

文章编号: 2095-4980(2021)01-0166-04

模拟离子源注入型 IH 加速器研制进展

赵良超, 石金水, 何小中, 庞 健, 马超凡

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 离子源注入型交叉手指型横电模(IH)加速器有望发展成为一种紧凑的、低功耗的离子加速器。中国工程物理研究院流体物理研究所研制了一台将质子束从 0.04 MeV 加速到 2.0 MeV 的离子源注入型 IH 加速器, 目前已经完成了该加速器的设计加工和束测平台搭建, 并进行了初步的束流测试试验。实测束流传输效率为 32.77%。束流实验结果与设计参数基本吻合, 证实了离子源直接注入型 IH 加速腔加速低能粒子的有效性和可行性。

关键词: 离子源注入型; IH 加速腔; 交变相位聚焦; 低能加速器

中图分类号: TN99

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019414

Development of ion source injected IH mode Linac

ZHAO Liangchao, SHI Jinshui, HE Xiaozhong, PANG Jian, MA Chaofan

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Ion source injected Interdigital H(IH) mode Linac has great potential to accelerate high current particle beam with high efficiency and low power consumption. One prototype of this accelerator was developed by Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics. This accelerator was designed to accelerate protons from 0.04 MeV to 2.0 MeV with an IH cavity. The accelerator now has been constructed and tested. Beam test results show that the transmission is about 32.77%, and all parameters are consistent with the designed values, which proves the effectiveness and feasibility of this kind of accelerator.

Keywords: ion source injected; IH cavity; alternating phase focusing; low energy accelerator

IH 加速结构是一种 $\beta\lambda/2$ 型加速结构, 其显著优点是具有较小的腔体尺寸和较高的分流阻抗, 有效分流阻抗可以达到 200 M Ω /m。加速离子束所需高频功率与常规漂移管直线加速器(Drift Tube Linac, DTL)腔相比, 可降低一个量级。近年来全球多个加速器研究机构均成功采用 IH 加速腔取代原有的 DTL 加速腔, 取得了较好的效果^[1-3]。但这些 IH 加速腔在设计上需要射频四极加速器(Radio Frequency Quadrupole, RFQ)作为注入器, 以提高入口能量。RFQ 昂贵且功耗很高, 限制了 IH 加速腔的通用性。离子源注入型 IH 加速腔试图将加速腔的入口能量从几百 keV/u 降低到几十 keV/u, 直接连接离子源使用, 不但降低了成本, 且充分发挥出功耗低的优势。这种类型的加速器能够在长度为 1 m 的腔体内产生 1~2 MeV/u 的离子束, 功耗仅几十千瓦, 在一些特定的应用环境, 如正电子放射断层造影术同位素制备、快中子照相、核材料探测、质子激发 X 射线发射分析(Particle Induced X-ray Emission, PIXE)中, 具有很好的应用前景。国际上已有几个研究所对这种新型的加速结构做了一些探索性研究, 但结果均不理想^[4-6]。

鉴于离子源注入型 IH 加速腔的应用前景以及目前尚未出现突破性成果的现状, 流体物理研究所研制了一套直接注入型 IH 加速腔, 以验证该结构具体可达到的性能指标。

1 IH 加速腔束流动力学设计

研制的离子源注入型 IH 加速腔的结构为: 质子束由电子回旋共振(Electron Cyclotron Resonance, ECR)源的直流高压(40 kV)引出后直接注入到加速腔内, 经过 35 个加速单元加速后引出, 能量达到 2.0 MeV, 腔体总长

收稿日期: 2019-10-20; 修回日期: 2019-11-27

作者简介: 赵良超(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事加速器物理及加速器技术研究。email:845074159@qq.com

1.078 m。加速腔采用交变相位聚焦结构，在束流加速的同时实现束流的横向聚束和纵向聚束，其电场分布和相位分布如图 1 所示。模拟计算束流包络和能量增长如图 2 所示，束流包络控制在漂移管孔径之内，约 38% 的束流通过传输，36.4% 的束流达到设计能量^[7]。

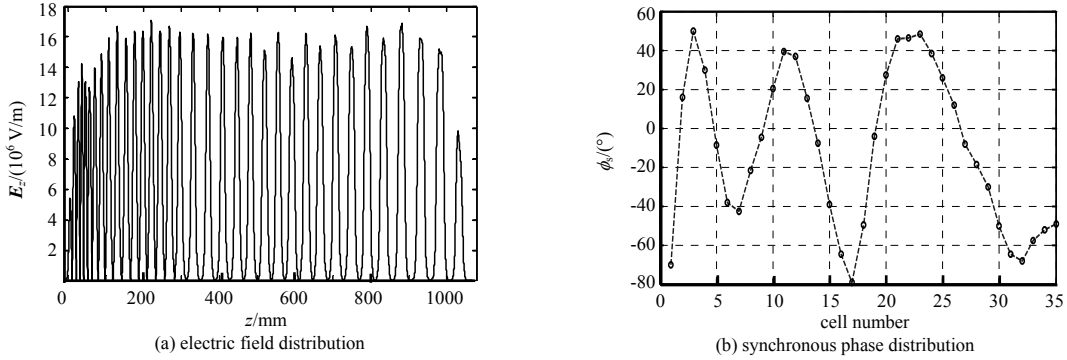


Fig.1 Electricity and synchronous phase distribution along the cavity

图 1 加速腔内电场分布和相位分布

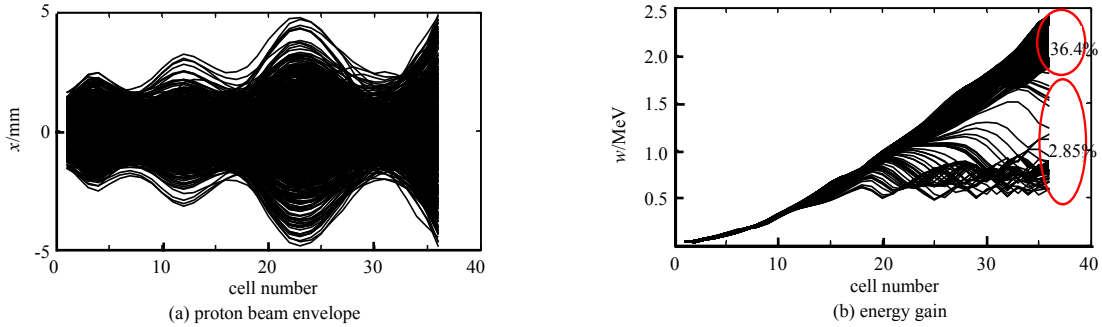


Fig.2 Proton beam envelope and energy gain

图 2 束流包络和束流能量增长

2 加速腔结构设计和加工

该加速腔的漂移管采用一体成型的机械加工方式，加工完成后分别焊接在上下翼板上。翼板分为上下两块，通过螺栓安装在筒壁上，如图 3 所示。为减少高频损耗，在翼板和腔壁之间使用了金属弹簧圈改善高频电接触。翼板和漂移管的材质均为无氧铜，外筒的材质为不锈钢镀铜。漂移管焊接在翼板上，漂移管的位置需要精确控制，保证其误差小于 0.1 mm。在 100% 的腔体 Q 值下，所需的高频功率为 28 kW，实际加工后的腔体通常能够达到 60%~70% 腔体 Q 值，实际所需的高频功率在 45 kW 左右。腔体的主要设计参数如表 1 所示。

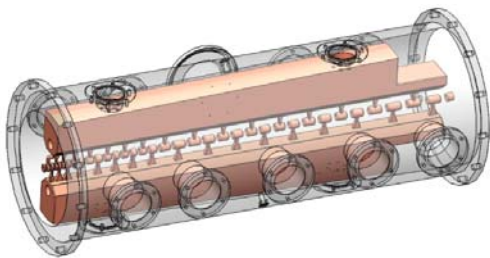


Fig.3 Cavity model of ion source injected IH accelerator
图 3 离子源注入型 IH 加速腔结构图

表 1 加速腔主要参数列表
Table1 Main parameters of the IH cavity

parameter	value	parameter	value
cavity length/mm	1 077.97	unload Q factor	11 151
DT number	36	shunt impedance/(MΩ/m)	365
gap number	35	cavity loss/kW	28
DT bore radius/mm	5.00	injection energy/keV	40
DT outline radius/mm	10.00	extraction energy/MeV	2.0
DT length/mm	5.80—35.60	beam transmission/%	38
cavity bore radius/mm	143.00—169.00	duty factor/%	10

3 功率馈入与束流测试

腔体加工完成后进行冷测和调谐，场分布基本达到设计值，误差小于 2.5%，谐振频率误差约 0.06 MHz，具备进行功率实验和束流实验的条件^[8]。腔体功率实验和束流实验平台由 ECR 源、高频功率源、IH 加速腔、辅

助系统组成，如图 4 所示。在 IH 加速腔的入口和出口分别设置了法拉第筒以观测束流，其中入口端的法拉第筒可以升降。

功率馈入测试较为顺利，经过短暂的腔体老练即可馈入约 45 kW(对应 Q_0 为 7 600)的高频功率。当增加功率至 50 kW 以上时，开始出现高压打火情况。

IH 加速腔与 ECR 源在连接时进行了严格的对中，因此在 ECR 源开启后腔体出口端即可测量到直通引出的 40 keV 束流，流强约 30 μ A。在馈入高频功率后，束流先增大，后减小，最大值约 53.33 μ A。束流增大的原因是当加速电压在一定值时，产生聚束效果，将直流束聚焦成纵向具有一定长度的束团。继续馈入高频功率至设计值，观察到 17.5 μ A 的质子束，对应约 32.77%的传输效率。束流信号采用示波器观测，如图 5 所示(通道 1 为入射波功率信号，通道 2 为腔内功率探针信号，通道 3 为反射功率信号，通道 4 为束流法拉第筒信号)。

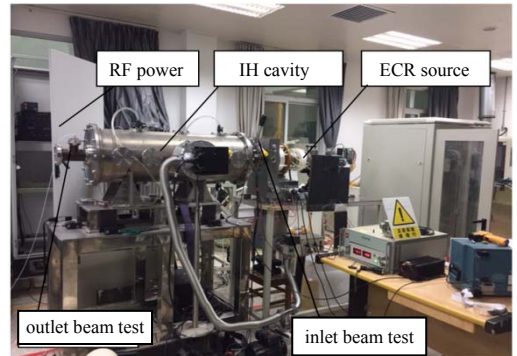


Fig.4 RF power and beam test platform 图 4 离子源注入型 IH 加速腔功率与束流测试平台

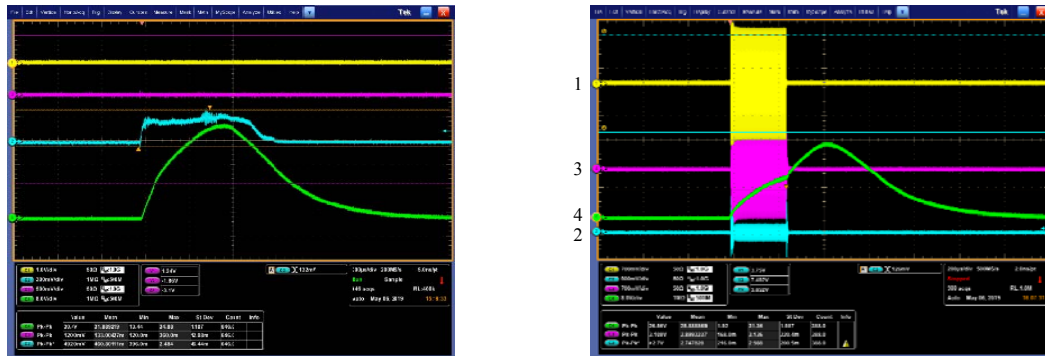


Fig.5 Beam acceleration test(left: without RF power; right: with 45 kW RF power) 图 5 束流传输测试(左:无功率,右:功率 45 kW)

为标定传输至腔体出口处的束流能量，开展了质子束的能量衰减实验。采用不同厚度的铝膜贴在闪烁体前，观测质子束穿透铝膜后引起的闪烁体发光现象，根据铝膜的厚度来标定质子束的最低能量。计算得到不同能量的质子在铝中的穿透深度，0.9 MeV 的质子可以穿透 12 μ m 厚铝膜，2.0 MeV 质子可以穿透 40 μ m 厚铝膜。由于高频功率源故障，目前只完成了 12 μ m 厚铝膜穿透实验，其闪烁体成像结果如图 6 所示。可以看到，在设计功率下，束流经过加速，穿透了 12 μ m 铝膜，即其能量至少达到了 0.9 MeV。

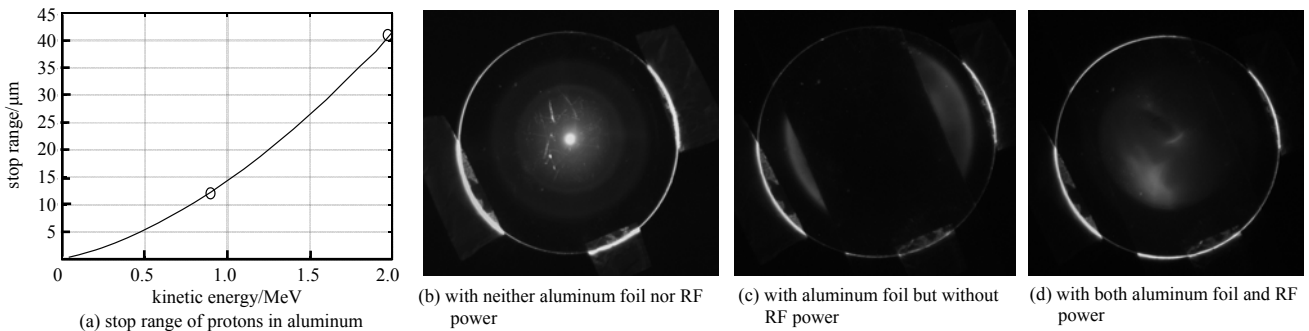


Fig.6 Image of protons penetrating 12 μ m aluminum foil 图 6 12 μ m 铝膜穿透成像

4 结论

初步测试结果表明，所研制的离子源注入型 IH 加速器功率馈入达到设计值，有束流通过加速腔并获得有效加速，其束流能量至少大于 0.9 MeV，其传输效率达到 32.77%，所需高频功率为 45 kW，与设计值基本吻合。

该加速器的研制和测试结果说明离子源引出的粒子束直接注入到 IH 加速腔进行加速聚焦是有效的、可行的。相对于传统的 RFQ 加速结构，这种结构更加紧凑，功耗更低，更适用于对束流品质要求不高的一般应用场景。

参考文献：

- [1] IWATA Y,YAMADA S,MURAKAMI T,et al. Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007,572(3):1007–1021.
- [2] YAMAMOTO K,TANAKA H,HARADA H,et al. Experimental verification of an APF linac for a proton therapy facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:Beam Interactions with Materials and Atoms, 2011, 269(24):2875–2878.
- [3] WANG Zhijun,HE Yuan,WU Wei,et al. Design optimization of the APF DTL in the SSC-linac[J]. Chinese Physics C, 2010,34(10):1639–1642.
- [4] LU Liang,HATTORI T,ZHAO Huanyu,et al. High power test of an injector linac for heavy ion cancer therapy facilities[J]. Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams, 2015(18):111002-1–111002-8.
- [5] LU Liang,HATTORI T,HAYASHIZAKI N. CW operation on APF–IH linac as a heavy ion implanter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010,622(3):485–491.
- [6] YAMAMOTO K,HATTORI T,MATSUI S,et al. Acceleration test of APF–IH type implanter[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B, 2002,188(1–4):229–232.
- [7] ZHAO Liangchao,PANG Jian,HE Xiaozhong,et al. Design of alternating phase focusing Interdigital H-mode Drift-Tube-Linac with low injection energy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016(806):75–79.
- [8] 赵良超,何小中,庞健,等. 离子源注入型 IH 加速腔冷测与调谐[J]. 强激光与粒子束, 2019,31(8):085106-1–085106-7. (ZHAO Liangchao,HE Xiaozhong,PANG Jian,et al. Cold test and cavity tuning for ion source injected IH cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019,31(8):085106-1–085106-7.)

(上接第 165 页)

- [2] SHEA H R. Effects of radiation on MEMS[C]// Proceedings of SPIE–The International Society for Optical Engineering, San Francisco,USA:SPIE, 2011:1–13.
- [3] SHEA H R. Radiation sensitivity of micro-electromechanical system devices[J]. Journal of Micro/Nanolithography,MEMS and MOEMS, 2009,8(3):030101.
- [4] ALLRED C L. Effects of radiation on silicon and borosilicate glass[D]. Boston,Massachusetts,USA:MIT, 2003.
- [5] COUMAR O,POIROT P,GAILLARD R,et al. Total dose effects and SEE screening on MEMS COTS accelerometers[C]// Radiation Effects Data Workshop. [S.l.]:IEEE, 2004:125–129.
- [6] LEE C I,JOHNSTON A H,TANG W C,et al. Total dose effects on micromechanical systems(MEMS):accelerometers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996,43(6):3127–3132.
- [7] EDMONDS L D,SWIFT G M,LEE C I. Radiation response of a MEMS accelerometers: an electrostatic force[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998,45(6):2779–2788.
- [8] KNUDSON A R,BUCHNER S,McDonald P,et al. The effects of radiation on MEMS accelerometers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996,43(6):3122–3126.
- [9] QUADRI G,NICOT J M,Guibaud G,et al. Optomechanical microswitch behavior in a space radiation environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005,52(5):1795–1799.
- [10] MIYAHIRA T F,BECKER H N,MCCLURE S S,et al. Total dose degradation of MEMS opticalmirrors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003,50(6):1860–1866.
- [11] MCCLURE S,EDMONDS L,MIHAILOVICH R,et al. Radiation effects in Micro–Electro–Mechanical Systems(MEMS):RF relays[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002,49(6):3197–3202.
- [12] SHEA H R,GASPARYAN A,CHAN H B, et al. Effects of electrical leakage currents on MEMS reliability and performance[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2004,4(2):198–207.