

固体核径迹探测器

李 焕 铁

(中国科学院高能物理研究所)

绝缘固体具有记录核粒子径迹的能力, 这是在 1959 年前后发现的。1958 年在氟化锂单晶体中, 用光学显微镜观察到铀裂变碎片的化学蚀刻径迹。第二年在薄云母中, 用电子显微镜直接观察到裂变碎片径迹。接着, 相继在玻璃和有机聚合物中, 发现带电粒子能产生径迹。此后又发现更多的绝缘物质能记录粒子径迹。就是这样, 产生了固体径迹探测器和径迹蚀刻技术^[1-3]。十多年来, 固体径迹探测器和径迹蚀刻技术的发展, 已导致它可能和已经在很多方面的应用。这些应用场合包括宇宙射线物理、天体物理、核物理、地球物理、地质学、考古学、地球化学、中子剂量和反应堆物理等科学领域。在生物学、生物物理、结晶学等方面也有它的应用。另外, 还在微量定量分析、射线照相术、辐射防护监察、铀矿勘探、纯化过滤和微粒大小测定等工艺方面亦有应用^[4-7]。固体径迹探测器的径迹记录物质的种类较多, 并具有不同的记录阈, 可根据不同的应用需要予以选择。它的一个主要优点是, 具有在强的轻粒子场中记录重粒子的能力, 可以完全把轻粒子排除不记, 某些径迹记录物质能在强的 γ 、 β 、 α 和中子场中探测微量的重粒子, 并且能够鉴定重粒子的电荷、能量和质量, 能保持较好的分辨。再者, 固体径迹探测器的潜伏径迹比较稳定, 不易衰退, 无机探测物质更为突出。这样有可能探测和鉴定强度很低的 (例如比 1/厘米²·年更低的) 稀有重粒子。另外, 在地球、陨石和其它星体物质中, 存在着各种天然的无机径迹记录物质, 记录和贮存了遥远的和从古至今的天体自然辐射过程的粒子径迹, 从中可以发掘不少难得的情报。正因为有上述优点, 所以, 在核物理中, 固体径迹探测器能用于裂变物理、重离子反应、超铀元素、超重元素合成等方面的研究^[10]。而在宇宙射线物理和天体物理中, 一方面凭借气球、火箭、卫星或飞船, 把大面积塑料径迹探测器送到高空飞行, 可以测量重宇宙射线的成份和能谱及其变化; 另一方面, 分析陨石、矿物、飞船部件和月球物质样品中的径迹, 也可以鉴定重初级宇宙射线成份, 发掘有关其起源和年龄的情报, 同时, 也可用来在天体中、宇宙射线中、陨石和矿物中寻找超重元素的踪迹。在研究天体演化这一基本问题上, 固体径迹探测器能提供过去和现在的情报, 人们对它寄予较

大的希望。目前, 国外在这些方面已经用它作了不少的研究。国内也已用它投入核物理方面的研究。固体径迹探测器在其它方面的应用也比较广。这些应用反过来又促进了对探测物质的径迹记录特性和径迹形成机构的研究。在了解不同类型的固体物质对各种电离粒子的响应方面, 已有显著的进展。同时, 在实践中也产生了鉴定重粒子的电荷和能量的方法, 以及若干自动径迹测量技术。

显示和观察绝缘固体中的核径迹, 有三种方式: 第一, 用电子显微镜直接观察; 第二, 带电粒子径迹经化学蚀刻后, 在普通的光学显微镜下可以观察; 第三, 某些固体, 如含银的晶体或玻璃, 经过一定手续, 使如银之类的金属离子沿辐射损伤区域沉积, 呈现类似核乳胶的径迹^[4]。第一种方法具有云室和核乳胶所不能达到的空间分辨 ($\sim 50 \text{ \AA}$), 但需制备极薄的样品。第三种方法仅限于某些物质。下面主要介绍采用化学蚀刻的固体核径迹探测器, 它的发展和各种应用。

一、径迹形成

在绝大多数绝缘固体中, 都可以产生重带电粒子径迹。一般说来, 电阻率大的物质, 能够记录和贮存径迹。至今, 在电阻率小的良半导体和金属物质中, 没有观察到径迹。一重带电粒子通过绝缘固体, 沿其轨道产生一狭窄的辐射损伤区域, 称为潜伏径迹。关于这区域的物理和化学特性, 尚不十分清楚。已经知道在这区域中, 平均分子量减少; 化学溶解率增加; 物理密度发生变化; 对于聚合物, 还有链端数增加, 光吸收特别是紫外光吸收的增加。这区域中的产物种类, 有机聚合物比无机物情况更复杂, 除了电子和离子以外, 有激发分子 (寿命较短)、自由基、和某些低分子量辐射分解产物。辐射损伤区域的大小, 以裂变碎片径迹为例, 用电子显微镜观察云母中的蚀刻径迹, 以及用电化学电阻技术测量蚀刻径迹的大小^[11,12], 都得到辐射损伤区域的直径为 $30-50 \text{ \AA}$ 。对于有机聚合物, 潜伏径迹直径小于 100 \AA , 并且在 50 \AA 以内的损伤才是重要的。

关于辐射损伤和径迹形成机构, 目前尚了解的不够, 但有某些进展。一通过无机绝缘固体的重带电粒

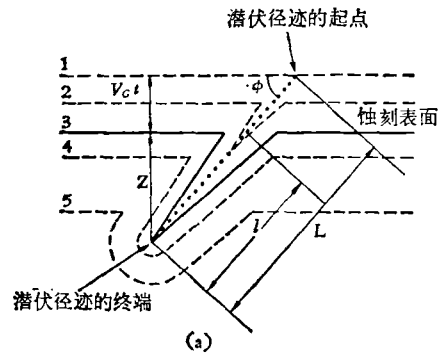
子, 主要以两种方式损失能量: 大部分能量用于电离和激发; 而较小部分能量以同原子的弹性相互作用消耗。但后者这种同原子直接碰撞引起的原子位移, 除了很低的人射粒子能量(小于 $\sim 0.05 \text{ MeV/amu}$)外, 不是形成径迹的一般原因, 否则将期望在金属和良半导体中也产生径迹。对于有机聚合物, 则由于入射带电粒子的电离和激发, 次电子的多次碰撞和激发电子态的衰变, 导致分子链的断裂和分子的分解, 从而产生离子、自由基和其它的分解产物。由此, 沿粒子轨道产生一辐射损伤区域。过去几年对径迹形成机制提出了几种解释模型和判断标准。它们把径迹记录同粒子和物质的参数联系起来; 把沿径迹的化学蚀刻率同作为粒子的参数(电荷、质量和能量)和物质的参数的某函数联系起来; 并指出径迹能否形成和这函数值的关系。最初采用总能量损失率 $((dE/dX)_T)$ 来描述和判断径迹的形成, 但由于未考虑 δ 电子带走能量, 而在一些情况下与实验矛盾。后来又提出离子爆发峰模型^[13], 采用原电离率 $(J = d_i/dX)$ 来描述。相隔不久又相继提出了限定能量损失(REL)模型^[14]和能量沉积模型^[15]。关于后面这三种解释模型, 一般通过参数的调整, 还能说明实验现象。实际上它们的函数形式是相似的。相对说来, 离子爆发峰模型或初级电离标准更适用于无机固体, 而限定能量损失模型适用于有机聚合物。但它们也都还存在缺陷, 如初级电离率标准没有考虑所有的次电离, 并且用到有机聚合物时意义变得含糊; 限定能量损失模型在低能($\sim 0.05 \text{ MeV/amu}$)与实验发生矛盾; 能量沉积模型没有考虑“初级激发”的贡献。因此都只能说是径迹形成的近似描述。看来, 同时考虑电离和激发, 并追踪电子的多次碰撞和踪迹, 有助于获得正确的理论描述。

二、化学蚀刻和径迹参数

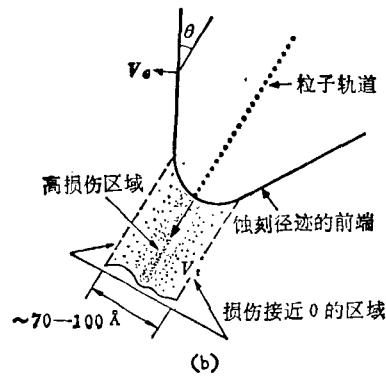
绝缘固体经带电粒子照射后, 浸入化学蚀剂溶液中, 狭窄的辐射损伤区域中的化学溶解率, 比固体表面的溶解率大很多。由于辐射损伤在粒子轨道附近最大, 并随离粒子轨道的距离增加而减小。故沿轨道方向径迹的化学蚀刻率达最大值 V_i (图1b)。而在某距离(25—50 Å)处降到最小值, 以致蚀刻径迹内侧的蚀刻率, 接近于固体表面的化学浸蚀率 V_G 。因为在相继的化学蚀刻中, 在到达可蚀刻的潜伏径迹的终点以前, 径迹前端保持其形状^[16], 故有

$$\sin \theta = V_G/V_i.$$

V_i 为常数时, 产生锥形径迹, 锥角为 θ 。图1a表示不同时刻的蚀刻径迹。蚀刻到潜伏径迹的终点后, 径迹端逐渐变圆, 并整个径迹变浅。如果沿粒子轨道方向 V_i 减小, 将产生凸面径迹; V_i 增加, 产生凹面径迹。对于较轻的粒子, 锥角也较大, 各种形状的蚀刻径



(a) 不同时间的蚀刻径迹(V_i 为常数);



(b) 蚀刻径迹前端的放大示意图

图1 粒子潜伏径迹的化学蚀刻

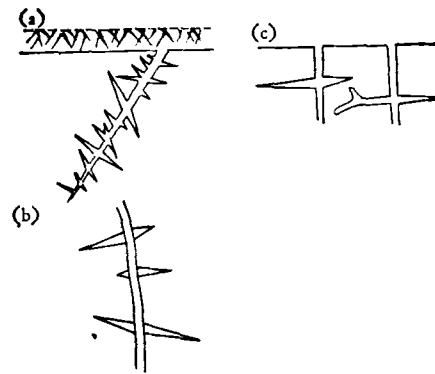


图2 蚀刻体径迹的 TINT 方法的示意图

(a) 无机固体中, 和非常长的径迹相截的径迹的蚀刻(表面磨去10—20 μ);

(b) 和裂缝相截的径迹向两方向蚀刻;

(c) 有机聚合物中, 和垂直入射的 ^{40}Ar 离子(10MeV/amu)的蚀刻道相截的径迹向两方向蚀刻

迹的形成, 重要的因素是 V_i 和 V_G 的相对竞争。蚀刻径迹长度 l 、锥角 θ 以及垂直入射粒子径迹的直径 D , 都与 V_i/V_G 值有关。 V_i/V_G 值主要决定于 J 或 REL , 但也与化学蚀剂类型、浓度和温度, 以及记录物质的化

表 I 各种径迹记录物质的记录阈值、最轻可探测的粒子、化学蚀刻条件和径迹衰退温度

径迹记录物质	记 录 阈 值				化学蚀刻条件	径迹“衰退” 温度(1小 时加热)
	J_c (相对单位)	REL_c (MeV·cm ² / mg)	$(dE/dx)_{rc}$ (MeV·cm ² / mg)	最轻可探 测的粒子		
硝酸纤维素	~1.3—2.3	~1.1	~1.2—1.3	H	6N KOH 或 NaOH, 22°C, 2—9 小时; 40°C, 5—60 分.	~85°C
醋酸纤维素 (Cellit)			~0.2	H		
三醋酸纤维素				He	20g NaOH + 16g KOH + 4.5g KMnO ₄ + 90g H ₂ O, 50°C, 10—200 分.	
醋酸-丁酸纤维素			~2	He	1 份 16% NaClO + 3 份 6.25N NaOH; 或 6N KOH, 60°C 15—120 分.	>125°C
聚酯膜 HBpaIT (组成为 C ₁₇ H ₂ O ₂)			~3	B	6N NaOH 或 KOH, 70°C, 8 分	
聚碳酸酯 (Lexan Makrofol Kimfol Zelux)	~6.8	~3.3	~4	C 和低能 He	1) 6N NaOH 或 KOH; 6N NaOH + 0.3% Dowfax 表面活化 剂, 60°C, 20 分—8 小时 2) 1 份 6.25N NaOH + 1 份 甲醇, 22°C, 30 分—3 小时或更长	~185°C
涤纶			~4	O	6N NaOH 或 KOH, 60°C, 40 分—8 小时	>185°C
塑料 (Cronar)	~13				6N NaOH, 60°C,	
塑料 (Melinex)	~20				15% NaOH, 60°C, 40 分—8 小时	
云母	~37		~13	Si	48% HF, 或 20% HF + 20% H ₂ SO ₄ , 23°C, 20 分—几小时, (或用热磷酸)	~525°C
P ₂ O ₅ 玻璃			~15		48% HF, 23°C, 30 分	~700°C
SiO ₂ 玻璃					48% HF, 23°C, 1—10 分	~370°C
钠-钙玻璃					48% HF, 22°C, 40—100 秒	~500°C
Tektite 玻璃			~15	S	48% HF, 23°C, 20—40 秒	
正长石	~44—52		~15	S	48% HF, 23°C, 10 秒	>915°C
石英			~15	S	KOH 溶液, 215°C, 21—40 分	~725°C
绿帘石					KOH 或 NaOH 溶液, 220°C	~625°C
楣石					KOH 或 NaOH 溶液, 220°C	~350°C
磷灰石	~78				65% HNO ₃ , 23°C, 15—40 秒	~775°C
倍长石					KOH 溶液, 200°C, 15 分	
拉长石					KOH 溶液, 210°C, 15 分	
锆石			~19	Ca	85% H ₃ PO ₄ , 450—500°C, 1 分; 或 20% NaOH + 5g H ₂ O, 220°C, 15 分—5 小时	~700°C
斜长石			~19	Ca	KOH 或 NaOH 溶液, 210°C	~875°C
透辉石					KOH 溶液, 210°C, 15 分	~475°C
紫苏辉石	~81				NaOH 溶液, 200°C, 3—10 分	
辉石			~20	Ca	2HF + H ₂ SO ₄ + 280H ₂ O, 23°C, 30 秒以上	~500°C
橄榄石			~20	Ca	KOH 溶液, 160°C, 6 分; 或 10% HF, 23°C, 30 秒; 或 2HF + H ₂ SO ₄ + 4H ₂ O, 23°C, 15 分	

学成分有关,其值为从1到 10^4 数量级。 $V_i \approx V_G$ 时,径迹难以形成。对于一定的记录物质,不仅要选用适合的蚀剂,而且需要选择适宜的条件并保持一定,使 V_i/V_G 保持在较大的固定值。已知的各种常用的径迹记录物质的蚀刻条件(包括化学蚀剂及其浓度、温度和蚀刻时间),列在表1中。对于某些记录物质,蚀刻产物的浓度对 V_i/V_G 值也有些影响。此外,用超声波激励,可以促进径迹的蚀刻,甚至可以进一步增加 V_i/V_G 值。在固体内部的体径迹的蚀刻方法,对于无机物,有TINT方法和TINCLE方法^[17],即同偶然非常长的径迹或裂面相截的那些径迹,可在截点向两方向蚀刻,对于有机聚合物或玻璃,可用重粒子(如10MeV/amu的 ^{40}Ar 离子)垂直入射,造成蚀刻细道,和细道相截的径迹可向两方向蚀刻(图2)。

三、固体径迹探测器的特性

1. 径迹记录物质和灵敏度

不同种类的径迹记录物质的灵敏度相差很大,常见的物质的记录阈值(J_c 、 REL_c 和 $(dE/dX)_{rc}$),和最轻可探测的粒子,分别列在表1中。至今,硝酸纤维素是最灵敏的物质,可探测几百keV至1个多MeV的质子^[18]和 $Z \geq 32$ 的相对论粒子。它有无色的和着色的。不同制备者用的配方和成份有些差异,因而灵敏度也不一致,其中Daicell硝酸纤维素塑料(日本产品)是较灵敏的一种。目前不易得到大面积均匀的塑料,尚在研究和改进。醋酸纤维素一般可探测 α 粒子,但有的亦可记录几百keV的质子径迹。聚碳酸酯记录碳(C)以上的粒子和 $Z \geq 55$ 的相对论粒子,并可记录低能 α 粒子径迹,是一种常用的也是研究得较多的物质。各国生产的型号不同,但灵敏度差别不大。厚度从 10μ 到 500μ 以上,能做到大面积均匀。国内生产的聚碳酸酯(朝阳和晨光产品)的径迹记录性能也比较适合。另外一些已生产的如涤纶之类的聚酯膜,也大都都可以记录粒子径迹。云母是最早发现的和常用的无机探测物质,可记录硅(Si)以上的粒子径迹。玻璃除自然存在的(如Tektite玻璃)外,人造的有好几种,其中氧化磷(P_2O_5)玻璃和氧化硅(SiO_2)玻璃是很有用的径迹记录物质。氧化硅玻璃的纯度也比较高。此外,在广阔的自然界中,存在于地球和月球以及陨石中的如晶体和玻璃之类的无机物,有不少是天然的径迹记录物质。其阈值相当高,也不易受环境因素的影响。

2. 径迹蚀刻率和电离率的关系

一定的蚀刻条件下, V_i 仅为 J 或 REL 的函数。对于几种塑料和玻璃, V_i - J 关系已由经验得出,如图3和4所示^[19]。另外,由实验得出的硝酸纤维素的 V_i - REL 关系,实际上与 V_i - J 关系差不多(图3)^[14]。某

些具有快变化关系的物质,如硝酸纤维素、三醋酸纤维素、聚碳酸酯、氧化磷(P_2O_5)玻璃和氧化硅(SiO_2)玻璃,适用于粒子鉴定。

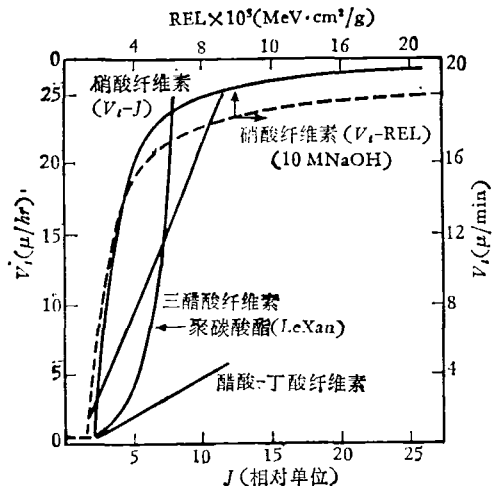


图3 几种聚合物的 V_i - J 关系和硝酸纤维素的 V_i - REL 关系

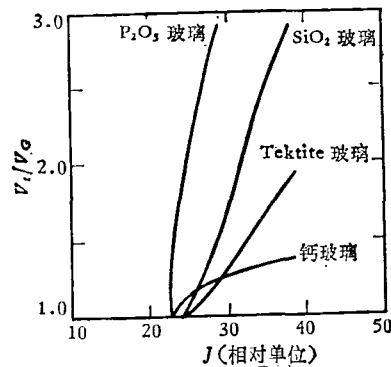


图4 各种玻璃的 V_i - J 关系

3. 记录效率和临界角

在很小的倾角 ϕ 入射的粒子,即使 $J > J_c$,如果 $V_i \sin \phi < V_G$,则潜伏径迹来不及蚀刻就被溶解了。故存在一临界角 $\phi_c = \sin^{-1}(V_G/V_i)$,它实际等于锥角 θ 。 $\phi \leq \phi_c$ 的入射粒子不能产生蚀刻径迹。临界角主要表征记录物质的特性,但也与蚀剂的浓度和温度有关。由此对于具有恒定的 J 并大于 J_c 的入射粒子,各种物质仍具有不同的记录效率 η ,对于一厚度为 d 和各向同性发射的粒子源,记录效率为:如果 $x \geq \sin \phi_c$,有 $\eta = 1 - \{\sin^2 \phi_c / [(2-x)x]\}$;如果 $x \leq \sin \phi_c$,有 $\eta = 1 - [(2 \sin \phi_c - x) / (2-x)]$,其中 $x = d/R_0$, R_0 为粒子在源中的射程。或一表面为同一电离率的粒子各向同性地照射,有 $\eta = \cos^2 \phi_c$;薄平面源为 $\eta = 1 - \sin^2 \phi_c$ 。常用的蚀刻条件下,几种物质的临界角

(对于裂变碎片得出)大致如下:聚碳酸酯 $\phi_c < 1^\circ$; 醋酸纤维素 $\phi_c \sim 1-2^\circ$; 涤纶 $\phi_c \sim 4-5^\circ$; 硝酸纤维素 $\phi_c \sim 4-12^\circ$ (与制备方法和成分有关); 各种玻璃 $\phi_c \sim 25-35^\circ$ [20]; 云母的剥裂面几乎不溶解, 即 $V_c \ll V_i$, 以致 ϕ_c 非常小, 所以云母和聚碳酸酯以很高的效率记录裂变碎片, 而某些玻璃的效率甚至小达 40%。

4. 温度效应

室温下, 潜伏径迹很稳定, 长时间不衰退。关于低温, 实验表明: 硝酸纤维素在 -26°C , 云母和橄榄石在液体氮温度下, 潜伏径迹的形成无明显的变化。但在高温下, 潜伏径迹发生衰退, 即可蚀刻的潜伏径迹变短, V_i 减小, 而 θ 增加, 从而蚀刻径迹的长度、直径和数目都随之减小。在很高的温度下, 甚至潜伏径迹完全消失, 即发生所谓“退火”。各种物质的衰退温度列在表 1 上。衰退温度与受热时间有关, 稍低的温度但长的受热时间, 同样可使潜伏径迹完全消失。一般无机物耐较高的温度, 至少在 200°C 以上。自然石英有最高的衰退温度, 在 710°C 下 25 天内衰退很小。但也有某些玻璃和无机物, 径迹在比较低的温度下衰退。有机聚合物的衰退温度不高, 最灵敏的硝酸纤维素仅在 60°C 以下才比较稳定。聚碳酸酯在 92°C 下 24 小时发生明显的效应。聚合物的温度效应与相对湿度有关。 60°C 下, 聚碳酸酯在 77% 的相对湿度下径迹衰退 25%, 而在干燥空气中无衰退。但是, 在 95% 的相对湿度下, 聚碳酸酯在 30°C 三个月内无衰退。此外, 聚合物中的体径迹比表面径迹具有较高的稳定性。在高温下退火可以改变无机物的径迹记录阈。高温下潜伏径迹的部分或全部消失的原因, 对于有机聚合物, 可能是由于十分稳定的自由基的结合和氢过氧化物的分解; 无机物可能归之于原子扩散。

5. 紫外光氧化效应

有机聚合物存在紫外光氧化效应, 以 Lexan 聚碳酸酯为例, 在电离粒子照射后, 再经紫外光照射, 不仅径迹蚀刻率 V_i 显著地增加, 而且径迹记录阈降低, 径迹长度增加。而 V_G 却增加不大。 V_i 增加的百分率随粒子的电离率或 REL 增加而增加 (图 5) [21]; 对重粒子径迹的效应比轻粒子大, 并且这效应随紫外光强度而增大。其它类型的聚碳酸酯有类似的效应。对于涤纶和其它聚酯膜也观察到蚀刻的加速。但硝酸纤维素膜在紫外光照射后, 不仅 V_i 增加, 而且 V_G 也增加很大, 以致径迹呈球形扩展, 并蚀刻径迹数随照射量增加而减少。紫外光氧化效应仅在氧存在下才能发生, 而在真空中照射无效应。目前的解释如下: 在潜伏径迹区域中, 由于电离粒子作用形成的产物, 吸收紫外线能量, 进一步引起化学键的断裂, 并形成自由基, 自由基

能同氧起反应, 从而产生永久性的分离, 导致化学反应率的进一步增加。紫外光氧化效应随表面内的深度而减小, 以致径迹中不同区域的 V_i 值不一致而呈现倾角效应

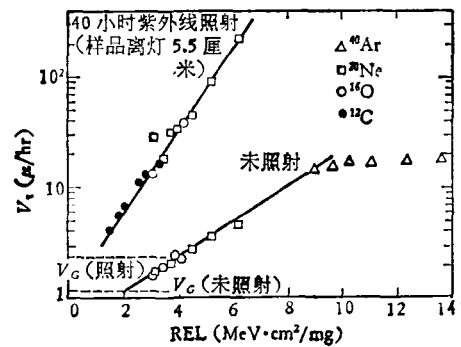


图 5 聚碳酸酯 (Lexan) 的紫外光氧化效应(紫外光源为 GEH400A33-1/T16 汞弧光灯, 蚀刻条件: $6.25\text{N NaOH } 70^\circ\text{C}$)

6. 环境辐射效应

很大剂量的 X、 γ 射线和电子的照射, 对径迹记录特性产生某些影响。如用 2.8×10^8 拉特的 2MeV 电子照射聚碳酸酯 Lexan, V_G 增加 12 倍, 裂变碎片径迹的长度对宽度比值由 8.7 减至接近于 1 [22]。用 1.5 MeV 电子在氮中照射硝酸纤维素直到 5×10^7 拉特, V_G 近似按 $\exp(0.046D)$ 增加 (D 表示单位为兆拉特的剂量), 直到 4×10^8 拉特饱和, V_G 为未受照射时的值的 900 倍。对于三醋酸纤维素, V_G 以类似的方式增大, 到 4×10^8 拉特, V_G 为未受照射时的值的 3000 倍。另外, 用直到 3.5×10^7 拉特的 γ 射线照射赛璐珞膜, 实验表明, α 粒子记录阈能随 γ 射线照射剂量增加而减小 [23]。无机物不易受环境辐射的影响, 用 1.5MeV 电子照射橄榄石、玻璃和云母直到 2×10^9 仑, 对记录和贮存裂变碎片径迹无明显的效应。

7. 其它效应

聚碳酸酯长期置于空气或氧中, 呈现老化效应, 即径迹蚀刻性质随潜伏径迹的年龄慢慢地变化。径迹蚀刻率大致对数地随时间增加, 并与电离率有关。这有点类似于光氧化过程。另外, 也有人在用 α 粒子照射硝酸纤维素和醋酸-丁酸纤维素膜时, 加直到 10^6 伏/厘米的电场, 发现蚀刻径迹数目和沿单个径迹的损伤的量都为电场所加剧。臭氧对塑料探测器的径迹蚀刻参数有些影响, 有引起记录灵敏度增加的趋势。用不同的化学蚀刻, 径迹蚀刻率可以相差很大, 并且能改变有机聚合物探测器的灵敏度。

四、粒子的鉴定

固体核径迹探测器可以用来鉴定重粒子的电荷和质量, 确定其能量和方向。主要根据如下: V_i/V_G 值为 J 或 REL 的函数, 因而也是粒子的电荷、质量和能量的函数; 另一方面, 径迹长度、直径和锥角又都是 V_i/V_G 值的函数, 因此, 鉴定粒子可以通过测量蚀刻径迹长度、直径或锥角来作。已有如下的鉴定方法。

1. 用蚀刻率方法鉴定重粒子的电荷和质量

对于入射到塑料中的重粒子, 测定粒子轨道上至少两点的 V_i 值, 便可以鉴定它的原子序数 Z 。同时, 因为具有相同的电荷但不同质量的粒子, 在相同的速度下, 在正比于质量的剩余射程处, 将有相同的 J 或 REL 值。因而在邻近同位素的百分质量差足够大的情况下, 由上述 V_i 值的测量, 也可鉴定重粒子的质量数 $A^{[14, 17]}$ 。测量相应于剩余射程 R 处的 V_i 值的方法有两种: 一是采用由厚 $\sim 250\mu$ 的片组成的塑料迭, 测量沿粒子轨道上各塑料片表面上的蚀刻锥长 L_i , 和相应的剩余射程 R_i (图 6a)。再是复制径迹, 并测量单个径迹上各点的宽度 D 和锥角 θ , 而由此可直接确定不同 R 处的 $V_i^{[24]}$, $R = x + (D(x) \tan \theta)/2$, $V_i = V_G \csc \theta$ (图 6b)。由加速器重粒子的刻度, 可得一组属于各种 Z 和 A 的 V_i-R 曲线, 或 L_i-R_i 曲线。而由原电离率公式, 结合射程-能量关系, 并根据 V_i-J 关系曲线, 可计算出一组属于不同 Z 和 A 的 V_i-R 曲线, 以此鉴定未知重粒子。按照此法, 用硝酸纤维素和聚碳酸酯塑料探测器, 能够鉴定 $Z \geq 6$, $E > 10 \text{ MeV/amu}$ 的高能重粒子; 能够分辨质量差大约 9% 或更小的高能重离子的同位素。某些玻璃和无机物径迹探测器亦可用上述方法鉴定重粒子。另外, 还发展一种允许用聚碳酸酯

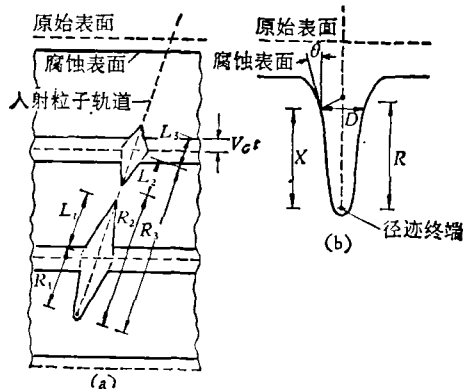


图 6 鉴定粒子的电荷, 测量不同剩余射程 R 处的 V_i 。(a) 沿粒子轨道测量塑料迭各表面的蚀刻锥长 L_i 和相应的剩余射程 R_i 。(b) 测量单个复制径迹各点的直径 D 和锥角 θ

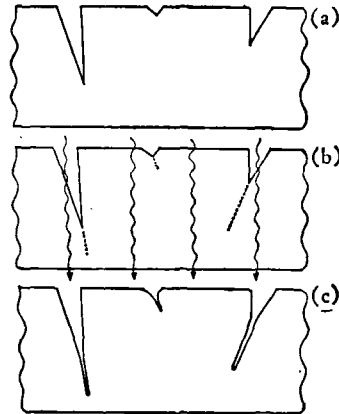


图 7 鉴定能量较低的重粒子

a) 第一次蚀刻; b) 紫外线照射, 以增加粒子轨道其余部分的蚀刻率; c) 第二次短的蚀刻, 以得出蚀刻径迹锥端的剩余射程

塑料鉴定能量更低的重粒子的方法^[25], 如图 7 所示, 先作第一次蚀刻, 出现蚀刻径迹锥, 但还未到达潜伏径迹终点; 然后用强紫外线照射, 以增加未蚀刻到的潜伏径迹区域的蚀刻率; 最后作短时间的第二次蚀刻, 给出细的蚀刻径迹管。由第一个蚀刻锥长 (经过对表面侵蚀掉的厚度校正) 除以蚀刻时间便得到 V_i , 由第二个蚀刻管长给出蚀刻锥端的剩余射程 R , 由此即可作出鉴定。

2. 总径迹长度法鉴定重粒子的电荷

某些无机固体, 重粒子的最大径迹长度 L_m 对原子序数的关系已经得出 (图 8)^[26]。采用蚀刻径迹的 TINT 和 TINCLE 方法, 能测量无机物中 $\sim 3\mu$ 以上的径迹长度, 由此可以鉴定重粒子的电荷。此法首先用于分析陨石和月球无机物中的径迹, 以得到太阳和银河系宇宙射线 ($Z > 20$) 的电荷组成。另外, 硝酸纤维

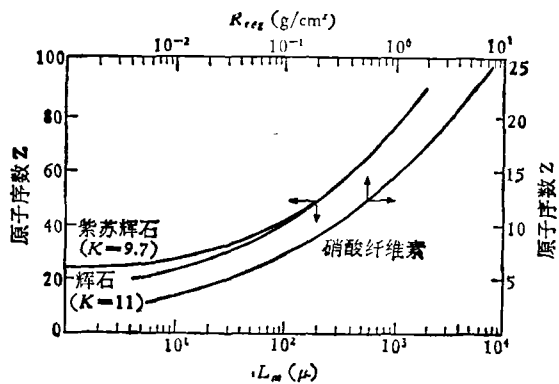


图 8 最大径迹长度 L_m 或最大记录射程 R_{reg} 对原子序数 Z 的关系

素塑料中粒子的最大记录射程 R_{rel} (即 $REL > REL_c$, 的径迹长度)对 Z 的关系, 也已得出 (图 8)。由此, 从塑料中的总径迹长度, 可以鉴定更低的电荷的粒子。

3. 确定粒子的能量

对于硝酸纤维素和聚碳酸酯, 实测的重粒子的径迹长度同计算的射程在 2% 以内符合, 这些物质的射程-能量关系已有计算值, 故从径迹长度, 经过对表面侵蚀校正, 可以确定粒子的能量^[16]。另外, 从粒子的蚀刻径迹直径对能量的关系, 也可确定粒子能量。按这方式, 几种玻璃已用于测量裂变碎片的能量, 其中以磷酸盐玻璃较好, 分辨为大约 $1-2\text{MeV}^{[10]}$; 用硝酸纤维素和醋酸纤维素塑料, 可测定直到大约 9MeV 的 α 粒子能量, 分辨为大约 200keV 。在某些情况下, 由粒子径迹数对深度的关系, 也可推知重粒子的能量分布, 曾以此测得铁 (Fe) 组宇宙射线能谱。

除此以外, 利用热退火特性, 改变无机探测器的径迹记录阈, 以及采用吸收剂等办法, 探测所欲的重粒子而排除其它干扰, 在某些分裂反应的研究和超重元素的探索实验中被采用。从硝酸纤维素中径迹直径的差异, 和径迹出现的先后, 也能辨认核反应放出的不同质量的粒子。关于粒子的方向, 根据它所产生的锥形径迹的特点, 和径迹在探测片中的方位, 便可以辨别。

五、径迹测量和计数

测量径迹参数的方法, 最基本的是用光学显微镜观察。在低放大倍数扫描, 在高放大倍数 ($\sim 1500\times$) 下测量。被测粒子的能量下限约为 $1\text{MeV}/\text{amu}$ 。用电子扫描显微镜测量径迹复制品, 是不久前发展的一种技术, 已经采用。另外一种采用电子学读数的电阻脉冲法^[17], 也正在研究之中。这二法能测量更低能量的粒子径迹。此外, 也有人用激光衍射方法测量径迹大小^[18]。

关于径迹计数, 除了用光学显微镜作人工计数外, 已发展几种自动计数技术。火花计数装置已用于测量薄塑料膜中的穿透的蚀刻径迹, 适用于低密度测量。电视象分析器和飞点粒子分析器是两种已经生产的仪器, 都是把径迹变为电讯号然后自动记录, 实践证明是适用的。还有不久报导的自动径迹扫描器^[19], 用计算机控制样品移动, 并可自动调焦。

在径迹计数技术发展过程中, 也先后产生过一些特殊的方法。测量高密度径迹数的, 有透射率法、比较电阻法、紫外线和 α 粒子穿透法等。测量低密度径迹数的, 一般把径迹蚀刻穿透, 然后采用白光投射、色液穿孔和氮气穿孔着色法等。此外, 采用涂在透明塑料上的极薄的 ($\sim 8\mu$) 着红色的硝酸纤维素膜, 加绿滤光片观察穿透的蚀刻径迹, 更便于自动计数。

总的说来, 固体径迹探测技术的应用较广, 但它还比较年青, 目前正处在发展阶段。从它本身来看, 有些问题尚待进一步研究, 比如说, 塑料径迹探测器很有用, 而如何制备特性好的塑料径迹记录物质, 有必要进一步研究; 用固体径迹探测器鉴定带电粒子的技术是在 1967 年前后才开始发展起来, 如何进一步完善以及发展新的鉴定方法, 值得研究; 目前在低能重粒子的探测和鉴定方面还存在问题。径迹形成机制的实验研究和理论描述也还需要进一步深入。再者, 在发展固体径迹探测器的应用方面, 也有一些实际问题尚待解决, 比如说, 径迹参数测量和径迹计数的方法需要进一步改进和向自动化发展, 以达到应用方便和实际可行, 并能提高测量精确度。另外, 固体径迹探测器是否可用来探测和鉴定轻粒子? 至今最灵敏的硝酸纤维素塑料只能记录几百 keV 范围的质子, 是否能找到更灵敏的塑料配方或其它径迹记录物质, 或更灵敏的显示潜伏径迹的方式, 不是不值得研究的问题。在国内, 大多数径迹记录物质和基本观测工具都已具备, 在已有研究的基础上, 完全有条件在这些方面迈出大步, 并把它用到宇宙射线和天体演化问题的研究中去, 用到核物理更多方面的研究中去, 用到地质考古、微量定量分析和其它方面去。

参 考 文 献

- [1] Young, D. A., *Nature*, **182** (1958), 375.
- [2] Silk, E. C. H. Barns, R. S., *Phil. Mag.*, **4** (1959), 970.
- [3] Fleischer, R. L. et al., *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **15** (1965), 1.
- [4] Price, P. B. Fleischer, R. L., *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **21** (1971), 295.
- [5] Fleischer, R. L. et al., *Science*, **178**-4058 (1972), 255.
- [6] Price, P. B. et al., *Phys. Rev.*, **D3** (1971), 815.
- [7] 道家忠义 *Radioisotopes*, **21-2** (1972), 121.
- [8] Comstock, G. M. et al., *Science*, **172** (1971), 154; Enge, W., *Atomkernenergie*, **20-3** (1972), 231.
- [9] Becker, K., *ORNL-4720* (1971); Кеирим-Маркус, И. Б. и др., *Атомная Энергия*, **34** (1973) 11.
- [10] Fieder, G., Kollner, H. S., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **15** (1972), 128, 116; England, J. B. A., *Techniques in Nuclear Structure*, Part I (1974), 13.
- [11] Childs, C. B. et al., *IRE Trans. Nucl. Sci.*, **9** (1962), 413 and *NASA-TM-X-2440* (1972), 138.
- [12] Bean, C. P. et al., *J. Appl. Phys.*, **33** (1963), 3407.

(下转第 205 页)