

用醋酸纤维素固体径迹探测器记录轻粒子

崔浣华 王世成 吴日昇

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文测定了醋酸纤维素径迹探测器(上海感光胶片厂生产)记录 α 粒子的能量上限及质子和氦核的能量范围和效率。用质子、氦核和 α 粒子进行实验,检验了 Benton 提出的限定能量损失模型,结果表明这种模型适用于这一探测器记录轻粒子的情况。探测器记录上述三种轻粒子时,它们的蚀刻速度和剩余射程呈一定的函数关系,因此可以用来鉴定轻粒子。

一、引 言

记录 $z \leq 2$ 的轻粒子需要用灵敏度高的固体径迹探测器^[1,2]。在纤维素酯塑料中,商品硝酸纤维素径迹探测器的灵敏度较高,它记录 α 粒子和质子的最高能量分别为 6 MeV 和 550 keV^[3,4]。商品醋酸纤维素径迹探测器记录 α 粒子和质子的最高能量分别为 4 MeV 和 300 keV^[5,6]。

由于商品硝酸纤维素径迹探测器具有较高的灵敏度,因此它比商品醋酸纤维素径迹探测器用途广泛。但醋酸纤维素膜使用安全,不易着火,醋酸纤维素径迹探测器不象硝酸纤维素径迹探测器那样在性能上容易受到环境条件的影响。因此,如果能将醋酸纤维素径迹探测器的灵敏度提高到满意的程度,它的性能将比硝酸纤维素径迹探测器更为可取。

朱润生^[7]用改变蚀刻条件的方法提高醋酸纤维素径迹探测器的灵敏度。使商品 Ferrania 电影胶片片基(醋酸纤维素径迹探测器)记录质子的最高能量可达 750—800 keV。为了探索国产醋酸纤维素膜作为固体径迹探测器的可能性,我们对提高它的灵敏度和它记录轻粒子的性能进行了研究。结果表明它可以作为轻粒子探测器并应用于各个方面。

文章[8]中曾报导,用含有 CuSO_4 3 毫克/毫升, 2% NaClO 的 3N NaOH 溶液(简称为 CSS), 在 40°C 蚀刻, 上海感光胶片厂生产的电影片基(醋酸纤维素径迹探测器, 以下简称为“上海膜”)记录 α 粒子的能量超过 8.78 MeV。它是一种灵敏度高的固体径迹探测器, 但未能确定其能量上限。本文测定了“上海膜”记录 α 粒子能量上限及质子和氦核的能量范围和效率。检验了 Benton 提出的限定能量损失模型对这一探测器记录轻粒子的适用性。

二、实验方法和结果

首先我们用记录质子相对灵敏度的方法^[9],测定了“上海膜”(1978年6月生产,膜厚 $146\ \mu\text{m}$,剥蚀后剩余厚度为 $80\pm 1\ \mu\text{m}$ ^[6]).以下各实验中使用的都是 $80\pm 1\ \mu\text{m}$ 的膜)在各种温度和各种 NaOH、NaClO 浓度的蚀刻液中的相对灵敏度.结果表明 40°C ,CSS 溶液为该探测器记录质子的最佳蚀刻条件.

1. 测定“上海膜”记录 α 粒子、质子和氘核的能量范围

用原子能研究所614静电加速器的单能质子或氘核束照射.靶室装置见[9].质子或氘核束通过与束流成 80° 的薄金靶散射以降低通量,这些质子或氘核垂直入射到“上海膜”上,用 Si(Au) 面垒半导体探测器监测入射质子或氘核的注量和能谱.

其中300和400 keV 的质子是分别经薄碳靶和薄金靶散射后得到.

用能量分别为300,400,500,600,700,800,900和1050 keV 的质子垂直照射“上海膜”.质子能散度在15%以下.

用能量分别为450,600,750,900,1050,1200,1350和1450 keV 的氘核垂直照射“上海膜”.氘核的能散度在12%以下.

用原子能研究所迴旋加速器的26.5 MeV 的 α 粒子,在靶室(靶室装置同上)内经薄金靶散射后,垂直射到包有铝箔的“上海膜”上,它们的能量分别为8.9,9.7,11.1和11.7 MeV.

用上述能量的 α 粒子(质子或氘核)和 ^{252}Cf 源的裂片照射过的“上海膜”,在 40°C ,用CSS 溶液蚀刻,然后用装有螺旋目镜测微计的光学显微镜(放大600倍)测量各种径迹的直径.对于质子的径迹,图1中的每个实验点为60个径迹直径的平均值.对于氘核和 α

粒子的径迹,图2,3中的每点为40个径迹直径的平均值.由裂片径迹的直径计算总体蚀刻速度 V_g 和剥蚀厚度 $V_g t$.

质子、氘核或 α 粒子径迹的半径与剥蚀厚度的关系分别表示在图1—3中.

由图1—3可见,能量为1.7—11.7 MeV 的 α 粒子,300—800 keV 的质子和450—1350 keV 的氘核的蚀刻曲线通过坐标原点,表明这些能量的 α 粒子、质子和氘核的径迹是从“上海膜”的原始表面开始蚀刻的,它们处在探测器可记录的能量范围之内,其中最高能量分别为11.7、0.8和1.35 MeV.

2. 测定“上海膜”记录质子和氘核的效率

实验方法同上.蚀刻后测量质子和氘核的径迹密度和裂片径迹的直径,研究质子和氘核的径迹密度和剥蚀厚度的变化关系(图4,5).对于质子和氘核的径迹密度,图4,5中每个实验点的统计误差为1%.

由图4,5可见,质子或氘核的径迹密度随剥蚀厚度的增加而增加,很快增至最大值,

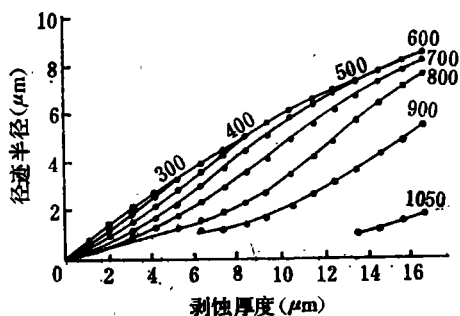


图1 质子(300—1050keV)径迹的半径与剥蚀厚度的关系.图中单位均为 keV

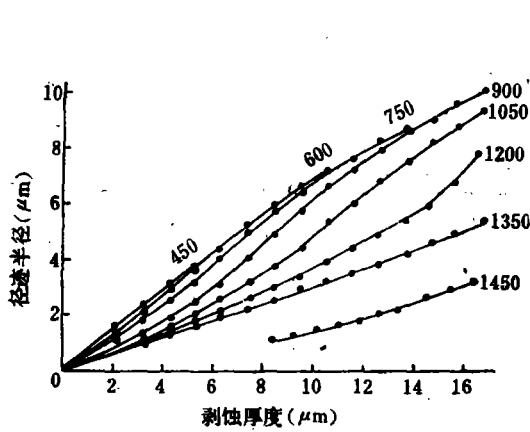


图 2 氦核 (450—1450keV) 径迹的半径与剥蚀厚度的关系,图中单位均为 keV

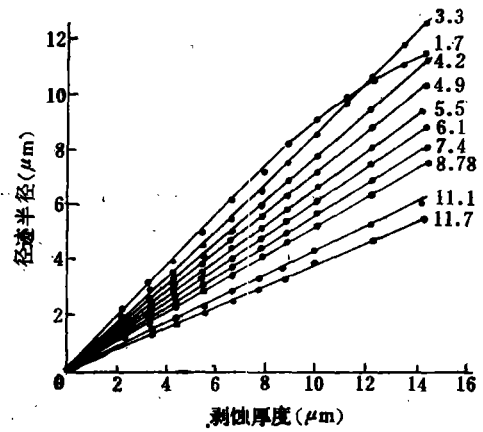


图 3 α 粒子 (1.7—11.7 MeV) 径迹的半径与剥蚀厚度的关系,参见[8],图中单位均为 MeV

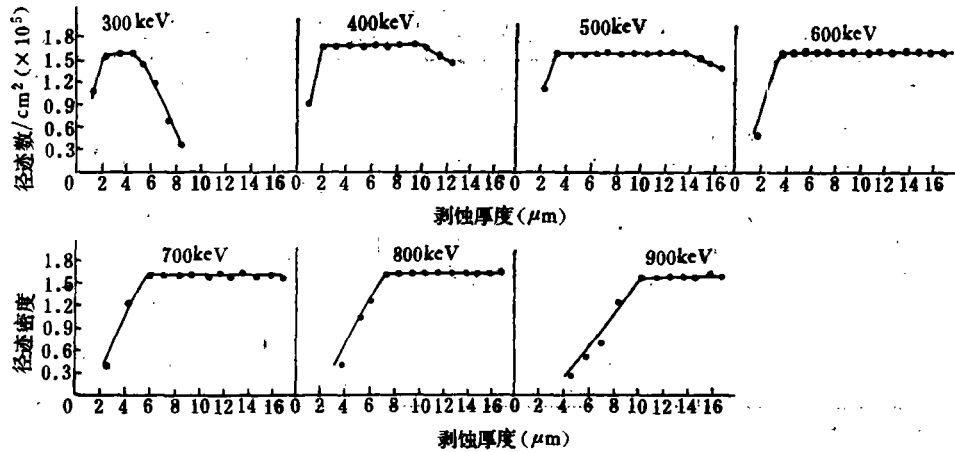


图 4 质子 (300—900 keV) 的径迹密度与剥蚀厚度的关系

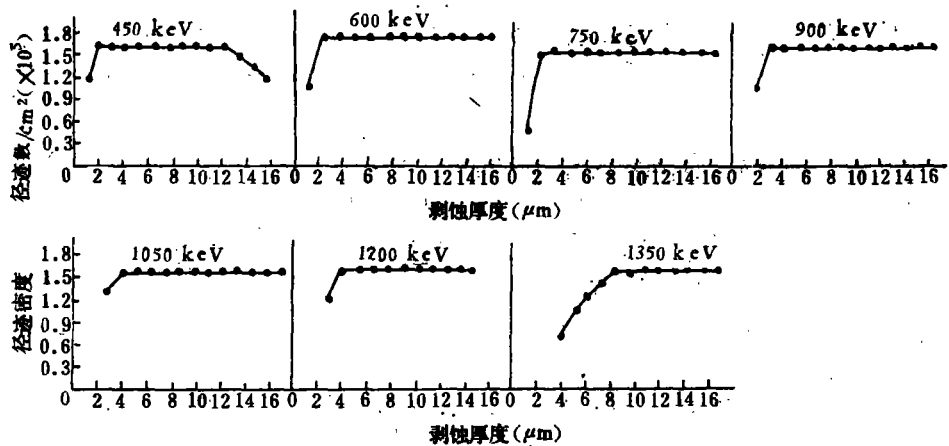


图 5 氦核 (450—1350 keV) 的径迹密度与剥蚀厚度的关系

然后缓缓下降,最大值的坪随能量增加而变长。根据测定的径迹密度最大值的平均值和半导体探测器测定的注量的比值得出质子或氦核的记录效率。“上海膜”对不同能量质子和氦核的记录效率分别列出在表1和表2中。表1、2中对于每种能量,注量的统计误差为1%。

表1 “上海膜”对不同能量垂直入射质子的记录效率

入射质子能量 keV	径迹密度最大值所在剥蚀厚度范围 μm	质子注量质子数/ cm^2	径迹密度测定值径迹数/ cm^2	记录效率%
400	2—10	1.72×10^5	1.69×10^5	98
500	3—13	1.52×10^5	1.56×10^5	103
600	3.5—16	1.61×10^5	1.58×10^5	98
700	5—16	1.61×10^5	1.60×10^5	99
800	6.5—16	1.62×10^5	1.63×10^5	101
900	9.5—16	1.56×10^5	1.56×10^5	100
400—900	9.5—10			$100 \pm 1^*$

* 平均值的标准偏差。

表2 “上海膜”对不同能量垂直入射氦核的记录效率

入射氦核能量 keV	径迹密度最大值所在剥蚀厚度范围 μm	氦核注量氦核数/ cm^2	径迹密度测定值径迹数/ cm^2	记录效率%
450	2—12.5	1.56×10^5	1.60×10^5	103
600	2—15	1.75×10^5	1.71×10^5	98
750	2.5—16	1.47×10^5	1.49×10^5	101
900	3—16	1.58×10^5	1.57×10^5	99
1050	4—16	1.57×10^5	1.56×10^5	99
1200	4—16	1.60×10^5	1.62×10^5	101
1350	6.5—16	1.61×10^5	1.58×10^5	98
450—1350	6.5—12.5			$100 \pm 1^*$

* 平均值的标准偏差。

由表1可见,“上海膜”记录质子较合适的剥蚀厚度为9.5—10 μm 处,此时垂直入射质子(400—900 keV)的记录效率为 $100 \pm 1\%$ 。

由表2可见,“上海膜”记录氦核较合适的剥蚀厚度为6.5—12.5 μm 处,此时垂直入射氦核(450—1350 keV)的记录效率为 $100 \pm 1\%$,因此“上海膜”可以作为质子和氦核通量的探测器。

3. Benton 提出的限定能量损失模型的适用性

由 α 粒子、质子和氦核的能量和测量的径迹直径计算蚀刻速度比 V 和限定能量损失率 REL 。

根据Fleischer等人^[10]提出的径迹蚀坑形成模型,垂直入射的 α 粒子、质子和氦核的潜径迹蚀刻后,它们的蚀刻速度比为 V

$$V = \frac{V_t}{V_s} = \frac{1 + \left(\frac{R}{h}\right)^2}{1 - \left(\frac{R}{h}\right)^2} \quad (1)$$

式中 R = 径迹半径, $h = V_g t$ 即表面剥蚀的厚度, R/h 是图 1—3 中 α 粒子(3.0—11.7 MeV)、质子(300—800 keV)和氦核(450—1350 keV)蚀刻曲线初始段直线部分的斜率,再由式(1)计算它们的蚀刻速度比 V 。

根据 Benton^[11] 提出的径迹记录准则,一个电荷为 z , 质量为 M (以质子质量作为单位), 动能为 E 的重离子, 在密度为 ρ , 原子序数为 Z , 原子量为 A 的阻止材料中的限定能量损失率可按下式计算^[12]:

$$REL1 = z^2 \left[\lambda'(E/M) + \frac{B'_z(\beta)(1-\beta^2)^{3/2}}{938.59\beta} \right]^{-1} \quad E/M(\text{MeV/amu}) \leq 0.5$$

$$REL2 = REL1 - Knz_{\text{eff}}^2 \beta^{-2} \left(\ln \frac{\omega_m}{\omega_0} - \beta^2 \right) \quad 0.5 \leq E/M(\text{MeV/amu}) \leq 20$$

式中 λ' = 速度为 v 的理想质子射程的导数

$B'_z(\beta)$ = 射程伸长的导数

$$\beta^2 = 1 - [1 + (E/938.59M)]^{-2}$$

$$z_{\text{eff}} = z [1 - \exp(-125\beta/z^{2/3})]$$

$$K = 2\pi e^4 / mc^2 = 2.55 \times 10^{-25} \text{MeVcm}^2$$

$$n = \rho N_A / (A/Z) \text{ 电子数/cm}^3$$

$$\omega_0 = 1 \text{keV}$$

$$\omega_m = 2mc^2\beta^2 / (1 - \beta^2) = 1.022\beta^2 / (1 - \beta^2) \text{ MeV}$$

将质子、氦核和 α 粒子的 $(V-1)$ 和 REL 的关系表示在图 7 (双对数坐标), 图 7 中的直线可表示为

$$V = 1 + a(REL)^b$$

因子 a 和指数 b 与探测器材料、蚀刻条件有关。图 7 中的直线可表示为如下方程式

$$V = 1 + 3.2 \times 10^{-7} (REL)^{2.40}$$

三种粒子各种能量的数据在双对数坐标图上构成一条直线, 说明这种灵敏度高的“上海膜”记录限定能量损失率很低的轻粒子时, Benton 的限定能量损失模型是适用的, 因此

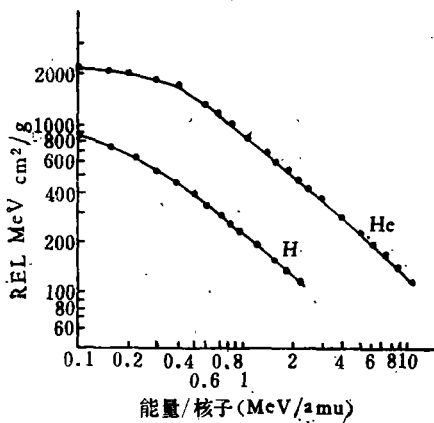


图 6 氢和氦同位素的 REL 计算数据

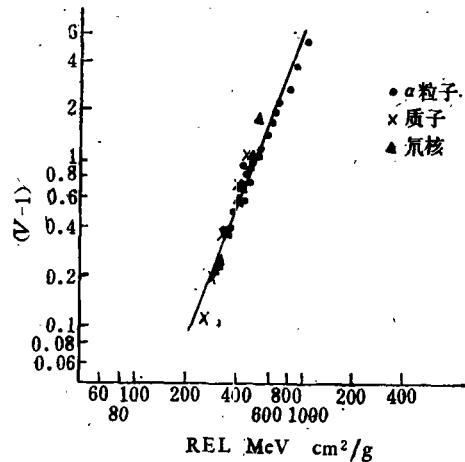


图 7 三种粒子(α 粒子、质子和氦核)的 $(V-1)$ 与 REL 的关系

也可以用来预言该探测器记录其它轻粒子(如 ^3H , ^3He , ^6He 等)的蚀刻性质。

4. 鉴定轻粒子

测定了“上海膜”记录 α 粒子的射程^[14], 并用 Barkas 等人^[11,13,15]提供的关系式计算 α 粒子的射程。实验值和计算值最大差 5%。

质子、氘核和 α 粒子的 $(V-1)$ 和计算的射程 R 的关系都表示在图 8 (双对数坐标), 图 8 中的直线可表示为如下方程:

α 粒子 (3.0—11.7MeV):

$$V = 1 + 83R^{-1.09}$$

质子 (400—800keV):

$$V = 1 + 45R^{-2.24}$$

氘核 (600—1350keV):

$$V = 1 + 86R^{-2.00}$$

因此利用三种粒子的 $(V-1)$ 和剩余射程在双对数坐标图上的直线关系, 可以鉴定轻粒子的电荷和质量。

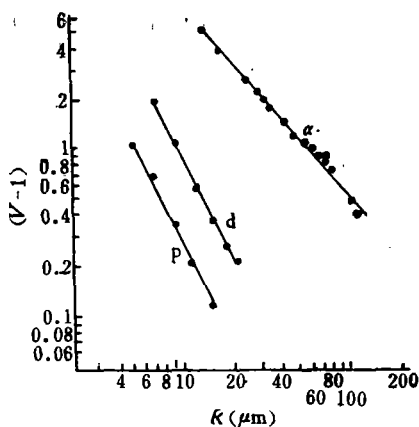


图 8 $(V-1)$ 和剩余射程的关系

三、讨 论

带电粒子射入固体径迹探测器中, 沿其轨迹产生辐射损伤。根据径迹记录的准则, 为了产生可蚀刻的潜径迹, 带电粒子产生的电离率必须高于某一临界值, 这一电离率的临界值称为阈值。

阈值的大小和探测器材料、蚀刻条件、环境条件等因素有关。各种重离子照射塑料、云母的实验结果表明, 对某种固体径迹探测器, 在一定的蚀刻条件下记录各种重离子时, 存在着一个明显的阈值。

我们用“上海膜”进行的实验得出: 记录 α 粒子、氘核和质子的最高能量分别为 11.7、1.35、0.8 MeV。按照阈值的概念, 它们相应的 REL 值应当相近, 但由图 6 可以看出, 它们的 REL 值差别较大。因此从上述的结果说明, “上海膜”记录这种 REL 值很低的轻粒子, 没有一个明显的共同的阈值。

Somogyi^[13] 从四种塑料径迹探测器的实验结果分析, 认为没有明显的阈值, 因此阈值的概念需要修正, 他提出一种表示灵敏度的方法, 能用它来说明一些实验现象, 但也有例外, 还不能圆满地解释目前所有的实验结果。

我们认为这一现象还可能和灵敏度随剥蚀厚度变化有关, 我们准备对此进行研究。

目前这方面积累的数据有限, 因此要提出一个合理的解释, 还需要充分的、准确的实验数据。

四、结 论

1. 在最佳蚀刻条件下,“上海膜”记录 α 粒子、质子和氘核的能量范围分别为 1.7—11.7, 0.3—0.8 和 0.45—1.35 MeV,“上海膜”是适合于记录轻粒子的固体径迹探测器。

2. 在一定的剥蚀厚度范围,“上海膜”记录垂直入射质子(400—900 keV)和氘核(450—1350keV)的效率都达到 $100 \pm 1\%$,因此,它可以作为质子或氘核通量的探测器。

3. Benton 的限定能量损失模型适用于“上海膜”记录轻粒子。由 α 粒子、质子和氘核的 $(V-1)$ 和 REL 的函数关系;可以用来预言其它轻粒子的蚀刻性质。

冯锡璋先生和苏峙鑫、朱善根同志对本工作进行了热情的指导和帮助。韩树奎、程业浩等同志帮助进行照射。在此向他们表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fleischer et al., Nuclear Tracks in solids (Univ. of California Press, Berkeley, 1975).
- [2] H. B. Lück, *Radiat. Eff.*, **29**(1976), 205.
- [3] W. D. Jones et al., *Appl. Phys. Lett.*, **10**(1967), 18.
- [4] B. S. Carpenter et al., *Inter. J. Appl. Radiat. Isotop.*, **23**(1972), 157.
- [5] G. Somogyi et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **59**(1968), 299.
- [6] M. Varnagy et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **89**(1970), 27.
- [7] 朱润生, 高能物理与核物理, **4**(1980), 356.
- [8] 崔浣华等, 核化学与放射化学, **2**(1980), 228.
- [9] 崔浣华等, 核技术, **2**(1980), 18.
- [10] R. L. Fleischer et al., *J. Geophys. Res.*, **69**(964), 331.
- [11] E. V. Benton U. S. Naval Radiological Defence Laboratory TR-68-14 (1968).
- [12] G. Somogyi, *Nucl. Instr. Meth.*, **134**(1976), 129.
- [13] E. V. Benton et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **67**(969), 87.
- [14] H. B. Lück, *Nucl. Instr. Meth.*, **124**(1975), 359.
- [15] National Academy of Sciences-National Research Council Publication-1133 (1964).

REGISTRATION OF LIGHT PARTICLES BY A CELLULOSE ACETATE SOLID STATE TRACK DETECTOR

CUI HUAN-HUA WANG SHI-CHENG WU RI-SHENG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

In this paper, the recording energy range and efficiency of cellulose acetate track detector (made by Shanghai Film Works) to proton and deuteron registration were determined, and the upper limit of recording energy to α -particle registration was determined too. The highest energies of α -particle, proton and deuteron registered are 11.7, 0.8 and 1.35 MeV respectively. At a certain removed layer thickness range, the efficiencies of vertical incident protons with energy 400—900 keV and deuterons with energy 450—1350 keV registered are all 100%. The model of restricted energy loss proposed by Benton was tested for the sensitive cellulose acetate track detector using protons, deuterons and alpha particles. It is shown that the model may be applied to light particle registrations. For these light particle registrations by the detector, there is a functional relation between the etching rate ratios and ranges, therefore, it may be used to identify light particles.