

文章编号: 1007-4627(2007)02-0133-05

# MeV 能量离子在生物样品中的能量损失与能量离散<sup>\*</sup>

马 磊, 陈启忠, 薛建明, 王宇钢<sup>#</sup>

(北京大学重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘 要:** 为了研究 MeV 能量离子在生物样品中的能量损失与能量离散, 分别使用 1.0, 1.8 和 2.8 MeV 质子和 4.5 MeV 氦离子分别辐照不同质量厚度的洋葱内表皮膜。当质子穿过该生物样品后, 可以利用透射能谱测量透射离子的能量损失和能量离散。实验结果显示, 在以上的生物样品中, MeV 能量离子的能量损失值和 TRIM 程序模拟的结果相吻合, 但是透射离子的能量离散值却与 TRIM 程序模拟结果有很大的不同。结合生物样品的结构不均匀的特性, 对 Bohr 能量离散理论进行了修正, 并发现修正后的 Bohr 能量离散理论计算结果与实验值符合得很好。

**关键词:** MeV 能量离子; 能量损失; 能量离散; 生物样品

**中图分类号:** Q691

**文献标识码:** A

## 1 引言

一束单能的带电离子束入射到固体表面时, 将与固体中的原子发生一系列的弹性和非弹性碰撞, 并逐渐损失能量, 最终停留在固体内部。由于碰撞过程的统计性, 各个粒子所损失的能量并不完全相等, 而是具有一定的统计分布。显然, 能量损失也受这种涨落的影响, 即能量离散。能量损失的实验研究开始于 20 世纪初, 这方面的最早理论是由 Bohr 等<sup>[1]</sup>建立的。这一理论对能量损失过程的基本特性做了定量的描述, 并被量子力学的引入所证实。Lindhard 等<sup>[2]</sup>进一步发展了 Bohr 理论, 提出了著名的 LSS 理论。能量离散的传统理论在描述荷能离子与金属、绝缘体包括高聚物等结构均匀性物质相互作用时是比较成功的。然而, 在描述荷能离子在结构非均匀性薄膜中的能量离散时却出现了非常大的偏差。例如, 日本京都大学的 Tosaki 等<sup>[3, 4]</sup>利用不同大小的碳离子粉末制成密度不均匀的、非均匀结构的薄膜样品, 采用热解石墨和金刚石作为均匀样品, 然后用 5.5 MeV 碳离子分别对上述 3 种实验样品做背散射能谱分析。实验结果显示, 对于能量损失而言, 无论是均匀样品还是非均匀样品, 理论结果与实验结果符合得都很好; 然而能量离散规

律则存在明显的差异: 对均匀样品来说, 理论结果与实验结果符合得较好, 但对非均匀样品来说, 理论结果与实验结果相差很大。法国巴黎大学 Amsel 等<sup>[5]</sup>对多空硅材料的研究也显示了类似的实验结果, 此外他们还讨论了能谱展宽与柱状多孔硅的倾角之间的关系。

自从 1957 年前苏联第一颗人造卫星上天以来, 经过近 50 多年的发展, 人类正在朝着永久地占领近地轨道空间、建立空间站迈进, 与此同时, 对于空间环境对地球生命的影响和空间生物学的研究也应运而生。我国在航天诱变育种方面取得了一系列的成就, 培育出一大批航天新品种或新组合, 并取得了良好的社会效益。然而在高能离子与生物体系的相互作用方面的研究开展得还很少, 为了进一步促进空间诱变育种的发展, 开展这方面的研究是很必要的。

本文的主要目标是通过 MeV 能量离子的透射能谱来确定不同能量不同种类的离子透射生物样品后的能量损失和能量离散值, 然后将 TRIM 程序模型计算结果与实验结果进行比较分析, 以期找出实验结果的能量损失及能量离散与理论的异同, 并总结出一定规律, 从理论上给以解释。

\* 收稿日期: 2007-02-12; 修改日期: 2007-03-07

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10435020)

作者简介: 马 磊(1980-), 男(汉族), 河北邢台人, 硕士研究生, 从事辐射生物学研究; E-mail: 26547094@163.com

# 通讯联系人: 王宇钢, E-mail: ygwang@pku.edu.cn

## 2 实验

### 2.1 实验装置

本实验所选用的质子束的能量为 1.0, 1.8 和 2.8 MeV 3 个能量, 氦离子束的能量为 4.5 MeV。离子能量选取的原则是离子束能够穿透样品膜且在样品中的能量损失比较均匀。所有实验均在北京大学  $2 \times 1.7$  MV 串列静电加速器的离子注入线上完成, 辐照环境为高真空环境(真空度可达  $10^{-5}$  Pa)。所用探测器为金硅面垒探测器, 能量分辨率为 15 keV, 对其所加偏压为 120 V, 探测器死时间控制在 25% 以内。由于入射离子的电流强度非常弱, 已经无法从束流积分仪读出, 离子辐照剂量以透射能谱曲线(高斯谱线)的波峰处计数达到 10 000 个粒子左右为宜。

### 2.2 实验样品的结构特性和制备方法

在本实验中所采用的实验样品为洋葱内表皮膜。洋葱内表皮膜是一种典型的植物样品。洋葱内表皮膜具有单层细胞结构, 厚度比较薄, 而且厚度分布非常不均匀, 此外洋葱内表皮膜的内部结构也是不均匀的。洋葱内表皮膜含有 C, H, O 和 N 4 种常见元素, 用 Vario EL 元素分析仪测得各元素百分比含量之比为 C : H : O : N = 24 : 54 : 21 : 1。各个样品密度测量值相差比较大, 变化范围为 0.92—1.301 g/cm<sup>3</sup>。大量样品实际测量密度平均值为 1.127 g/cm<sup>3</sup>。用测量精度为 1  $\mu$ m 的测微计测量单层洋葱内表皮膜表面的不同位置可得到洋葱膜的平均厚度大约为 10  $\mu$ m, 最厚的位置厚度甚至超过最薄位置的两倍多, 这说明厚度分布是极不均匀的。

洋葱内表皮膜样品的制作过程如下: 将洋葱切成 4 大块, 剥开洋葱的表皮, 在表皮内层撕下内表皮膜, 然后将膜样品平铺于滤纸上面, 待内表皮膜微干后, 用干净的滤纸将其包裹, 然后夹于崭新的厚书中保存 2 d, 这样可保证实验样品平整。取出膜样品, 这时样品比较干而软, 然后将洋葱切割成 10 mm  $\times$  10 mm 的正方形样品, 将它们放置在盛有硅胶干燥颗粒的干燥器中密封, 在阴凉干燥处保存。由于生物样品干而脆非常容易损坏, 所有样品都在光学显微镜下观察, 选取好的均匀样品做出 MeV 能量离子透射能谱, 通过透射能谱给出的信息进一步挑出好样品。由于实验中需要对不同样品的不同

质量厚度进行辐照, 因此, 实验前需将所有样品膜按不同层数堆叠起来, 并用铝薄膜将其包裹。根据 TRIM 程序估计离子在样品中的射程以及样品堆叠后本身的厚度, 可以将洋葱内表皮膜堆叠成 1—8 层不同的层数。制作流程如下: (1)将样品堆叠成所要求的层数, 用精确度为 0.1 mg 的电子天平称出其质量, 称量时注意样品的干燥性; (2)用精确度为 1  $\mu$ m 的测微计对堆叠好的样品多次测厚求得其平均厚度值; (3)将样品用铝薄膜小心地包裹起来, 做好标记, 将其放入干燥器中密封, 在阴凉干燥处保存; (4)计算样品的密度和质量厚度等参数。

## 3 实验结果与理论分析

### 3.1 实验结果

MeV 能量离子透射实验样品后, 测得其透射能谱近似为高斯分布, 能量损失值可以由入射离子

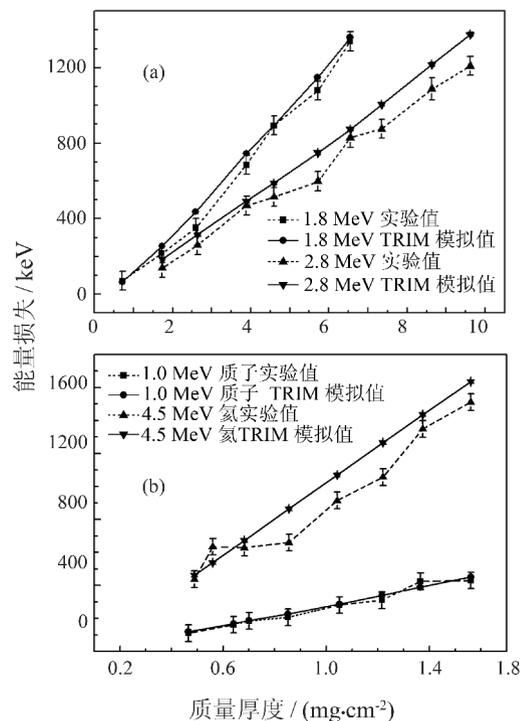


图 1 MeV 能量离子透射洋葱内表皮膜的实验平均能量损失值与 TRIM 模拟值比较

能量值减去波峰位置对应能量值计算, 能量离散值可以根据透射能谱的半宽度即 FWHM 值得到。用精确度为 0.02 mm 的游标卡尺测量出实验样品的面积, 用精确度为 0.1 mg 的电子天平称量出每个实验样品的质量, 从而可得到实验样品膜的面密

度, 即质量厚度。

图 1 给出了 MeV 能量离子透过不同质量厚度的洋葱内表皮膜后能量损失的平均值, 其中, (a) 为 2.8 和 1.8 MeV 质子透射洋葱内表皮膜的 TRIM 模拟值与实验平均能量损失值的比较; (b) 为 1.0 MeV 质子和 4.5 MeV 氦离子透射洋葱内表皮膜的 TRIM 模拟值与实验平均能量损失值的比较。从图中的测量曲线可以看出, 随着样品质量厚度的增加。离子透过该种样品时的能量损失逐渐增加。在实验所用的入射质子能量分别为 1.0, 1.8, 2.8 MeV 和入射氦离子能量为 4.5 MeV 时, 基于 TRIM 程序的模拟计算结果都与实验测量到的能量损失的平均值很好地吻合。这说明即使实验样品为不均匀材料的生物样品, 荷能离子在其中的平均能损亦可以用 TRIM 程序来模拟和描述。

图 2 显示了 MeV 能量离子透过不同质量厚度的洋葱内膜后的能量歧离, 其中, (a) 为 2.8 MeV

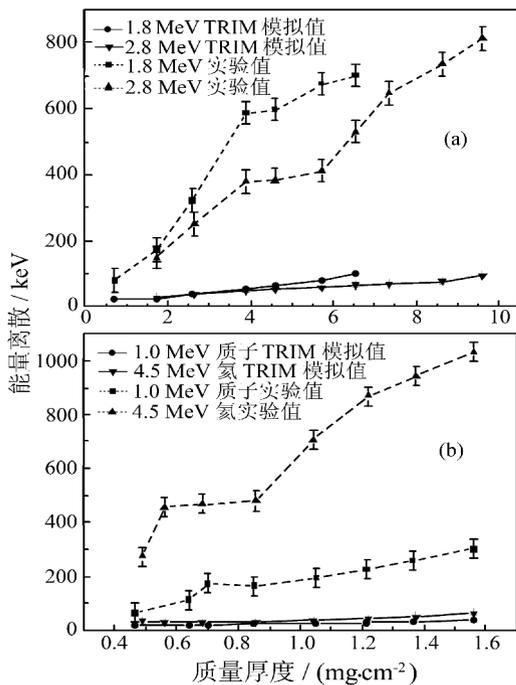


图 2 MeV 能量离子透射洋葱内表皮膜的能量离散值与 TRIM 模拟值比较

和 1.8 MeV 质子透射洋葱内表皮膜的 TRIM 模拟值与能量离散值比较; (b) 为 1.0 MeV 质子和 4.5 MeV 氦离子透射洋葱内表皮膜的 TRIM 模拟值与能量离散值比较。从图中可以看出, MeV 能量离子穿过样品后其能量歧离非常大, 且质量厚度越大越偏离基于 TRIM 程序模拟的结果。

### 3.2 理论分析

带电粒子穿过多元素靶材料时, 由 Bragg 规则<sup>[5]</sup>, 其阻止本领可写为

$$-\frac{dE}{dl} = \sum_k n_k S_k, \quad (1)$$

其中  $S_k$  和  $n_k$  分别表示多元素靶材料中第  $k$  种元素的阻止截面和靶原子密度,  $n_k$  也可写为以下形式:

$$n_k = \frac{N_A}{m_k} d_k,$$

$N_A$  为阿伏加德罗常数,  $m_k$  为  $k$  元素的原子质量,  $d_k$  为  $k$  元素的体密度。由方程(1)可得出的能量损失为

$$\Delta E = -\int_0^l \left(-\frac{dE}{dl}\right) dx.$$

假设多元素靶的厚度  $l$  很薄, 则上式可化为

$$\Delta E = -\int_0^l \left(-\frac{dE}{dl}\right) dx \approx l \sum_k \frac{N_A}{m_k} d_k S_k,$$

对变量  $d_k$  和  $S_k$  取微分, 可得

$$\delta(\Delta E) = \left( \sum_k \delta(\Delta E_{ck}) + \sum_k (\Delta E_{ck}) \frac{\delta \rho_k}{\rho_k} \right), \quad (2)$$

其中, 为  $\rho_k$  为  $k$  元素的面密度,  $\Delta E_{ck}$  是由入射离子与  $k$  元素的原子碰撞而引起的能量损失。如果假设多元素靶中各元素面密度偏离分布是一样的, 即

$$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \approx \frac{\delta \rho_2}{\rho_2} \approx \dots \approx \frac{\delta \rho_k}{\rho_k} \approx \frac{\delta \rho}{\rho}.$$

方程(2)可化为

$$\delta(\Delta E) \approx \delta(\Delta E_c) + \delta(\Delta E_c) \frac{\delta \rho}{\rho}.$$

如果  $\delta(\Delta E_c)$ ,  $\delta \rho$  的分布为高斯分布, 则上式可写为

$$\Omega^2 = \Omega_0^2 + (\Delta E_c)^2 \left( 2.355 \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2, \quad (3)$$

其中,  $\Omega$  为修正后的能量离散值,  $\Delta E_c$  和  $\Omega_0$  为基于 TRIM 程序模拟的平均能量损失值和能量离散值,  $\Delta \rho / \rho$  为样品面密度偏离。由此可以看到, 在生物样品中能量离散值与基于 TRIM 模拟的能量离散值的偏差来源于生物样品的面密度偏离所引起的能量离散。

由方程(3)可得实验样品的面密度偏离

$$\left| \frac{\Delta\rho}{\rho} \right| = \frac{\sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}}{2.355\Delta E_c} \quad (4)$$

由 2.8 MeV 质子透射洋葱内表皮膜的实验能量离散值和基于 TRIM 模拟的能量损失和离散值, 通过方程(4), 可以得到洋葱内表皮膜的面密度偏离  $\Delta\rho/\rho$  的平均值约为 0.3。利用此值和方程(3)可以算出修正后的 1.0 MeV 质子和 4.5 MeV 氦离子能量离散值, 计算结果如图 3 所示。

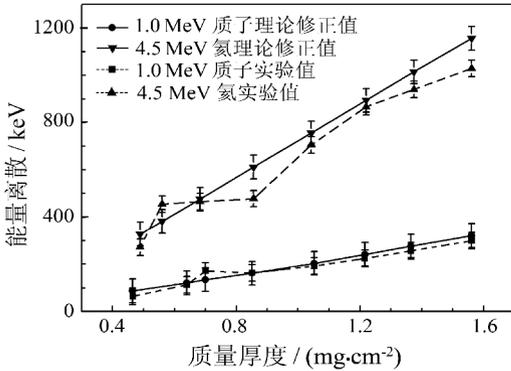


图 3 1.0 MeV 质子和 4.5 MeV 氦离子透射洋葱内表皮膜的实验能量离散值与修正后的能量离散值

从图 3 可以看出, 在实验误差范围内, 修正后的能量离散值与实验能量离散值符合得很好。由此可以看出, 面密度偏离  $\Delta\rho/\rho$  与入射离子的种类和能量无关, 可以作为描述材料面密度不均匀程度的参数。当靶材料的密度是均匀的, 而表面比较粗糙时,  $\Delta\rho/\rho$  可以用来描述材料的粗糙程度, 这时 TRIM 模拟值与实验能量离散值的偏差主要来自靶材料厚度的不均匀分布, 这已被许多实验所验证<sup>[6, 7]</sup>。

## 4 结论

MeV 能量离子透射能谱的实验证实, 对于非均质材料, 如生物样品洋葱内膜, 其理论值与平均能损的实验值符合得很好, 这说明 TRIM 程序不但可以用来模拟均质材料的能量损失, 也可以用来模拟非均质材料的能量损失。然而在能量歧离上, 我们发现生物样品的能量离散的理论值和实验值相差很多。结合生物样品不均匀的结构特性和对实验结果的理论分析, 我们认为这种在生物样品中的能量歧离增大很多的现象起源于生物样品结构及质量密度的极度不均匀。

**致谢** 感谢北京大学重离子物理研究所马宏骥老师为透射能谱实验工作提供很大的方便并给实验工作提出了许多宝贵建议; 感谢北京大学化学学院谢景林老师为实验中生物样品的元素测定提供方便。

## 参考文献 (References):

- [1] Bohr N. Mat Fys Medd K, Dan Vidensk Selsk, 1948, **18**: 8.
- [2] Lindhard J K. Mat Fys Medd Dan Vidensk Selsk, 1965, **14**: 33.
- [3] Tosaki M, Ito S, Maeda N. Nucl Instr and Meth, 2000, **B168**: 543.
- [4] Tosaki M, Ohsawa Daisuke, Isozumi Yasuhito. Nucl Instr and Meth, 2004, **B219-210**: 241.
- [5] Amsel G, d'Artemare E, Battistig G, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1997, **B122**: 99.
- [6] Besenbacher F, Andersen J U, Bonderup E. Nucl Instr and Meth, 1980, **168**: 1.
- [7] Eckardt J C, Lantschner G H. Thin Solid Films, 1994, **249**: 11.

# Energy Loss and Straggling of MeV Energy Ions through Biological Samples<sup>\*</sup>

MA Lei, CHEN Qi-zhong, XUE Jian-ming, WANG Yu-gang<sup>#</sup>

(Key Laboratory of Heavy Ion Physics, MOE, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In order to study the energy loss and its straggling of MeV energy ions in biological samples, onion membrane samples with different thickness were irradiated with 1.0, 1.8, 2.8 MeV H<sup>+</sup> and 4.5

\* Received date: 12 Feb. 2007; Revised date: 7 Mar. 2007

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10435020)

# Corresponding author: Wang Yu-gang, E-mail: ygwang@pku.edu.cn

MeV  $\text{He}^+$ , respectively. The energy loss and straggling of these ions after penetrating the biological samples were measured with transmission energy spectrum. The experimental results show that the energy losses of MeV energy ions in the biological samples mentioned above are consistent with TRIM simulation but their energy straggling are different from the simulations. Considering the inhomogeneous mass density and structure of biological materials, we modified Bohr's energy straggling theory, and then the results are in good agreement with the experimental energy straggling values.

**Key words:** MeV energy ion; energy loss; energy straggling; biological sample