

文章编号: 1007-4627(2003)01-0048-04

HIRFL 辐照终端照射野均匀度与离子通量的关系*

李 强, 颜红梅, 李文建, 党秉荣, 马秋峰, 卫增泉

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 采用固体核径迹探测器聚碳酸酯膜, 测定了兰州重离子研究装置提供的 55 MeV/u ^{40}Ar 和 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束经辐照终端束流均匀化扫描装置后照射野均匀度与离子通量之间的关系. 结果表明: 对于 ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束, 离子通量小于 1×10^6 和 2×10^7 ions/cm² 时, 横向照射野均匀度缓慢增加; 当离子通量分别介于 $1 \times 10^6 - 1 \times 10^7$ 和 $2 \times 10^7 - 1 \times 10^8$ ions/cm² 时, ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束照射野均匀度逐渐增加; 离子通量达到 1×10^7 和 1×10^8 ions/cm² 时, ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束照射野均匀度分别约为 58% 和 61%. 从而说明, 辐照终端束流扫描装置对束流的均匀化程度目前并不能满足辐照生物效应、辐射育种和重离子治癌等研究工作的需要, 须对其性能做进一步的提高.

关键词: 重离子束; 照射野均匀度; 离子通量; 束流扫描装置

中图分类号: Q691; R730 **文献标识码:** A

1 引言

重离子束照射野横截面上的均匀性是将重离子束应用于生命科学研究的重要问题, 它直接影响着重离子束辐照生物效应、辐射育种等研究的统计结果. 尤其是在重离子束治癌中, 照射野的均匀性是影响适形治疗疗效的重要因素之一, 为保证均匀地杀死靶区癌细胞, 要求重离子束照射野均匀度好于 95%^[1]. 兰州重离子研究装置(HIRFL)是目前我国唯一有条件进行重离子束治癌研究的装置, 中国科学院近代物理研究所目前也正在拟定重离子束浅层肿瘤临床治疗试验研究计划^[2-4], 因而对 HIRFL 辐照终端束流均匀化装置的性能进行检验和对照射野均匀度与离子束照射通量关系的研究就显得非常必要.

通常, 采用固体核径迹探测器是确定重离子束照射野内单位面积上离子贯穿数分布的很好方法, 即确定照射野均匀度的很好方法^[5]. 在离子通量较小时, 在光学显微镜下观察固体核径迹探测器经化学蚀刻后离子的径迹分布情况; 在离子通量较大时, 则可在电子显微镜下观察. 本文采用聚碳酸酯

膜固体核径迹探测器, 在重离子辐照生物效应、辐射育种和重离子治癌等研究感兴趣的离子通量范围内(对于 ^{40}Ar 离子束, 离子通量小于 10^7 ions/cm²; 对于 ^{20}Ne 离子束, 离子通量小于 10^8 ions/cm²), 分别对 HIRFL 提供的 55 MeV/u ^{40}Ar 和 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束经辐照终端束流扫描装置^[6]后的照射野均匀性进行了测量, 给出了照射野均匀度与离子通量的关系, 并根据实验结果对提高束流均匀化扫描装置性能提出了一些建议.

2 材料与方法

(1) 材料 100 μm 厚的聚碳酸酯膜(分子式 $\text{H}_{18}\text{C}_{16}\text{O}_3$)剪成 $\phi 40$ mm 的圆片粘在样品盘($\phi 41$ mm)上作为核径迹探测器.

(2) 辐照 HIRFL 提供的 55 MeV/u ^{40}Ar 和 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束经辐照终端束流扫描装置^[6]后, 束斑面积约为 50 mm \times 50 mm. 辐照终端的详细介绍见文献[7]. 束流经真空管道引出镍窗引入大气, 经过用于离子束通量监测的自由空气电离室, 照射自动换样系统装载的粘有聚碳酸酯膜固体

收稿日期: 2002 - 09 - 20; 修改日期: 2002 - 10 - 14

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10205021); 中国科学院西部之光课题(XB010612); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(JY020617)

作者简介: 李 强(1971-), 男(汉族), 陕西宝鸡人, 博士, 副研究员, 从事重离子束在生命科学中的应用基础研究.

核径迹探测器的样品盘, 自动换样系统可装载 10 个样品盘依次接受照射. 自动换样系统的介绍见文献[8]. 由于 ^{40}Ar 离子的质量数是 ^{20}Ne 离子质量数的两倍, 故本文分别对 ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束选择了如下文所述的 8 个和 7 个离子通量对聚碳酸酯膜进行了照射.

(3) 蚀刻方法 对辐照后的聚碳酸酯膜固体核径迹探测器编号进行化学蚀刻, 蚀刻剂为 NaOH 溶液, 浓度为 6.25 mol/L, 蚀刻温度为 65 °C, 蚀刻时间为 10 h.

(4) 均匀度的确定 将蚀刻后的每一圆形聚碳酸酯膜随机划分为 12 个面积相等的小区, 测量时每个小区在光学显微镜(放大倍数 10×10)下任取 5 个视野($\phi 462\ \mu\text{m}$), 取视野内蚀刻孔数的平均值作为束流通过该小区的离子数(离子贯穿数), 则横截面上束流的均匀度 H 定义为^[9]

$$H = \left(1 - \frac{\sigma}{M}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

其中 M 为 12 个小区内离子贯穿数的平均值, σ 为平均值 M 的标准偏差. 详见文献[7].

3 结果与讨论

在通量为 1.08×10^5 , 5.11×10^5 , 1.01×10^6 , 2.01×10^6 , 3.01×10^6 , 4.01×10^6 , 6.01×10^6 和 1.00×10^7 ions/cm² 的 55 MeV/u ^{40}Ar 离子束照射下, 照射野均匀度 H 实验测量结果如表 1 所列. 而在通量为 2.60×10^6 , 5.16×10^6 , 7.72×10^6 , 1.03×10^7 , 2.56×10^7 , 5.11×10^7 和 1.02×10^8 ions/cm² 的 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束照射下, 照射野均匀度测量结果列于表 2. 表中光学显微镜下小区内离子贯穿数的平均值 M 为划分出的 12 个小区内所有 60 个视野离子贯穿数的平均值. 由于 ^{40}Ar 离子通量 1.08×10^5 ions/cm² 较小, 故而显微镜下一个视野内的蚀刻离子径迹数很少, 多数情况下都为 0, 所以对于 ^{40}Ar 离子该通量得到的照射野均匀度有很大的误差.

表 1 不同通量的 55 MeV/u ^{40}Ar 离子束照射下束流均匀度的测量结果

通量/(ions · cm ⁻²)	M	σ	H
1.08×10^5	0.30	0.17	43.3%
5.11×10^5	2.43	1.74	28.4%
1.01×10^6	4.43	3.12	29.6%
2.01×10^6	6.63	4.06	38.8%
3.01×10^6	12.18	6.74	44.7%
4.01×10^6	14.18	7.90	44.3%
6.01×10^6	17.15	6.79	60.4%
1.00×10^7	35.23	15.38	56.3%

表 2 不同通量的 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束照射下束流均匀度的测量结果

通量/(ions · cm ⁻²)	M	σ	H
2.60×10^6	2.18	1.55	28.9%
5.16×10^6	4.64	2.82	39.2%
7.72×10^6	5.56	3.38	39.2%
1.03×10^7	8.22	5.59	32.0%
2.56×10^7	18.13	9.16	49.5%
5.11×10^7	26.73	10.22	61.8%
1.02×10^8	50.60	21.80	56.9%

本文对测量得到的照射野均匀度与离子通量的关系进行了拟合,结果如图 1 和图 2 所示. 对于 55 MeV/u ^{40}Ar 离子束,考虑到离子通量为 1.08×10^5 ions/cm² 时照射野均匀度误差较大,可以得到:当离子通量小于 10^6 ions/cm² 时,均匀度缓慢增加;离子通量介于 $10^6 - 10^7$ ions/cm² 时,均匀度逐渐增加;离子通量达到 10^7 ions/cm² 时,照射野均匀度约为 58%. 而对于 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束,当离子通量小于 2×10^7 ions/cm² 时,均匀度缓慢增加;离子通量介于 $2 \times 10^7 - 1 \times 10^8$ ions/cm² 时,均匀度逐渐增加;离子通量到达 10^8 ions/cm² 时,照射野均匀度约为 61%. 由此可见,尽管由于 ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子质量数的不同,使得照射野均匀度变化时对离子通量的依赖随不同的离子而不同,但对不同能量的 ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束的实验测量都反映出:在重离子辐照生物效应、辐射育种和重离子治癌等研究感兴趣的离子通量范围内,照射野均匀度随离子通量增加有相同的变化规律.

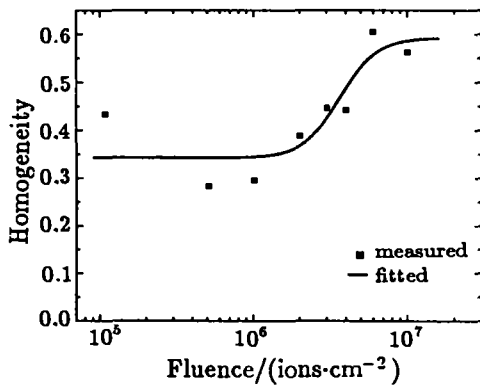


图 1 55 MeV/u ^{40}Ar 离子束照射野均匀度与离子通量的关系

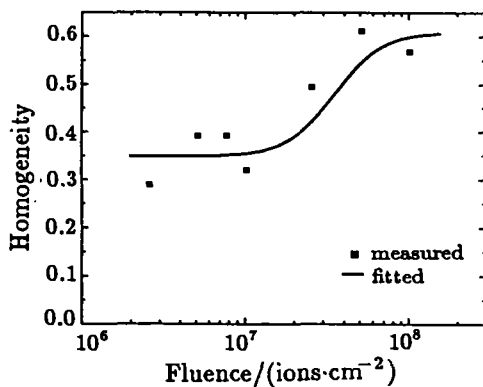


图 2 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束照射野均匀度与离子通量的关系

辐照终端束流均匀化扫描装置使得 HIRFL 提供的 55 MeV/u ^{40}Ar 和 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束照射野均匀度与通量之间出现依赖关系,且照射野均匀度对 ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束分别小于 58% 和 61%. 这样的 ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束照射野,将对利用它们进行辐照生物效应和辐射育种等研究的实验结果的统计意义造成不良影响,更不适合于重离子束治癌临床试验的照射野要求. 因而必须对束流均匀化扫描装置的性能做进一步的提高,以满足上述研究的需要. 本文认为造成照射野均匀度与离子通量有上述的依赖关系且均匀度不高,主要有以下三方面原因: (1) 扫描装置水平与垂直方向上的扫描频率较低,这样一个周期的束流扫描还未结束,实验中用于剂量监测的空气电离室的预置通量计数已经达到,因而通过辐照控制系统切断了束流; (2) 束流进入辐照终端前的磁四极透镜对束流的聚焦情况不好,比如束斑较散和束斑横截面内离子数密度并非高斯分布等; (3) 聚焦后的束流并未进入扫描装置的中心. 因此,为在离子通量较小的情况下就改善照射野均匀度并从整体上提高离子束照射野的均匀性,须在以上三方面做进一步的改进.

4 结论

(1) 在重离子辐照生物效应、辐射育种和重离子治癌等研究感兴趣的离子通量范围内, HIRFL 提供的 55 MeV/u ^{40}Ar 和 80 MeV/u ^{20}Ne 离子束经辐照终端束流均匀化扫描装置后照射野均匀度与离子通量的关系为:对 ^{40}Ar 离子束,通量小于 1×10^6 ions/cm² 时,而对 ^{20}Ne 离子束,通量小于 2×10^7 ions/cm² 时,均匀度缓慢增加;对 ^{40}Ar 离子束,离子通量介于 $1 \times 10^6 - 1 \times 10^7$ ions/cm² 时,而对 ^{20}Ne 离子束,离子通量介于 $2 \times 10^7 - 1 \times 10^8$ ions/cm² 时,均匀度逐渐增加;当 ^{40}Ar 和 ^{20}Ne 离子束通量分别达到 1×10^7 和 1×10^8 ions/cm² 时,照射野均匀度分别约为 58% 和 61%. 对这些离子束,照射野均匀性随离子通量增加出现相同的变化规律.

(2) 必须进一步提高辐照终端束流扫描装置的性能,从而提高离子束照射野的均匀度,以便使 HIRFL 提供的束流满足重离子束辐照生物效应、辐射育种和重离子束浅层肿瘤治疗等研究工作的需要.

参 考 文 献:

- [1] Hirao Y, Ogawa H, Yamada S, *et al.* Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba—A Design Summary and Update[Z]. NIRS-M-89, HIMAC-001, 1992, 28.
- [2] 李 强, 卫增泉, 李文建等. 重离子束适形放射治疗技术[J]. 原子核物理评论, 2001, 18(2): 109.
- [3] 卫增泉. 重离子束治癌的最新进展和思考[J]. 原子核物理评论, 1997, 14(2): 102.
- [4] 李 强, 卫增泉. 重离子治癌中的三维剂量成形方式[J]. 原子核物理评论, 1997, 14(4): 243.
- [5] Kraft G, Daues H W, Fischer B, *et al.* Irradiation Chamber and Sample Changer for Biological Samples[J]. Nucl Instr and Meth, 1980, 168: 175.
- [6] 侯明东, 孙友梅, 刘 杰等. 兰州重离子加速器辐照终端与快重离子辐照效应研究[J]. 核技术, 1996, 19: 594.
- [7] 颜红梅, 卫增泉, 李文建等. 重离子束均匀度的测定及治癌束流成形的模拟试验[J]. 核技术, 1997, 20: 230.
- [8] 李文建, 卫增泉, 颜红梅等. 兰州重离子加速器细胞辐照装置[J]. 核技术, 1997, 20: 370.
- [9] Haberer T, Kraft G. Monte-Carlo-simulations Concerning the Magnetic Raster Scan System [M]. GSI Scientific Report 1991, March 1992, 303.

Relationship between Homogeneity of Irradiation Field and Ion Fluence at Irradiation Terminal of HIRFL*

LI Qiang, XIE Hong-mei, LI Wen-jian, DANG Bing-rong, MA Qiu-feng, WEI Zeng-quan
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Using 55 MeV/u ^{40}Ar and 80 MeV/u ^{20}Ne ion beams delivered by the Heavy Ion Research Facility at Lanzhou (HIRFL), the relationships between the irradiation homogeneities in irradiation fields generated by the beam scanning device located at the irradiation terminal of the HIRFL and ion fluence were measured respectively with 100 μm polycarbonate films by means of nuclear track detection. The results show that the homogeneity increases when the ion fluence are lower than 1×10^6 and 2×10^7 ions/cm², and the homogeneity has a gradual increase at the fluence of 1×10^6 — 1×10^7 and 2×10^7 — 1×10^8 ions/cm² and then reached about 58% and 61% when the fluence are higher than 1×10^7 and 1×10^8 ions/cm², respectively, for the ^{40}Ar and ^{20}Ne ion beams. It is evident that the homogeneity in the irradiation field made by the beam scanning device presently cannot satisfy the requirements of researches such as heavy-ion induced biological effects, etc. Therefore, the performance of the scanning device should be improved further.

Key words: heavy ion beam; homogeneity of irradiation field; ion fluence; beam scanning device

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10205021); Western Talent Program of Chinese Academy of Sciences (XB010612); Research Startup Fund of Returnee Studying Abroad of the Ministry of Education of China (JY020617)