

HI-13 串列加速器升级工程 144 MHz 铜铌溅射超导腔物理设计

彭朝华, 关遐令

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要:为设计 HI-13 串列加速器升级工程中的 QWR 铜铌溅射超导腔,利用电磁场计算软件和力学结构计算软件分析了 QWR 腔的高频特性和机械振动频率。考虑到 QWR 腔在加工和运行时环境温度差异,给出了 QWR 腔常温加工时的几何尺寸。本工作还分析了 QWR 腔电磁场的不对称性对束流运输的影响。

关键词:QWR; HI-13 串列加速器; 铜铌溅射超导腔; 物理设计

中图分类号: TL503.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2006)06-0646-04

144 MHz Niobium Sputtered Superconducting Cavity Physical Design for HI-13 Tandem Upgrade Project

PENG Zhao-hua, GUAN Xia-ling

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-62, Beijing 102413, China)

Abstract: In order to design the niobium sputtered superconducting cavity used in HI-13 tandem upgrade project, RF performance and mechanical frequency of QWR cavity is analyzed by numerical simulation. Considered the difference of cavity body temperatures in manufacture case and online case, geometry of cavity in room temperature environment is given. Affection of asymmetrical electromagnetic field of QWR cavity to beam transfer is also analyzed in the paper.

Key words: QWR; HI-13 tandem accelerator; niobium sputtered superconducting cavity; physical design

HI-13 串列加速器升级工程中超导增能段由 4 个 QWR 铜铌溅射超导腔(以下简称 QWR 腔)组成,总的增能为 2 MeV/q。QWR 超导腔实质上是 1 段一端短路的同轴传输线,其内柱长度近似等于腔的最低谐振频率的四分之一波长。

升级工程中的 QWR 腔设计指标要求

QWR 超导腔在馈入功率为 7 W 时 QWR 腔的平均加速梯度好于 3.5 MV/m,同时 4 个 QWR 腔的谐振频率误差需好于 10 kHz。

1 同步速度 β_0 与工作频率 f_0

为得到合适的 QWR 超导腔同步速度 β_0 ,分析考察了不同情况下超导增能器的加速效率

(图 1)。

从图 1 可见, QWR 腔的同步速度 β_0 越小越有利于重离子的加速。

为了与低能聚束段的频率 6 MHz 相匹配, QWR 腔的频率选择为 6 MHz 的整数倍。原设计频率为 108 MHz、同步速度 0.08, 后综合考虑到加工、溅射等技术上的因素, 改为 144 MHz, 并同时确定两个加速间隙和腔体内柱的纵向尺寸为 60 mm × 60 mm × 60 mm, 相对应的同步速度 β_0 为 0.115。

2 QWR 腔的主要机械尺寸

QWR 腔主要机械尺寸的确定借助 3D 电磁场数值计算程序 CST-MWS 和通用有限元数值计算软件 ANSYS。

除上面提到的加速间隙和内柱的纵向尺寸外, QWR 腔的其余几个主要结构参数为: 内柱长度 L_{in} , 谐振腔的频率主要由 L_{in} 决定; 开路端间距 L_{cap} , 调谐器的调节精度和调节范围主要由 L_{cap} 决定; 束流孔位置 P_b , P_b 一定程度上影响平均加速梯度。

QWR 腔在常温下加工, 但它工作在 4.2 K 温度下, 为得到较为精确的几何尺寸, 降温过程中的材料收缩对频率的影响需仔细考虑。文献 [1] 列出北京大学 QWR 铜铌溅射腔在降温过程中频率变化的测量值, 在温度为 300、77、

9.2、4.2 K 时, 频率分别为 143.153、143.582、143.606、143.629 MHz。文献 [2] 中列出若干常用材料在降温过程中的线性膨胀变化趋势。由文献 [2] 可知, 铜材料在 77 K 时的收缩率为 3.07 mm/m, 4.2 K 时为 3.29 mm/m。

北京大学 QWR 腔内杆长度为 513 mm, 在 77 K 时, 内杆理论上收缩 1.58 mm, 在 4.2 K 时, 收缩 1.69 mm。当内杆长度为 513 mm 时, 内杆增长 1 mm, 频率减小 274 kHz, 与常温相比, 在 77 K 时, 北京大学 QWR 腔频率将增大 433 kHz, 4.2 K 时, 将增大 463 kHz, 这与测量数据吻合很好。

综上所述, QWR 腔要在低温下工作在 144 MHz, 常温下的设计频率选择为 143.55 MHz 则是比较合适的。

内杆长度和开路端间距对频率的影响示于图 2。内杆长度对 QWR 腔频率的影响很大, 长度变化 1 mm, QWR 腔频率变化 274 kHz; 开路端间距对频率的影响小得多。但开路端间距直接影响安装在开路端的机械调谐器的频率调节精度和调节范围, 所以, 两者必须放在一起考虑才能得到一较为合适的值。内杆长度和开路端间距分别选择为 512 和 73 mm。

腔的外壁厚度及内柱液氦孔道大小取决于整个腔体的机械稳定性和热传导性能, 需满足两个指标: 良好的热传导能力, 使得在仅冷却内

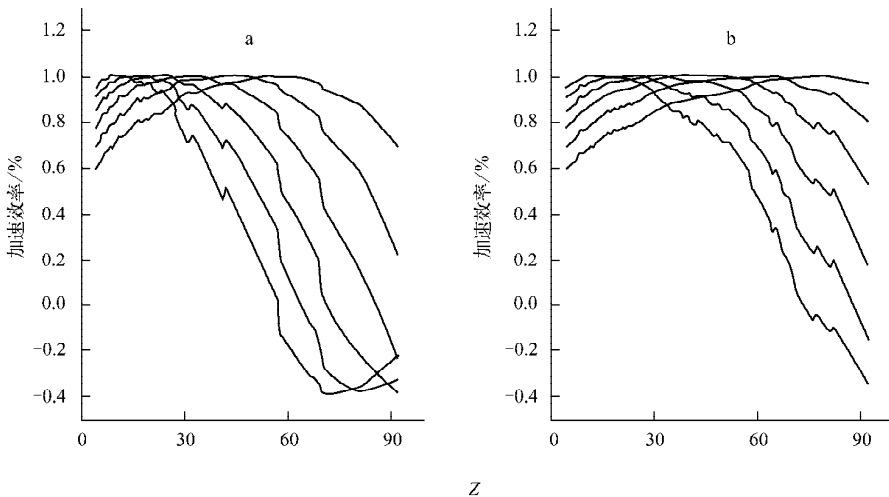


图 1 超导增能器对不同束流的加速效率

Fig. 1 Accelerating efficiency of superconducting booster for different beams

a——无串联加速器第二剥离器, b——有串联加速器第二剥离器
曲线左端从下至上 β_0 分别为 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10

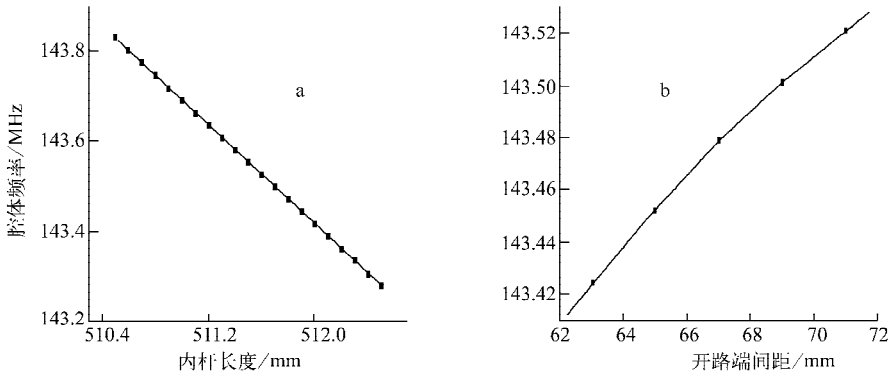


图2 内杆长度(a)、开路端间距(b)与腔体频率的关系

Fig. 2 Relationship between length of inner conductor(a), gap of open end(b) and frequency of cavity

柱情况下整个腔体均能处于同一温度;良好的机械强度,使得腔体在加工、安装和运行过程中均能保证良好的稳定性。

从意大利 LNL 的设计来看,内柱液氦孔道为 $\phi 40$ mm 时,可在较大功率情况下保证腔体的热稳定;外壁厚度为 1 cm 能很好满足机械稳定性和热传导要求。

液氦孔道的深度对谐振腔的机械本征频率有一定影响。图 3 示出液氦孔道深度对机械本征频率的影响。从图 3 可见,液氦孔道深度越深,机械本征频率越高,这意味着外部噪声对 QWR 的影响越小。

束流孔大小和位置也是值得考虑的参数。从束流运输的角度看,束流孔大便于束流运输,但束流孔越大,超导腔的分路阻抗则越小。束流孔选为 $\phi 20$ mm。

图 4 示出 QWR 腔中沿内导体表面的电场分布。很明显,当束流孔离内柱的半球顶越近,

越可能得到较高的加速电场。计算表明,当束流孔从原来位置向半球顶位置前移 2 cm 后,平均加速电场梯度提高近 7%。据此,束流孔的位置选在距离半球顶点 48 mm 处。

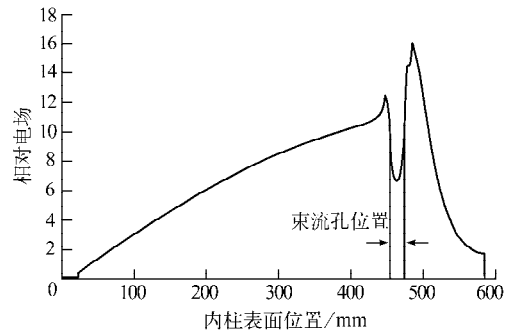


图4 沿内柱表面的电场分布

Fig. 4 Electric field distribution along surface of inner conductor

基于以上分析,得到 QWR 腔的主要几何尺寸(表 1)。

表 1 QWR 腔主要机械尺寸

Table 1 Main geometrical parameters of QWR cavity

几何参量名称	量值/mm
外导体内径	90
内导体外径	30
内柱长度	512
开路端间距	73
束流孔位置	距半球顶 48
液氦孔道半径	20
外导体壁厚	10

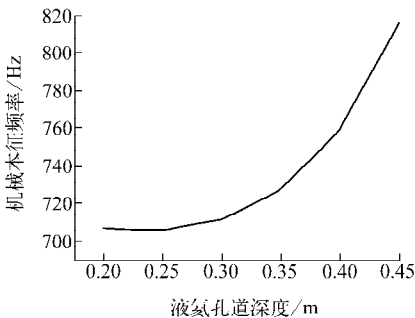


图3 液氦孔道深度对机械本征频率的影响

Fig. 3 Influence of liquid He channel on mechanical eigen-frequency

3 144 MHz OWR 腔的高频性能和束流动力学指标

144 MHz QWR 超导腔的主要高频性能列于表 2。腔内束流中心线沿束流运输方向上的电磁场分布示于图 5。

表 2 144 MHz 超导腔高频性能

Table 2 RF performance

of 144 MHz superconducting QWR cavity

参量	数值
室温下的谐振频率 f (MHz)	143.55
几何因子 G (Ω)	26.17
E_{\max}/E_{acc}	5.725
H_{\max}/E_{acc} (Oe/(MV/m))	115.43
储能因子 U/E_{acc}^2 (J/(MV/m) ²)	0.076

从图 5 可见, QWR 腔机械结构本身在 y 方向上的不对称导致了束流中心线上 y 向电场分量的不对称, 使得束流在穿越腔的过程中, 在 y 方向上将受到 1 个偏转力。这个偏转力在某些情况下需要认真对待, 如束流在无横向偏

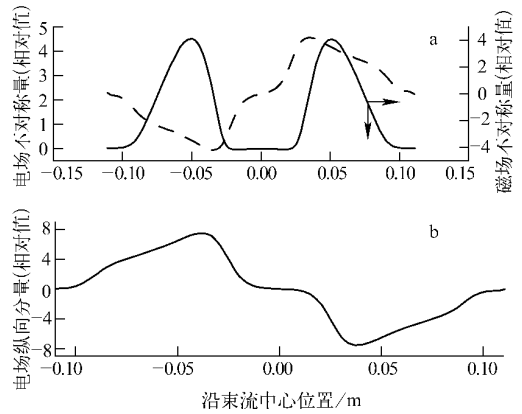


图 5 超导腔内束流中心沿束流方向电磁场分布
Fig. 5 Field distribution along beam center line of superconducting cavity

a——电磁场不对称量; b——电场纵向分量

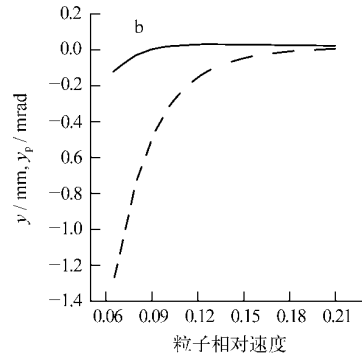
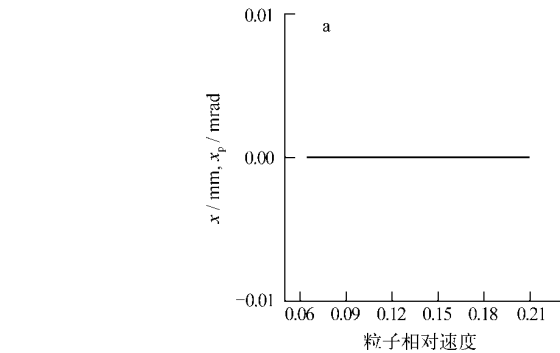


图 6 QWR 腔不对称场对束流运输造成的影响

Fig. 6 Effect of asymmetric field components of QWR on beam transport

a—— x 方向, 实线为 x , 虚线为 x_p ; b—— y 方向, 实线为 y , 虚线为 y_p

4 结论

QWR 腔工作在极低温, QWR 腔的设计频率需略低于工作频率。内柱长度对 QWR 腔的谐振频率起着决定性作用, 开路端间距则对机械调谐系统的频率调节范围和调节精度有着不可忽视的影响。此外, 束流孔的大小和位置对加速效率也有一定影响。

机械结构上的不对称性导致束流通过 QWR 腔时受到 y 向的偏转力, 从而影响束流

转修正元件时, 需穿越多个 QWR 腔体。图 6 示出质荷比为 3 时不同速度的粒子穿越单个 QWR 腔时在 x 方向和 y 方向受到的偏转作用。从图 6 可见, 粒子速度较低时, 偏转作用已不可忽视。

的高品质运输。所以, 当 QWR 腔在束线上大量运用时, 需仔细设计光路, 以消弱偏转带来的影响。

参考文献:

[1] 郝建奎. 铜铈溅射式超导 QWR 的研制及实验研究[R]. 北京: 北京大学重离子物理研究所, 2001.
[2] 张新民. 超导低温技术与粒子加速器[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 307.