柱体磁屏蔽结构, 其轴向和径向屏蔽系数 S_{\parallel} , S_{\perp} 可分别表示为

$$S_{\perp} \approx \frac{\mu d}{D} + 1, \quad S_{\parallel} \approx 4NS_{\perp}, \quad (6)$$

对于加端盖封闭式圆筒, 其轴向屏蔽系数用下式^[5]计算:

$$S_{\parallel} \approx \frac{4N(S_{\perp} - 1)}{1 + D/2L} + 1, \quad (7)$$

其中 D 为圆筒直径, L 为圆筒长度, d 为壁厚, μ 为材料磁导率, 而 N 为去磁系数, 令 $p = L/D$, 当 $p \gg 1$ 时, 有^[4]

$$N = \frac{1}{p^2 - 1} \left[\frac{p \ln(p + \sqrt{p^2 - 1})}{\sqrt{p^2 - 1}} - 1 \right]. \quad (8)$$

根据磁屏蔽材料在低温下磁导率测量结果和对单、双层屏蔽筒屏蔽系数的估算, 最终确定采用立式双层筒形磁屏蔽结构, 层间由聚四氟材料做衬垫; 为了同时满足单 cell 和多 cell 超导腔的测量需要, 要求筒内剩余磁场均区大于 1200mm, 最终确定屏蔽筒尺寸为: 总高 2100mm, 外径 $\phi 350$, 内径 $\phi 336$.

由于此屏蔽筒尺寸较大, 市售材料的最大幅宽约为 230mm, 故需将数块焊接在一起, 同时又要保证良好的同心度和垂直度, 加工难度大, 精度要求高. 保证磁屏蔽性能的关键是退火工艺, 采用先分段退火, 再做总体退火, 取得了很好的效果. 该磁屏蔽装置(图 2)由我们与北京钢铁研究总院共同研制完成.



图 2 磁屏蔽筒的现场安装

5 磁屏蔽效果测试

我们将磁屏蔽筒放入低温恒温器中, 在室温下进行了实地测试. 使用的测量仪器是 CTM-5W01B 型磁通门磁强计, 其分辨率为 1nT; 从低温恒温器底部开始, 测量不同高度时屏蔽前后各点轴向和径向剩余磁场, 每次均测量东西南北 4 个方位, 取其最大值. 测量结果表明, 剩余磁场均区大于 1500mm(超导腔垂直测量时所处的位置约在 300—900mm 处), 而轴向剩余磁场小于 140nT(1.4mGs), 径向剩余磁场小于 40nT(0.4mGs), 均远优于设计值; 即使考虑到低温下材料磁导率的下降, 也有足够的余量满足 1.3GHz 超导腔垂直测量的需要 ($H_{in} < 10mGs$). 图 3 给出了低温恒温器内, 屏蔽前和屏蔽后轴向剩余磁场的变化情况.

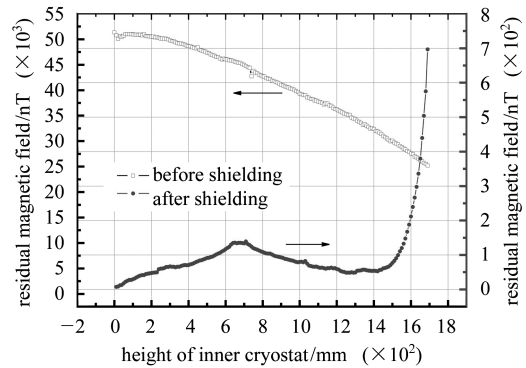


图 3 屏蔽前和屏蔽后轴向剩余磁场的变化

6 结论

空间磁场对纯铌超导腔性能的影响是不容忽视的; 做好低温下静态磁场屏蔽的关键是选取适当的磁

性材料和合理的磁屏蔽装置结构. 我们和北京钢铁研究总院合作研制的立式双层筒形磁屏蔽结构, 完全能满足 1.3GHz 超导腔垂直测量的要求; 在同等测试条件下, 上述结果要远优于日本 KEK 同类装置轴向残余磁场 6mGs, 径向残余磁场 4.5mGs^[6] 的性能指标.

参考文献(References)

- 1 Hasan Padamsee, Jens Knobloch, Tom Hays. RF Superconductivity for Accelerators. New York: Cornell University Ithaca, 1998. 6—7
- 2 Aune B, Bandelmann R, Bloess D et al. Superconducting TESLA Cavities. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2000, **3**: 092001-3
- 3 ZHANG Yu-Heng. Superconductivity Physics. Hefei: University of Science and Technology of China Publisher, 1997. 250—252 (in Chinese)
- 4 Hasan Padamsee, Jens Knobloch, Tom Hays. RF Superconductivity for Accelerators. New York: Cornell University Ithaca, 1998. 173—175
- 5 LUO Guo-Hui. Lecture Note for Superconducting RF. The 2nd OCPA Accelerator School. Huangshan, China, July, 2000. 11—12
- 6 Kenji Saito. Quick Vertical Test System for L-band Superconducting RF Cavity. Proceeding of the 21st Linear Accelerator Meeting. Tokyo, Japan 1996

Magnetic Shield for the Vertical Test System of Superconducting Cavity

SUN Hong ZHAO Sheng-Chu GE Ming-Qi

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In this paper the influence of the space magnetic field on the performance of a superconducting niobium bulk cavity is introduced briefly. And an effective magnetic shielding method for superconducting cavity vertical test is presented. The initial permeabilities of eight different kinds of Fe-Si and Fe-Ni materials at liquid helium or liquid nitrogen temperature has been measured to compare with those at room temperature. The measurement data are given also. Based on it a double layers cylinder magnetic shield has been developed for the cryostat of 1.3GHz superconducting cavity.

Key words magnetic shield, superconducting cavity, cryostat, vertical test