

# 中能中子与 $^{60}\text{Ni}$ 反应的理论计算和分析

黄小龙

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:**在中子与 $^{60}\text{Ni}$  反应的总截面、去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据基础上, 获得了入射中子能量 0.456~150 MeV 范围内的一组普适的中子与 $^{60}\text{Ni}$  反应的光学模型势参数。利用光学模型、宽度涨落修正的 Hauser-Feshbach 理论、预平衡反应的激子模型和核内级联模型的中能核反应计算程序 UNF 和 MEND, 计算了中子与 $^{60}\text{Ni}$  反应的所有截面、角分布和能谱, 并将理论计算结果与实验数据和评价数据进行了分析比较。

**关键词:**光学模型; 中能核反应; UNF 程序; MEND 程序;  $^{60}\text{Ni}$

中图分类号: O571.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)01-0033-05

## Calculation and Analysis of Neutron-Induced Reactions on $^{60}\text{Ni}$ Below 150 MeV

HUANG Xiao-long

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-41, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Based on the experimental data of the total, the nonelastic and the elastic cross sections and the elastic scattering angular distributions for  $n+^{60}\text{Ni}$  reactions, a set of parameters for neutron optical model potential was obtained in the incident neutron energy region of 0.456-150 MeV. Then reaction cross sections, angular distributions, energy spectra, gamma-ray production cross sections and gamma-ray production energy spectra were calculated in terms of the optical model, the distorted wave Born approximation theory, the Hauser-Feshbach theory, the exciton model and the cascade mechanism inside nuclear. The results were analyzed and compared with the existing experimental data and other evaluated data from ENBF/B-6. There are in agreement with each other within error.

**Key words:** optical model; intermediate energy nuclear reaction; UNF code; MEND code;  $^{60}\text{Ni}$

近年来, 中高能核反应理论及其反应数据 的研究已成为国际核物理界广泛关注的领域,

并得到重视。随着反应堆物理和加速器驱动的次临界系统(ADS)等应用核技术的发展,对高精度评价核数据的需求增多。

$^{60}\text{Ni}$  是重要的核材料之一,它的中子核反应数据对核能开发和核工程应用具有重要意义。目前,实验测量数据尚不能满足实际需要,特别是中高能区的数据,除  $(n, p)$  等反应在 20 MeV 以下能区有实验数据外,其余能区及其它反应道截面、角分布、能谱的测量数据甚少或者没有,因此,需进行理论计算来补充和完善。

本工作利用中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应的总截面、弹性散射角分布和天然 Ni 去弹性散射截面的实验数据和光学模型自动调参程序 APMN<sup>[1]</sup>, 给出入射中子能量为 0.456~150 MeV 的一组普适中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应的光学模型势参数。利用光学模型、宽度涨落修正的 Hauser-Feshbach 理论、预平衡反应的激子模型和核内级联模型的中能核反应计算程序 UNF 和 MEND, 系统计算中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应的所有截面、角分布和能谱数据。

## 1 理论模型和参数的选择与调整

光学模型描述核反应的势散射阶段,给出中子与原子核反应的总截面、去弹性散射截面、形状弹性散射截面、弹性散射角分布、复合核和预平衡发射过程的逆截面及穿透因子。

从 EXFOR 实验库中可检索得到中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应的总截面、去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据,在低于 24 MeV 能区,有弹性散射角分布实验数据。关于总截面,在 0.6~5 MeV 能区,由于仍有结构存在,直接取 P. Stoler<sup>[2]</sup> 的数据以保留其结构;在 5~20 MeV 能区,取 P. Stoler<sup>[2]</sup> 实验数据的样条拟合值。由于中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应的总截面只到 28 MeV 能区,高于 28 MeV 能区有中子与天然 Ni 反应的总截面实验数据(在误差范围内二者的差别很小),因此,在 20~150 MeV 能区,取 P. Stoler<sup>[2]</sup>、D. C. Larson<sup>[3]</sup> 和 W. P. Abfalter<sup>[4]</sup> 等实验数据的样条拟合值,并参考 S. Pearlstein<sup>[5]</sup> 的系统学和 ENDF/B-6 的评价值。关于去弹性散射截面,因无  $^{60}\text{Ni}$  的实验数据,但有天然 Ni 的去弹性散射截面实验数据,

高于 4 MeV 后,在误差范围内二者的差别很小,因此,直接取天然 Ni 的去弹性散射截面实验数据<sup>[6]</sup> 作为  $^{60}\text{Ni}$  的去弹性散射截面实验数据。

关于光学模型势,采用 Woods-Saxon 位势,其表达式可分别表述为:

对光学模型势的实部,有:

$$V = V_0 + V_1 E + V_2 E^2 + V_3 (N - Z) / A \quad (1)$$

对虚部势的面吸收部分,有:

$$W_s = W_0 + W_1 E + W_2 (N - Z) / A \quad (2)$$

对虚部势的体吸收部分,有:

$$W_v = U_0 + U_1 E + U_2 E^2 \quad (3)$$

自旋-轨道耦合势为  $U_{so}$ , 光学模型势的实部、虚部势的面吸收、虚部势的体吸收、自旋-轨道耦合势的半径分别为  $r_r$ 、 $r_s$ 、 $r_v$  和  $r_{so}$ ; 光学模型势的实部、虚部势的面吸收、虚部势的体吸收、自旋-轨道耦合势的弥散宽度分别为  $a_r$ 、 $a_s$ 、 $a_v$  和  $a_{so}$ 。

在式(1~3)中: $Z$ 、 $N$ 、 $A$  分别表示靶核的电荷数、中子数和质量数; $E$  是入射中子的能量; $V$ 、 $W_s$ 、 $W_v$ 、 $U_{so}$ 、 $E$  以 MeV 为单位, $r_r$ 、 $r_s$ 、 $r_v$ 、 $r_{so}$ 、 $a_r$ 、 $a_s$ 、 $a_v$ 、 $a_{so}$  以 fm 为单位。

利用中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应的总截面、去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据和光学模型自动调参程序 APMN<sup>[1]</sup>, 在入射中子能量  $E \leq 150$  MeV 条件下,获得了一组普适的  $^{60}\text{Ni}$  中子光学模型势参数,结果列于表 1。

应用这一组光学模型势参数,对中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应总截面、弹性散射截面、弹性散射角分布和去弹性散射截面进行了理论计算,并与相应的实验数据进行了比较。结果表明,得到的普适中子光学模型势参数能够再现实验数据。图 1~3 示出了  $^{60}\text{Ni}$  反应总截面和中子弹性散射角分布以及去弹性散射截面与实验数据的比较。

为了计算和分析,对  $E \leq 150$  MeV 能区中子与  $^{60}\text{Ni}$  反应的所有截面、角分布和能谱计算,引入了低能核反应计算程序 UNF 和中能核反应理论计算程序 MEND,二者皆能给出所有的反应截面及能谱。UNF 采用带宽度涨落修正的 Hauser-Feshbach 理论、与  $J\pi$  有关的激子模型;MEND 采用 Hauser-Feshbach 理论,激子

表 1 <sup>60</sup>Ni 中子光学模型势参数  
Table 1 Optical model potential parameters for <sup>60</sup>Ni

参数	参数数值		参数	参数数值	
	$E \leq 20$ MeV	$E > 20$ MeV		$E \leq 20$ MeV	$E > 20$ MeV
$V_0$	53.987 732	54.184 853	$U_{so}$	6.2	6.2
$V_1$	-0.302 761	-0.310 020	$r_r$	1.186 454	1.180 355
$V_2$	-0.004 315	0.000 362	$r_s$	1.276 851	1.307 949
$V_3$	-24.0	-24.0	$r_v$	1.467 827	1.200 871
$W_0$	12.018 859	12.946 355	$r_{so}$	1.186 454	1.180 355
$W_1$	-0.215 356	-0.214 055	$a_r$	0.719 689	0.625 429
$W_2$	-12.0	-12.0	$a_s$	0.545 279	0.558 398
$U_0$	-1.103 158	-2.832 649	$a_v$	0.300 000	0.765 894
$U_1$	0.174 809	0.163 131	$a_{so}$	0.75	0.75
$U_2$	-0.004 977	-0.000 432			

注:  $V, W, U$  以 MeV 为单位;  $r, a$  以 fm 为单位

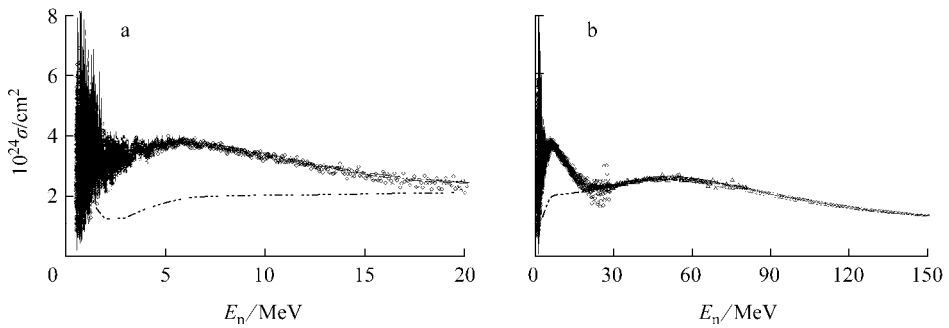


图 1 <sup>60</sup>Ni 中子总截面与实验数据和评价数据的比较

Fig. 1 Comparison of calculated and evaluated neutron total cross section with experimental data for <sup>60</sup>Ni

双点划线——系统学计算;长虚线——JENDL-3;短虚线——ENDF/B-6;实线——本工作;

◇——P. Stoler;△——D. C. Larson;×——W. P. Abfalterer

a—— $E_n = 0 \sim 20$  MeV; b—— $E_n = 0 \sim 150$  MeV

模型和核内级联模型分别描述核反应的平衡和预平衡反应过程;对于核反应的直接作用部分,单独用 DWUCK 程序计算,并作为程序的一个输入文件。

为使计算结果与实验数据符合较好,程序运行中可调整能级密度参数、对修正、巨偶极共振参数或出射粒子的光学势参数等。

## 2 计算结果及其分析

### 2.1 $E_n \leq 20$ MeV 能区

应用获得的光学模型势参数和低能核反应计算程序 UNF, 计算了  $E_n \leq 20$  MeV 能区中子

与<sup>60</sup>Ni 反应的截面、角分布、能谱和  $\gamma$  产生数据等数据。

图 1a 所示为<sup>60</sup>Ni 全截面与实验测量数据的比较,理论计算结果与实验数据符合较好;去弹性散射截面由于没有直接测量数据而采用天然镍的实验数据。图 2 所示为理论计算结果与实验测量数据的比较,计算结果与实验测量数据在误差范围内一致。对于<sup>60</sup>Ni 的弹性散射角分布,从图 3 可看出,理论计算与实验数据符合较好。这说明,已调整好的光学势参数是可靠的,从而保证了理论计算的可靠性。

<sup>60</sup>Ni 总中子非弹性散射截面的实验测量有

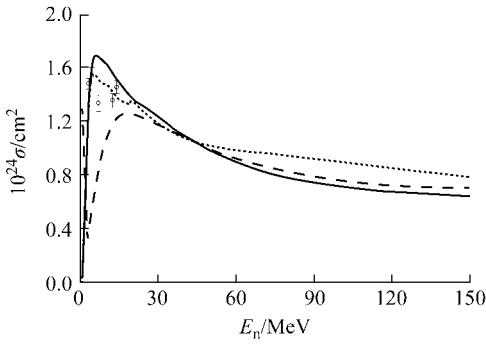


图2 <sup>60</sup>Ni 中子去弹性散射截面  
与实验数据和评价数据的比较

Fig. 2 Comparison of calculated neutron nonelastic cross section with experimental data for <sup>60</sup>Ni  
长虚线——系统学计算;短虚线——ENDF/B-6;  
实线——本工作;◇——H. L. Taylor

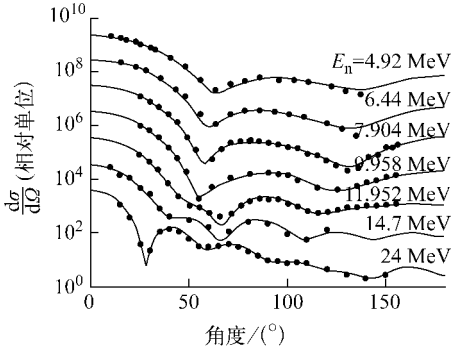


图3 <sup>60</sup>Ni 中子弹性散射角分布  
与实验数据的比较

Fig. 3 Comparison of calculated neutron elastic scattering angular distribution with experimental data for <sup>60</sup>Ni

两家<sup>[7-8]</sup>,均为单能点测量,可用于有关参数的调整标准,以保证理论计算的合理性。图4示出理论计算结果与实验数据的比较。

图5示出非常重要的反应道(n,p)的理论计算结果与实验测量数据<sup>[9-15]</sup>的比较。可以看出,理论计算结果能够再现实验数据。对于无实验测量数据的其它反应道,理论模型能合理地预言其反应截面。

### 2.2 E<sub>n</sub> > 20 MeV 能区

在此能区,基本上无实验数据,因此,理论计算显得尤为重要。应用获得的光学模型势参数和中能核反应理论计算程序MEND,计算了

20 MeV ≤ E<sub>n</sub> < 150 MeV 能区中子与<sup>60</sup>Ni 反应的截面、角分布和能谱等数据。

图1b所示为<sup>60</sup>Ni 全截面与实验测量数据的比较,理论计算结果与实验数据符合较好,结合图3所示的弹性散射角分布,说明获得的光学势参数是可靠的。

作为例子,图6示出了 n + <sup>60</sup>Ni 反应发射中子、质子、氘、氚、<sup>3</sup>He 和 α 粒子反应道截面的MEND 计算结果。

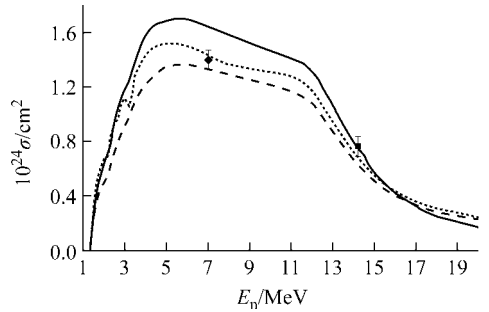


图4 <sup>60</sup>Ni 中子总非弹性散射截面  
与实验数据和评价数据的比较

Fig. 4 Comparison of evaluated total neutron inelastic-scattering cross sections with experimental data for <sup>60</sup>Ni  
长虚线——JENDL-3;短虚线——ENDF/B-6;  
实线——本工作;◆——J. H. Towle;  
■——Shi Xiamin

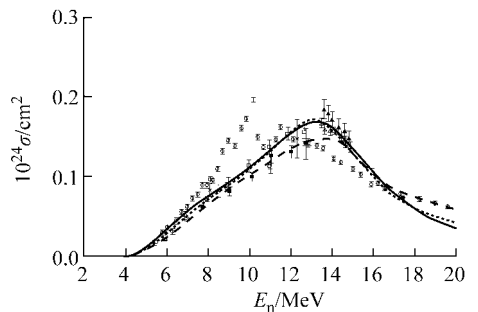


图5 <sup>60</sup>Ni(n,p)<sup>60</sup>Co 反应截面  
与实验数据和评价数据的比较

Fig. 5 Comparison of evaluated cross section with experimental data for <sup>60</sup>Ni(n,p) <sup>60</sup>Co reaction  
长虚线——JENDL-3;短虚线——ENDF/B-6;实线——本工作;  
○——A. Paulsen;▲——Wang Yongchang;  
■——H. Vonach;×——S. Sudar;  
□——M. Wangner;◆——Lu Hanlin;  
△——A. A. Filatenkov

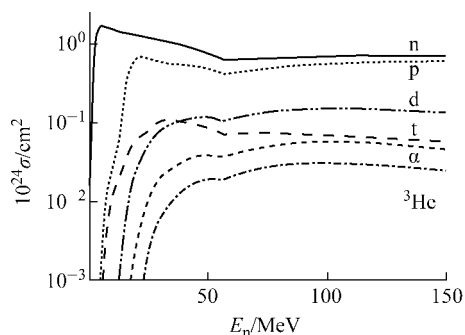


图6  $n+^{60}\text{Ni}$  反应发射中子、质子、氘、氚、 $^3\text{He}$  和  $\alpha$  粒子反应道截面的理论计算结果

Fig. 6 Theoretical calculated cross sections of neutron, proton, deuteron, triton, helium and alpha emission for  $n+^{60}\text{Ni}$  reaction

### 3 结语

应用中子与 $^{60}\text{Ni}$ 反应的总截面、去弹性散射截面、弹性散射角分布的实验数据以及低能核反应计算程序 UNF 和中能核反应理论计算程序 MEND, 在入射中子能量 0.456 ~ 150 MeV 能区内, 对中子与 $^{60}\text{Ni}$ 反应的截面和能谱进行了理论计算和分析, 并将理论计算结果与实验数据进行了比较。理论计算结果与实验数据在误差范围内一致。

### 参考文献:

[1] SHEN Q B. A program for automatically searching optimal optical potential parameters in  $E \leq 300$  MeV energy region[J]. Nucl Sci Eng, 2002, 141:78-82.

[2] STOLER P, CLEMENT J, GOULDING C, et al. The MeV total neutron cross section program at RPI[C]. Knoxville: National Bureau of Standards, 1971:311-316.

[3] LARSON D C, HARVEY J A, HILL N W. Measurement of neutron total cross sections at ORELA to 80 MeV[C]. Brookhaven: World Scientific Press, 1980:277-282.

[4] ABFALTERER W P, BATEMAN F B, DIETRICH F S, et al. Measurement of neutron total cross sections up to 560 MeV[J]. Phys Rev,

2001, C63:044608-044611.

[5] PEARLSTEIN S. Medium-energy nuclear data libraries: A case study, neutron- and proton-induced reactions in  $^{56}\text{Fe}$ [J]. Astrophys J, 1989, 346:1 049-1 096.

[6] TAYOR H L, LONJSJO O, BONNER T W. Nonelastic scattering cross sections for fast neutrons[J]. Phys Rev, 1955, 100:174-182.

[7] TOWLE J H, OWENS R O. Absolute level densities from neutron inelastic scattering[J]. Nucl Phys, 1967, A100:257-271.

[8] SHI X M, SHEN R L, XING J Q, et al. Measurements of the induced gamma ray cross-sections by 14.2 MeV neutrons with Fe, Ni and Cu [J]. Chinese J Nucl Phys, 1982, 4:120-132.

[9] PAULSEN A. The spin cut-off factor for  $^{60}\text{Co}$  [J]. Z Phys, 1967, 205:226-235.

[10] WANG Y C, REN Z L, YUAN J Q, et al. The cross section measurement for the  $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$  reaction[J]. High Energy Phys Nucl Phys, 1990, 14:923-932.

[11] VONACH H, WAGNER M, HAIGHT R C. Neutron activation cross-sections of  $^{58}\text{Ni}$  and  $^{60}\text{Ni}$  for 8-12 MeV neutrons, NEANDC-259[R]. European: OECD Nuclear Energy Agency, 1989.

[12] SUDAR S, CSIKAI J, QAIM S M, et al. Neutron activation cross-sections for  $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}^m$ ,  $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}^{m+g}$  and  $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}^m$  reaction in the 5 to 12 MeV energy range[C]. Juelich: Juelich University Press, 1991:291-295.

[13] WAGNER M, VONACH H, HAIGHT R C. Measurement of the  $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$  cross section in the neutron energy range 6-13 MeV, INDC (AUS)-14/D [R]. [S. l.]: INDC, 1991.

[14] LU H L, ZHAO W R, YU W X. Cross section measurement for  $^{58}\text{Ni}(n, np + pn + d)^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$  and  $^{62}\text{Ni}(n, \alpha)^{59}\text{Fe}$  reactions[J]. Chinese Nucl Phys, 1994, 16:263-276.

[15] FILATENKOV A A, CHUVAEV S V, AKSENOV V N, et al. Systematic measurement of activation cross sections at neutron energies from 13.4 to 14.9 MeV, RI-252[R]. RUS: Khlopin Radium Institute, 1999.