

加速器射频超导技术

沙 鹏 潘卫民

(中国科学院高能物理研究所 100049)

带电粒子加速器(以下简称“加速器”)是人类探索微观世界的重要工具,除了用于高能物理研究以外,也广泛地扩展到工业生产、医疗卫生、材料科学、国防科技等诸多领域。目前的加速器,无论是周长 27 千米、发现希格斯粒子的大型强子对撞机(LHC),还是小型的医用直线加速器,大多采用射频加速腔来给带电粒子(电子、质子、重离子)补充能量,因此,射频加速腔相当于汽车的发动机。过去,射频加速腔多采用铜、铝等金属材料制成,这些材料的微波表面电阻(微波在导体内传播时,由于趋肤效应,电流会集中在导体的表面而发生损耗,这个损耗对应的电阻被称为微波表面电阻。)会导致射频加速腔产生功率损耗,大大降低了加速器的能量转换效率。因此,20 世纪 60 年代,研究加速器的科学家和工程师们开始尝试采用超导材料(铌、铌三锡等)来制作射频加速腔,也就是超导腔。之后,与超导腔相关的加速器射频超导技术蓬勃发展,超导腔的性能不断提高,在全世界的大型加速器装置上得到了广泛的应用,射频超导技术也成为了加速器的核心技术之一,本文将对该技术做一个简要介绍。

一、超导腔的基础知识

跟传统的射频加速腔相比,超导腔的主要优势在于:超导腔的微波表面电阻接近于零,因此,其功耗也接近于零,可以大幅度提高加速器的能量转换效率;连续波工作时,超导腔的加速梯度(E_{acc})可以高达 50 MV/m,是传统的射频加速腔的几十倍,可以显著降低高能加速器的规模^[1]。

超导腔的优势很明显,但是适合超导腔的超导材料却不好找,需要满足以下几个条件:

- (一) 具有较大的超导能隙,从而具备较高的超导转变温度;
- (二) 超导能隙函数为 s 波;
- (三) 具有较高的下临界磁场;
- (四) 具有较小的微波表面电阻;
- (五) 导热好,避免超导腔因为热量积累导致温度过高而失超;
- (六) 材料好获取,具备良好的可塑性和金属加工特性,可以大规模制造。

1911 年,荷兰的昂内斯在汞金属上发现了超导电性。之后,经过上百年的研究,人类已经发现了成千上万种超导材料。但是,其中能满足上述条件、用于制作超导腔的超导材料却非常少,尽管科学家们发现了大量的高温超导材料(钇系、铋系、铊系、汞系……),其超导转变温度都超过了液氮温度,但是几乎都是陶瓷材料,或者需要施加高压,加工和可塑性很差。因此,截止到目前为止,能够用于制作超导腔的材料仍然以铌为主(也有少数超导腔采用了铅、铌三锡等材料)。与其他超导材料相比,铌的主要优势如下:

- (一) 铌作为一种金属,拥有良好的可塑性和加工性,可以大规模制造——这点非常重要。
 - (二) 在所有单质元素中,常压下铌的超导转变温度最高,达到了 9.3 K。
 - (三) 铌的剩余电阻率(RRR)高达 300,导热性能非常好(图 1),避免超导腔因为温度过高而失超。
 - (四) 铌的下临界磁场也很高,达到了 170 mT。
- 铌材经过机械加工、电子束焊接、表面处理等工序后,就可以制成各种类型的超导腔,如图 2 所示。

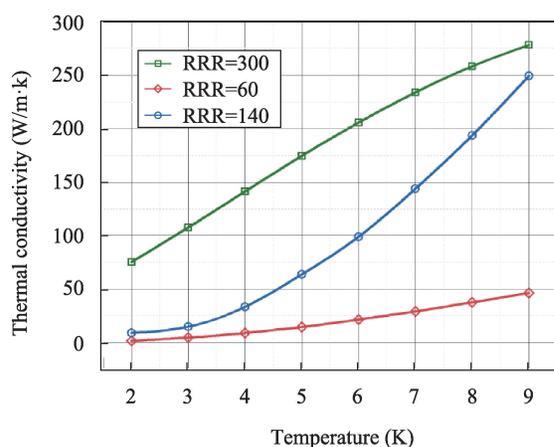


图1 铌的热导率随温度的变化

二、超导腔的用途

超导腔在加速器上的首要用途就是加速带电粒子。图2中650 MHz超导腔的电场分布如图3所示(红色代表电场强,蓝色代表电场弱)^[2],当带电粒子从左向右沿着超导腔中心的轴线(黑色虚线)前进时,就会感受到超导腔内的电场,从而获得加速。

除了加速带电粒子以外,超导腔在加速器上还有一些特殊用途,例如:同步辐射光源上经常采用超导腔来拉伸带电粒子束团的长度;LHC的高亮度升级项目(High luminosity LHC, HL-LHC)采用超导

腔使得粒子束进行正面碰撞,从而提高对撞亮度。

此外,超导腔不仅在加速器上有广泛应用,近年来,在暗物质和引力波探测、超导量子计算等领域也开始崭露头角,例如:利用1.3 GHz超导腔开展的暗光子探测实验,如图4所示。

三、超导腔的系统集成

超导腔要想真正用在加速器上,还需要很多附属设备:一、低温恒温器,为超导腔提供低温、高真空的环境;二、耦合器,将微波功率馈入超导腔内,建立电场加速带电粒子;三、调谐器,将超导腔的谐振频率调到目标值;四、高阶模抑制器,将超导腔内的高阶模引出并吸收。最后,将超导腔和这些附属设备集成到一起,形成超导腔模组,就可以用在加速器上了。

图5是中国科学院高能物理研究所(以下简称“高能所”)自主研制的499.8 MHz超导腔模组的示意图,图6是对应的实物。该超导腔模组于2017年10月投入北京正负电子对撞机(BEPC II)的运行至今,也是国产超导腔首次代替进口超导腔在大科学装置上实现了长期稳定运行。



325 MHz超导腔



166.6 MHz超导腔



499.8 MHz超导腔



650 MHz超导腔



1300 MHz超导腔

图2 各种类型的超导腔

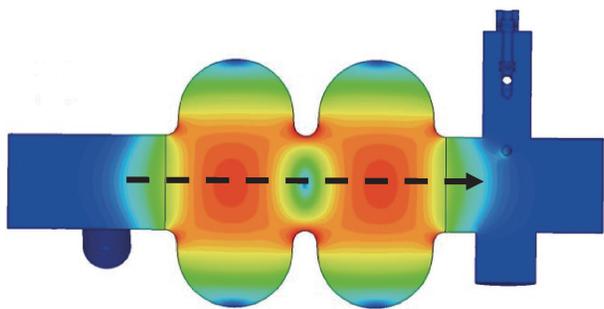


图3 超导腔内电场分布

图7是高能所研制的1.3 GHz超导腔模组,里面包含了8只1.3 GHz超导腔及附属设备,该模组于2023年6月进行了高功率测试,测试结果达到了国际领先水平,使我国的高性能超导腔技术跨入了世界前列。

经过60余年的发展,加速器射频超导技术已进入了黄金时代,在建和计划中的大型加速器基本都采用超导腔来加速电子、质子和重离子,例如:高能

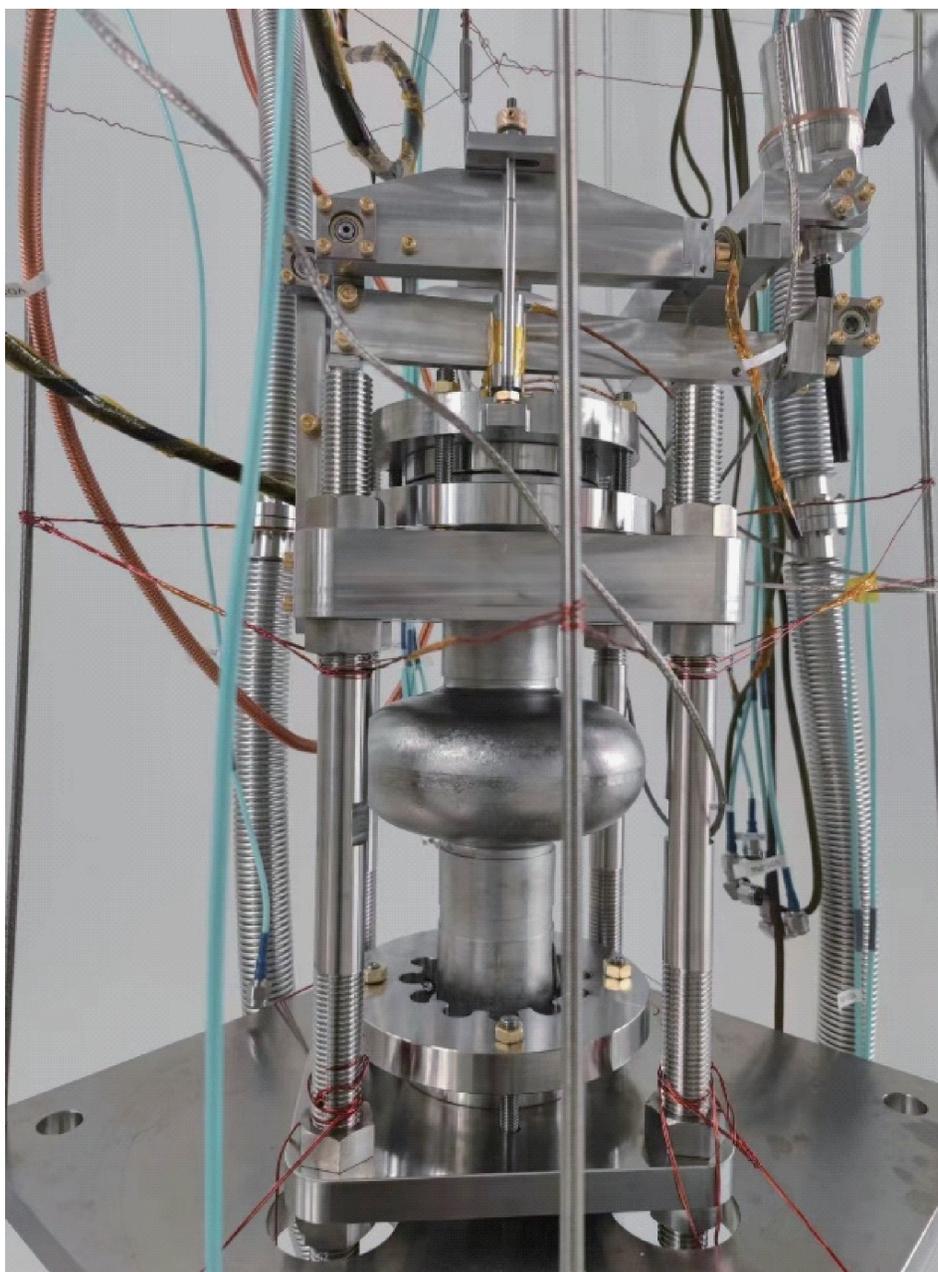


图4 利用1.3 GHz超导腔开展的暗光子探测实验

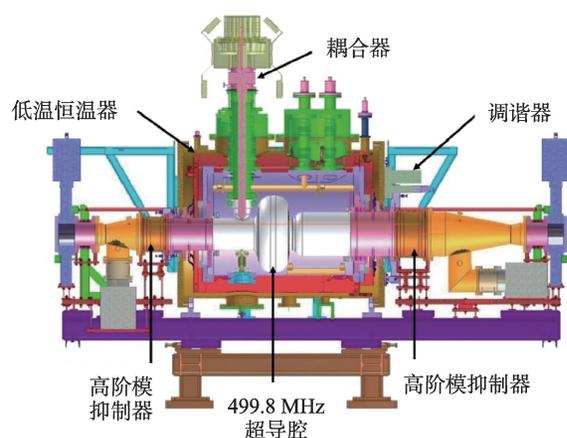


图5 499.8 MHz 超导腔模组示意图

同步辐射光源(HEPS)、合肥先进光源(HALF)、强流重离子加速装置(HIAF)、加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)、中国散裂中子源Ⅱ期(CSNSⅡ)、欧洲散裂中子源(ESS)、长基线中微子加速器(PIP-II)、环形正负电子对撞机(CEPC)、国际直线对撞机(ILC)、未来环形对撞机(FCC)、稀有同位素束流装置(FRIB)、高重频自由电子激光(LCLS-II、SHINE、S3FEL、DALS……)等等。在国内外这些大型加速器建设推动下,加速器射频超导技术具有广阔的发展前景。

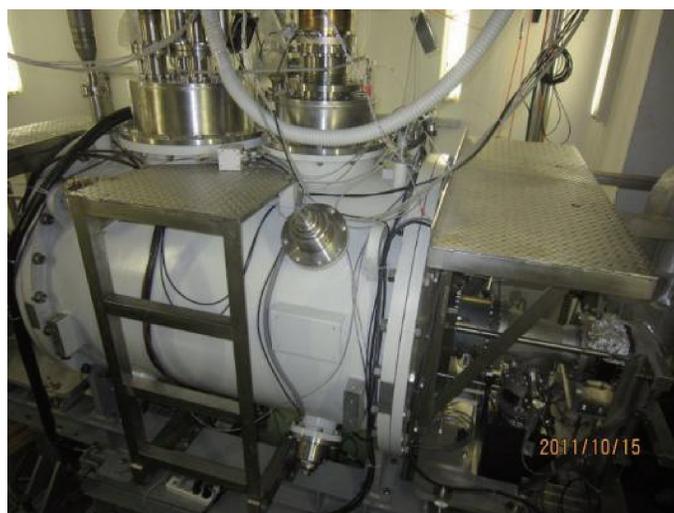


图6 499.8 MHz 超导腔模组实物



图7 1.3 GHz 超导腔模组

参考文献

- [1] 潘卫民,葛锐,翟纪元.加速器射频超导与低温技术[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2023.
[2] H. Zheng, P. Sha, J. Zhai, et al., Development and vertical tests of

650 MHz 2-cell superconducting cavities with higher order mode couplers, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 995 (2021) 165093. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165093>.