

# 中能重离子束深度剂量分布计算\*

李强 卫增泉 李文建

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 提出了称之为复合歧离算法的中能重离子束深度剂量分布计算方法,并计算了中能C、O离子束的Bragg相对剂量分布曲线,同实验测量结果进行了比较,计算与实验测量符合得很好.证实了复合歧离算法的合理性及由它计算Bragg曲线的可靠性.补充和完善了离子束的深度剂量分布计算原理与方法.

**关键词** 中能重离子束 深度剂量 能量歧离 主束衰减

## 1 引言

重离子束应用于放射治疗的优势之一就是其独特的倒转深度剂量分布,即在离子入射通道有一低剂量的坪区,而在接近离子射程末端时出现一个高剂量的Bragg峰区.对重离子束在组织中的深度剂量分布的准确计算,是确定重离子束放射治疗方案的一个重要环节.对于C、O、Ne等常见治癌重离子束的能量往往介于50—500MeV/u之间,它跨越了部分中能(10—100MeV/u)和高能区域(>100MeV/u). Sihver模型<sup>[1]</sup>计算高能重离子束的深度剂量分布已取得了相当成功,但至今尚未见对中能重离子束深度剂量分布有较成功的计算.本文提出的中能重离子束深度剂量分布计算算法,补充和完善了治癌重离子束的深度剂量分布计算原理与方法,同时对指导在兰州重离子研究装置(HIRFL)上开展的重离子束放射物理、辐射生物学和即将开展的浅层肿瘤治疗等研究工作有着重要意义.

## 2 中能重离子束深度剂量分布计算方法

重离子束穿越靶物质期间的能量歧离、核反应所致的主束衰减以及次级粒子的出现等效应,都会对离子束的深度剂量分布产生影响.对于低能重离子束(能量<10MeV/u),由于其相对运动动能往往小于靶核库仑位垒,因而不与靶物质发生核反应,但因辐射与物质相互作用的统计涨落特性,随贯穿深度增加入射离子束能量歧离增大,最终形成了射程

1999-04-06 收稿

\* 国家攀登计划 B(85-45-01-3)和甘肃省自然科学基金(A57)资助

歧离. 考虑了这一特点的简单歧离模型已能准确地计算低能重离子束的深度剂量分布<sup>[2]</sup>. Sihver 模型<sup>[1]</sup>对高能重离子束深度剂量分布的计算主要考虑了核反应所致的主束衰减以及次级粒子的出现, 而认为能量歧离效应对深度剂量的影响较小. 我们认为离子束的能量歧离效应和核反应所致的主束衰减及次级粒子的出现共同影响着中能重离子束的深度剂量, 因而给出中能重离子束的深度剂量分布计算的原理和算法为:

(1) 入射离子束穿越靶物质期间, 由于辐射作用的统计涨落特性产生的能量歧离, 使得主束能谱在某一贯穿深度处呈高斯型分布;

(2) 随离子束贯穿深度的增加, 主束的能量歧离也逐渐增大, 最终形成射程歧离;

(3) 由建立在实验基础上的  $K_{ox}$  核反应截面经验公式<sup>[3]</sup>, 考虑入射中能束流随贯穿深度的增加, 由于发生核反应而导致的主束通量衰减;

(4) 每发生一次核反应, 入射炮弹  ${}^A_Z X$  离子消失, 出射与弹核速度相同的次级碎片粒子, 分别为  ${}^A-Z_{Z-1} Y$  离子、质子和中子, 中子在计算中被忽略;

(5) 考虑次级粒子对深度剂量的贡献, 而认为次级粒子不再与靶核反应产生更高阶粒子, 不再考虑次级粒子的能量歧离.

本文称它为复合歧离算法. 计算可得到不同贯穿深度上的剂量  $D$  与离子束入射点剂量  $D_0$  的比值, 即离子束的 Bragg 相对剂量分布曲线.

### 3 结果与讨论

利用上面提出的复合歧离算法, 本文计算了 74.55, 50, 49.01 MeV/u  ${}^{12}\text{C}$  和 74.28 MeV/u  ${}^{16}\text{O}$  离子束在等效生物组织——水中的 Bragg 曲线, 分别同我们用双电离室法实验测量的相对剂量分布<sup>[4]</sup>进行了比较, 如图 1(a), (b) 所示. 可以看到, 理论计算

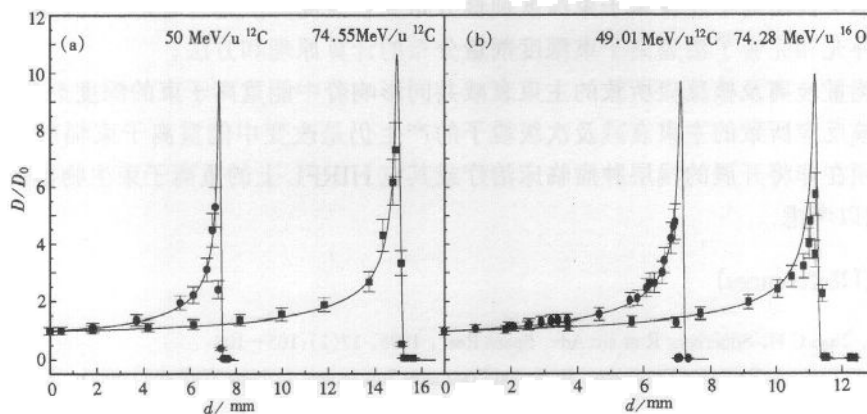


图 1 74.55, 50 MeV/u  ${}^{12}\text{C}$ (a) 和 49.01 MeV/u  ${}^{12}\text{C}$ , 74.28 MeV/u  ${}^{16}\text{O}$ (b)  
离子束 Bragg 曲线理论计算与实验测量结果的比较

的  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  离子束 Bragg 曲线与实验测量的相对剂量结果符合得很好, 尤其在坪区, 计算结果几乎与测量值一致, 并且在 Bragg 峰区, 计算结果也在实验误差范围内与测量值符

合,因而证实了本文提出的中能重离子束深度剂量分布复合歧离算法的合理性与计算结果的可靠性,同时也说明了能量歧离及核反应所致的主束衰减等效共同影响着中能重离子束的深度剂量分布. 也应看到,计算结果给出了大于实验测量的峰坪剂量比. 双电离室法测量离子束 Bragg 相对电离分布存在着两方面系统误差,它们造成了 Bragg 峰区附近实验测量结果的偏小. 这两个系统误差分别是离子的平均电离能  $W$  值随离子能量降低而缓慢增大和离子束随贯穿深度增加所致的动量展宽. 考虑了这些因素后,计算得到的峰坪剂量比将进一步同实验测量结果接近.

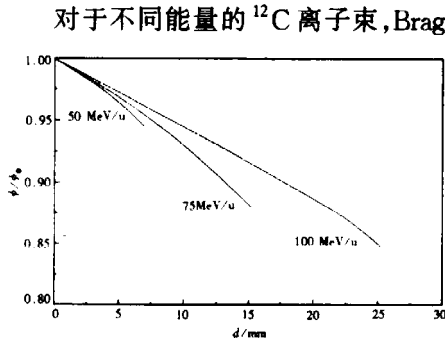


图2 100,75和50MeV/u  $^{12}\text{C}$  离子束随贯穿深度增加主束通量的衰减

对于不同能量的  $^{12}\text{C}$  离子束, Bragg 曲线的计算反映出, Bragg 峰右侧拖着一个随离子束能量增大而变长的剂量“尾巴”,但其数值相对峰区和坪区而言很小,小于坪区剂量的5%,它们是次级粒子的剂量贡献. 本文用复合歧离算法计算了100,75和50MeV/u  $^{12}\text{C}$  离子束随贯穿深度增加主束的衰减情况,如图2所示. 当离子束能量降至不再与靶核反应时,即图中曲线端点处,主束的通量衰减分别为15%,12%和6%. 主束衰减导致次级碎片粒子的出现,从而使原离子束形成了复杂的混合离子束辐射场,改变了原辐射场的品质. 可见,核反应所致的主束衰减仍对中能重离子束辐射场的品质有着较大的影响.

## 4 结论

(1) 本文提出的中能重离子束深度剂量分布复合歧离算法是合理的,计算结果也是可靠的,它补充和完善了治癌离子束深度剂量分布的计算原理和方法;

(2) 能量歧离及核反应所致的主束衰减共同影响着中能重离子束的深度剂量分布;

(3) 核反应所致的主束衰减及次级粒子的产生仍是改变中能重离子束辐射场品质的因素,必须在即将开展的浅层肿瘤临床治疗或其它 HIRFL 上的重离子束生物学效应实验研究中加以考虑.

## 参考文献(References)

- 1 Sihver L, Tsao C H, Silberberg R et al. *Adv. Space Res.*, 1995, 17(2):105—108  
Attix F H. *Topics in Radiation Dosimetry, Radiation Dosimetry Supplement 1*. New York and London, Academic press, 1972, 404—409
- 3 Kox S, Gramp A, Perrin C et al. *Phys. Rev.*, 1987, C35:1678—1691
- 4 LI Qiang, WEI ZengQuan, LI WenJian et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1998, 22(7):646—650  
(李强,卫增泉,李文建等. 高能物理与核物理,1998,22(7):646—650)

## Calculation of Depth-Dose Distribution of Intermediate Energy Heavy-Ion Beam

LI Qiang WEI ZengQuan LI WenJian

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract** A complex straggling algorithm is presented to calculate depth-dose distribution of intermediate energy heavy-ion beam. Relative dose Bragg curves of carbon and oxygen ion beams with intermediate energies were computed according to the algorithm above. Comparisons between the relative doses predicted and measured were taken up. The Bragg curves predicted by the complex straggling algorithm show a good agreement with the experimental data. So the reasonableness of this algorithm and its reliability for calculating depth doses were verified. Hence the principle and method to deduce the depth-dose distribution of therapeutic beam was integrated after this algorithm was developed.

**Key words** intermediate energy heavy-ion beam, depth-dose distribution, energy straggling, primary beam attenuation

---

Received 6 April 1999

\* Supported by National Clim(B)(85-45-01-3) and Natural Science Foundation of Gansu Province(A57)