

# $p+^{107,109}\text{Ag}$ 核反应数据的计算和分析

冷志平, 张开强, 张正军

(西北大学 物理学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 本工作通过理论计算的方法获得了一套适合入射能量为从阈值到 200 MeV 的  $p+^{107,109}\text{Ag}$  核反应全套微观数据。首先, 使用光学模型理论进行调参计算, 得到了一套适合入射能量为从阈值到 340 MeV 的  $p+^{107,109}\text{Ag}$  核反应 Becchetti-Greenlees 光学势参数, 这套参数与实验数据符合很好。其次, 在这套光学势参数的基础上用扭曲波玻恩近似对入射能量从阈值到 200 MeV 的  $p+^{107,109}\text{Ag}$  直接非弹性散射截面进行了计算。最后, 使用核反应统计理论计算了入射能量从阈值到 200 MeV 的  $p+^{107,109}\text{Ag}$  核反应各反应道的截面和出射粒子能谱, 得到了该能区  $p+^{107,109}\text{Ag}$  核反应全套微观数据。将所有计算值与实验数据进行比较, 结果表明, 所得到的全套微观数据与实验数据符合很好。

**关键词:** 全套微观数据; 光学模型; 核反应统计理论; 质子核反应

**中图分类号:** O571.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2013)05-0705-06

**doi:** 10.7538/yzk.2013.47.05.0705

## Calculation and Analysis of $p+^{107,109}\text{Ag}$ Reaction

LENG Zhi-ping, ZHANG Kai-qiang, ZHANG Zheng-jun

(*Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

**Abstract:** The full set of micro data for  $p+^{107,109}\text{Ag}$  nuclear reaction with incident energy from threshold up to 200 MeV was obtained by theoretical calculation. Firstly, a set of Becchetti-Greenlees optical model potential parameters for  $p+^{107,109}\text{Ag}$  nuclear reaction with incident energy from threshold up to 340 MeV was obtained using optical model theory. The set of parameters is in good agreement with the experimental data. Secondly, based on this set of parameters, the cross sections of inelastic scattering for  $p+^{107,109}\text{Ag}$  nuclear reaction with incident energy from threshold up to 200 MeV were calculated using distorted wave Born approximation theory. Thirdly, all the cross sections and energy spectra for  $p+^{107,109}\text{Ag}$  nuclear reaction with incident energy from threshold up to 200 MeV were calculated using intra-nuclear cascade model and nuclear reaction statistical theory. Finally, all the calculation data were compared with the experimental data respectively and the results show that the full set of micro data is in good agreement with the experimental data.

收稿日期: 2011-12-02; 修回日期: 2012-02-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB209903); 中国科学院战略性先导项目资助

作者简介: 冷志平(1986—), 男, 山东成武人, 硕士研究生, 理论物理专业

**Key words:** full set of micro data; optical model; nuclear reaction statistical theory; proton-induced nuclear reaction

加速器驱动的次临界系统(ADS)的出现使突破目前核能开发利用中所遇到的技术“瓶颈”(热中子反应堆在整个核燃料循环、乏燃料后处理和固有安全性方面还有明显的不足)成为可能,因此,对 ADS 的研究在国际上已成为一个热点。我国 ADS 以核燃料增殖及废物核素嬗变为目标,在核能可持续发展中有巨大作用<sup>[1]</sup>。ADS 的工作原理是用中高能质子轰击重金属核,用出射的中子束作为外中子源作用在一个次临界堆上,以达到充分利用核燃料、处理废料和消除固有安全隐患的目的。质子与重金属核的核反应微观数据很重要,是整个 ADS 系统设计的基础之一。 $p+^{107,109}\text{Ag}$  核反应微观数据属于这类数据(Ag 只有<sup>107</sup>Ag 和<sup>109</sup>Ag 两种天然核素,丰度分别为 0.518 39 和 0.481 61)。依据中国 ADS 中子源的设计要求,质子入射能量须达 200 MeV<sup>[2]</sup>。而能量从阈值到 200 MeV 的质子入射靶核<sup>107,109</sup>Ag 核反应的实验数据相当少。因此,本文拟计算该能区  $p+^{107,109}\text{Ag}$  的全套微观数据。

## 1 模型和参数

光学模型是核反应理论的重要部分,它用 1 个复数平均势描写入射粒子与靶核的相互作用,实数势部分表示形状弹性散射,虚数势部分表示靶核对入射粒子的吸收。采用 Woods-Saxon 势<sup>[3]</sup>,利用自动调参程序 APMN.FOR 获得了一套适合核反应  $p+^{107,109}\text{Ag}$  的 Becchetti-Greenlees 光学势参数,将计算结果整理后得到如下的光学势:

$$V_R = 66.020\ 492\ 55 - 0.515\ 336\ 51E + 0.001\ 032\ 88E^2 + 31.521\ 133\ 42 \frac{N-Z}{A} + 0.214\ 185\ 80 \frac{Z}{A^{1/3}} \quad (1)$$

$$W_S = \max\left(0, 11.193\ 966\ 87 - 0.134\ 585\ 87E + 18.692\ 186\ 36 \frac{N-Z}{A}\right) \quad (2)$$

$$W_V = \max(0, -1.711\ 972\ 83 + 0.278\ 304\ 04E - 0.000\ 449\ 67E^2) \quad (3)$$

$$V_{SO} = 3.495\ 180\ 13, W_{SO} = 0.000\ 801\ 02 \quad (4)$$

$$r_R = 1.123\ 619\ 20\ \text{fm} \quad (5)$$

$$r_S = 1.284\ 595\ 73\ \text{fm}, r_V = 1.218\ 279\ 36\ \text{fm},$$

$$r_{SO} = 1.457\ 317\ 71\ \text{fm}, r_C = 1.089\ 185\ 83\ \text{fm} \quad (6)$$

$$a_R = 0.772\ 623\ 18\ \text{fm}, a_S = 0.493\ 990\ 75\ \text{fm},$$

$$a_V = 0.315\ 367\ 43\ \text{fm}, a_{SO} = 1.042\ 492\ 15\ \text{fm} \quad (7)$$

其中: $V_R, W_S, W_V$  分别为光学势的中心实部、面吸收虚部和体吸收虚部的特征量; $N, Z, A$  分别为靶核的中子数、质子数和质量数; $E$  为入射质子能量, MeV; $V_{SO}$  和  $W_{SO}$  分别为自旋-轨道耦合实部势和虚部势的特征量; $r_R, r_S, r_V, r_{SO}, r_C$  分别为中心实部势、面吸收虚部势、体吸收虚部势、自旋-轨道耦合势和库仑势的半径参数; $a_R, a_S, a_V, a_{SO}$  分别为中心实部势、面吸收虚部势、体吸收虚部势、自旋-轨道耦合势的弥散宽度。

扭曲波玻恩近似(DWBA)理论实际是微扰论的一个具体应用<sup>[4]</sup>。对应程序是 DPPM-C.FOR。用 DPPM-C.FOR 得到的直接非弹性散射反应道剩余核的变形参数列于表 1, $\epsilon, J, \pi$  和  $\beta_0$  分别为剩余核激发能、角动量量子数、宇称和变形参数。

使用 MEND 程序计算  $p+^{107,109}\text{Ag}$  各反应道的反应截面和 6 种出射粒子(n、p、 $\alpha$ 、d、t、<sup>3</sup>He)的发射能谱。MEND.FOR 程序是计算的主体程序,它适合计算入射能低于 250 MeV 的中子、质子入射中重核核反应的总截面、总反应截面、弹性散射角分布、各反应道截面、6 种出射粒子能谱和双微分截面等全套微观核数据,整合了球形光学模型、核内级联机制和核反应统计理论(包括描述预平衡核反应的激子模型理论和描述平衡核反应的蒸发模型及 Hauser-Feshbach 理论)等。国外具有类似计算功能的程序有 TALYS、GNASH、ALICE/ASH 等。MEND 与这些程序有相同的理论框架,但在细节处理上有差别。其中重要的一点是对轻复合

表 1 直接非弹性散射反应道剩余核变形参数

Table 1 Deformation parameters of residual nucleus for  $p+^{107,109}\text{Ag}$  reaction

核素	$\epsilon/\text{MeV}$	$J^\pi$	$\beta_0$	核素	$\epsilon/\text{MeV}$	$J^\pi$	$\beta_0$
$^{107}\text{Ag}$	0.093 125	3.5 <sup>+</sup>	0.3	$^{109}\text{Ag}$	0.088 034	3.5 <sup>+</sup>	0.35
	0.125 59	4.5 <sup>+</sup>	0.4		0.132 74	4.5 <sup>+</sup>	0.40
	0.324 81	1.5 <sup>+</sup>	0.1		0.311 38	1.5 <sup>+</sup>	0.1
	0.423 15	2.5 <sup>+</sup>	0.18		0.415 21	2.5 <sup>+</sup>	0.2
	0.773 31	5.5 <sup>+</sup>	0.5		0.42	3.5 <sup>+</sup>	0.35
	0.786 59	1.5 <sup>+</sup>	0.1		0.701 91	1.5 <sup>+</sup>	0.1
	0.922 06	2.5 <sup>+</sup>	0.17		0.707	1.5 <sup>+</sup>	0.1
	0.949 7	2.5 <sup>+</sup>	0.17		0.724 35	1.5 <sup>+</sup>	0.1
	0.973 3	3.5 <sup>+</sup>	0.18		0.735 29	2.5 <sup>+</sup>	0.1
	0.991	6.5 <sup>+</sup>	0.5		0.773 5	5.5 <sup>+</sup>	0.4
	1.061 2	3.5 <sup>+</sup>	0.18		0.789	3.5 <sup>+</sup>	0.2
	1.143 06	2.5 <sup>+</sup>	0.13		0.862 76	2.5 <sup>+</sup>	0.1
	1.146 9	4.5 <sup>+</sup>	0.3		0.869 47	2.5 <sup>+</sup>	0.1
	1.222	5.5 <sup>+</sup>	0.4		0.87	2.5 <sup>+</sup>	0.1
	1.223 01	2.5 <sup>+</sup>	0.13		0.89	4.5 <sup>+</sup>	0.3
	1.258 89	1.5 <sup>+</sup>	0.1		0.911	3.5 <sup>+</sup>	0.2

粒子发射的计算, MEND 在激子模型理论中引入了改进的 pick-up 机制, 而其他类似程序则未引入该机制。所以, MEND 程序能更好地计算 6 种出射粒子能谱和双微分截面。其中, 使用激子模型处理了 1~5 次发射过程, 并对 1~4 次发射过程考虑核内级联发射。对于平衡发射, 使用宽度涨落修正的 Hauser-Feshbach 理论计算一次发射过程, 用蒸发模型计算 1~18 次发射过程<sup>[5]</sup>。在计算过程中, 对预平衡形状因子 DK、 $\alpha+^{107,109}\text{Ag}$  的光学势参数  $a$  及  $\alpha$  粒子发射的能级密度参数  $a_1$  和对修正  $\Delta$  进行了调节。其中,  $\alpha+^{107,109}\text{Ag}$  的光学势参数列于表 2。表 2 中,  $A_R$ 、 $A_S$ 、 $A_V$ 、 $A_{SO}$  分别为光学势中心实部势、面吸收虚部势、体吸收虚部势和自旋-轨道耦合势的弥散宽度;  $X_R$ 、 $X_S$ 、 $X_V$ 、 $X_{SO}$ 、 $X_C$  分别为光学势中心实部势、面吸收虚部势、体吸收虚部势、自旋-轨道耦合势和库伦势的半径;  $U_0$ 、 $U_1$  和  $U_2$  分别为体吸收虚部势的常数因子、能量一次方项系数和二次方项系数;  $V_0$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$  分别为光学势中心实部的常数因子、能量一次方项系数、能量二次方项系数、电荷对称项系数和电荷一次方项系数;  $W_0$ 、 $W_1$

和  $W_2$  分别为面吸收虚部势的常数因子、能量一次方项系数和电荷对称项常数因子。 $n+^{107,109}\text{Ag}$  的光学势参数参考文献[6], 而  $d+^{107,109}\text{Ag}$  的光学势参数参考文献[7]。 $p+^{107}\text{Ag}$  核反应的  $DK=2\ 000$ ,  $\alpha$  粒子 1 次发射的  $a=19.6$ 、 $a_1=18.6$ ,  $\Delta=0.2$ ;  $\alpha$  粒子 2 次发射的  $a=18.0$ 、 $a_1=17.0$ ,  $\Delta=0.5$ 。 $p+^{109}\text{Ag}$  的  $DK=2\ 000$ ,  $\alpha$  粒子 1 次发射的  $a=20.966\ 144$ 、 $a_1=18.635\ 671$ ,  $\Delta=1.8$ 。

表 2 MEND 程序中使用的  $\alpha+^{107,109}\text{Ag}$  的光学势参数  
Table 2 Optical model potential parameters for  $\alpha+^{107,109}\text{Ag}$ 

参数	数值	参数	数值
$A_R$	0.41	$U_2$	0.0
$A_S$	0.41	$V_0$	151.9
$A_V$	0.41	$V_1$	-0.17
$A_{SO}$	0.41	$V_2$	0.0
$X_R$	1.0	$V_3$	50.0
$X_S$	1.0	$V_4$	0.0
$X_V$	1.0	$V_{SO}$	2.5
$X_{SO}$	1.0	$W_{SO}$	0.0
$X_C$	1.0	$W_0$	61.7
$U_0$	0.0	$W_1$	-0.05
$U_1$	0.0	$W_2$	44.0

## 2 结果与分析

用 APMN06M.FOR 程序计算得到  $p + {}^{107,109}\text{Ag}$  核反应的去弹截面和弹性散射角分布的理论值, 这些理论值与实验值的比较如图 1~3 所示。 $p + {}^{107,109}\text{Ag}$  核反应的非弹性散射未查到实验数据, 图中未给出计算结果。

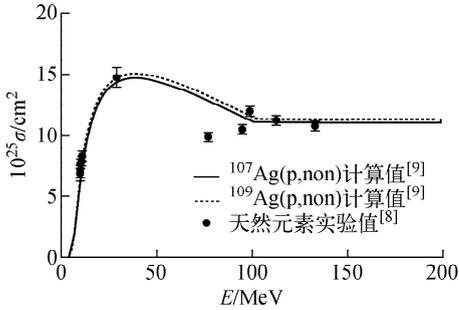


图 1  ${}^{107,109}\text{Ag}(p, \text{non})$  截面计算值和实验值的比较

Fig. 1 Theoretical cross section compared with experimental data for  ${}^{107,109}\text{Ag}(p, \text{non})$

用 MEND.FOR 程序计算得到入射能为从阈值到 200 MeV 的  $p + {}^{107,109}\text{Ag}$  核反应各反应道的截面和能谱数据。其中, 能谱用于表示出射粒子截面随出射能量变化的关系, 是反应截面对出射能的一阶导数。出射粒子能谱(特别是中子谱)是研究靶的形状、能量沉积、散热及次临界堆中的中子慢化等一系列重要问题的前提。将它们和实验值比较, 结果如图 4、5 所

示(图 5 中  $E_{\text{out}}$  为出射粒子能量)。从图可看出, 理论计算值和实验值符合很好。

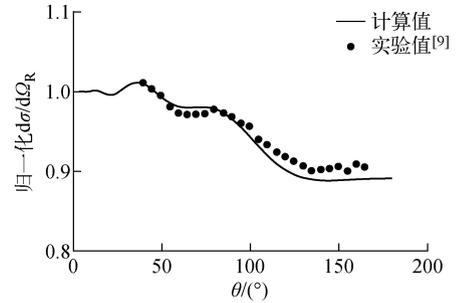


图 2  $E = 6.06 \text{ MeV } {}^{109}\text{Ag}(p, \text{el})$  角分布与卢瑟福散射截面比值计算值和实验值的比较  
Fig. 2 Theoretical data compared with experimental data for  ${}^{109}\text{Ag}(p, \text{el})$  with  $E = 6.06 \text{ MeV}$

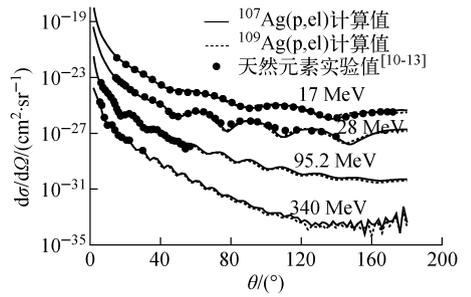


图 3  $E = 17 \sim 340 \text{ MeV } {}^{107,109}\text{Ag}(p, \text{el})$  角分布与散射截面比值计算值和实验值的比较  
Fig. 3 Theoretical data compared with experimental data for  ${}^{107,109}\text{Ag}(p, \text{el})$  with  $E = 17 \sim 340 \text{ MeV}$

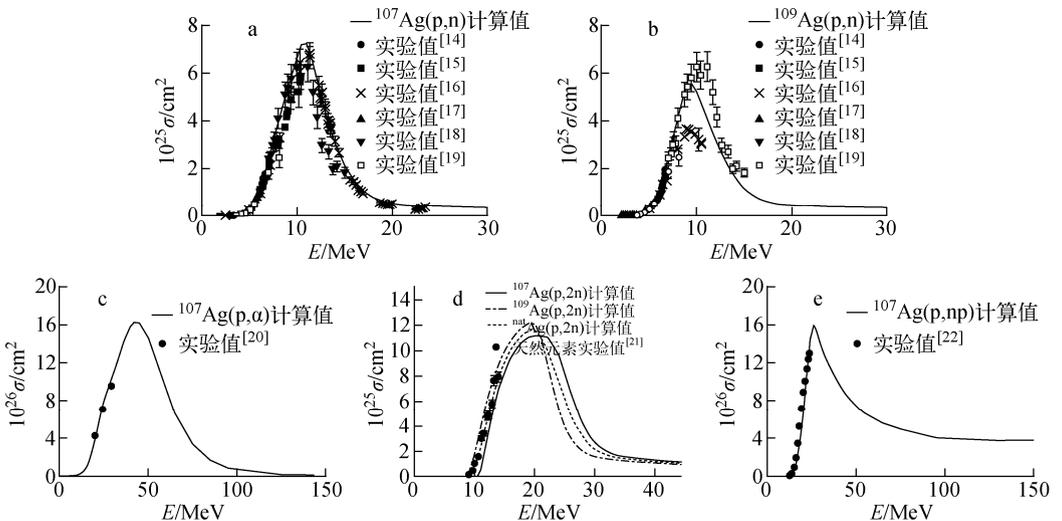
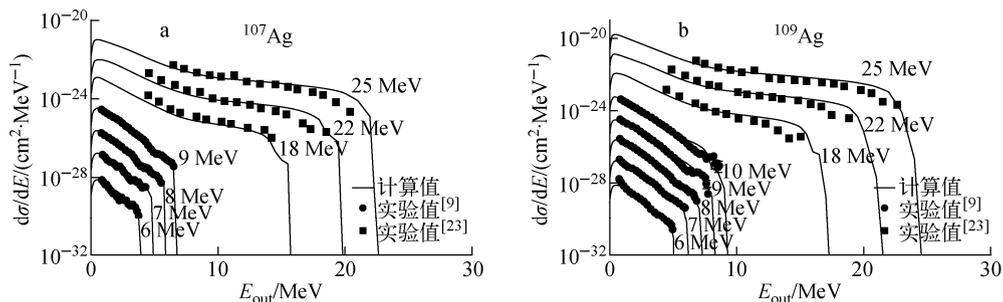


图 4 不同截面计算值与文献实验值的比较

Fig. 4 Theoretical cross sections compared with experimental data



a. 从上至下每条理论曲线和实验数据分别乘  $10^3$ 、 $10^2$ 、 $10^1$ 、 $10^0$ 、 $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ ;

b. 从上至下每条理论曲线和实验数据分别乘  $10^4$ 、 $10^3$ 、 $10^2$ 、 $10^1$ 、 $10^0$ 、 $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$

图5  $^{107}\text{Ag}(p, xn)$ 和 $^{109}\text{Ag}(p, xn)$ 能谱计算值和文献实验值的比较

Fig. 5 Theoretical  $^{107}\text{Ag}(p, xn)$  and  $^{109}\text{Ag}(p, xn)$  energy spectra compared with experimental data

从计算过程和结果可看出,多个反应道之间有较复杂的竞争和协同关系。以 $^{107}\text{Ag}$ 为例,在入射质子能量约5 MeV时,(p,p)道和(p,n)道打开。入射能达10 MeV时,(p,2n)道打开,其截面迅速增大,而同时,(p,n)道的反应截面迅速减小。入射能达15 MeV时,(p,α)道、(p,np)道和(p,d)道打开,但反应截面很小。在入射能为20 MeV左右时,(p,2n)道的反应截面达最大并又开始迅速减小,而(p,n)道的反应截面已减到很小。因此,(p,n)道和(p,2n)道存在强烈竞争关系。在入射能为10~20 MeV时,主要有(p,p)道、(p,n)道和(p,2n)道。其中,(p,p)道主要是直接非弹性散射的贡献。因此,直接非弹性散射截面的合理分配为准确计算(p,n)道和(p,2n)道反应截面的基础。而直接非弹性散射反应道没有实验数据,合理分配直接非弹性散射截面就成为计算中极其重要而又困难的环节。使用DPPM-C.FOR和MEND.FOR两个程序反复调节计算,并每次均将(p,n)道和(p,2n)道反应截面计算值和实验值比较,得到了较为合理的直接非弹性散射截面。因(p,n)和(p,2n)道存在强烈的竞争关系,所以也需合理分配二者的比重。在入射能为20~25 MeV时,(p,nα)道、(p,3n)道和(p,nd)道打开且其截面迅速增加,尤其是(p,3n)道的打开使(p,2n)道的截面迅速减小。此时(p,α)道截面也快速增大。而入射能为25 MeV时,(p,np)道截面随(p,p)道截面的减小而减小,二者为协同关系。在入射能达30 MeV时,(p,3n)道截面达最大,而(p,2n)道

截面变得很小,(p,2n)反应道关闭。(p,α)道截面继续快速增大。在入射能达40 MeV时,(p,2d)道打开且其截面迅速增大,而同时(p,α)道截面达最大并又迅速减小。因此,(p,α)道和(p,2d)道存在强烈的竞争关系。因此,从图上可看出,理论计算值和实验值符合很好。

### 3 结语

应用APMN06M.FOR自动调参程序得到了一套合适的光学势参数,用这套光学势参数和其他计算程序计算得到的入射能量为从阈值到200 MeV的 $p+^{107,109}\text{Ag}$ 核反应全套微观数据与所有实验数据均符合很好。这套参数和全套 $p+^{107,109}\text{Ag}$ 核反应微观数据在ADS的设计中有重要应用。

### 参考文献:

- [1] 丁大钊. 加速器驱动洁净核能系统的物理及技术基础研究[J]. 中国基础科学, 2001(1): 13-18. DING Dazhao. The basic research on physics and technology related to the accelerator driven radioactive clean nuclear power system (ADS) [J]. China Basic Science, 2001 (1): 13-18 (in Chinese).
- [2] 王庆伟. 质子与 $^{181}\text{Ta}$ 核反应微观数据的理论计算[D]. 西安:西北大学物理系, 2007.
- [3] SHEN Qingbiao. APMN: A program for automatically searching optimal optical potential parameters in the  $E \leq 300$  MeV energy region [J]. Nucl Sci Eng, 2002, 141(1): 78-84.

- [4] 申庆彪. 低能与中能核反应理论:上册[M]. 北京:科学出版社,2005:403-404.
- [5] CAI Chonghai. MEND: A code for calculating nuclear data of medium-heavy nuclei below 250 MeV[J]. Nuclear Physics Review, 2011, 28(3): 354-365.
- [6] 张建树,张正军,孙秀泉.  $^{113}\text{Cd}$  在 0.01~20 MeV 能区中子诱导核反应的光学模型计算[J]. 光子学报,1998,27(6):521-525.  
ZHANG Jianshu, ZHANG Zhengjun, SUN Xiuquan. Calculation of the optical model of neutron-induced nuclear reaction on  $^{113}\text{Cd}$  in the 0.01-20 MeV energy region[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(6): 521-525(in Chinese).
- [7] HAN Yinlu, SHI Yuyang, SHEN Qingbiao. Deuteron global optical model potential for energies up to 200 MeV [J]. Physical Review C, 2006, 74(4): 1-11.
- [8] CARLSON R F. Proton-nucleus total reaction cross sections and total cross sections up to 1 GeV[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1996, 63(1): 93-116.
- [9] Experimental nuclear reaction data(EXFOR)[M/OL]. [S. l.]: [s. n.], 2011 [2011-04-13]. <http://www-nds.iaea.org>.
- [10] DAYTON I E, SCHRANK G. Elastic scattering of 17 MeV protons by nuclei[J]. Physical Review, 1956, 101(4): 1 358-1 367.
- [11] DITTMAN R, SANDHU H S, COLE R K, et al. Elastic scattering of 28 MeV protons from Al, Si, Cu, Ag and Au[J]. Nuclear Physics A, 1969, 126(3): 592-608.
- [12] GERSTEIN G, NIEDERER J, STRAUCH K. Elastic scattering of 96 MeV protons[J]. Physical Review, 1957, 108(2): 427-432.
- [13] RICHARDSON R E, BALL W P, LEITH C E, et al. Nuclear elastic scattering of high energy protons[J]. Physical Review, 1952, 86(1): 29-41.
- [14] HERSHBERGER R L, FLYNN D S, GABBARO R D F, et al. Systematic of proton absorption deduced from (p,p) and (p,n) cross sections for 2.0-6.7 MeV protons on  $^{107,109}\text{Ag}$  and  $^{115}\text{In}$ [J]. Phys Rev C, 1980, 21(3): 896-901.
- [15] WING J, HUIZENGA J R. (p, n) cross sections of V51, Cr52, Cu63, Cu65, Ag107, Ag109, Cd111, Cd114, and La139 from 5 to 10.5 MeV[J]. Physical Review, 1962, 128(1): 280-290.
- [16] COLLE R, KISHORE R, CUMMING J B. Excitation functions for (p,n) reactions to 25 MeV on Cu-63, Cu-65, and Ag-107[J]. Physical Review C, 1974, 9(5): 1 819-1 830.
- [17] BLASER J P, BOEHM F, MARMIER P, et al. Fonctions d'excitation de la reaction (p,n) (I) [J]. Helv Phys Acta, 1951, 24(3): 3-5.
- [18] CHODIL G, JOPSON R C, MARK H, et al. (p,n) and (p,2n) cross sections on nine elements between 7.0 and 15.0 MeV[J]. Nuclear Physics A, 1967, 93(3): 648-672.
- [19] ALBERT R D. (p,n) cross section and proton optical-model parameters in the 4 to 5.5 MeV energy region[J]. Physical Review, 1959, 115(4): 925-927.
- [20] FERRERO A M, GADIOLI E, ERBA E G, et al. Alpha emission in proton induced reactions [J]. Z Phys A, 1979, 293(2): 123-134.
- [21] THOMAS R G, BARTOLI W. Neutron production in Ag, Ta, Au, Pt, and Pb by the interaction of 7.5-14 MeV protons[J]. Physical Review, 1967, 159(4): 1 022-1 028.
- [22] COHEN B L, NEWMAN E, CHARPIE R A, et al. (p,pn) and (p,an) excitation functions[J]. Physical Review, 1954, 94(3): 620-625.
- [23] GRIMES S M, ANDERSON J D, WONG C. Odd-even effects in pre-equilibrium (p,n) reactions [J]. Physical Review C, 1976, 13(6): 2 224-2 236.