

100MeV回旋加速器主磁铁设计与工艺技术研究*

张天爵^{1;1)} 储诚节¹ 钟俊晴¹ 吕银龙¹ 陈荣范¹ 杨建俊¹ 樊明武²

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (华中科技大学 武汉 430074)

摘要 中国原子能科学研究院目前正在建造一台100MeV强流回旋加速器,它加速负氢离子,通过剥离引出质子束,能量75MeV—100MeV,流强200 μ A.该回旋加速器的磁铁为紧凑型整体结构,采用4扇直边叶片,渐变气隙.将报告该磁铁的设计特点,数值模拟结果;磁性材料及成分偏析、缩孔等内部缺陷;机械结构设计、公差、变形;还将描述磁铁的工作进展.

关键词 回旋加速器磁铁 非理想磁场 磁性能退火 磁铁内部缺陷

1 引言

中国原子能科学研究院正在设计和建造的串列加速器升级工程要求在现有的串列加速器前端建造一台100MeV紧凑型回旋加速器^[1],该回旋加速器采用四个直边扇形的紧凑型结构,加速由多峰负氢离子源产生的负氢粒子,通过双向剥离引出方式来引出能量连续可变的强流质子,引出质子束流强为200 μ A,引出能量为75—100MeV连续可调.

该回旋加速器磁铁主要由上下盖板各1个、磁轭4个、磁极8个、镶条16根、上下芯柱各1个组成,其中盖板和磁轭采用铸件,其余部件采用锻件,主磁铁下半部分示意图见图1.磁铁整体高度为2.31m,磁铁盖板直径为6.16m,盖板厚度为0.775m,磁极的半径为2m,高度为0.765m,磁极间隙采用类椭圆轮廓面的变气隙结构.

2 主磁铁的设计

如果考虑提高轴向聚焦力以提高流强、考虑结构紧凑以降低功耗和造价,则需要尽量减小磁极间的气隙;然而,考虑到高频腔假D、对中线圈以及束流诊断装置等部件的安装,则需要足够高的磁极间气隙高度,综合考虑,经多种方案设计比选,气隙取中心区6cm,逐渐变化到外半径的大约5cm.

为了使磁场满足等时场并控制径向与轴向振荡频率,以及中心区的磁场负梯度、引导束流对中等要求,

需要反复调整励磁电流、磁极的类椭圆轮廓面曲线,同时也需调节磁极高度和角宽度、磁极的偏心量、磁极两边的镶条、芯柱的结构等.在磁铁设计中,特别注意保证束流在高端有足够高的轴向聚焦以避免Walkinshow共振,并重点控制由于负氢的洛伦兹剥离引起的束流损失小于0.3%.

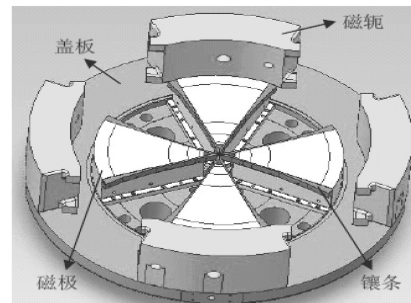


图1 主磁铁的几何结构图

上述磁铁设计的三维有限元数值模拟,采用了国内外三个不同的软件进行计算和结果比对验证.由于在调整磁场以达到多种束流动力学要求的过程中,在一些敏感区域的调节量非常小,为了提高有限元模拟计算的精度,采用合理的网格剖分技术和合理的有限单元是数值计算的关键.

3 非理想因素研究与热加工工艺要求

3.1 主磁铁非理想场的控制要求

在实际加速过程中,由于存在各种非理想磁场,

2008-01-07 收稿

* 国家自然科学基金(10125518)资助

1) E-mail: tjzhang@ciae.ac.cn

负氢离子将围绕加速平衡轨道振荡,影响束流品质.将非理想谐波场叠加到设计的磁场中,采用轨道跟踪的方法来研究判断非理想谐波场在不同半径范围上引起的束流变化情况,从而确定可允许的非理想谐波场的幅度大小.假定允许束流的循环发射度增长100%,通过束流跟踪,要求一次谐波幅值小于2Gs,二次谐波40Gs,一次、二次谐波的径向梯度分别不超过8Gs/cm和5Gs/cm.

3.2 主磁铁材料非理想因素对磁场的影响

为充分预测由于磁铁材料的不均匀性、内部缺陷等热加工的非理想因素引起的磁场偏差,有效降低主磁铁的设计、建造风险,我们基于有限元分析对这些问题进行了模拟和研究,对主磁铁材料提出技术要求.其中主要包括:大型磁铁铸、锻件的材料性能,热处理过程,化学成分、成份偏析等.

3.2.1 磁极和盖板磁导率不均匀对磁场的影响

为了确定磁极间磁化曲线的不一致性与中心平面的一次谐波的关系,以1008#钢的磁化曲线为参考,将四对磁极中的一对的磁导率减小1%,而另外三个的磁化曲线保持不变.数值模拟结果表明:磁场一次谐波的幅值的大小随半径增大,但一次谐波的幅值最大不超过8Gs,可通过垫补而有效减小. $\Phi 6160\text{mm}$ 、局部高达770mm的特大型盖板在铸造和热处理过程中可能会出现化学成分、结晶状态的较大不一致性,这些不一致性也将在中心平面的磁场产生一次谐波等非理想场.在磁场的数值计算中选择1/4盖板的材料为国产Q235,其余的3/4盖板的材料为1008#钢,此时,在中心平面的一次谐波幅值最大为4Gs.

根据上述数值模拟的基本结果,结合15年前30MeV回旋主磁铁和目前100MeV回旋加速器综合实验装置的主磁铁一次谐波垫补结果,提出了磁极材料之间磁导率的偏差允许范围为 $\pm 1.5\%$.对于盖板,考虑制造厂家的实际状况,提出如下要求:含碳量在小于0.12%的范围内,即8号钢国标,但在盖板的不同位置取样的C元素成分偏差值控制在0.02%—0.04%;Si含量 $\leq 0.37\%$;在热处理时,同圆周的温差小于 5°C .当出现一次谐波时,先通过镶条的垫补,以减小一次谐波,再配合调节磁轭上的谐波线圈,最终使得一次谐波的幅值满足要求.

3.2.2 主磁铁内部缺陷对磁场的影响

实际铸造、锻压后的磁铁内部往往含有小的气泡、夹杂等缺陷,这些缺陷将影响磁场分布,特别是磁极(锻件)面附近和盖板与磁极交界附近(铸件)的缺陷.因此,我们用椭球模型模拟不同位置、不同大小的缺陷对磁场的影响.将主磁铁分成三个区域(1区为

距离中心面100mm之内的磁极,2区为磁极其余部分,3区为盖板和磁轭)^[1]进行模拟计算,计算结果表明允许的超声波探伤缺陷见表1.

表1 主磁铁中各分区允许的缺陷

	1区(磁极, 芯柱, 镶条)	2区	3区
当量直径“ Φ ”	$\Phi 3\text{mm}$	$\Phi 6\text{mm}$	$\Phi 8\text{mm}$
在200mm \times 200mm区域,少于5个当量直径“ Φ ”	$\Phi 2\text{mm}$	$\Phi 4\text{mm}$	$\Phi 6\text{mm}$

注:其中铸件探伤起始灵敏度为 $\Phi 4\text{mm}$,盖板外层二分之一厚度允许 $\Phi 12\text{mm}$ 单个缺陷.

当铸件内部有局部缺陷超标时,可用同材质焊条补焊,在盖板和磁轭内部无法补焊的位置,可通过磁轭的垫补线圈来调节减小缺陷带来的影响.

3.2.3 主磁铁磁性能退火对磁场的影响

为获得好的磁性能,主磁铁必须在铸、锻造完成后进行磁性能退火.铸、锻件经磁性能退火后,铁素体的晶粒大小发生改变,同类产品的实验研究结果表明铁素体的晶粒越大,导磁性能越好.通常可通过特定的热处理方法^[2]得到大的铁素体晶粒.因此,根据主磁铁的结构形状、热处理炉的加热和控温特性,我们进行热处理的温度场动态有限元数值模拟,确定了如图2所示的磁性能热处理曲线.

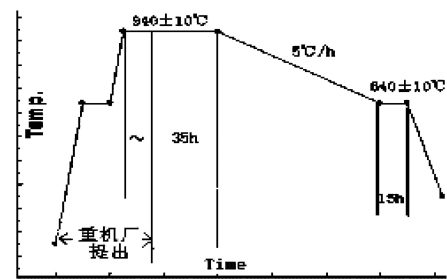


图2 主磁铁热处理过程曲线

4 机械设计、结构变形与加工公差

4.1 主磁铁的机械设计和磁铁结构变形

主磁铁的机械结构设计是根据目前国内外的原材料生产和国内机械加工能力来确定的,通过对5种结构方案的优点和缺点进行比较和分析^[3],最终决定采用整体盖板方案.并且,由于主磁铁上半部受本身重力约160吨、电磁吸力420吨、真空压力180吨,为减小变形,优化设计了不等高盖板,见图3,与等高盖板相比,不增加盖板的铸件重量,而磁铁变形减少了 $\sim 35\%$,由于真空压力引起的相对变形减少约46%.

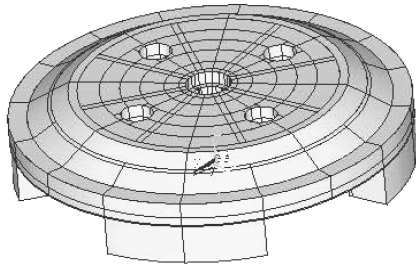


图 3 整体盖板优化后的方案示意图

4.2 主磁铁加工和装配公差控制

主磁铁加工和装配过程存在的公差, 也将在磁极的中心平面上产生非理想场. 根据有限元数值模拟和解析分析等手段, 并参照 TRIUMF, PSI, GANIL, IBA 等单位的回旋加速器磁铁的公差要求, 对 100MeV 回旋加速器磁铁的公差提出如下要求:

- ① 磁极安装后, 磁极间气隙可以在理论设计的曲面上平移 $\pm 0.1\text{mm}$, 并要求磁极面加工轮廓度为 0.1mm ;
- ② 允许 8 扇磁极的角度同时出现相同的公差; 但对于

不同一性的偏差, 要求严格, 包括磁极大小和装配后的谷区大小, 要求在外半径(半径 2m) 处弧长公差小于 0.1mm , 这相当于角度公差为 $\pm 0.00286^\circ$; 上下磁极对齐, 装配后, 在外半径处公差小于 0.15mm , 小半径处公差小于 0.1mm .

5 结论

100MeV 回旋加速器主磁铁尺寸大, 技术要求高. 根据物理设计结果, 参照国内外有关回旋加速器的技术要求, 考虑各重型机械厂的装备能力和以往业绩, 研究设计了 100MeV 回旋加速器主磁铁的结构, 制定了适合该磁铁的热加工技术要求和冷加工与装配的公差控制要求. 该主磁铁目前正在加工建造之中, 磁极锻件原材料已从法国 Industeel 公司订货, 2007 年 11 月份运抵天津港; 中信重型机械公司负责主磁铁盖板和磁轭铸件毛坯件的冶炼和粗加工, 2008 年 4 月完成热加工和粗加工工作.

参考文献(References)

1 ZHANG Tian-Jue et al. Nuclear Instruments and Methods

in Physics Research B, 2007, **261**: 25—30

2 Badeau J P et al. Proc. of EPAC, 1994. 2295

3 CHU Cheng-Jie et al. Proc. of ICC, 2004. 393

Magnet Design and Engineering Technique Study on a 100MeV Compact H-Cyclotron*

ZHANG Tian-Jue^{1,1)} CHU Cheng-Jie¹ ZHONG Jun-Qing¹ LÜ Yin-Long¹
CHEN Rong-Fan¹ YANG Jian-Jun¹ FAN Ming-Wu²

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A 100MeV compact high intensity H-cyclotron is under design and construction at CIAE which will provide a 75MeV—100MeV, 200 μA proton beam. The main magnet of this cyclotron adopts an integrally compact structure with a fixed field and four sectors, while the hill gap is constantly changeable. This paper reviews the design features of the magnet, numerical simulation results, the inner defects of the magnet including the carbon content segregation and shrinkage porosity, factors related to mechanical design including the tolerance and deformation. The latest progress will also be reported in this paper.

Key words cyclotron magnet, imperfection field, magnetic anneal, inner defects of the magnet

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10125518)

1) E-mail: tjzhang@ciae.ac.cn