

$^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 和 $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 反应截面的测量与评价

李庭晏 施兆民

(北京大学技术物理系, 100871)

卢涵林 赵文荣 于伟翔 袁遐林

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要

本实验用活化法测量了中子能量在 13.60 MeV—17.77 MeV 的 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$, $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 和 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$ 三个反应道的反应截面值, 并计算了反应截面测量误差的协方差矩阵. 实验的测量误差在 3%—7% 范围内.

本文还对上述三个反应截面及 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ 反应截面进行了编评, 推荐了从阈能到 20MeV 能区的激发曲线.

一、引 言

Ni, Fe 元素都是合金材料的重要组成元素, 广泛应用于反应堆材料及防护屏蔽材料

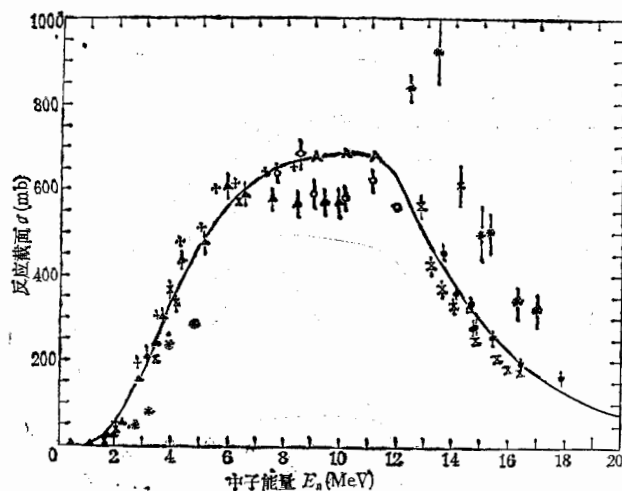


图1 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 反应截面各家测量情况

+ (62) J. F. Barry^[13], * (68) P. Decowski^[14] x (71) A. Paulsen^[15], Δ (75) D. L. Smith^[16] □ (77) 黄建周^[17] ◇ (85) 范培国^[18] ○ (89) H. Vonach^[19], ● (89) 本工作
△ 理论计算 — 评价值

中。因此准确测量 (n,p) , (n,α) 的反应截面, 对于更好地确定中子对金属材料的抗辐射损伤能力是很重要的。根据 1986 年 IAEA 咨询组会议 (东德 Gaussing) 提出的当今 D-T 聚变反应核数据的需要, 我们测量了当前还不能满足聚变堆设计要求的 Ni 元素的一些数据。基于同样的目的, 我们还对 $^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 及 $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 反应截面进行了编评。

在图 1—4 中, 我们给出了以上四个反应道的各家测量情况。可以看出, 在 $E_n =$

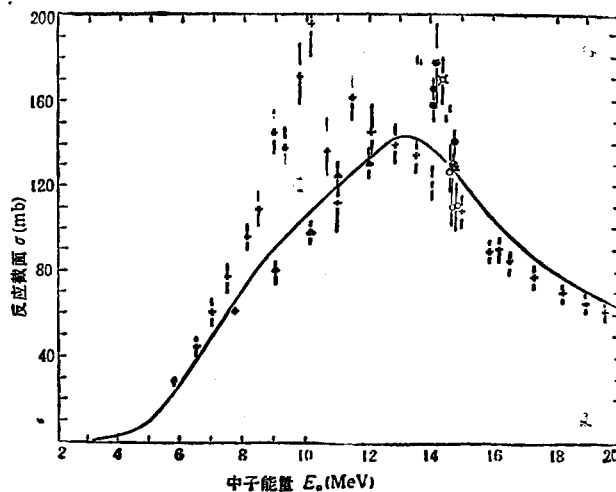


图 2 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反应截面各家测量情况

+ (67) A. Paulsen^[20], ☆ (73) J. D. Hemingway^[11], * (74) G. N. Moslov^[22], ▨ (75) V. Weigel^[23], ⊕ (77) N. I. Molla^[24], ○ (79) E. W. Lees^[25], △ (85) B. M. Bahal^[26], □ (86) N. I. Molla^[27], 1 (89) 王永昌^[28], ⊕ (89) H. Vonach^[19], ● (89) 本工作, — 非正式评价

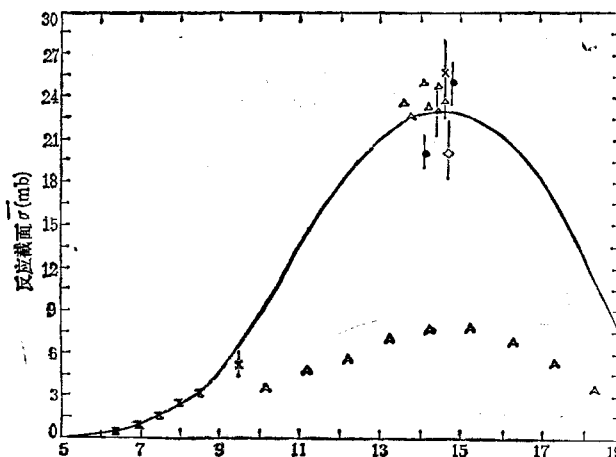


图 3 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$ 反应截面各家测量情况

⊕ (75) V. Weigel^[23], × (78) K. Fukuda^[29], ◇ (79) E. W. Lees^[25], ⌘ (84) S. M. Qaim^[30], △ (89) 王永昌^[28], ● (89) 本工作, △ 理论计算, — 非正式评价

15—20MeV 能区, $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反应道数据存在分歧. 而 $^{60}\text{Ni}(n,p)$ 和 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 反应, 测量数据很少, 因此, 有必要对这些反应截面进行测量, 以澄清分歧和补充数据. 对 $^{54}\text{Fe}(np)$ 反应, 在中高能区, 早期的数据有些分歧, 但近年又产生了一些新数据, 因此需要对它的激发曲线重新进行编评.

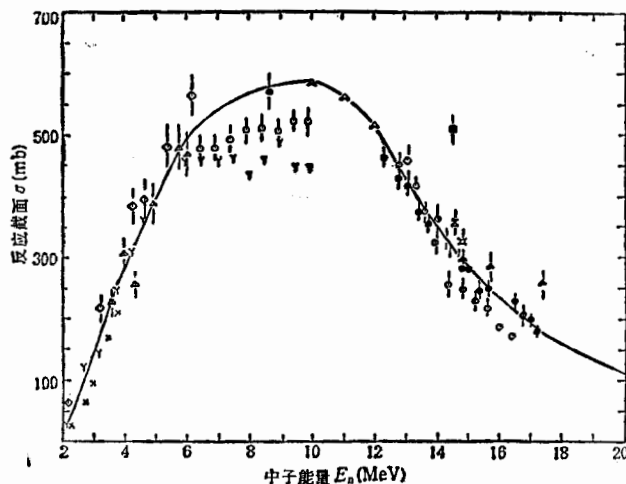


图 4 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ 反应截面各家测量情况

△(65) E. E. Carroll^[31], ×(65) A. Lauber^[32], ◇(65) S. R. Salisbury^[33], ○(67) P. V. Rao^[34], ▲(69) R. C. Barrall^[35], ☆(72) J. J. Singh^[36], Y(75) D. L. Smith^[63], ⌘(78) K. Fukuda^[29], ▨(78) I. Garlea^[37], ⊙(79) A. Paulsen^[20], ●(82) 卢涵林^[38], +(85) B. M. Bahal^[26] △ 理论计算, - 评价值

二、实验测量

$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$, $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 和 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$ 反应截面的测量用活化法完成, 中子通量用 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面^[1]作为相对标准测定.

测量中用 $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 反应产生 13.6—17.8MeV 能区的中子, 氘束由 600kV 高压倍加器和 2.5MV 静电加速器提供. 前者的 d 核平均能量为 110keV, 流强在 $45\mu\text{A}$ 左右, 束斑直径 0.8cm. 后者的 d 核平均能量分别为 1.22MeV、1.72MeV 和 1.97MeV, 流强在 $15\mu\text{A}$ 左右, 束斑直径 0.3cm. 靶样品为天然同位素组份的金属圆片, 直径约 20mm, 纯度好于 99.9%. Al 片厚度约 $10\mu\text{m}$, 质量为 70mg 左右. Ni 片质量一般在 500mg 左右, 厚度约 0.2mm, 但在 14.09 和 14.77MeV 两个能点处用的是质量为 5400mg, 厚度为 2mm 的厚 Ni 片, 以得到 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 和 $^{60}\text{Ni}(n,p)$ 两个反应道产物较高的 γ 计数率. 照射时, Ni 片夹在两铝片中, 样品到 neutron 源的距离为 2—4cm, 靶以 neutron 源为中心与束流成 0° 、 20° 、 30° 、 45° 、 120° 等角度. 由于高压倍加器所产生的中子通量大, 故在 13—15MeV 能区尽量用高压倍加器所产生的中子照射. 在 15MeV 以上的能区, 则用静电加速器产生的中子照射. 样品辐照时间在 10 个小时左右. 在高压倍加器上, 用金硅面垒探测器对中子通量进行监测. 在静电加速器上则用长中子管对中子通量进行监测.

辐照后的样品冷却一段时间后,用 136cm^3 的 $\text{Ge}(\text{Li})\gamma$ 探测器对剩余核的 γ 射线进行测量.对于少数 Al 样品剩余核的 γ 射线也采用直径为 80mm ,高为 80mm 的 $\text{NaI}(\text{TI})$ 探测器测量.探测器用 $0.1\text{--}1.5\text{MeV}$ 的系列标准源进行刻度,并用最小二乘法计算出效率曲线.对 $^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$ 反应,冷却时间在 5 天以上,测量时间从半个小时到 5 个小时不等.对 $^{60}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$ 和 $^{62}\text{Ni}(\text{n},\alpha)$ 反应,冷却时间在 6 天以上,测量时间在 9 小时以上.

实验中所测的几种反应道剩余核及它们的半衰期^[2]、 γ 射线强度和能量^[3] 列于表 1 中.

表 1 被测剩余核的半衰期及 γ 射线

反应道	剩余核	半衰期	γ 能量(MeV)	γ 强度
$^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)$	^{24}Na	15.02h	1.368	99.994%
$^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$	^{58}Co	70.916d	0.811	99.45%
$^{60}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$	^{60}Co	5.271y	1.173	99.87%
$^{62}\text{Ni}(\text{n},\alpha)$	^{59}Fe	44.496d	1.099	56.5%

根据所测得的 γ 谱,得到相应的全能峰单位时间计数,对探测器探测效率、级联效应、 γ 射线在样品中自吸收、 γ 射线强度、中子在样品及靶头上散射、中子通量波动等因素进行修正后,可得到被测的反应截面 σ 为

$$\sigma = \sigma_0 \frac{N_\tau \cdot e^{\lambda t} \cdot M_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot g_0 \cdot I_0 \cdot f_0 \cdot K_0 \cdot S_0 \cdot S'_0 (1 - e^{-\lambda_0 T})}{N_{\tau_0} \cdot e^{\lambda_0 t_0} \cdot M \cdot \varepsilon \cdot g \cdot I \cdot f \cdot K \cdot S \cdot S' (1 - e^{-\lambda T})}, \quad (1)$$

其中以下标“0”表示作为相对标准 Al 片的各项量.式中各项量:

σ 为反应截面; N_τ 为所测特征 γ 射线的全能峰单位时间计数; λ 为剩余核的衰变常数; t 为冷却时间; M 为样品的靶核数; ε 为全能峰探测效率; g 为级联修正; I 为 γ 射线强度; f 为样品对 γ 射线自吸收校正; K 为中子通量波动因子; S 为中子在样品中的散射校正; S' 为中子在靶头上的散射校正; T 为全部辐照时间.

中子通量波动因子 K 为:

$$K = \left[\sum_{i=1}^l \phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i} \right] / \Phi (1 - e^{-\lambda T}).$$

其中各项的意义是:将整个照射时间分为 l 段,每段时间间隔为 Δt_i , T_i 为此时间间隔到照射结束的时间; ϕ_i 为 Δt_i 内的相对中子通量, Φ 为 T 内的相对中子通量平均值.

三、实验结果

由所测得的各项按公式(1)可得到 $^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$, $^{60}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$ 和 $^{62}\text{Ni}(\text{n},\alpha)$ 反应在中子能量 $13.6\text{--}17.8\text{MeV}$ 的反应截面值.所测结果列于表 2 中.

各反应道的各项误差及在各能点各项误差间的关联系数 M 列于表 3 中.

由(1)式可知, λ 射中子能量 E_i 相应的反应截面 σ_i 是 $\sigma_0, N_\tau, M, \varepsilon, g, I, f, K, S, S', N_{\tau_0}, M_0, \varepsilon_0, g_0, I_0, f_0, K_0, S_0, S'_0$ 等参数的函数.设它们有 L 个参数,第 l 个参量的误差为 e_{il} ,对于入射中子能量为 E_i ,相应的第 l 个参量的误差为 e_{il} ,它们间的关联系数为 M_{il} ,则 σ_i

σ_j 间的协方差矩阵 V_{ij} 为^[4]:

$$V_{ij} = \sum_{l=1}^L M_{il} e_{il} e_{jl} (i, j = 1, \dots, n), \quad (2)$$

其中 n 表示在 n 个能点进行了测量。对于某一能点 E_i 的截面误差 $\Delta\sigma_i$ 为

$$\Delta\sigma_i = \sqrt{V_{ii}}, \quad (3)$$

由(2),(3)式可计算得截面误差相对协方差矩阵 C_{ij} 为:

$$C_{ij} = V_{ij} / \Delta\sigma_i \cdot \Delta\sigma_j. \quad (4)$$

表 4, 表 5, 表 6 中列出了这三个反应截面的误差相对协方差矩阵。

表 2 $^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 反应截面的测量结果

能量 (MeV)	截面 (mb)	反应道	$^{58}\text{Ni}(n,p)$	$^{60}\text{Ni}(n,p)$	$^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$
13.60±0.13			461.0±14.9		
14.09±0.14			366.0±9.2	165.0±4.6	20.4±1.2
14.60±0.22			331.0±13.9		
14.77±0.28			285.0±10.2	142.0±4.5	25.0±1.6
14.81±0.30			290.0±8.2		
15.37±0.44			260.0±9.1		
16.42±0.60			199.0±7.1		
17.77±0.18			166.0±9.4		

表 3 $^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 截面的主要误差项及关联系数

误差项	符号	误差 %			误差关联系数 M
		$^{58}\text{Ni}(n,p)$	$^{60}\text{Ni}(n,p)$	$^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$	
剩余核 γ 计数统计	ΔN_γ	1.1—3.9	1.4—1.8	2.4—3.8	0
^{24}Na γ 计数统计	ΔN_{γ_0}	1.0—3.0	1.2—1.7	1.2—1.7	0
剩余核 γ 探测效率	$\Delta \epsilon$	1.0	1.0	3.8	1
^{24}Na γ 探测效率	$\Delta \epsilon_0$	1.0	1.0	1.0	1
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ 截面	$\Delta \sigma_0$	0.5—2.1	0.5—3.1	0.5—3.1	a
剩余核 γ 在样品中自吸收校正	Δf_s	0.1	1.0	1.0	1
^{24}Na γ 在样品中自吸收校正	Δf_{s_0}	0.1	0.1	0.1	1
中子通量在剩余核中波动校正	ΔK_s^2	0.07—0.09	0.05—0.09	0.05—0.09	0—1
中子通量在 ^{24}Na 中波动校正	ΔK_0	0.15—0.3	0.1—0.3	0.1—0.3	0—1
靶核数目	ΔM	0.003—0.006	0.003—0.006	0.003—0.006	0.5
^{27}Al 靶核数目	ΔM_0	0.017—0.02	0.017—0.02	0.017—0.02	0.5
中子在靶头上散射校正	$\Delta S'$	0.3	0.1	0.2	0—1
中子在样品中散射校正	ΔS_0	0.1	0.1	0.1	0—1
中子能散引起的误差	ΔE	1.7—5.6	0.1—0.7	3.0—8.0	0—1

a: 关联系数由 S. Tagesen^[1] 给出。

表4 $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 截面误差相对协方差矩阵

	1	2	3	4	5	6	7	8	$E_n(\text{MeV})$
1	1.00								13.60
2	0.36	1.00							14.09
3	0.23	0.46	1.00						14.60
4	0.27	0.60	0.43	1.00					14.77
5	0.32	0.53	0.40	0.58	1.00				14.81
6	0.21	0.34	0.24	0.33	0.35	1.00			15.37
7	0.20	0.30	0.21	0.29	0.31	0.23	1.00		16.42
8	0.11	0.16	0.12	0.14	0.16	0.13	0.20	1.00	17.77

表5 $^{60}\text{Ni}(n,p)$ 截面误差相对协方差矩阵

	1	2	$E_n(\text{MeV})$
1	1.00		14.09
2	0.36	1.00	14.77

表6 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 截面误差相对协方差矩阵

	1	2	$E_n(\text{MeV})$
1	1.00		14.09
2	0.50	1.00	14.77

四、理论计算

在编评工作中,为了补充某些缺少测量点的数据,我们在部分能点用 HFTT 程序^[5]进行了理论计算. 该程序是基于包括平衡前发射的统计理论^[6], 平衡前发射部分采用激子模型,平衡后发射采用蒸发模型. 计算中所取各参数为: 初始激子数 $n_0 = 3(2p, 1h)$. 激子跃迁矩阵可调参数对 $^{58}\text{Ni}, K = 490$; 对 $^{60}\text{Ni}, K = 130$; 对 $^{62}\text{Ni}, K = 700$; 对 $^{54}\text{Fe}, K = 190$. 能级密度取自 Gilbet-Cameron^[7] 公式. 光学势参数对于 n, p 取 F. Becchetti^[8] 推荐值; 对于 $d, t, ^3\text{He}$ 取 F. Perey^[9] 推荐值; 对 ^4He 取 Mefadden^[10] 推荐值.

对于 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 反应截面,理论比实验值偏低很多,其原因可能是我们所采用的理论模型中关于 α 粒子形成因子中只考虑了费米面以上核子形成 α 粒子,而未考虑费米面上和费米面以下核子也可以形成 α 粒子^[11]. 若考虑此因素,可望改善理论与实验的符合程度,这有待于进一步的工作去解决.

五、数据的编评

我们对目前可能收集到的 $^{58}\text{Ni}(n,p), ^{60}\text{Ni}(n,p), ^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ 和 $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 反应截面的实验数据进行了评价推荐. 将所收集数据的相对标准截面、 γ 射线强度和半衰期进行修正,并在 14.7 MeV 能量处归一,然后根据各家数据的实验误差给出不同的权重,计算从阈能到 20MeV 能量激发曲线.

$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$. 此反应道在阈能—6MeV 能区数据较多,且一致性较好,我们的编评结果与 IRDF(1982)^[12] 的推荐值一致.在 6—12MeV 能区数据较少,只有 D. L. Smith^[16]、范培国^[18]和 J. F. Barry^[31] 三家的数据,而且实验数据之间相差约 20%,因此我们主要根据理论计算的结果定出此能区的推荐值. 我们的推荐结果比 IRDF^[12] 的推荐值高出 20%,但与范培国^[18]和 J. F. Barry 的数据相吻合. 最新公布的结果表明, Kornilor^[39], Wagner^[40] 的结果与我们评价相一致, H. Vonach^[19] 的结果介于 ENDF/B-V 与我们之间.

在 12—20MeV 能区,总的看来,近几年的测量值比以前有所降低,我们的实验测量也证实了这一点. 由于 14.7MeV 附近测量点多,在编评时,我们先仔细定出 14.7MeV 处的推荐值,然后将各家数据在这一点进行归一、拟合给出 12—20MeV 能区的推荐值.

$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$. 此反应道测量数据不多. 主要是 A. Paulsen^[20]的测量结果,而其他作者大部分都集中在 14MeV 附近,有很大分歧. 最新(1989 年)公布的 H. Vonach^[19] 测量结果表明,在 7.7—12MeV 中子能区,他的结果与 A. Paulsen^[20] 的有很大差别. 我们认为作为正式给出推荐值为时尚早,有待于更精细的实验值发表. 我们借助于理论计算和 14MeV 能区平均值给出非正式的评价值.

$^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$. 由于 ^{62}Ni 的同位素丰度低,给测量带来困难,所以此反应道的测量数据很少,除本工作的两个测量点外,只收集到另外五家的十个数据点,最大能量点是本实验在 14.77MeV 所做的测量,而理论计算的值又如前所述在(n, α)反应道偏低,这给编评工作带来一定困难. 因此只能给出粗略的激发函数曲线. 在评论时,从阈能—9MeV 能区,推荐值以 S. M. Qaim^[30] 的测量为依据,在 14 MeV 附近根据其余几家及本工作的测量定出 14.7MeV 能点的推荐值. 在其它能区则参考理论计算曲线的走向以及在 14.7 MeV 能点处的绝对值定出. 此反应道的实验数据不够充足,编评误差大,这有待于今后改进.

$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$. 此反应道在阈能—6MeV 能区数据多,一致性好. 在此能区,我们的编评结果与前人基本一致. 在 6—10MeV 能区,考虑到 D. L. Smith^[16] 的数据在此能区有普遍偏低的现象,我们主要以范培国^[18]的数据为依据,并参考理论计算的结果定出推荐

表 7 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 评价值

中子能量 (MeV)	反应截面 (mb)	中子能量 (MeV)	反应截面 (mb)
0.5	0.02±0.02	10.17	684.0±68.4
1.5	16.4±0.4	11.19	678.0±67.8
2.0	62.7±1.6	12.0	630.6±25.2
3.0	176.0±4.4	13.0	492.4±13.1
3.5	263.8±4.4	14.0	381.4±10.2
4.0	344.6±5.7	14.7	316.8±5.7
4.5	415.9±6.9	15.0	292.8±7.8
5.0	477.0±7.9	16.0	222.6±8.9
5.5	528.1±17.6	17.0	168.1±6.7
6.0	569.8±19.0	18.0	126.6±5.1
7.0	627.9±20.9	19.0	96.3±9.6
8.0	657.4±21.9	20.0	75.6±7.6
9.155	675.0±67.5		

表8 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ (非正式)评价值

中子能量 (MeV)	反应截面(mb)	中子能量 (MeV)	反应截面(mb)
4.0	0.06±0.06	12.5	139.5±13.9
4.5	2.3±1.2	13.0	143.2±10.0
5.0	9.3±0.9	14.0	139.0±4.9
6.0	29.7±2.1	14.7	130.3±3.4
7.0	52.1±3.8	15.0	125.8±4.4
8.0	72.8±5.3	16.0	104.8±7.4
9.0	90.7±6.6	17.0	92.3±6.5
10.0	105.1±10.5	18.0	81.7±5.7
11.0	116.1±11.6	19.0	72.7±5.1
12.0	130.3±13.0	20.0	65.0±4.6

表9 $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$ (非正式)评价值

中子能量(MeV)	反应截面(mb)	中子能量 (MeV)	反应截面(mb)
5.0	0	13.5	21.1±4.2
6.5	0.46±0.057	14.0	22.8±1.1
7.0	0.93±0.12	14.5	23.1±1.1
7.5	1.6±2.0	15.0	22.9±1.1
8.0	2.5±0.31	15.5	22.4±4.5
9.0	4.7±0.94	16.0	21.4±4.3
10.0	8.9±1.8	17.0	18.2±3.6
11.0	13.7±2.7	18.0	13.4±2.7
12.0	18.0±3.6	19.0	7.4±1.5
13.0	21.1±4.2		

表10 $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ 评价值

中子能量(MeV)	反应截面(mb)	中子能量(MeV)	反应截面 (mb) _j
2.0	14.4±1.02	12.0	516.7±77.5
2.5	64.8±4.6	12.5	468.7±23.4
3.0	143.4±10.2	13.0	424.5±21.2
3.5	214.7±15.2	13.5	384.5±19.2
4.0	280.0±19.9	14.0	348.3±10.4
4.5	340.5±24.2	14.5	315.5±9.5
5.0	396.7±28.2	15.0	285.8±8.6
5.5	449.3±31.9	15.5	259.0±9.1
6.0	498.8±35.4	16.0	234.8±8.2
6.5	523.8±37.2	16.5	213.0±7.4
7.0	543.1±81.5	17.0	193.5±6.8
8.5	577.1±86.6	17.5	175.9±6.2
9.0	582.5±87.4	18.0	160.3±5.6
9.5	585.7±87.8	18.5	146.4±5.1
10.0	587.0±88.1	19.0	134.1±4.7
10.5	586.7±88.0	19.5	123.3±4.3
11.0	561.4±84.2	20.0	113.9±4.0

值, 它们比 ENDF/B-V 的推荐数据高约 20%, 与 BOSPOR^[41] 推荐的数据较接近. 在 10—12MeV 能区, 没有收集到数据, 我们依据理论计算定出推荐值. 在 12—20MeV 能区, 近几年主要有 A. Paulsen^[15] 及卢涵林^[38] 等人的数据, 这几家比早期 S. R. Salisbury^[33] 及 E. E. Carroll^[31] 等人用反冲质子法测量的数据有所降低所以我们的编评结果比 BOSPOR^[41] 的推荐值有所降低.

以上四个反应道的评价结果见表 7—10.

参 考 文 献

- [1] S. Tagesen and H. Vonach, *Physics Data*, **13-1**(1981).
- [2] Handbook on Nuclear Activation Data, IAEA(1987).
- [3] 刘运祚等,《衰变纲图》(1978).
- [4] D. L. Smith, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A257**(1987), 365.
- [5] 黄斐增, 北京大学学报, Vol. **25**, No. 3(1989), 289.
- [6] C. K. Clina, *Nucl. Phys.*, **A193**(1972), 417.
- [7] A. Gilbert and A. Cameron, *Can. J. Phys.*, **43**(1965), 1446.
- [8] F. Becchetti and G. W. Greenless, *Phys. Rev.*, **182**(1969), 1190.
- [9] F. G. Perey, *Atomic Data and Nucl. Data*, **15**(1975), 4.
- [10] Mefadden, *Nucl. Phys.*, **84**(1966), 177.
- [11] K. Sato, *Phys. Rev.*, **C28**(1983), 1527.
- [12] IRDF 1982.
- [13] J. F. Barry, *J. Nucl. Energy*, **16**(1962), 467.
- [14] P. Decowski, *Nucl. Phys.*, **A112**(1968), 513.
- [15] A. Paulsen, 71cant (1971).
- [16] D. L. Smith, ANL/NDM-10(1975).
- [17] 黄建周, 原子能科学技术, **3**(1977), 11.
- [18] 范培国, *Chinese J. Nucl. Phys.*, **7**(1985), 242.
- [19] H. Vonach, NEANDC(1989).
- [20] A. Paulsen, *Nukleonik*, **10**(1967), 91.
- [21] J. D. Hemingway, *J. Nucl. Energy*, **27**(1973), 241.
- [22] G. N. Moslov, INDC(CCP)-42/U(2) (1974).
- [23] V. Weigel, *Radiochimica Acta*, **22**(1975), 11.
- [24] N. I. Molla, *Nucl. Phys.*, **A283**(1977), 269.
- [25] E. W. Lees, AERE-R9390(1979).
- [26] B. M. Bahal, GKSS-85/E/11(1985).
- [27] N. I. Molla, INDC(BAN)-003/GI(1986).
- [28] 王永昌, 兰州大学, 私人通讯.
- [29] K. Fukuda, NAEADC(J)-56/U(1978).
- [30] S. M. Qaim, *Nucl. Sci. and Eng.*, **88**(1984), 143.
- [31] E. E. Carroll, *Nucl. Sci. and Eng.*, **22**(1965), 411.
- [32] A. Lauber, *Nucl. Phys.*, **73**(1965), 234.
- [33] S. R. Salisbury, *Phys. Rev.*, **140**(1965), 305.
- [34] P. V. Rao, *Phys. Rev.*, **154**(1967), 102?
- [35] R. C. Barrall, *Nucl. Phys.*, **A138**(1969), 387.
- [36] J. J. Singh, *Amer. Nucl. Soc. Trans.*, **15**(1972), 147.
- [37] I. Garlea, *Rev. Roum. Phys.*, **31**(1986), 149.
- [38] 卢涵林, *Chinese J. Nucl. Phys.*, **4**(1982), 272.
- [39] Kornilor, NEANDC 1989.9.13-15 ANL 会议报告.
- [40] Wagner, NEANDC 1989.9.13-15 ANL 会议报告.
- [41] BOSPOR 80.

The Cross-Section Measurements and Evaluations for $^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ and $^{54}\text{Fe}(n,p)$ Reactions

LI TINGYAN SHI ZHAOMIN

(Dept. of Technical Physics, Peking University, 100871)

LU HANLIN ZHAO WENRONG YU WEIXIANG YUAN XIALIN

(Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

ABSTRACT

Activation techniques have been used to measure the cross-section for $^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$ and $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ reactions in the neutron energy range 13.6—17.8 MeV. The uncertainty of measured data has been aculated from 3%—7%. The covariance matrixes for measurement error are calculated. Evaluations for $^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)$ and $^{54}\text{Fe}(n,p)$ cross-section are made.