

中子核反应中反冲核的平均射程*

叶邦角 · 春日井好己 · 池田裕二郎

摘要 · 用活化法测量了快中子核反应中反冲核在靶中的平均射程,发现不同日本原子能研究院反应堆工程部的核反应 $(n,2n)$, (n,p) , (n,α) 和 (n,np) 中的反冲核的平均射程存在系统性规律,导出了经验公式。此外,把理论公式计算的结果同实验结果进行了比较,并给出了修正的理论计算公式。

关键词 · 中子溅射,反冲核,平均射程。

Average ranges of recoil nuclides in the neutron reaction

YE Bangjiao¹ · Yoshimi Kasugai² · Yujiro Ikeda² ·

1 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026) ·

2 (Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki, Japan)

Abstract · Average ranges of recoil nuclides in the target materials induced by fast neutron reactions have been measured by the activation method. A systematic trend of average range was found for $(n,2n)$, (n,α) , (n,p) and (n,np) reactions. An empirical formula was presented to describe the experimental results. Moreover, the calculated results based on theoretical formula were compared with the experimental results. A revised formula was deduced from the present work. ·

Key words · Neutron sputtering, Recoil nuclide, Average range

· · 材料在强中子束辐照下其性能将产生变异,在材料内部和近表面将产生各种空位、位错等缺陷,由于质子和 α 粒子等轻带电粒子的发射将在内部产生氢气和氦气泡,此外,溅射产生的反冲粒子还会给环境带来放射性污染。在聚变反应堆中,例如国际热核实验反应堆(ITER)^[1],快中子壁负载高达1MW/m²,反应堆真空容器、管道和热交换器件等的表面由于溅射将产生表面剥离。第一壁的剥离物和从内部击出的重反冲核进入等离子体中还将降低等离子体的温度^[2],严重的还将使等离子体达不到点火温度。因此,知道反冲核的平均射程对聚变堆结构材料的选择和估计辐射危害尤为重要。

· · 通常中子核反应中产生的反冲核绝大部分是电中性的^[3],反冲核具有一定的动能,离表面较近的一部分反冲核可以到达表面,如果其能量大于表面脱出功,将离开表面形成溅射。溅射产额与反冲核的平均能量有关,反冲核的平均能量越大,在靶中的射程就越长,即对溅射产额有贡献的有效靶厚就越厚。通常有效靶厚就可认为是反冲核的平均射程。

· · 著名的Ziegler能量射程手册^[4]并不能给出反冲核的平均射程,因为反冲核的平均动能要远低于该手册中的最低能量。由于实验上的难度,目前还没有一种实验方法能直接测量反冲核的平均射程。理论上,用核反应的理论可给出反冲核的平均能量,用射程与能量的关系可以得到平均射程。

· · 本文首先介绍一种用实验间接测量平均射程的方法,并用该方法得到了多种反冲核的平均射程,导出了平均射程的经验公式。然后用理论公式计算了平均射程,并与实验结果进行了比较,最后得到了平均射程修正的计算公式。

1 · 实验方法

· · 对快中子引起的核反应,反冲核获得的最大动能 T_m 为

$$T_m = (4A_1 E_n) / (1 + A_1)^2 \quad (1)$$

式中, A_1 是靶材料的质量数, E_n 是入射中子的能量。如果核反应发生在近表面,则反冲核将有可能到达表面并从表面发射出来,形成溅射。快中子溅射产额 Y_n 就是溅射出的反冲核数量与入射中子数之比。如果反冲核溅射方向与中子入射方向相同就称为正向溅射,反之,就称为背向溅射从核反应中产生的反冲核具有平均能量 $T = T_m/4$,在靶中就有一定的射程分布 $F_R(T, \theta, x)$,其中, x 是核反应发生处离靶表面的距离, θ 是反冲核发射方向与中子入射方向的夹角。正向溅射产额可写成^[3]

$$Y_n(E_n, \theta) = (N / \cos \theta) \sigma(E_n) \int_0^{\infty} x F_R(T, \theta, x) dx \quad (2)$$

式中, N 是单位体积靶的原子核密度, $\sigma(E_n)$ 是对应于中子能量为 E_n 的核反应截面。只要靶相对于射程足够厚,则平均射程就可写为

$$\langle R(T, \theta) \rangle = (\int_0^{\infty} x F_R(T, \theta, x) dx) / (\int_0^{\infty} F_R(T, \theta, x) dx) \quad (3)$$

对 $\theta = 0$ 的方向,(3)式的分母为1。因而可得到快中子引起的正向溅射产额为

$$Y_n(E_n) = N \sigma(E_n) \langle R(T) \rangle \quad (4)$$

由(4)式可知只要测定正向溅射产额,就可得到反冲核的平均射程 $\langle R \rangle$ (μm)。

· · 如果溅射核具有放射性,我们可用收集膜来收集溅射核,并通过测量收集膜上溅射核的 γ 能谱来确定溅射核的数量,并由此可得到快中子溅射产额 Y_n 实验是在日本原子能研究院聚变中子源实验室(FNS)完成的。能量为14.9MeV的快中子由中子发生器产生。在旋转靶室,中子注量约为 $2 \times 10^{12}/s$ 。收集膜采用厚度为0.013mm的特制塑料薄膜,实验在空气中完成。对每一种样品,收集膜与样品的距离分别为0.2、0.5、1.0、2.0、3.0、5.0mm。从不同距离得到的溅射产额可外推得到样品表面的溅射产额。我们选择了24种材料进行测量,它们是F、Mg、Al、Sc、Ti、V、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zr、Nb、Mo、Pd、Ag、Cd、In、Ta、Re、Pt、Au、Pb和SS316型不锈钢。样品的面积为 $25mm \times 25mm$,厚度从0.005—0.25mm视材料而不同。中子辐照时间视所测量核反应的半衰期而定,除 $^{27}Al(n,p)^{27}Mg$ 核反应仅辐照10min外,其余辐照时间为7—30h。经中子辐照后的样品和收集膜的活性由5个高纯锗探测器分别测量,探测器的效率被仔细刻度。实验进行了近半年测量了29个(n,2n)、10个(n, α)、14个(n,p)和4个(n,np)共57种核反应的正向溅射产额^[5],由此得到了57种反冲核的平均射程,如图1所示实验误差主要来源于统计误差,除个别重核外,对绝大部分结果,实验误差在20%范围内。由图1可知,对不同反应所产生的反冲核的平均射程与反冲核的质量数 A_2 存在着一个简单的系统性规律,我们用一经验公式来表示,即

$\langle R \rangle = aA^b_2(5)$

式中,a和b是拟合系数(见表1) · 对大部分的反冲核,用经验公式计算的平均射程与实验结果可在30%的范围内符合。

表1 · 平均射程经验公式中的拟合系数
Table 1 The fitting parameters in the · empirical formula of average range

核反应 Nuclear reaction	a	b
(n,2n)	8969	-3.041
(n, α)	2609	-2.445
(n,p)	19782	-3.139
(n,np)	212754	-3.77

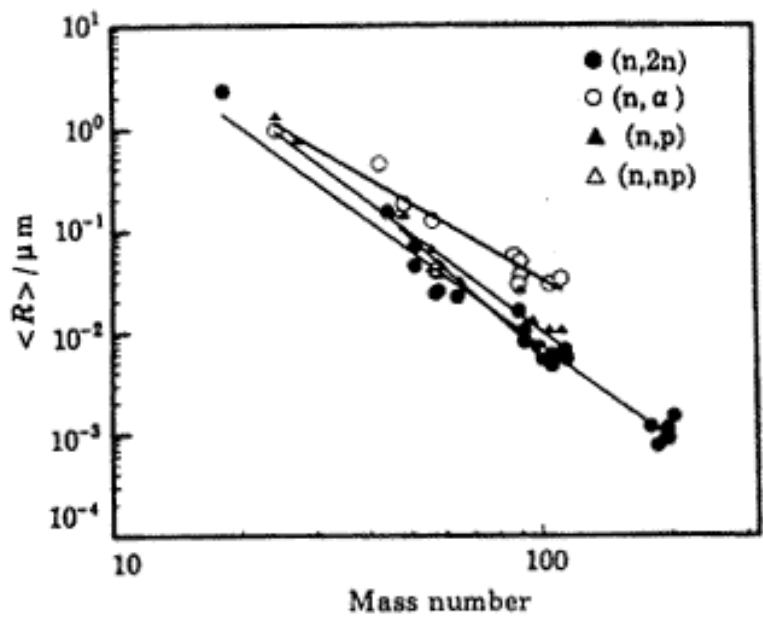


图1 · · 反冲核的平均射程实验测量值
Fig.1 Experimental values of average ranges of recoil nuclides

2 · 修正的理论计算公式

· · 按照Schlott^[6]的工作,平均能量为T(keV)的反冲核的平均射程$\langle R(T) \rangle$(μ g/cm²)可写成

$$\langle R(T) \rangle = \begin{cases} C_1 A_2 \{ [(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}) / (Z_1 Z_2)] \cdot T \}^{2/3}, & \varepsilon < 0.1, \\ C_1 A_2 \{ [(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2} / (Z_1 Z_2)] \cdot T \}, & 0.5 < \varepsilon < 10 \end{cases} \quad (6)$$

式中, ε 为约化能量,为

$$\varepsilon = \{ 32.5 A_2 / [(A_1 + A_2) Z_1 Z_2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}] \} T \tag{7}$$

式中,A₁、A₂和Z₁、Z₂分别是靶核和反冲核的质量数与原子序数,C₁和C₂是系数,可由文献[6]中的图4和图7得到。

对目前研究的57个核反应,反冲核的平均动能随靶核的质量数增大而减少,当A₂从18增加到203时,平均动能约从700keV减小到70keV对一个典型的核反应⁹³Nb(n,2n)^{92m}Nb,反冲核^{92m}Nb的平均动能约为160keV,实验平均射程为0.01 μ m,而计算平均射程为0.03 μ m,计算值是实验值的3倍 · 而对²⁴Mg(n,p)²⁴Na核反应,反冲核²⁴Na的平均射程实验值为1.29 μ m,与计算值1.18 μ m差别不大。表2为几种典型的核反应的反冲核的计算值和实验值的比较。所有57个核反应的反冲核的平均射程的计算值与实验值之比C/E见图2所示。由图2可见,对(n, α)核反应所产生的反冲核,计算值总比实验值偏小；对(n,p)核反应,在低质量区,计算值与实验值接近,随着A₂的增大,C/E亦增大；对(n,2n)核反应,C/E同样随A₂的增大而增大,当A₂为200时,C/E约增大到5。

表2 · 一些核反应反冲核计算和实验平均射程
Table 2 Calculated and experimental values of average range for some reactions

核反应Nuclear reaction	反应截面 Reaction cross section/mb	平均动能 Average kinetic energy/keV	计算 <R>Calculation / μ m	实验 <R>Experiment / μ m
²⁷ Al(n, α) ²⁴ N	114	572	0.714	0.9651
⁵¹ V(n, α) ⁴⁸ Sc	17	298	0.122	0.1799
⁵² Cr(n,2n) ⁵¹ Cr	376	281	0.0875	0.0686
⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	111	257	0.0732	0.0627
⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co	269	248	0.0570	0.0353
⁹³ Nb(n,2n) ^{92m} Nb	464	158	0.0306	0.0103
¹⁸¹ Ta(n,2n) ^{180m} Ta	1297	82	0.0061	0.0012
¹⁹⁷ Au(n,2n) ^{196g} Au	1894	75	0.0046	0.0011
²⁰⁴ Pb(n,2n) ²⁰³ Pb	2120	73	0.0074	0.0015

· · 从图2进一步可知,除(n, α)核反应外,比值C/E随A₂的变化也存在着一定的规律,我们可在(6)式中引进一个修正因子,使计算结果与实验结果更好地符合。我们记(6)式的计算结果为<R>_{cal},修正后的计算结果为<R>_{rev},则基于实验结果,我们可得到一个修正的计算公式为

$$<R>_{rev} = [8.471 A_2^{-0.7177} + 0.8227 A_2^{-0.32} (Z_1 - Z_2)^{2.2}] <R>_{cal} \tag{8}$$

该式括号中的第二项不对 $(n,2n)$ 核反应起作用,因为该反应不改变 Z 。用修正公式计算的平均射程与实验值比较见图3所示。从图3可见,除了极个别的反冲核外,大部分的结果与实验结果的差别在30%范围内,考虑到实验的误差较大,用该公式已可很好地预言实验结果。

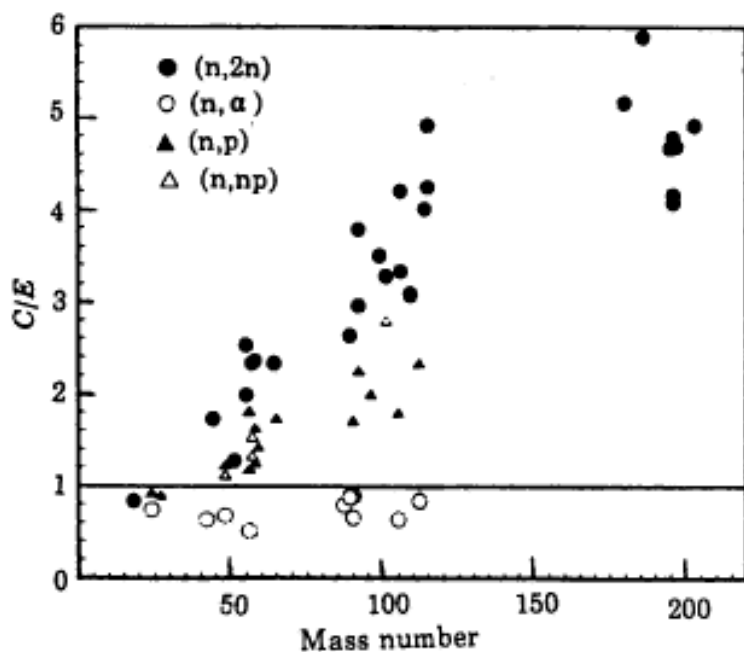
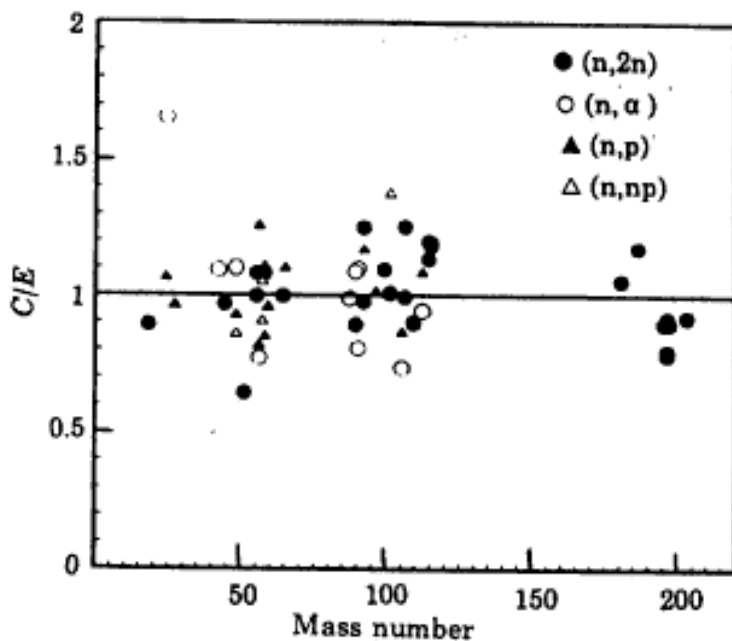


图2 · · 反冲核的平均射程的理论计算值与实验值的比值随 A_2 的变化

Fig.2 The ratios of calculated and experimental values for average range of recoil nuclides changing with A_2



· 图3 · 用修正的计算公式计算的反冲核的平均射程与实验值的比较

· Fig.3 Comparison of calculated values by using revised formula with experimental value for average ranges of recoil nuclides

致谢 · 对日本原子能研究院FNS实验室工作人员在实验工作期间所提供的稳定的强中子束流深表

感谢

* 本工作得到中国科学院和中国科技大学回国基金资助

作者单位：叶邦角·中国科学技术大学·合肥·230026

春日井好己·池田裕二郎·日本茨城县

参考文献

1 ITER Design Report. J Plasma and Fusion Society of Japan, 1997, 73:7-18 ·

2 Behrisch R, Harling O K, Thomas M T, et al. J Appl Phys, 1977, 48:3914-3918 ·

3 Behrisch R. Sputtering by particle bombardment II, Berlin: Spring-Verlag, 1983. 179-225

4 Z1Littmark U, Ziegler J F. Range distributions for energetic ions in all elements, Vol.6. New York:
· Pergamon Press, 1980. 41-350 ·

5 Ye B J, Kasugai Y, Ikeda Y. JAERI-Research, 1997, 97-082

6 Schott H E. Radiat Eff, 1970, 6:107-112

收稿日期·1998-06-04,修回日期·1998-09-15