

## 蒸发和激子模型的 $(n, \alpha)$ 激发函数系统学研究

樊胜<sup>1,2</sup>, 阎芳<sup>1,3</sup>, 张鸿洲<sup>1,4</sup>, 赵志祥<sup>1</sup>

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2. 上海大学射线研究所, 上海 201800;

3. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳 421000;

4. 西北大学物理系, 陕西西安 710006)

**摘要:**  $(n, \alpha)$  反应截面对于反应堆, 特别是对快堆和聚变堆工程设计是一种很重要的数据。在一些近似条件下, 基于核反应蒸发和预平衡激子模型理论研究了入射能量小于 20 MeV 的  $(n, \alpha)$  激发函数。在靶核  $30 \leq A \leq 209$  范围内, 基于  $(n, \alpha)$  反应的截面实验数据对得到的半经验公式的参数进行了研究, 得到了参数对靶核的  $N$  和  $Z$  以及中子入射能量的依赖关系。利用普适参数预言  $(n, \alpha)$  反应的激发函数, 预言值在其误差范围内与实验数据一致。

**关键词:** 蒸发模型; 预平衡激子模型;  $(n, \alpha)$  反应激发函数

中图分类号: O571.413

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)03-0193-07

### Systematics Approach of the Cross Section for $(n, \alpha)$ Reaction Based on the Evaporation and Exciton Models

FAN Sheng<sup>1,2</sup>, YAN Fang<sup>1,3</sup>, ZHANG Hong-zhou<sup>1,4</sup>, ZHAO Zhi-xiang<sup>1</sup>

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University, Shanghai 201800, China;

3. Nuclear Technology College, Nanhua University, Hengyang 421000, China;

4. Physics Department, Northwest University, Xi'an 710006, China)

**Abstract:** The production data of helium from neutron-induced reactions are of prime importance from the viewpoint of nuclear applications and nuclear reactor technology. A systematics approach of the cross section for the  $(n, \alpha)$  reaction is obtained on the basis of the evaporation and exciton models. The systematic parameters depend on the energy of incident neutron, the mass and charge number of the target nucleus. The predictions from systematics approach of  $(n, \alpha)$  cross section are in good agreement with the experimental data.

**Key words:** evaporation model; exciton model;  $(n, \alpha)$  reaction cross section

收稿日期: 2003-03-31; 修回日期: 2003-07-14

基金项目: 国家重点基础发展规划资助项目 (G1999022600); 教育部归国留学基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目 (10305021)

作者简介: 樊胜 (1968—), 男, 湖南常德人, 研究员, 博士后, 核物理专业

(n, α)反应截面对于反应堆,特别是对快堆和聚变堆工程以及加速器驱动核能系统<sup>[1]</sup>设计是一种很重要的数据,但相当多的核素尚无(n, α)反应实验数据。因此,希望通过理论模型和系统学研究来补充实验数据的不足。GNASH<sup>[2]</sup>、TNG<sup>[3]</sup>、UNF<sup>[4]</sup>、EMPIRE-II<sup>[5]</sup>等理论程序可用于计算(n, α)反应截面数据,但在计算过程中需大量调整靶核和剩余核的参数,且调整难度较大。

一些采用复杂理论公式的简化、保留理论模型的清晰物理图像的解析表达来研究(n, p)和(n, α)反应截面的系统学方法<sup>[6~22]</sup>在近年得到了很大的进展。这些系统学研究有共同的缺陷:大多以平衡态统计模型为基础,未考虑预平衡发射的贡献;基本上是14 MeV附近截面的系统学;系统学值与实验数据间的偏离较大。文献<sup>[23]</sup>则克服了以上缺点,它基于蒸发和预平衡模型,在考虑粒子的二次发射情况下,对理论模型进行了适当简化,得到有两个参数的半经验计算方法,其系统学结果虽很好地再现了实验数据,但在该系统学中却假定了复合系统的形成截面与能量无关,并作为该系统学的一个主要参数。

基于文献<sup>[23]</sup>的工作,本工作研究(n, α)反应截面系统学半经验计算方法。

## 1 半经验计算方法

利用蒸发和预平衡激子模型,并假定:预平衡发射过程考虑  $n=3$  的激子态达到平衡;考虑“无返回近似”;与发射 α 粒子竞争的主要是发射中子和质子的过程,忽略粒子二次发射过程。(n, α)反应截面可表述为:

$$\sigma(n, \alpha) = \alpha^{\text{ev}}(n, \alpha) + \alpha^{\text{pre}}(n, \alpha) \quad (1)$$

式中:  $\alpha^{\text{ev}}(n, \alpha)$  为蒸发部分的贡献;  $\alpha^{\text{pre}}(n, \alpha)$  为预平衡发射的贡献。

按照蒸发模型<sup>[24]</sup>,蒸发部分的贡献为:

$$\alpha^{\text{ev}}(n, \alpha) = C_\alpha(N, Z, E_n) \frac{k\Gamma_\alpha(E_C, E_R)}{1 + k\Gamma^C(E_C)} \quad (2)$$

式中:  $C_\alpha(N, Z, E_n)$  为与复合核的形成截面有关的可调参数,在本工作中,为与入射中子能量  $E_n$  和靶核  $N, Z$  有关的可调参数;  $E_C = E_n + B_n$ , 为复合核的激发能,  $B_n$  是中子和靶核结合能;  $E_R = E_C - B - \epsilon$ , 是余核的激发能,  $\epsilon$  为出射

粒子能量,  $B$  为出射粒子结合能;  $\Gamma_\alpha(E_C, E_R)$  为 α 粒子的衰变宽度;  $\Gamma^C(E_C)$  为复合核的总衰变宽度;  $k/(1+k)$  是预平衡发射后达到平衡态的几率,对于  $E_n \leq 20$  MeV 的中子入射,近似地取为<sup>[25]</sup>:

$$k = 0.035A(1.0 + \frac{B_n}{E_n}) \quad (3)$$

α 粒子的衰变宽度为:

$$\Gamma_\alpha(E_C, E_R) \propto \frac{1}{\rho(A, E_C)} \cdot \int_0^{E_C - B_\alpha} D(\epsilon) \epsilon \rho(R, E_C - B_\alpha - \epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

式中:  $A$  为靶核的质量数;  $D(\epsilon)$  为库仑位垒穿透因子;  $\rho(A, E_C)$  和  $\rho(R, E_C - B_\alpha - \epsilon)$  分别为复合核和剩余核能级密度;  $B_\alpha$  是 α 粒子与靶核的结合能。

在出射粒子衰变宽度计算中假定逆截面与能量无关。

根据与发射粒子竞争的主要是发射中子和质子这一假定,复合核的总衰变宽度  $\Gamma^C(E_C) \approx \Gamma_n(E_C, E_R) + \Gamma_p(E_C, E_R) + \Gamma_\alpha(E_C, E_R)$ , 其中,  $\Gamma_n(E_C, E_R)$ 、 $\Gamma_p(E_C, E_R)$  分别为中子和质子衰变宽度,考虑到  $E_n \leq 20$  MeV,  $\Gamma_n(E_C, E_R) \gg \Gamma_p(E_C, E_R) \gg \Gamma_\alpha(E_C, E_R)$ , 则复合核的总衰变宽度近似为  $\Gamma^C(E_C) \approx \Gamma_n(E_C, E_R)$ , 中子衰变宽度可写为:

$$\Gamma_n(E_C, E_R) \propto \frac{1}{\rho(A, E_C)} \cdot \int_0^{E_C - B_n} \epsilon \rho(R, E_C - B_n - \epsilon) d\epsilon \quad (5)$$

式(4)中的 α 粒子库仑位垒穿透因子  $D(\epsilon)$  取为:

$$D(\epsilon) = \begin{cases} 1.0 & \epsilon \geq E_0 \\ \frac{\epsilon}{E_0^2} & \epsilon < E_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $E_0$  是库仑位垒势高度,取为<sup>[26]</sup>:

$$E_0 = 1.03 \frac{(Z - Z_\alpha)Z_\alpha}{(A + 1 - A_\alpha)^{1/3} + A_\alpha^{1/3}} \cdot \left[ 1 - \frac{1.13}{(A + 1 - A_\alpha)^{1/3}} \right] \quad (7)$$

式中:  $A_\alpha, Z_\alpha$  分别为 α 粒子的质量数和核电荷数。

为简化计算,复合核能级密度取为常温型,有:

$$\rho(A, E) \propto e^{-E/T} \quad (8)$$

式中:  $T$  为核温度(MeV), 在  $E_n \leq 20$  MeV 情况下取为<sup>[7]</sup>:

$$T = \begin{cases} \frac{13}{\sqrt{A}} & A < 165 \\ \frac{13(0.0125A - 1.0625)}{\sqrt{A}} & A \geq 165 \end{cases} \quad (9)$$

则蒸发部分的贡献可近似写为:

$$\sigma^{\text{ev}}(n, \alpha) \approx C_\alpha(N, Z, E_n) \frac{k}{1+k} \cdot \frac{\int_0^{E_C - B_\alpha} D(\epsilon) \epsilon \rho(R, E_C - B_\alpha - \epsilon) d\epsilon}{\int_0^{E_C - B_n} \epsilon \rho(R, E_C - B_n - \epsilon) d\epsilon} \quad (10)$$

按照预平衡激子理论<sup>[27]</sup>, 在假定预平衡发射过程激子态  $n=3$  时达到平衡; 考虑“无返回近似”, 则预平衡发射的贡献可表述为:

$$\sigma^{\text{pre}}(n, \alpha) = C_\alpha(N, Z, E_n) \frac{L_\alpha(n=3)}{(1+k)L} \quad (11)$$

式中:  $L_\alpha$  和  $L$  是  $\alpha$  粒子的预平衡发射几率和复合核的总预平衡发射几率。

$\alpha$  粒子在激子态  $n=3$  情况下的预平衡发射几率, 考虑 pick-up 机制<sup>[28,29]</sup> 可写为:

$$L_\alpha(n=3) \propto \frac{1}{\omega_C(2, 1, E_C)} \cdot \int_0^{E_C - B_\alpha} \epsilon F_{1m} Q(\alpha) \omega(1, 1, E_C - B_\alpha - \epsilon) d\epsilon \quad (12)$$

式中:  $\omega_C(2, 1, E_C)$  为复合核系统 2 个粒子和 1 个空穴( $n=3$ )的激子态密度;  $Q(\alpha)$  为组合因子, 取为 0.993<sup>[29]</sup>;  $F_{1m}$  为形成几率, 在中子入射能量低于 20 MeV 的情况下,  $F_{13}$  即费米面上 1 个粒子拾取费米面下 3 个粒子形成  $\alpha$  粒子是主要的, 其它组合的贡献很小,  $F_{13}$  可表述为<sup>[29]</sup>:

$$F_{13} = (a_1 + a_2 \epsilon_F)^2 + (b_1 + b_2 \epsilon_F) \epsilon + (c_1 + c_2 \epsilon_F) \epsilon^2 \quad (13)$$

式中:  $\epsilon_F$  为费米能; 参数  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$  分别取为 0.570 41, -0.003 95 MeV<sup>-1</sup>, -0.023 81 MeV<sup>-1</sup>, 0.000 246 MeV<sup>-2</sup>, 0.000 25 MeV<sup>-2</sup>, -0.000 003 MeV<sup>-3</sup><sup>[29]</sup>。

根据与发射  $\alpha$  粒子竞争的主要是发射中子和质子这一假定, 复合核的预平衡发射几率  $L \approx L_n + L_p + L_\alpha$ 。对于  $E_n \leq 20$  MeV 中子入射,  $L_n \gg L_p \gg L_\alpha$ , 则复合核的总预平衡发射几率近似为  $L \approx L_n$ 。中子预平衡发射几率为:

$$L_n(n=3) \propto \frac{1}{\omega_C(2, 1, E_C)} \cdot \int_0^{E_C - B_n} \epsilon \omega(1, 1, E_C - B_n - \epsilon) d\epsilon \quad (14)$$

激子态密度采用 Ericson 公式<sup>[30]</sup>, 有:

$$\omega_C(p, h, E) = \frac{g(gE)^{n-1}}{p!h!(n-1)!} \quad (15)$$

式中:  $p$  为粒子数;  $h$  为空穴数; 激子数  $n = p + h$ ;  $g$  为单粒子态密度, 取为  $g = \frac{A}{8}$ 。

预平衡发射的贡献近似为:

$$\sigma^{\text{pre}}(n, \alpha) \approx C_\alpha(N, Z, E_n) \frac{1}{1+k} \cdot \frac{\int_0^{E_C - B_\alpha} \epsilon F_{1m} Q(\alpha) \omega(1, 1, E_C - B_\alpha - \epsilon) d\epsilon}{\int_0^{E_C - B_n} \epsilon \omega(1, 1, E_C - B_n - \epsilon) d\epsilon} \quad (16)$$

由此得到的  $(n, \alpha)$  反应激发函数的半经验计算公式中仅有唯一的参数  $C_\alpha(N, Z, E_n)$ 。

## 2 参数系统学研究结果

$(n, \alpha)$  反应截面的实验数据分歧较大, 为此, 对实验数据进行了分析和比较。将所采用的实验数据与 ENDF/B6、CENDL-2 以及 JENDF3.3 等数据库的结果进行了比对, 只有实验数据和各数据库的结果均一致的方予采用, 截面数据小于  $1 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup> 的未予以利用。

图 1(a~d) 示出了入射能量分别为 8、11、14.5 和 20 MeV 的  $(n, \alpha)$  反应截面的半经验计算方法的参数  $C_\alpha(N, Z, E_n)$  和靶核  $N, Z$  的依赖关系。可以看出:  $C_\alpha(N, Z, E_n)$  与  $(1+A^{1/3})^2$  成正比, 而与靶核的不对称系数  $(N-Z+1)/A$  为指数关系, 可表述为:

$$C_\alpha(N, Z, E_n) = (1+A^{1/3})^2 \cdot \exp[0.6931(B-K \frac{N-Z+1}{A})] \quad (17)$$

式中:  $B$  和  $K$  是拟合参数;  $E_n$  取常数。

本工作研究了入射中子能量为 8、10、11、12、14.5、18 和 20 MeV 时的拟合参数  $B$  和  $K$  的值, 得到了它们与中子入射能量的关系(图 2), 有:

$$\begin{aligned} B &= -2.71167(\pm 0.6413) - \\ &0.22598(\pm 0.03744)E_n \\ K &= -76.42824(\pm 12.37834) + \\ &2.27665(\pm 0.67977)E_n \end{aligned} \quad (18)$$

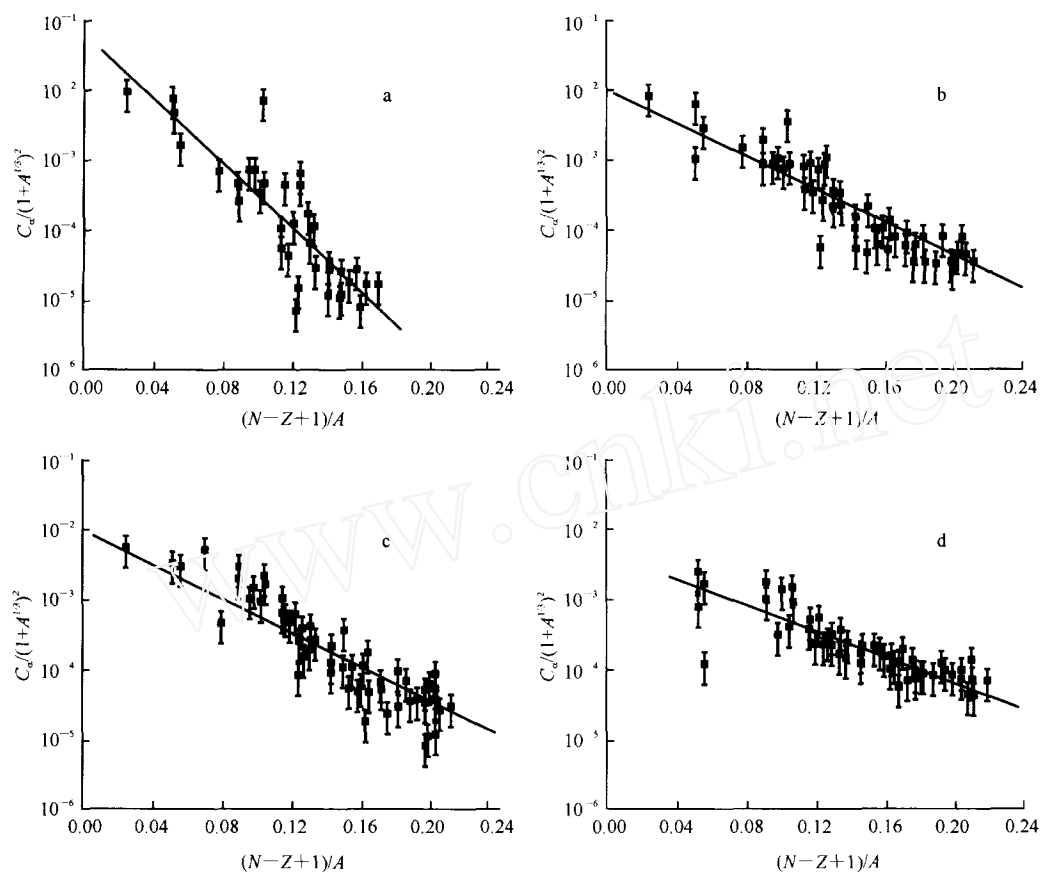


图1 不同能量入射中子与靶核  $N$  和  $Z$  的系统规律

Fig. 1 Dependence of parameter on  $N$  and  $Z$  with different energies

- a— $E_n=8$  MeV,  $B=-3.96134 \pm 0.95046$ ,  $K=-70.6439 \pm 10.80265$ ;  
 b— $E_n=11$  MeV,  $B=-5.54518 \pm 0.76275$ ,  $K=-51.6233 \pm 10.91393$ ;  
 c— $E_n=14.5$  MeV,  $B=-5.859 \pm 0.633$ ,  $K=-38.076 \pm 4.051$ ;  
 d— $E_n=20$  MeV,  $B=-7.18705 \pm 0.38398$ ,  $K=-31.6957 \pm 2.49002$

图3(a)~(c)分别示出了利用公式(19)的参数半经验计算方法计算出的 $^{54}\text{Fe}(n, \alpha)$ 、 $^{93}\text{Ni}(n, \alpha)$ 和 $^{197}\text{Au}(n, \alpha)$ 反应激发函数和实验数据<sup>[31~39]</sup>的比较。半经验计算结果在实验数据的误差范围内一致。图3(d)是在靶核 $30 \leq A \leq 210$ 范围内、14.5 MeV中子入射的半经验计算结果与实验数据的比较。可以看出,计算结果与实验数据的比值处在0.6~1.5范围内。

### 3 小结和讨论

在忽略粒子的二次发射、激子态在 $n=3$ 达到平衡以及“无返回近似”和 $\alpha$ 粒子的“pick-up”机制条件下,基于蒸发模型和预平衡激子

模型,对理论公式进行了简化,得到了计算 $(n, \alpha)$ 反应激发函数的半经验计算方法。该计算方法只有唯一的参数 $C_a(N, Z, E_n)$ 。 $C_a(N, Z, E_n)$ 在固定能量点的计算结果和靶核 $N$ 、 $Z$ 有明显的依赖关系, $C_a(N, Z, E_n)$ 和靶核的不对称系数 $(N-Z+1)/A$ 以及 $(1+A^{1/3})^2$ 有简单的关系。 $C_a(N, Z, E_n)$ 参数中的线型拟合参数 $B$ 和 $K$ 的值与中子入射能量的关系近似为一条直线。

利用拟合得到的参数,计算了14.5 MeV中子入射,靶核范围 $30 \leq A \leq 210$ ,计算结果与实验数据的比值处在0.4~2.0范围内,在实验数据误差范围内相一致。

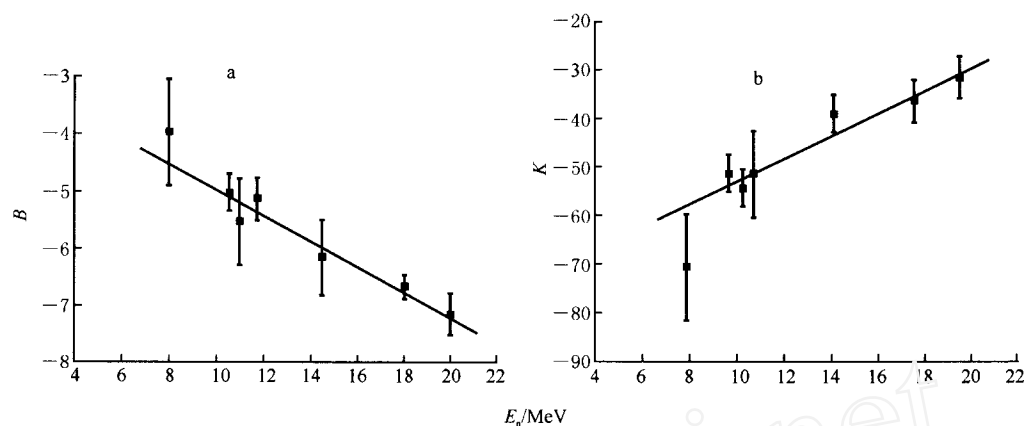


图 2 参数 B(a)和 K(b)与能量的变化关系

Fig. 2 Relation of parameter B(a) and K(b) with incident neutron energy

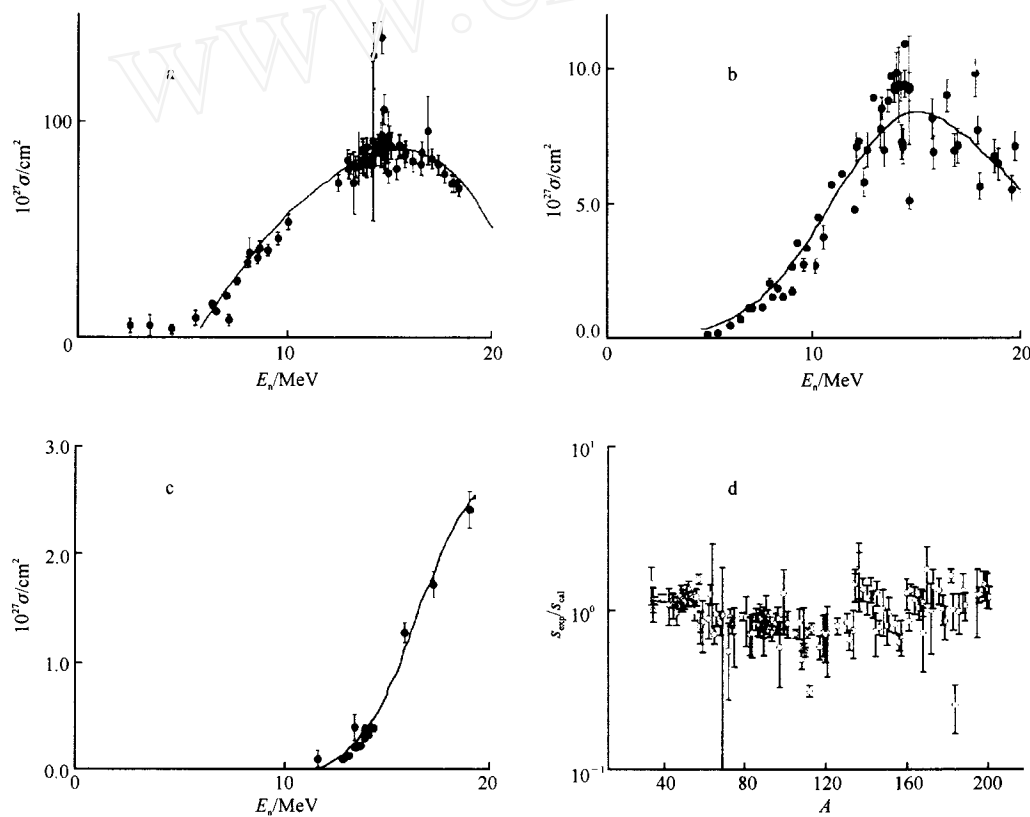


图 3 系统学方法计算的不同反应激发函数和实验数据<sup>[31~39]</sup>的比较

Fig. 3 Comparisons of calculated results with measured data for the different reaction

a——<sup>54</sup>Fe(n,α); b——<sup>93</sup>Ni(n,α); c——<sup>197</sup>Au(n,α); d——计算值与实验数据的比较

参考文献:

[1] Rubbia C, Rubio JA, Buono S, et al. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier; CERN/AT/95-44(ET) [R]. Switzerland; European Organization for Nuclear Research, 1995.

[2] Young PG, Arthur ED. A Pre-equilibrium Statistical Nuclear Model Code for Calculation of Cross Sections and Emission Spectra; LA-6947 [R]. USA; Los Alamos National Laboratory, 1977.

[3] Fu CY. A Consistent Nuclear Model for Com-

- compound and Pre-equilibrium Reactions With Conservation of Angular Momentum; ORNL-TM-7402[R]. USA; Oak Ridge National Laboratory, 1980.
- [4] Zhang J. A Unified Hauser-Feshbach and Exciton Model for Calculation Double-differential Cross Section of Neutron-induced Reactions Below 20 MeV[J]. Nucl Sci Eng, 1993, 114: 55~61.
- [5] Herman M. EMPIRE-II: Modular System of Codes for Nuclear Reaction Calculations [EB/OL]. [http://www-nds.iaea.org.at/empire/](http://www-nds.iaea.org/at/empire/), 2002.
- [6] Konobeyev AYu, Lunev VP, Shubin YUN. Semi-empirical Systematics for (n,  $\alpha$ ) Reaction Cross Sections at the Energy of 14.5 MeV[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1996, B108: 233~242.
- [7] Lu Wende. Applicability of the Constant-nuclear-temperature Approximation in Statistical-model Calculations of Neutron Cross Sections at 14.4 MeV for Medium-Z Nuclei[J]. Phys Rev, 1971, C4: 1173~1181.
- [8] Eder G. On (n, p) Cross Section for 14 MeV Neutrons[J]. Z Physik, 1972, 253: 335~343.
- [9] Gardner DG. Trends in Nuclear Reaction Cross Section (I), the (n, p) Reaction Induced by 14 MeV Neutrons[J]. Nucl Phys, 1962, 29: 373~399.
- [10] Gardner DG. Trends in Nuclear Reaction Cross Sections(II), the (n,  $\alpha$ ) Reaction Induced by 14.5 MeV Neutrons for Elements in the Range  $6 \leq Z \leq 30$ [J]. Nucl Phys, 1964, 60: 49~64.
- [11] Allan DL. An Experimental Test of the Statistical Theory of Nuclear Reactions[J]. Nucl Phys, 1961, 24: 274~299.
- [12] Gardner DG, Rosenblum S. Trends in Nuclear Reaction Cross Section(IV), Recalculated (n, p) Cross Sections for 14.5 MeV Neutrons of Nuclei in the Range  $6 \leq Z \leq 50$ [J]. Nucl Phys, 1967, A96: 121~137.
- [13] Strohal P. Reaction Mechanism and Shell Effects From the Interaction of 14.6 MeV Neutrons With Nuclei[J]. Nucl Phys, 1962, 30: 49~67.
- [14] Chatterjee A. Shell Effects (n,  $\alpha$ ) Reactions at 14 MeV[J]. Nucl Phys, 1963, 49: 686~693.
- [15] Chatterjee A. Trends in (n,  $\alpha$ ) Cross Sections at 14 MeV[J]. Nucl Phys, 1963, 47: 511~520.
- [16] Chatterjee A. Shell Effects in 14 MeV (n, p) Reactions[J]. Nucl Phys, 1964, 60: 273~293.
- [17] Sigg RA, Kurodap PK. 14.6 MeV Neutron Activation Cross Sections for the Xenon Isotopes [J]. Nucl Sci Eng, 1976, 60: 235~238.
- [18] Struwe W, Winkler G. Measurement of (n, p) Cross Section Isotopes of Cd, Sn, and Te for 14 MeV Neutrons[J]. Nucl Phys, 1974, A222: 605~613.
- [19] Molla NI, Qaim SM. A Systematic Study of (n, p) Reactions at 14.7 MeV[J]. Nucl Phys, 1977, A283: 269~288.
- [20] Qaim SM, Wollie R, Rahman MM. Measurement of (n, p) and (n,  $\alpha$ ) Reaction Cross Sections on Some Isotopes of Nickel in the Energy Region of 5 to 10 MeV Using Deuterium Gas Target at a Compact Cyclotron[J]. Nucl Sci Eng, 1984, 88: 143~153.
- [21] Belgaib M, Asghar M. Semi-empirical Systematics of (n, p) Cross Sections for 14.5 MeV Neutrons[J]. Nucl Instrum Methods, 1998, B142: 463~472.
- [22] Konobeyev AYu, Korovin YuA. Semi-empirical Systematics of (n, p) Reaction Cross Section at Energy of 14.5 MeV[J]. Nucl Instrum Methods, 1995, B103: 15~22.
- [23] Zhao Zhixiang, Zhou Delin. Systematics of Excitation Function for (n, Charge-particle) Reactions [J]. Nucl Sci Eng, 1988, 99: 367~374.
- [24] Hulse W, Feshbach H. The Inelastic Scattering of Neutrons[J]. Phys Rev, 1952, 87: 366~376.
- [25] Fan Sheng, Zhao Zhixiang. A Semiempirical Method to Calculate Continuum Gamma-ray Spectra and Multiplicities From Neutron-induced Reactions[J]. Nucl Sci Eng, 1996, 124: 349~357.
- [26] Dostrovsky I, Frakenkel Z. Monte-Carlo Calculations of Nuclear Evaporation Processes III Applications to Low-energy Reactions [J]. Phys Rev, 1959, 116: 683~702.
- [27] Gadioli E, Gadioli F, Tagliaferri EG. Pre-equilibrium Model Evaluation of Neutron Spectra From Proton-induced Reactions[J]. Phys Rev, 1976, C14: 573~582.
- [28] Iwamoto A, Harada K. Mechanism of Cluster Emission in Nucleon-induced Pre-equilibrium Re-

- actions[J]. Phys Rev, 1982, C26:1 821~1 834.
- [29] Zhang J, Yan S, Wang S, et al. The Pick-up Mechanism in Composite Particle Emission Processes[J]. Z Phys, 1992, A344:251~261.
- [30] Griffin JJ. Statistical Model of Intermediate Structure[J]. Phys Rev Lett, 1966, 17:478~491.
- [31] Chittenden DM, Gardner DG, Fink RW. New Isotope of Manganese, Cross Sections of the Iron Isotopes for 14.8 MeV Neutrons[J]. Phys Rev, 1961, 122:860~861.
- [32] Saraf SK, Brent CE, Egum PM. Cross Sections and Spectra for the  $^{54}\text{Fe}$  and  $^{56}\text{Fe}$   $(n, xp)$  and  $(n, x\alpha)$  Reactions Between 8 and 15 MeV[J]. Nucl Sci Eng, 1991, 107:365~373.
- [33] Paulsen A, Widera R, Arnotter F. Cross Section for the Reactions  $\text{Fe-54}(n,\alpha)\text{Cr-51}$ ,  $\text{Fe-54}(n,p)\text{Mn-54}$  and  $\text{Fe-56}(n,p)\text{Mn-56}$ [J]. Nucl Sci Eng, 1979, 72:113~116.
- [34] Doczi R, Semkova V, Fenyvesi A. Excitation Functions of Some  $(n,p)$  and  $(n,\alpha)$  Reactions From Threshold to 16 MeV[J]. Nucl Sci Eng, 1998, 129:164~173.
- [35] Bormann M, Schmidt W, Schroeder V, et al. Measurement of  $(N,A)$  Reaction With 14 MeV Neutrons for Cu-63, Nb-93, Rh-103, Ag-107, I-127 and Cs-133[J]. Nucl Phys, 1972, 186:65~87.
- [36] Mannan A, Qaim SM. Activation Cross-section and Isomeric Cross-section Ratio for the Nb-93  $(N,A)Y-90m$ ,  $G$  Process[J]. Phys Rev, 1988, 38:630~637.
- [37] Kulishic P, Ajdacic V, Cindro N, et al. A Study of the Reactions  $^{92}\text{Nb}(n,\alpha)^{90}\text{Y}$  and  $^{141}\text{Pr}(n,\alpha)^{138}\text{La}$  at 14 MeV[J]. Nucl Phys, 1964, 54:17~27.
- [38] Bayhurst BP, Prestwood RJ.  $(n,p)$  and  $(n,\alpha)$  Excitation Functions of Several Nuclei From 7.0 to 19.8 MeV[J]. J Inorg Nucl Chem, 1961, 23:173~184.
- [39] Coleman RF, Hawkev BE, O'connor LP. Cross Sections for  $(N,P)$  and  $(N,A)$  Reactions With 14.5 MeV Neutrons[J]. Proc Phys Soc (London), 1959, 73:215~223.