

350MHz 强流质子 RFQ 加速器工艺腔的 研制与测量*

郭之虞^{1;1)} 方家驹¹ 郭菊芳¹ 李纬国¹ 于茂林¹ 高淑丽¹
关遐令² 傅世年² 欧阳华甫² 许文武² 徐韬光²

1 (北京大学重离子物理研究所 重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100093)

摘要 为研究强流质子 RFQ 加速腔的设计与加工工艺,研制了一台全尺寸无氧铜工艺腔. 本文介绍了其物理设计与机械设计、机械加工与钎焊工艺研究及其高频性能的测量和调节. 经调节,RFQ 工艺腔可以达到较为理想的电场分布,其 4 个象限电场分布的一致性和平整度均能满足要求,二极场分量也足够小.

关键词 质子加速器 射频四极场(RFQ) 加速器 工艺腔

1 引言

强流质子射频四极场(RFQ)加速器是当前国际上加速器研究的热点之一,这在很大程度上源于高功率质子加速器(HPPA)发展的推动,因为 RFQ 是在离子源后的首个低能强流加速段的最优加速结构^[1,2]. 近年来国际上对于高功率质子加速器产生了巨大的兴趣^[3],它们一般采用 1GeV 左右能量、平均功率达数 MW 到数十 MW 的强流质子束轰击重金属靶,以取得可供利用的强度极高的散裂中子流,用于驱动次临界反应堆洁净核能系统、处理核废料、散裂中子源、中微子研究等. 美国、欧洲、日本、韩国等都开展了这方面的研究,我国从 1999 年起也开始了加速器驱动洁净核能系统(ADS)的基础研究^[4].

强流质子 RFQ 加速器一般可把质子束加速到几个 MeV,质子束平均流强可高达几十乃至上百 mA,负载因子高至 10%—100%,要求很高的束流传输效率和长时间无障碍的高可靠运行. 这些都对

加速器的束流动力学研究、腔体与部件的设计、加工和安装的精度、有效的冷却等提出了很高的要求. 由于在各加速段中 RFQ 加速段的质子速度最低,故其空间电荷效应最严重、对整个加速器组合中束流性能的影响最大,因此各国的研究项目都把 RFQ 作为最先着手研究的重点. 例如美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)为开展这种强流质子 RFQ 的研究,曾专门研制了一台称为“低能展示加速器”(LEDA)的 350MHz, 6.7MeV 质子 RFQ^[5]. 这类强流 RFQ 在技术、工艺上也是难度很大的. 它不仅要求加工精度高(20—30 μ m),而且要解决大发热量腔体的有效水冷问题. RFQ 多由经钎焊的无氧铜腔体构成,由于焊接引起的热变形对腔体的制造精度、真空密封等均有较大影响,因此它是腔体制造的一大难点. 为了获取在强流质子 RFQ 精密加工、焊接、打孔等难点问题上的经验,各国在研制强流质子 RFQ 时,除进行束流动力学和腔体物理的研究外,还要进行 RFQ 工艺腔的研究,并对它进行测量. 本工作的研究目的是通过研制一节 RFQ 工艺腔,验证

2003-11-13 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目资助

1) E-mail: zhyguo@pku.edu.cn

总体设计的合理性,研究工艺实施的可行性.该工艺腔亦可用于冷模测量,检查其高频性能及主要物理参数.

2 RFQ 工艺腔的设计

2.1 物理设计

我国的 ADS 项目计划研制一台 3.5MeV 强流质子 RFQ 加速器.根据 3.5MeV RFQ 束流动力学设计其腔的长度应为 4.75m,因此计划采用 4 节 1.188m 长的四翼型 RFQ 腔组成,每两节腔组成一段,两段间采用通用的电极端部间的电容及耦合环耦合,以提高腔体高频性能的稳定度.该 RFQ 的主要设计参数见表 1^[6].

表 1 3.5MeV 质子 RFQ 加速器主要参数

参数	单位	数值
工作频率	MHz	352.2
注入能量	keV	75
输出能量	MeV	3.5
峰值流强	mA	60
负载因子	%	6—100
腔体长度	m	4.75
最大表面电场	MV/m	33
峰值束流功率	kW	210
峰值腔耗功率	kW	420
峰值高频总功率	kW	630

3.5MeV 质子 RFQ 的工作频率、加速能量和四翼腔型等的选取,都与其基于 352MHz,1.2MW 速调管的射频功率源有关,而四翼型腔体的具体结构:正八边形腔体、调谐活塞、真空抽气孔、高频馈入口等则参照了国际上 352MHz 强流质子 RFQ 腔的主流型结构.因此一节 1.188m 长的无氧铜腔应是工艺腔研制的基础,对它的加工、安装、焊接、调节、测量,应成为对工艺腔研究的基本内容.该工艺腔入口端设计了活动电极头,出口端盖板上设计了活动耦合环,以便更换不同形状和尺寸的电极头和耦合环,测量其对高频性能的影响.

2.2 机械与工艺设计

机械设计根据物理设计进行,并充分考虑了材料供应的可能及现场工艺条件.RFQ 腔加工的难点主要有:

1) 加速腔长度为 1188mm,系封闭式不可拆结

构,四电极组成的束孔直径精度及在全长范围内各断面中心的同轴度精度均为 $\pm 0.02\text{mm}$,其总体精度要求较高.

2) 所用无氧铜材料的纯度高(99.97%),其导电、导热、切削及钎焊的性能均良好,但材料的韧性大、塑性大,消除应力后材质更软,在加工过程中易于变形.

3) 钎焊为热加工工艺,又是加工的终结工序.大的实体工件在钎焊中易发生复杂的变形,使机械加工的精度受到影响.

考虑到加工误差对电参数的影响与结构长度的平方成正比,加工难度亦随结构长度增加而变大,且机械加工和钎焊引起的变形均与腔体长度有关,因此选择工艺腔长度与实际加速腔相同.

考虑到研制件具有单件生产的特点,故在进行机械设计时从装配工艺出发,选用“修配调整法”以保证装配尺寸链的封闭环精度,从而使各组成环的加工精度适当降低,以降低加工难度和对加工设备的苛求.如束孔精度要求 $\pm 0.02\text{mm}$,而电极头圆弧的加工精度则定为 $\pm 0.03\text{mm}$,且在数控铣床上用指状圆球头铣刀同时加工圆弧面及两侧面,以保证弧面的准确性及与侧面的对称性.又如水平电极两配合面的终加工尺寸是由上、下山字形电极调整好束孔直径的尺寸精度后,按其两配合面实际需要尺寸确定的.

3 RFQ 工艺腔的加工与工艺研究

3.1 机械加工工艺研究

在加工过程中考虑到材质变形对工件加工尺寸、形状位置公差及表面粗糙度等的影响,特别重视了材料消除应力的工作,在加工的不同阶段均认真进行了稳定化处理.在精加工阶段对数控铣床的精度、操作工人的技术等级、冷却润滑液以及切削规范等都做了严格规定,并设计了 5 套专用工夹具.

零件加工完成后经过了两次总装,其中第 2 次总装是在钎焊前做了除油清洗及钝化处理后的.两次总体组装测量结果如表 2 所示.测量结果表明机械加工是成功的,包括电极的成型加工,腔体组装工艺,装配精度以及深孔加工试验,均达到了图纸设计的基本要求,也证明了工艺设计及加工方法是可靠与成熟的.

表 2 两次总体组装测量结果

单位:mm

测量项目	测量对象	指标	第 1 次总装	第 2 次总装	测量方法
电极全长直线度偏差	1 号电极	0.04	0.02	0.013	以电极头圆弧最高点素线为准
	3 号电极		0.02	0.024	
	5 号电极		0.03	0.034	
	7 号电极		0.02	0.027	
束孔下半圆中心线同轴度偏差	1/4 全长处	± 0.02	0.013	0.017	在组装三电极情况下测量
	1/2 全长处		0.006	0.016	
	3/4 全长处		0.007	0.019	
四电极不对称度误差	入口	0.05	0.03	0.07*	各电极间置 $\phi 18$ 圆柱测外尺寸
	出口		0.03	0.04	

* 事后发现有一活动电极松动,导致结果不准,但基准已变,无法补测。

3.2 钎焊工艺研究

无氧铜钎焊可用氢气炉或真空炉,大型工件用氢气炉的工艺相对简单。考虑到北京地区的条件,选用真空炉钎焊。主体焊料选用 AgCu28,其熔点和流点均为 779℃,二级焊料选用 AgCu24-25(含银),其熔点及流点均在 720℃左右。焊接结合面表面粗糙度定为 0.032mm,钎缝间隙取 0.02mm 左右。

由于工件体积大、热容量大且厚度不均匀,为了在钎焊进程中控制温度,在工件表面放置了钎料丝和片,以便观察样件熔化程度。整个钎焊过程分为加热升温、保持、缓慢降温 and 自然冷却 4 个阶段。钎焊后检查各处焊料已熔化,长方向钎缝已明显焊透,工件外观光亮,上法兰面焊料有外流现象。经真空检漏,长方向的 8 条焊缝未发现漏,但上法兰约 1/4 圆周上有多处漏,下法兰有一处小漏。其原因首先是炉内温度场不够均匀,顶部温度偏高,致使上法兰有过热现象。其次在观察到样件熔化后保持时间偏长,因工件热容量大此时温度继续上升,致使上法兰焊料超过流点过多而造成外流。而下法兰处则温度偏低焊料扩散不足。

焊后变形情况比较复杂,经检查在轴向及径向均有变形。轴向中间微鼓,且平面稍有扭变。束孔径向尺寸在入口处呈长圆形,长径超上限 0.04mm,短径未超限。出口均匀收缩,超下限在 0.10—0.11mm 之间。四电极头之间的间隙不对称度也稍有改变,入口处的最大间隙在第四象限(1—7 电极间),超上限 0.125mm,其余间隙未超限。出口处的最小间隙在第四象限,超下限 0.12mm,其余间隙未超限。从整体看,入口处因有可换活动电极头变形较大,出口处为整体结构故变形相对均匀。第四象限两电极间隙在入口处和出口处超差方向相反,说明电极在长度方向上有扭曲变形存在。

从钎焊结果看,对钎料形状、料槽形式、炉温控制等问题还需进一步研究和实验,钎焊工艺还有待进一步完善,特别是选择钎焊炉时恒温区要有一定裕量。图 1 为钎焊后的 RFQ 工艺腔。

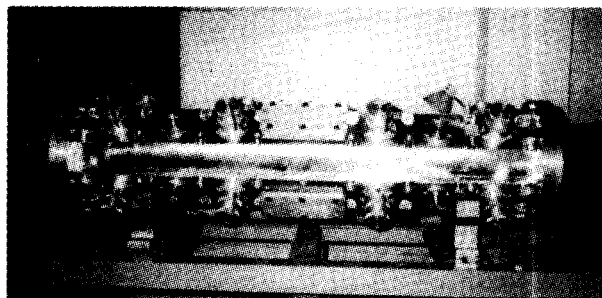


图 1 钎焊后的 RFQ 工艺腔

4 RFQ 工艺腔高频性能的测量和调节

对工艺腔高频性能的测量和调节包括对四极场和二级场的频率、Q 值与近轴 4 个象限中沿轴向电场分布的测量,以及通过调谐块、调谐活塞对它们的调节,使之满足束流动力学设计的要求。工艺腔的高频性能用网络分析仪 HP8753C 测量,网络分析仪通过 GPIB 由计算机控制,在 LabVIEW 平台上完成测量、数据获取与分析处理^[7]。电场分布的测量采用小球微扰法,在测量前以 RFQ 束轴为基准对小球驱动测试台先进行机械准直。电介质小球直径 6mm,分别在 4 个象限中紧贴相邻两电极的顶部,由电机拉动引线沿轴向移动。调节 4 个象限中的 16 个金属调谐活塞进出腔的位置可调节腔中场的分布与频率。当活塞端面与腔的内表面取平时作为位置零点,伸入腔内时为正值。活塞位置的调节范围为

+ 30mm 至 - 15mm.

当活塞位置皆取 0 时, 测量 RFQ 工艺腔与用 HFSS 程序模拟计算得到的四极模频率、Q 值与二极模频率见表 3, 相应的四极场与二极场的实测场分布分别见图 2 与图 3. 可看出第四象限中的四极场整体偏低, 且与第二象限的场相差很大, 这与图 3 中相应二极场高达 58% 是一致的. 同时第四象限中的场两端偏高, 平整度很差.

表 3 工艺腔高频参数测量与模拟
计算值(活塞位置为零时)

高频参数	单位	测量值	HFSS 模拟值
四极模频率	MHz	350.855	351.379
四极模 Q 值*		5963	9271
二极模频率	MHz	348.20	347.805

* 测量值为有载 Q 值, 模拟值为无载 Q 值. 尚未测量耦合系数, 无法直接比较.

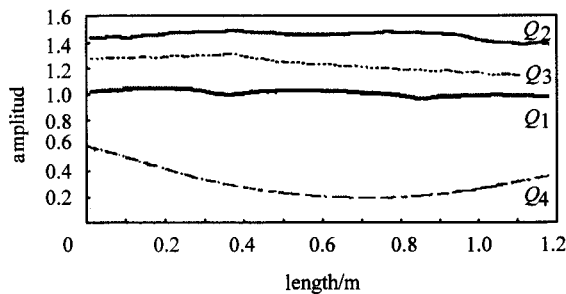


图 2 工艺腔调节前的四极场分布(所标数字为象限)

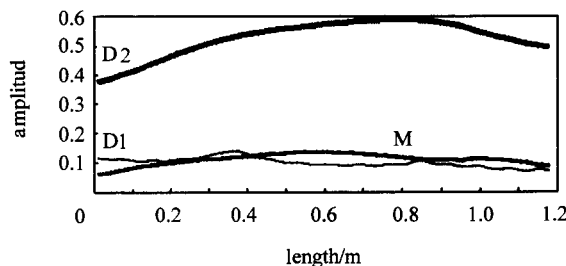


图 3 工艺腔调节前的二极场分布(M: 单模; D1, D2: 二极模)

根据 RFQ 腔的等效传输线与耦合腔链理论, 工艺腔第四象限的场强与场分布可以通过提高该象限的频率与两端的局部频率得到改善. 分析与计算表明在这种情况下仅凭调节活塞是不够的, 因而首先在第四象限两端沿腔壁加入大小不同的多个调谐金属块, 在此基础上再通过活塞进行调节, 最后使第四象限的场分布平整度大为改善, 且与其他 3 个象限的场比较一致, 4 个象限的场分散度小于 $\pm 5\%$; 场

平整度好于 7%, 二极场也减小到 5% 以内, 分别见图 4 与图 5.

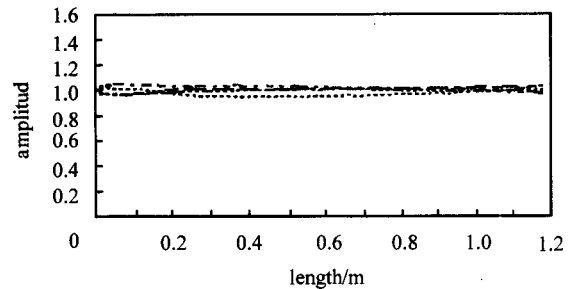


图 4 工艺腔调节后的四极场分布

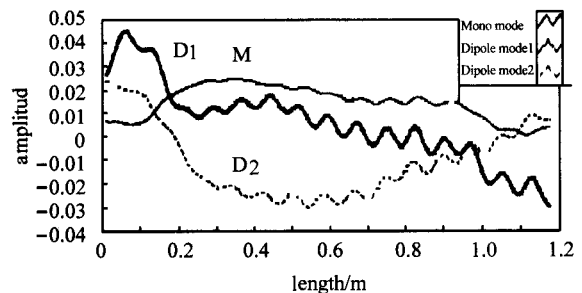


图 5 工艺腔调节后的二极场分布

第四象限的电场异常现象与焊接后的工艺腔机械测量数据是一致的. 由于钎焊引起的电极形变使第四象限腔空间(特别是近轴区)与其他 3 个象限产生较大的不一致, 因此需要用调谐块进行补偿.

5 结论

强流质子 RFQ 加速器的机械加工与钎焊工艺是其研制的关键问题之一. 采用修配调整法可以有效地保证机械加工的精度, 在加工的不同阶段分别进行稳定化处理以消除材料应力也是十分必要的. 对钎焊工艺而言, 整个工件的温度均匀性、钎料形状、钎料槽形式、炉温控制等问题对保证钎焊质量是重要的. 对工艺腔高频性能测量和调节的初步研究表明, RFQ 工艺腔的物理与工艺设计基本符合要求, 测量与调节方法也是可行的. 经调节, RFQ 工艺腔可以达到较为理想的电场分布, 其 4 个象限电场分布的一致性和平整度均能满足要求, 二极场分量也足够小. 在本工作的基础上, 有必要进一步开展 RFQ 工艺研究, 特别是钎焊工艺的研究.

参考文献 (References)

- 1 CHEN Jia-Er, FANG Jia-Xun. Progress of Natural Sciences, 2001, 11(11): 1121 (in Chinese)
(陈佳洱, 方家骕. 自然科学进展, 2001, 11 (11): 1121)
- 2 Schneider J D. Overview of High Power CW Proton Accelerators. Proc. of EPAC 2000. 118
- 3 Lagniel J M. High Power Proton Linac for a Multi-user Facility. Proc. of EPAC 2000. 945
- 4 GUAN Xia-Ling, FU Shi-Nian, FANG Jia-Xun et al. The Activities of HPPA Technology Related to ADS in China. Proc. of APAC 2001. 138.
- 5 Smith H V et al. Commissioning Results from the LEDA RFQ. Proc. of EPAC 2000. 969
- 6 FU Shi-Nian, GUAN Xia-Ling, OUYANG Hua-Fu et al. R&D Status of a 3.5MeV RFQ Accelerator for ADS Study in China. Proc. of Linac 2002. 155
- 7 FU Shi-Nian. HEP & NP, 2002, 26(7):735 (in Chinese)
(傅世年. 高能物理与核物理, 2002, 26(7):735)

**Development and Measurements of a Technological Cavity for
350MHz High Current Proton RFQ***

GUO Zhi-Yu^{1;1)} FANG Jia-Xun¹ GUO Ju-Fang¹ LI Wei-Guo¹ YU Mao-Lin¹ GAO Shu-Li¹
GUAN Xia-Ling² FU Shi-Nian² OUYANG Hua-Fu² XU Wen-Wu² XU Tao-Guang²

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

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100093, China)

Abstract A full-dimension oxygen-free-copper technological cavity was developed for the study on the design and the technological process of a high-current proton RFQ. The physical and mechanical design, machining and brazing technological studies, and RF performance measurements and tuning were introduced. An ideal field distribution could be reached by tuning cavity, whose consistence and smoothness of the field distributions in the four quadrants meet the demands of use. Its dipole components are small enough, too.

Key words proton accelerator, RFQ accelerator, technological cavity

Received 13 November 2003

* Supported by Major State Basic Research Development Program

1) E-mail: zhyguo@pku.edu.cn