

CR-39 核径迹探测器及其在核科学等研究领域中的应用*

翟鹏济 唐孝威

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

王 龙 梁天骄

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘 要 介绍了一种核径迹探测器 CR-39 塑料的特性.这种探测器对带电粒子非常灵敏,它还具有稳定、透明等特点,可记录 p、 α 粒子,裂变碎片和其他带电粒子,它是现有固体核径迹探测器中能量沉积密度探测阈最低的材料.介绍了 CR-39 对带电粒子的响应,给出了各种带电粒子的 v_T 对限定能量损失(REL)的响应曲线.利用 CR-39 与转换屏的组合还可测定能量范围广的中子能谱,可作为方便的个人中子剂量计.介绍了 CR-39 在研究中子、带电粒子引起的核反应产物、角分布和反应截面等特性以及在 α 粒子剂量学和环境科学尤其是氡剂量学中的应用.此外,CR-39 已成功用于生物医学中放射性水平极低的生物组织切片 α 放射性分析.

关键词 CR-39,带电粒子,核科学

CR-39 PLASTIC NUCLEAR TRACK DETECTOR AND ITS APPLICATION IN NUCLEAR SCIENCE

ZHAI Peng-Ji TANG Xiao-Wei

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

WANG Long LIANG Tian-Jiao

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The transparent and stable plastic material CR-39 can be used as a nuclear track detector which is highly sensitive to charged particles. It can record tracks induced by protons, alphas, fission fragments and other charged particles. Among various available solid state nuclear track detectors CR-39 has the lowest deposited energy density detection-threshold. The response of CR-39 to charged particles and the response curve of v_T of different charged particles to REL are given. The CR-39 detector is widely used in studies of nuclear reactions, angular distributions and reaction cross-sections caused by neutrons and charged particles. Neutron spectra, over a wide energy range, can be measured by the combination of CR-39 and a transformation screen. The successful applications of CR-39 in alpha particle dosimetry, environmental science (especially in the measurement of radon) and in biomedicine, such as the analysis of alpha radioactivity in sections of organic tissues, are described.

Key words CR-39, charged particle, nuclear science

商业上用来做太阳镜或作为焊接屏蔽材料通常叫 CR-39(California Resin - No.39)的一种聚碳酸酯塑料,自1978年被发现可作为固体核径迹探测器使用以来^[1],人们对其性能和在不同领域应用的可能性进行了大量研究,不但能制造出不同厚度的实用的 CR-39,而且可以在许多科学研究领域中广泛应用^[2-5].CR-39的分子式为 $(C_{12}O_7H_{18})_n$,分子量为272,其密度为 $1.31-1.32g/cm^3$.它是由液状单体二基醇双烯丙基碳酸酯聚合而成.在聚合时,单体中两个烯丙基官能团能发生网状交联,形成热固

性塑料.由于这些交联网上的链只要受很少辐射量就会断裂形成潜在径迹,因此 CR-39 对带电粒子非常敏感,是现有固体核径迹探测器中具有最低能量沉积密度探测阈的材料.它具有灵敏、稳定、透明等特点.由于制作原料不同和工艺的差异,来自不同厂商的 CR-39,对辐射的响应是不同的,就是说不同来源的 CR-39 有不同的灵敏度.

当带电粒子进入固体材料时,在沿其射程轨迹

* 1999-12-03 收到初稿,2000-02-23 修回

周围造成辐射损伤,这受损严重的狭窄区域称为潜径迹,损伤半径一般只有纳米级.当这种潜径迹经一定条件的化学蚀刻处理,就会因受损伤区域比未受损伤区域容易被腐蚀而使探测器材料中的潜径迹放大,达到普通光学显微镜可观测的微米级程度,该材料就能作为固体核径迹探测器材料使用了.CR-39塑料中的带电粒子潜径迹的化学蚀刻条件通常是70℃,6.25 mol的NaOH或KOH溶液,蚀刻3—6h或根据需要缩短或加长.化学蚀刻时,两个同时发生的蚀刻速度控制着径迹蚀坑的发展,各向同性地移去体材料本身的蚀刻速率称为体蚀刻速率,表示为 v_B ,沿潜径迹的蚀刻速度表示 v_T .显然,只有当 $v_T - v_B > 1$ 时径迹才能保留,通常也用 $v_T - v_B$ 的大小表示灵敏度.

1 CR-39对带电粒子的响应

研究表明,CR-39中径迹蚀刻速度 v_T 可以表示为限定能量损失REL的函数,其中

$$(REL)_{\omega_0} = Z_{\text{eff}}^2 / \beta^2 \times f(\beta)_{\omega_0} \quad (1)$$

式中 Z_{eff} 为有效电荷, $\beta = v/c$, ω_0 是一个可调常数,已找到其最佳拟合值为 $200\text{eV}^{1/3}$.图1给出了70℃,6.25 mol的NaOH蚀刻CR-39中各种带电粒子 v_T 对 $(REL)_{200}$ 的响应曲线.由图1可见,CR-39的电离阈值很低,它扩展到 $Z/\beta = 10$,但并没有其他塑料那样明显的阈特征.曲线斜率的渐进变化表明了灵敏度高低的变化区间.在 $(REL)_{200} = 1.5 \times 10^3 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 时,斜率从1迅速上升,这区间根据高Z核径迹可预期有极好的电荷分辨,甚至可能质量分辨也不错,这有利于初级宇宙线Fe同位素研

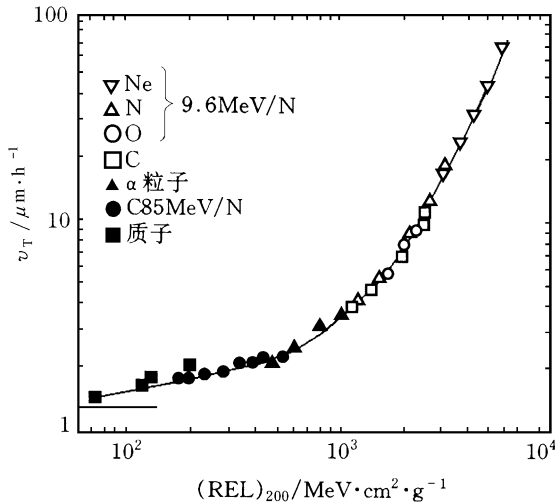


图1 各种带电粒子 v_T 对 $(REL)_{200}$ 的响应曲线

究中应用. $10^2 < (REL)_{200} < 10^3 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 区间响应是低灵敏的.但是由于CR-39的均匀性和响应的各向同性的完美结合,已经证明,对质子和 α 粒子有好的能量分辨是可能的^[6].

2 CR-39用于核反应研究

用核径迹探测器研究核反应的实验很多,一个典型的例子是用CR-39塑料探测器研究中子引起的核反应^[7].首先用已知不同能量的质子和 α 粒子垂直入射CR-39,然后用70℃,6 mol NaOH溶液蚀刻一定时间,测量不同蚀刻时间的径迹直径,从而得到平均径迹直径和粒子能量关系及径迹直径和蚀刻时间关系的刻度曲线(见图2和图3).14.7 MeV的中子打 ^{51}V 靶,引起 (n, α) 和 (n, p) 核反应.用事先摆放在靶周围的刻度过的小片CR-39记录核反应所产生的 α 和 p .照射后标出各片CR-39与入射束之间的位置关系,用与刻度相同的条件蚀刻不同的间隔,测量各间隔的径迹直径,得到直径频度分布,其峰值和刻度曲线相比较就可以得到不同组别的 α 和 p .通过粒子密度统计不但可以得到角分布,而且可算出反应截面.

在带电粒子引起的核反应研究中,CR-39也有很好的应用.天体物理学理论指出,天体能量的核

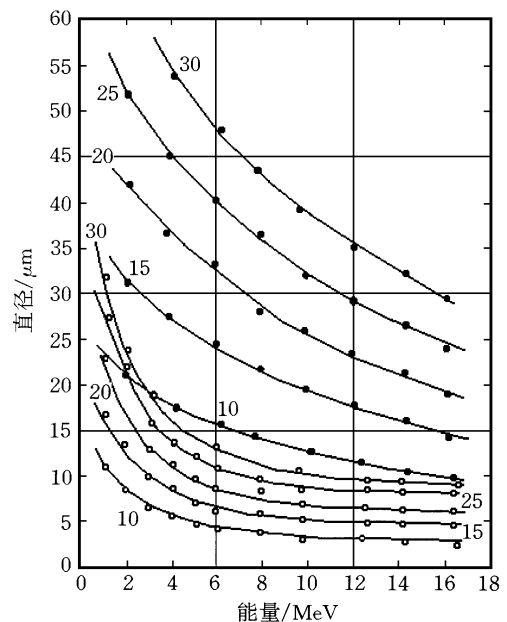


图2 CR-39中质子(空心圈)和 α 粒子(实心点)径迹直径与粒子能量的关系

[蚀刻条件:6 mol NaOH,(70±1)℃.图中数字为蚀刻时间(h)]
相互作用截面是非常小的,不能直接在实验室中测量.一般是在较宽的能量范围内研究这些核反应,然
物理

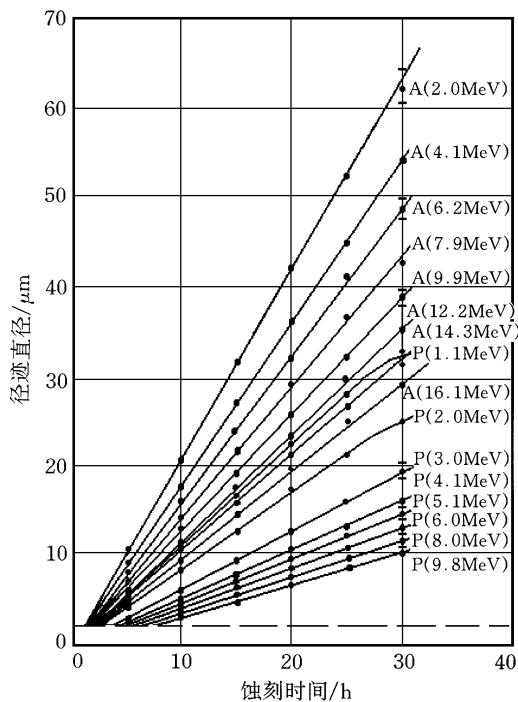


图3 CR-39中不同能量的质子和 α 粒子蚀刻坑直径与蚀刻时间的关系

[蚀刻条件: 6 mol NaOH, (70 ± 1) °C. 图中 A 和 P 分别表示质子和 α 粒子, 括弧内为相应的能量]

后根据核反应理论外推到天体能区. 天体物理中所关注的天体能区的核相互作用 ${}^6\text{Li} + d$, 其 $\text{Li}(n, \alpha)$ 和 $\text{Li}(d, p)$ 反应的出射粒子 α 和 p 的角分布和反应截面的测定, 使用 CR-39 可以得到很好的结果.

使用核径迹探测器对中能重离子反应进行探索性的研究, 很容易观察到某些新类型核反应的总体特征, Khan 等用各种不同类型的固体核径迹探测器研究 86 MeV/N 的 ${}^{12}\text{C}$, 107 MeV/N 的 ${}^{16}\text{O} + {}^{197}\text{Au}$ 引起的核反应, 在 CR-39 探测器中显示出大量的多重反应产物事件. 按照径迹入射角跟踪至作用点, 确定每个事件发射带电粒子的多重性. 从 107 MeV/N 的 ${}^{16}\text{O} + {}^{197}\text{Au}$ 反应产物的多重性分布可以看出, 带电粒子多重性高达 14, 最可几值是 4, 出射粒子角分布明显地集中在向前方向形成角分布峰^[8]. 这样的实验结果给出了中能重离子反应过程的总体图像, 这对反应机制分析是很重要的.

3 CR-39 用于中子剂量学

CR-39 能很好地记录裂变径迹, 利用天然的或浓缩的铀箔经热中子诱发 ${}^{235}\text{U}$ 裂变, 用 CR-39 记录其裂变径迹密度来测定热中子剂量, 通过下式可得到热中子剂量:

$$\rho = \rho_0 \sigma \phi, \quad (2)$$

式中 ρ 是热中子诱发径迹密度(径迹/ cm^2), ρ_0 是 CR-39 的中子灵敏度(径迹/中子·靶), σ 是 ${}^{235}\text{U}$ 的裂变截面(580 靶), ϕ 为热中子剂量, 即时间积分通量(中子/ cm^2). 如果用 ${}^{10}\text{B}$ 和 ${}^6\text{Li}$ 同位素代替铀作转换屏, 则可以克服自裂变引起的本底和自身放射性影响. 在 CR-39 表面涂一层含硼化合物, 或涂在其他材料上使用时, 放一片 CR-39 与其组合, 很适合作为袖珍型个人剂量计或环境监测器, 用于测量反应堆设施核后处理工厂或医院等的中子场. 如采用浓缩 ${}^{10}\text{B}$ 转换屏, 还能测量陆地和水面上的天然热中子本底, 其灵敏度约为 1.3×10^{-2} 径迹/中子.

利用有不同阈能的可裂变核素, 通过 (n, f) 反应测广谱中子剂量. 如 ${}^{234}\text{U}$ (0.26 MeV)、 ${}^{237}\text{Np}$ (0.32 MeV)、 ${}^{236}\text{U}$ (0.70 MeV)、 ${}^{238}\text{U}$ (1.3 MeV)、 ${}^{232}\text{Th}$ (1.5 MeV). 利用 CR-39 与之相继地或同时与这些可裂变转换屏叠合, 照射后可以测定能量范围广泛的中子能谱.

大部分塑料都含 C、H、O(硝酸纤维素还含有 N), 中子对这些原子核的弹性散射截面为 1 靶量级, 同 C、N、O 可发生 (n, α) 反应. 多数塑料核径迹探测器灵敏度约为 $10^{-4} - 10^{-5}$ 径迹/中子. 若中子能量为 5 MeV, 相当于 0.5 至 5 mre m/(径迹/ cm^2), 能产生易于观测的反冲径迹的最小能量约为 0.5 - 1 MeV. CR-39 对 Am-Be 中子(该源产额中 23% 低于 1.5 MeV, 低能成分平均能量为 400 keV, 而高能成分平均能量为 4.5 MeV)的响应灵敏度约为 2×10^{-4} 径迹/中子. 图 4 为 CR-39 中产生的径迹密度与中子通量的关系, 蚀刻条件是 70 °C, 6.25 mol 的 NaOH, 蚀刻 1 h^[9]. 已发现 CR-39 探测中子的能量范围从超过 100 keV 直到 15 MeV, 接近 10 mre m 的灵敏度^[10]. 因此, CR-39 可能是个人中子剂量计应用中最具优势的塑料核径迹探测器.

4 CR-39 用于 α 粒子剂量学和环境科学

CR-39 是最灵敏的塑料径迹探测器, 它记录 α 粒子的能量范围很宽, 从 ~ 0.1 MeV 到超过 50 MeV. 自然界存在三种氡同位素: ${}^{220}\text{Rn}$ ($T_{1/2}$, 56s), ${}^{222}\text{Rn}$ ($T_{1/2}$, 3.8d), ${}^{219}\text{Rn}$ ($T_{1/2}$, 4s), 它们及其子体发射的 α 粒子用 CR-39 能很好地记录. 近年来, CR-39 在国内外已广泛用于环境氡剂量的监测研究^[11-17]. 环境中室内外氡测量主要关心 ${}^{222}\text{Rn}$, 测量时通常使用一个简单的杯形装置、可透性膜及

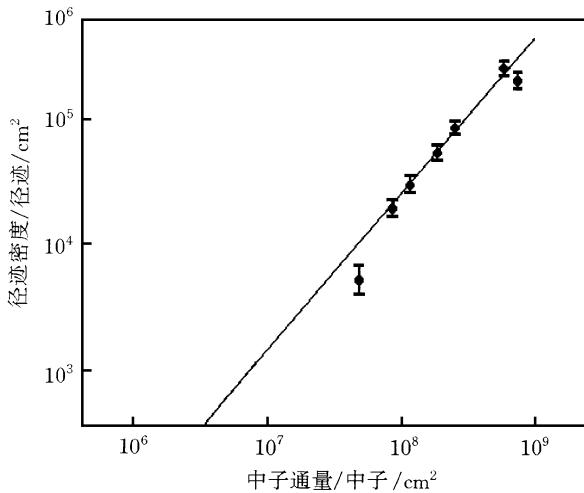


图4 CR-39 中径迹密度与中子通量的关系

CR-39 片.照射前打开 CR-39 包装粘贴于杯底,杯口放可透膜组装后,旋转于预测地点两周以上至几个月,视情况而定.照射完取出 CR-39 片,蚀刻后统计径迹密度,根据下式计算出氡浓度:

$$C = (N/S - B)/(K \times t) \times 100, \quad (3)$$

式中 C 为平均氡浓度(Bq/cm^3), N 为总径迹读数, B 为本底径迹密度(径迹/ cm^2), S 为计数面积(cm^2), K 为刻度系数(径迹 $\cdot cm^{-2}/kBq \cdot cm^{-3} \cdot h$), t 为监测时间(h). 刻度系数 K 是对所用 CR-39 核径迹探测器在标准氡室中,模拟环境条件下进行已知氡浓度的定时照射刻度得到的.

5 CR-39 在生物医学中的应用

CR-39 已成功地用于放射性水平极低.又不能浓集的人体组织切片的 α 放射性分析,把 CR-39 紧贴组织切片上保存在 $-20^\circ C$,直到一年的时间.为完成定量分析,使用能测定单个径迹长短轴直径.投影长度.蚀刻到终点的长度和径迹深度等参量的成像分析系统.做出 CR-39 对 α 径迹响应曲线.照射后探测器上的径迹密度可以通过下式换算为单位质量组织的放射性:

$$A = T \times 11.95/t, \quad (4)$$

式中 A 为单位质量组织的放射性(Bq/kg); T 为测得的(假定来自 ^{210}Po) α 径迹密度(径迹/ cm^2), t 为照射时间(d).

Henshaw 研究对比了吸烟者和不吸烟者肺组织切片的 α 放射性,结果表明,两组有相似性(放射化学的数据说明吸烟者 ^{210}Po 含量水平高),而淋巴结的 α 放射性,非吸烟者却明显偏高(见表1)^[18].

表1 吸烟者和非吸烟者肺部 α 放射性(平均值,单位 Bq/kg 和剂量值(括号内数字单位 mSv/a))

	吸烟者	非吸烟者
支气管	0.66 \pm 0.18(0.35)	0.66 \pm 0.14(0.35)
肺膜	1.45 \pm 0.31(0.77)	1.58 \pm 0.60(0.84)
淋巴结	3.40 \pm 0.80(1.82)	11.20 \pm 1.58(5.98)

利用 CR-39 测定 4 名成人和 7 名 16 岁以下儿童的股骨.肋骨.胸骨和椎骨切片总共 30 个部位切片的 α 放射性.结果显示,儿童骨骼平均 α 放射性比成人低,骨骼中存在的 ^{226}Ra 非常少.骨髓区域的径迹数用于确定骨髓的放射性,因为得到的是均匀分布,所以认为红骨髓与骨有等值剂量.因此得到成人和儿童红骨髓 α 放射性剂量分别为 0.78 和 0.18 mSv/a .从样品中分离出的红骨髓 α 放射性约为 0.16 mSv/a ^[19].用类似方法测定了牙齿的 α 放射性,分析表明牙外侧切片的平均放射性是 $12.4 \pm 2.0 Bq/kg$,内侧表面是 $5.6 \pm 0.6 Bq/kg$.这些总的放射性大大高于身体其他部位的放射性,其他部位代表性的放射性范围是 1—3 Bq/kg .以上这些利用 CR-39 不但可测出 α 放射性,而且可得到组织.骨骼或牙齿 α 放射核的微区分布.如果把正常人肺中的局域沉积分布作成模式,则可作为基准线与在铀矿工作过的人肺情况作比较.

除以上介绍的一些研究领域外,在地震预报氡的监测,环境水特别是含铀量低.样品又特少的水中铀的测定,植物和蔬菜中含硼量的测定等都可应用.总起来说,凡是研究质子. α 粒子.裂变碎片和许多带电离子径迹的领域,CR-39 都可作为核径迹探测器使用,而发挥其有效作用.

参 考 文 献

- [1] Cartwright B G, Shirk E K, Price P B. Nucl. Instr. Meth. 1978, 153:457
- [2] Cassou R M, Benton E V. Nucl. Track Det., 1978, 2:173
- [3] Fower P H, Amin S, Clapham V M *et al.* Proc. 10th Int. Conf. on Solid State Nuclear Track Detectors, Lyon 1979, 239
- [4] Henshaw D L, Griffiths N, Landen O A L *et al.* Nucl. Instr. Meth., 1981, 180:65
- [5] 庞德聆.核技术,1988(11):40 [PANG De-Lin. Nucl. Techniques, 1988(11):40(in Chinese)]
- [6] Benton E V, Preston G C, Ruddy F H *et al.* Proc. 10th Int. Conf. on Solid State Nuclear Track Detectors, Lyon 1979, 459
- [7] Khan N A, Khan H A, Ahmad M *et al.* Nucl. Instr. Meth., 1983, 215:193
- [8] Khan H A, Lund T, Vater P *et al.* Phys. Rev., 1983, C28:1630

(下转第 392 页)