

简 报

D-T中子诱发 $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$
核反应中剩余核在靶中前、后冲平均
投影射程的测定

郭应焕 赵珍兰 张景烈 罗世华 黄忠祥 杨瑞英 江泳 冯锡璋

(中国科学院高能物理研究所)

(关键词 D-T中子诱发核反应, 铜靶, 铝靶, 剩余核, 前、后冲平均投影射程)

一、引 言

随着可控聚变反应研究的进展, 近年来提出了D-T中子对将来可控聚变反应器材材料损伤效应研究的重要性^[1]。这种损伤效应包括活化掺杂、溅射、反应等使材料的成分和结构发生变化的效应。它会改变材料性能、诱发化学腐蚀。原子核在(n, X)型反应中, 除裂变外, 剩余核的质量常与靶核的质量相近。当离子质量与介质核质量相近时, 有关其射程的性质还了解不多^[2], 因此在讨论上述材料损伤问题时会遇到一定困难。剩余核反冲射程的测定在核技术中很重要。它不但能直接用来研究中子的损伤效应, 还能为近质量离子注入提供重要数据^[3], 在用活化法准确测定核反应截面中它也是必不可少的^[4]; 此外, 它还能核反应机制提供重要信息^[5,6]。剩余核反冲技术很早就用于介子产生的研究中^[7]。反冲技术也是一种快速放射分离方法。本工作测定了D-T中子诱发 $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应中剩余核在靶内的反冲平均投影射程。

二、原 理

剩余核反冲射程的测定常用活化反冲法^[8]。这种方法是, 把靶和反冲收集箔按中子场的特点用相应的方法安排在其中照射^[9,10], 然后把靶和反冲收集箔分开处理, 分别进行放射性测量。

设对厚度为 l 的单位面积的靶, 用强度为 I 的、垂直于靶面的平行中子束照射。由于反应截面通常较小, 可近似地认为通过厚度不大的靶时束流强度不变, 因而可假定在靶中的反应密度 D (即靶内单位体积中的反应数) 为一常数。一般地对垂直入射到介质中的单能平行离子束, 沿束流方向的射程近似地呈高斯分布^[2,3,9]。如设剩余核沿中子束流方向前进, 则在靶中深度 x_0 处产生反应时剩余核反冲到 x 的几率 p 为

1981年10月23日收到

$$p[x, x_0, R_0(E)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi} R_0(E) \rho} e^{-\left[\frac{x-x_0-R_0(E)}{\sqrt{2} R_0(E) \rho}\right]^2} \quad (1)$$

式中 $R_0(E)$ 是能量为 E 的剩余核平均射程, ρ 为射程分散因子, 它与阻滞过程的统计因素、靶材料的不均匀性和各向异性等有关。由于剩余核反冲的方向分布, 用活化反冲法不能直接求出 R_0 。对剩余核在束流方向上的密度分布, 原则上可通过考虑其反冲的方向分布, 再按 (1) 式对 x_0 在靶厚度上的积分求出来。图 1 中给出了这个密度分布的定性形状。为了给出实验上可测量的量, 我们设在单位面积靶中反应剩余核的 X_i 部分反冲为靶外的 Y_i 部分 (图 1)。这里 i 表示前冲 (F) 或后冲 (B)。显然有 $X_i = Y_i$, 令

$$R_i = X_i/D = Y_i/D,$$

式中 D 是前述的反应密度。 R_i 的物理意义是: 平均地说, 在靶中靠靶面部分厚 R_i 层中反应所产生的剩余核全部反冲出靶面为收集箔所收集。设所用单位面积靶厚 l , 若以 A 表示某时刻剩余核的放射性强度, 则

$$\frac{R_i}{l} = \frac{A_i}{A_l}$$

A_i 为收集箔上反冲核放射性强度, A_l 为反应产生的剩余核总放射性强度。所以

$$R_i = \frac{A_i}{A_l} l \quad (2)$$

R_i 常称为反冲核在束流方向上的平均投影射程。显然 (2) 式只有在 $l \gg R_i$ 时成立, 当满足这个条件时称为厚靶技术。

实际上, 实验中所用中子束总有一分散角 α 。因此对用 (2) 式求得的平均投影射程要作中子束分散角的修正^[10,11]。若设中子束的平均分散角为 $\bar{\alpha}$ 。显然由于斜射, 使 (2) 式中的等效厚度比 l 大, 因此对 l 引入修正因子 $1/\cos\bar{\alpha}$ (或相当于对 A_l 减少同样的因子)。前冲放射性 A_F 在一级近似下无修正。后冲放射性 A_B 对 $\bar{\alpha}$ 的依赖较大, 可以按反射系数对其缩小一因子 $1/\cos\bar{\alpha}$ 。因此, 修正的结果是, 由 (2) 式求得的前冲射程 R_F 扩大一因子 $1/\cos\bar{\alpha}$, 对求得的 R_B 不变。

三、实 验

我们在 $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$ 和 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应剩余核反冲射程测定中, 采用了上述 $l \gg R$ 的厚靶法。把厚 $8\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 Al 箔 (A_{00}) 和厚 $15\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 Cu 箔 (光谱分析表明系纯度高于 99.9% 的天然铜), 用酒精和丙酮清洗干净, 作为直径 24mm 的圆形靶。用称重法准确测定其厚度。把厚 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 的纯聚乙烯膜用酒精洗净, 作成和靶一样大的圆片, 放在紧靠靶箔的前后, 作为反冲收集箔。加上纯聚乙烯的本底箔, 组成一个靶叠。两边加上聚乙烯保护箔, 把靶叠与外界隔离。整个靶封装在聚乙烯塑料袋内 (图 2)。袋的内部抽成真空, 使整个靶在外部大气压力下互相压紧。制好的靶用 300keV D 束高压倍加器上产生的 D-T 中子束照射。D 束聚焦直径为 5mm。靶叠表面离开 T 靶 5mm。靶所接收的中子能量范围为 13.97—15.37MeV。中子通量在靶叠中心处约 $(2-3) \times 10^9 \text{ n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。通常照射 2—3

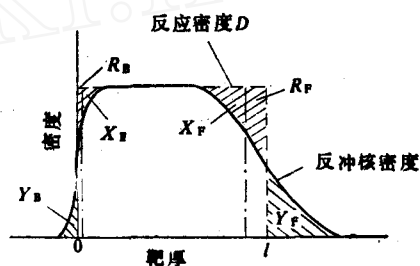


图1 平均投影射程的物理意义示图

小时, 积分通量约为 $2.5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 。

照射后把靶箔、收集箔和本底箔分开, 分别在 Ge(Li) γ 谱仪上进行测量。谱仪对 ^{60}Co 1332keV 峰的分辨率为 1.87keV。对 ^{24}Na 跟踪测量特征 γ 能峰 1368.7keV 的强度, 对 ^{64}Cu

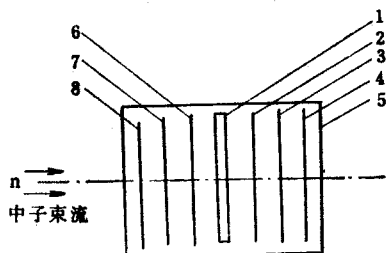


图2 靶的装配

1 靶箔(Cu或Al); 2,6 前冲和后冲收集箔(聚乙烯); 3,7 收集器本底箔(聚乙烯); 4,8 靶叠保护箔(聚乙烯); 5 聚乙烯袋(抽真空)

跟踪测量 e^+ 湮灭发射的 511keV 峰的强度。其相应的 γ 全能峰强度数据则由谱仪的 γ 能谱分析程序给出。

在我们的实验中, 由于中子流强较弱, 没有对 中子束进行准直。因此对 中子束分散角(即入射角)作了修正。由实验安排可算出平均入射角 $\bar{\alpha}$ 。但考虑到中子束在靶边缘会减小(即离开靶叠中心越远, 对 T 靶上 D 束焦面的张角越小), 因此近似地取 $\bar{\alpha}$ 为靶叠相对于 D 束焦面张角 62° 的一半。所以对前冲射程 R_F 引入修正因子 $1/\cos 31^\circ = 1.17$ 。

四、结果和讨论

表 1 给出上述两个核反应剩余核在靶中前、后冲平均投影射程的测定结果(六次重复实验)。

1. 实验中测得(分别用 511keV 及 1345.8keV 测定) ^{64}Cu 的半衰期为 12.71 ± 0.13 小时, ^{24}Na 的半衰期为 15.02 ± 0.42 小时。通过对测得的 γ 能谱, 根据中子、快中子及 γ 的核活化分析 γ 射线表^[12]的分析表明, 在上述半衰期范围及谱仪的能量分辨范围 511.0 ± 1.0 keV 和 1368.7 ± 2.0 keV 内, 未发现干扰核素。在 ^{64}Cu 的测定中, 存在 $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 反应的同位素干扰, 由于 ^{63}Cu 的丰度为 69.1%, 其截面是 2.6mb; ^{65}Cu 的丰度为 30.9%, $(n, 2n)$ 反应截面是 930mb。因此其干扰仅 0.7%, 因而同位素干扰的修正很小。

表1 R_F 和 R_B 的实验值及 $R_F + R_B$ 的文献值

核反应	反冲核能量范围, MeV	前冲平均投影射程 R_F , $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	后冲平均投影射程 R_B , $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	$R_F + R_B$ 的文献值, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ (-3.15MeV)	0.356—3.826	282.9 ± 11.0 ($10.5 \times 10^{-5} \text{ cm}$)	20.0 ± 3.4 ($0.7 \times 10^{-5} \text{ cm}$)	$245(3.814 \text{ MeV})^{** (4)}$ $10.94 \times 10^{-5} \text{ cm}(1.335 \text{ MeV})^{** (5)}$
$^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$ (-9.98MeV)	0.018—0.724	73.8 ± 13.1 ($8.3 \times 10^{-6} \text{ cm}$)	10.0 ± 5.1 ($1.1 \times 10^{-6} \text{ cm}$)	$40(0.728 \text{ MeV})^{** (4)}$

* 反冲核能量的平均值; **反冲核能量的最大值。

2. 实验误差来源主要有二: 一是放射性测量的统计误差。对 ^{64}Cu 前冲放射性统计误差为 10%, 对 ^{24}Na 前冲放射性统计误差为 2.5%。二是靶叠相对于中子源位置几何安排的不确定性。这项误差约 3%。表 1 中给出的误差为六次测量的标准偏差。由于实验中的中子束较弱, 相应地反冲核放射性弱。中子束弱而没有准直, 从而引进了照射几何安排的不确定性。因此提高中子流强是减小实验误差的关键。此外, 用强中子束及薄靶-薄收集箔还可测量图 1 中的反冲核密度分布。

3. 对 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 和 $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$ 在 13.97—15.37MeV 中子诱发反应中, 根据剩余核向前和向后反冲射程有很大差别, 表明在这个中子能区, 它们主要属于复合核反应。

4. D-T 中子对 Cu、Al 材料的 $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面较大, 分别为 930mb 和 120mb^[13], 而且本实验结果表明反应剩余核的溅射(后冲)及反应发射(前冲)亦不小。因此, 对这两种材料在强的 D-T 中子长期照射下其成分和结构都会有所改变。并且由于反冲效应, 也会对和它们相邻接的材料产生影响。

对北京师范大学低能物理所提供高压倍加器的照射条件、张荫芬在照射过程中的协助、瞿世隆及时运送照射样品一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Ullmaier et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **145**, 1, 1 (1977).
- [2] L. Winsberg et al., *Phys. Rev.*, **121**, 518 (1961).
- [3] P. D. Townser et al., *Ion Implantation, Sputtering and their Applications*, London, Academic Press, 1976.
- [4] J. Csikai et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **24**, 227 (1963).
- [5] B. G. Huevey, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **10**, 240 (1960).
- [6] 赵珍兰等, *核化学与放射化学* **3** (2), 113 (1981).
- [7] S. C. Fung et al., *Phys. Rev.*, **95**, 1, 176 (1954).
- [8] S. Flaggé et al., *Physik Chemis*, **B42**, 179 (1939).
- [9] J. Biersack, *Z. Physik*, **221**, 495 (1968).
- [10] R. Gähler et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **130**, 203 (1975).
- [11] J. Bottiger et al., *Radiation Effects*, **20**, 65 (1973).
- [12] S. A. Lis et al., *J. Radioanal. Chem.*, **25**, 303 (1975).
- [13] D. 法索埃脱著, 伍任译, *中子活化分析*, 原子能出版社, 1978年.

THE DETERMINATION OF FORWARD AND BACK- WARD AVERAGE PROJECTIONAL RECOIL RANGES IN THE $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$ AND $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ REACTIONS INDUCED BY D-T NEUTRONS

GUO YINGHUAN ZHAO ZHENLAN ZHANG JINGLIE LUO SHIHUA
HUANG ZHONGXIANG YANG RUIYING JIANG YONG FENG XIZHANG

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

ABSTRACT

In this work, the forward and backward average projectional recoil ranges (R) of the residual ^{64}Cu and ^{24}Na with respect to neutron beam direction respectively in the $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$ and $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ reactions induced by D-T neutrons were determined by thick-target-thick-catcher method. The results are $R_F=73.8\pm 13.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, $R_B=10.0\pm 5.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ for ^{64}Cu in Cu-target and $R_F=282.9\pm 11.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, $R_B=20.0\pm 3.4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ for ^{24}Na in Al-target.

(Key words D-T Neutron, Cu-target, Al-target, Residual nuclei, Average projectional recoil range)