

国产铌材超导腔的研制和实验

赵 夔 王莉芳 张保澄 于 进 王 彤 吴根法 耿荣礼 宋进虎 陈佳洱
(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘 要 通过对国产铌腔的研制和探索,掌握了超导腔的设计制造和实验研究的关键技术,进行铌材改性后获得了铌腔后处理的特定工艺.在 2.5K 温度时,国产铌腔的加速梯度超过 10MV/m,品质因素 10^9 .

关键词 超导腔 铌材改性 品质因素 加速梯度

1 引 言

1992 年底北京大学超导腔课题组开始国产铌腔的研制,目的是跟踪国外超导加速器技术的最新研究成果,为我国发展超导加速器和高平均功率自由电子激光器奠定基础.

1994 年 4 月,两只采用国产铌材的 L 波段 1.5GHz 超导加速腔在北京大学重离子所研制成功.迄今为止,仅德、美、日等国的有数几个公司和实验室可以制作或生产超导铌腔.超导腔的制造不单是加速器物理与技术的问题,它还广泛深入地涉及了冶金及材料科学的前沿课题.在研制过程中,解决了获取具有高残留电阻比(RRR)超导腔的重大难题,经后处理的国产超导腔的 RRR 由 50~60 提高到 300 左右.同时从掌握铌材的机械性能入手,圆满地完成了铌腔的冲压成形、精加工及电子束焊接.改性处理后的铌腔经低温实验测得 RF 性能有显著提高,在 2.5K 温度时,加速梯度超过 10MV/m,品质因素 10^9 ,获得了具有突破性的进展.

2 国产 1.5GHz 铌腔的设计和制造

吸取国外的经验,确定研制几何形状为椭球形的超导腔.这种腔形具有优异的性能,腔的几何形状设计采用了 1993 年最新版本的 Superfish 程序组.

腔形设计的考虑原则是:在保证频率的条件下,优化腔的整个形状,在一定的平均场 E_{cc} 下,尽量降低表面峰值电场 E_{peak} ,即降低 E_{peak}/E_{ac} 值,降低峰值磁场 H_{peak} ,增大耦合因

子和分路阻抗.对椭球腔的赤道直径、加速间隙、圆弧的曲率半径、束管直径等尺寸进行了优化,优化铌腔几何参数设计时必须全盘考虑.在计算程序优化的基础上,确定了 1.5GHz 超导腔的几何尺寸和结构设计图.

超导腔的材料选择具有良好的射频超导性能的铌材,并采用薄铌板冲压成形的办法.为掌握铌板的冲压成形及机加工性能,对铌材机械性能进行测试和预加工实验,从而对冲压模具的制作提出几点要求:(1)模具材料,它不能引起铌板的表面沾污,硬度应强,但不能擦伤铌腔表面;(2)冲压步骤要合理,要避免冲压引起材料起皱和厚度不匀,冲压件易脱模;(3)要给出电子束焊接的加工余量.由此而设计了 1.5GHz 铌腔的冲压模具.

电子束焊接质量的优劣对铌腔的超导性能影响很大,在铌腔焊接前,进行了大量的铌板样片的焊接实验.由于准备充分和实验数据可靠,成功地完成了铌腔的整体焊接.

3 国产铌材性能改进的研究

超导腔所能取得的最高加速梯度与 RRR 的平方根成正比,因此铌腔的性能可用 RRR 的高低来衡量.RRR 的定义是铌材在常温下的电阻和低温 10K 时的电阻比值.

高 RRR 铌材的获取必须采用多次真空电子束熔融办法制备,需严格控制铌内隙式杂质 C、O、H、N 的含量,因为这些杂质的热传导性较差.通过实验,测得国产铌样品的残留电阻比仅 50 左右,比要求低 3~4 倍.分析

其原因,认为主要是电子束真空熔炼炉的真空条件差,电子束熔融次数不够,后处理温度及时间都不合适;电镜检查发现,铌板晶粒不均匀,且表面有大量球状物.可见这批铌材未达到质量要求,直接影响了国产铌腔的射频超导性能.本所围绕此关键问题进行了一系列研究,并与美国、日本的同行开展了合作研究.采用超高真空下长时间高温热处理方案进行国产铌材的改性,目的是除去铌材中的 C、O、H、N 杂质,这种除气机制与加热炉的真空度和加热温度、时间有着密切关系.用钛作为吸气材料.当样品在 $\leq 1.33 \times 10^{-4}$ Pa 的真空中高温加热时,钛蒸发到铌表面形成几十微米的薄膜,俘获样品中扩散的杂质,经化学处理去除这层薄膜合金与杂质.另外,在热处理过程中,真空炉中的杂质原子被钛吸收可以防止铌的再次污染.改性后的铌材晶粒变大且均匀,球状物消失,与 RRR 测量结果联系起来看,铌材的射频超导性能明显提高.

4 低温超导实验结果

对国产铌腔进行了两步低温超导实验,第一步实验安排在国产铌腔的高温改性之前,也就是说铌腔的 RRR 值仅为 50 左右,通过低温实验测得腔体的品质因素只达到 3×10^8 ,加速梯度 4.5MV/m.从测试结果看,铌腔的性能与理论预期的基本相符,较低 RRR 值的超导腔不能获得高的加速梯度.

1994 年 10 月对铌腔进行了改性和后处理,11 月作了进一步实验.测得在温度 2.5K 时腔体的品质因素达到 10^9 ,加速梯度 E_{acc} 高于 10MV/m.图 1 是国产铌腔的加速梯度与品质因素的关系曲线,图 2 是国产铌腔的射频超导性能与美国 CEBAF 国家实验室同类 1.5GHz 铌腔的比较.由此可见,国产铌腔的射频超导性能已达到国外同类 1.5GHz 铌腔的水平.

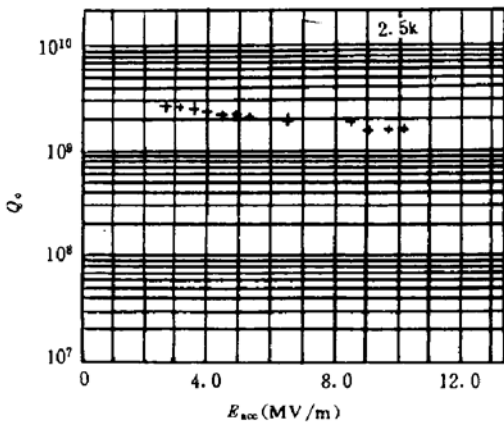


图 1 品质因素与加速梯度关系曲线

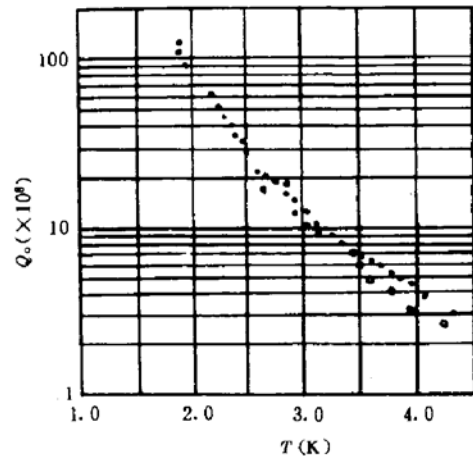


图 2 铌腔测试结果与 CEBAF 结果比较
○:美国CEBAF, ●:北京大学超导腔

Research Progress of 1.5 GHz Chinese Niobium Superconducting Cavity

Zhao Kui Wang Lifang Zhang Baocheng Yu Jin Wang Tong
Wu Genfa Geng Rongli Song Jinhu Chen Jiaer

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The research progress of superconducting cavity made in Chinese Niobium, with the emphasis on the quality improvement of the Niobium and (下转第 15 页)