

仪器与测量

14.1 MeV 中子诱发 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$
反应截面的精确测量*周小媛¹⁾ 江历阳^{1)†} 李文琳¹⁾ 郭浩¹⁾ 武文若¹⁾²⁾
阮锡超¹⁾ 黄小龙¹⁾

1) (中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

2) (河南师范大学物理学院, 新乡 453007)

(2025 年 5 月 29 日收到; 2025 年 6 月 26 日收到修改稿)

钼作为重要的结构材料, 在核能系统中得到广泛应用, 因此钼高精度的中子反应截面对核能系统研发具有重要意义. 本文采用活化法和相对测量法测量了 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ 的反应截面, 利用中国原子能科学研究院纳秒脉冲中子发生器 (CPNG) 对样品进行辐照、利用高纯锗探测器对辐照后样品进行活化产物核的活度测量, 并计算反应截面和修正因子, 最终得到 14.1 MeV 能点的 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ 的反应截面. 为降低实验测量的不确定度, 本工作提出了待测产物与监测产物为同一个产物核的策略, 有效消除了产物核半衰期与衰变分支比、伽马探测效率、辐照过程的束流波动等引进的不确定度, 有效提高了测量精度, 获得了到目前为止精度最高的实验数据. 测量结果与其他实验数据进行了比较与分析, 本工作为该反应道的核数据评价提供了高精度的实验数据支撑.

关键词: (n,p) 反应, 活化法, 不确定度, 反应截面**PACS:** 29.30.Kv, 14.20.Dh, 24.10.-i, 29.25.Dz**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250700**DOI:** 10.7498/aps.74.20250700

1 引言

钼 (Mo) 因其高熔点、良好的高温强度、优异的抗腐蚀性和低热膨胀系数等特性, 在核能系统中有多种重要应用^[1,2]. 如钼及其合金 (如 TZM, 含钛和锆的钼合金) 被用于高温反应堆的核燃料包壳或结构支撑材料; 在核聚变装置 (如托卡马克) 中, 钼也是第一壁或偏滤器材料的重要候选者^[3]; 作为燃料添加剂, 钼以氧化物 (MoO_3) 形式加入铀钚混合氧化物 (MOX) 燃料中, 可改善燃料性能; 等等. 因此钼高精度的中子反应截面对核能系统研发具有重要意义, 尤其是 (n,p) 及 (n, α) 反应截面, 由于产

生的是气体核素, 容易形成气泡, 从而导致材料的性能下降. 近年来, 先进核能系统的发展 (如第四代反应堆、聚变堆、小型模块化堆等) 对核数据精度提出了更高要求, 而高精度的核数据测量则面临着诸多挑战, 如中子注量率及反应产物的精确测量、本底干扰的准确排除、引用数据 (半衰期、衰变分支比等) 带来的额外不确定度、各种修正因子的准确确定等.

为提高实验数据的精度, 本文提出了一种基于活化法的新实验测量方法, 其主要目标是尽可能降低测量数据的不确定度. 本文将对此方法进行详细的介绍, 安排如下: 首先介绍实验方法, 其次以 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面为例, 在中国原子能科学

* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFA1606603) 和稳定支持基础科研计划 (批准号: BJ010261223282) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiangly@ciae.ac.cn

研究院的高压倍加器上完成了实验测量,最后给出结果和分析并与数据库中其他人的结果作对比,根据文献所给方法与数据,文献所用方法均为活化法,相对不确定度范围在 3.5%—10.9% 之间,而本次实验不确定度低于 2%,为核数据库提供了高精度数据.

2 实验方法

用活化法测量截面时,一般用相对法进行,即相对于某个反应截面精确已知的反应道进行相对测量^[4],这样可以消除相当一部分的不确定度来源,进而提高实验数据的精度.具体截面表达式为

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_a} = \frac{M_x}{M_a} \cdot \frac{\text{cps}_x}{\text{cps}_a} \cdot \frac{F_x}{F_a} \cdot \frac{m_a}{m_x} \cdot \frac{I_{\gamma a}}{I_{\gamma x}} \cdot \frac{\varepsilon_{\gamma a}}{\varepsilon_{\gamma x}} \cdot \frac{\eta_a}{\eta_x}, \quad (1)$$

式中,下标 x 表示待测样品; a 表示监测样品; σ 为反应截面; cps 为活化产物核测量时的计数率; M 为样品原子量; m 为样品的质量; η 为样品中某种同位素的丰度; I_{γ} 为 γ 射线分支比; ε_{γ} 为探测效率; F 为辐射测量因子.在此式子中,左边为待测反应截面与监测反应截面的比值,本文称为比截面.

式中辐照测量因子 F 是一个无量纲参数,其表达式为^[5]

$$F(\lambda, t_i, t_c, t_m) = \frac{\lambda t_m}{(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_c}(1 - e^{-\lambda t_m})}, \quad (2)$$

其中 λ 为衰变常数; t_m 为测量时间 (s); t_i 为辐照时间 (s); t_c 为冷却时间 (s).把 (2) 式代入 (1) 式得

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_x}{\sigma_a} &= \frac{M_x}{M_a} \cdot \frac{\text{cps}_x}{\text{cps}_a} \\ &\times \frac{\lambda_x t_{mx}(1 - e^{-\lambda_x t_{ix}})e^{-\lambda_x t_{cx}}(1 - e^{-\lambda_x t_{mx}})}{\lambda_a t_{ma}(1 - e^{-\lambda_a t_{ia}})e^{-\lambda_a t_{ca}}(1 - e^{-\lambda_a t_{ma}})} \\ &\times \frac{m_a}{m_x} \cdot \frac{I_{\gamma a}}{I_{\gamma x}} \cdot \frac{\varepsilon_{\gamma a}}{\varepsilon_{\gamma x}} \cdot \frac{\eta_a}{\eta_x}. \end{aligned} \quad (3)$$

实验测量的基本原理:尽可能找一待测反应与监测反应的活化产物是相同的,例如本次实验中待测反应 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ 与监测反应 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 均为 ^{92m}Nb ,这样半衰期、特征 γ 射线分支比以及探测效率等数据都相同,利用 (3) 式可消除效率与分支比的不确定度;同样,由于产物核半衰期相同,待测样品和监测样品的辐照条件也相同,所以可以把 F 中带有 t_i 的一项消掉.

通过以上处理,把 (3) 式中分支比、探测效率

以及把 F 中的 $(1 - e^{-\lambda t_i})$ 消掉后可得

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_a} = \frac{M_x}{M_a} \cdot \frac{\text{cps}_x}{\text{cps}_a} \cdot \frac{t_{mx}e^{-\lambda_a t_{ca}}(1 - e^{-\lambda_a t_{ma}})}{t_{ma}e^{-\lambda_x t_{cx}}(1 - e^{-\lambda_x t_{mx}})} \cdot \frac{m_a}{m_x} \cdot \frac{\eta_a}{\eta_x}. \quad (4)$$

3 实验过程

3.1 样品准备

本实验所用的样品和监测样品均用精度为 0.1 mg 的天平多次称量求取的平均值,厚度用游标卡尺多次测量求取的平均值,具体信息如表 1 所列^[6].

表 1 样品和监测片的参数

材料	直径/mm	厚度/mm	质量/g	丰度/%
^{92}Mo	20	1.03	3.2496	14.53
$^{93}\text{Nb-1}$	20	0.79	2.0685	100
$^{93}\text{Nb-2}$	20	0.78	2.0675	100

3.2 样品辐照

两片 Nb 样品贴紧在 Mo 样品两侧组成样品组,并放置于厚度为 0.5 mm 的锡盒中进行辐照.辐照时,样品组放置于与 d-T 中子源入射 d 束成 90° 的方向上,距离 T 靶中心 10 cm 处,其中入射氘离子束能量 300 keV,氘离子流强是 330 μA ,伴随 α 粒子监测方向是 155° ,对样品进行了为期 2 h 的照射.具体效果图如图 1 所示^[7].

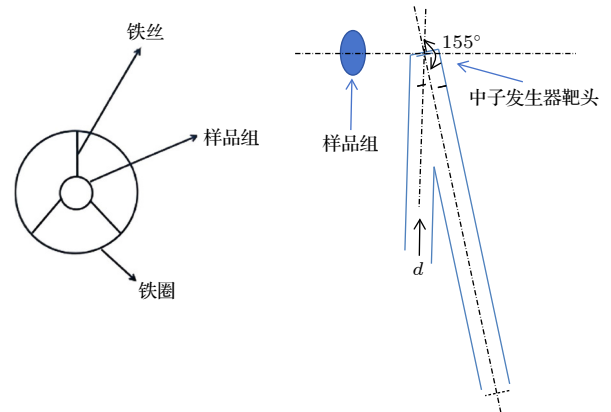


图 1 样品组悬挂与中子源辐照示意图

Fig. 1. Schematic diagram of sample group suspension and neutron source irradiation.

3.3 放射性测量

辐照后, ^{92}Mo 与 ^{93}Nb 的产物均为 ^{92m}Nb ,半衰期为 10.15 d,先将 Mo 样品冷却 0.5 h,然后放在

高纯锗探测器中的支架上进行测量, 其中高纯锗型号为 GEM50P4-83, 高纯锗晶体直径为 62 mm, 晶体厚度是 90 mm, 如图 2 所示. 样品与探测器表面的距离为 10 cm, 测量时间为 5 d. 测量完钼样品后将它取出, 随后两个 Nb 监测片被依次放入探测器中, 在相同的位置进行测量, 每个样品的测量时间为 1 d, 并用 ortec-meastro 软件将计数读出. 伽马能谱如图 3 所示.



图 2 高纯锗及内部支架 (源放在支架中心处)
Fig. 2. High purity germanium and internal bracket (source placed at the center of the bracket).

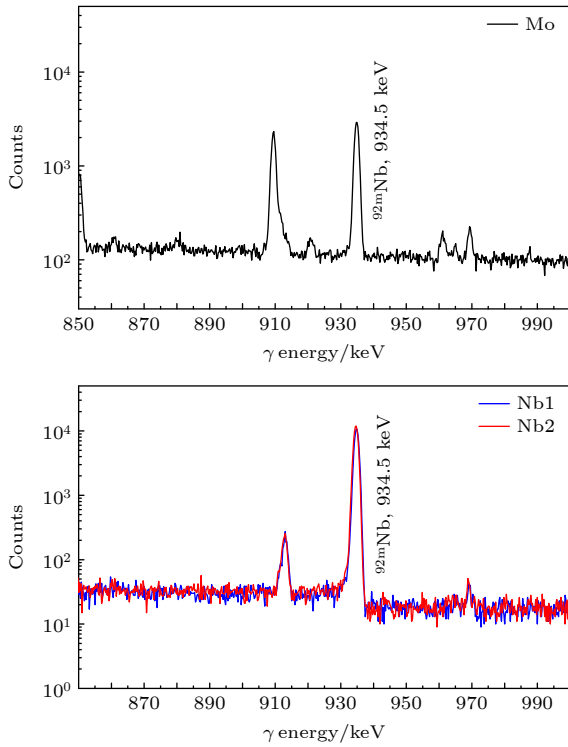


图 3 测量得到的样品 Mo 和两个监测片 Nb 的伽马能谱
Fig. 3. Gamma spectra of the measured sample Mo and two monitoring samples Nb.

4 数据分析

4.1 截面计算

在实验过程中, 由于样品与监督片厚度、质量

等因素, 需要对截面进行一些修正, 所以实际计算时所用式子如下所示:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_a} = \frac{M_x}{M_a} \cdot \frac{\text{cps}_x}{\text{cps}_a} \cdot \frac{t_{mx} e^{-\lambda_a t_{ca}} (1 - e^{-\lambda_a t_{ma}})}{t_{ma} e^{-\lambda_x t_{cx}} (1 - e^{-\lambda_x t_{mx}})} \times \frac{m_a}{m_x} \cdot \frac{\eta_a}{\eta_x} \cdot \frac{f_{sa}}{f_{sx}} \cdot \frac{f_{ga}}{f_{gx}} \cdot \frac{f_{cx}}{f_{ca}}, \quad (5)$$

其中 f_s 为自吸收修正因子; f_g 为几何修正因子; f_c 为低能散射中子修正因子.

4.2 修正因子的计算

截面测量的方法与公式已在第 2 节阐述, 通过上述 (4) 式计算求得比截面值为

$$\sigma_x/\sigma_a = 0.1676. \quad (6)$$

4.2.1 中子注量波动

由于本次实验样品与监督片的产物相同, 所以半衰期也相同, 所以辐照过程中中子注量波动可以不需要考虑.

4.2.2 级联修正

由于本次实验样品与监督片生成的产物相同, 其衰变纲图相同, 且测量条件一样, 所以无需考虑级联效应修正.

4.2.3 自吸收修正

自吸收效应是指射线在通过物质时, 部分射线被该样品吸收, 导致到达探测器的强度减弱. 自吸收效应会对实验结果产生一定的影响, 因此需要进行自吸收修正 [8].

本工作采用蒙特卡罗模拟的方法进行样品自吸收修正 [9]. 首先将样品替换为相同大小的真空圆柱体, 并将其放置在距离高纯锗晶体表面 10 cm 处进行 γ 计数, 这样得到的计数值记为 N_1 . 接下来, 将真空圆柱体替换为相同尺寸 of 样品, 并再次进行 γ 计数, 得到的计数值记为 N_2 . 通过计算 N_1 和 N_2 的比值, 可以得到自吸收修正系数, 用于修正样品在实际测量中的 γ 射线自吸收效应. 修正系数即为

$$f_s = N_2/N_1. \quad (7)$$

通过 (7) 式计算 Mo 的修正系数为 0.9750, Nb 的修正系数为 0.9836.

4.2.4 几何修正

由于刻度源是点源, 实际样品则具有一定的直

径、厚度和几何尺寸, 即实际样品效率和刻度效率是有差异的, 所以我们要对活化后的样品进行几何修正. 要确定几何修正系数, 可采取以下步骤^[10]: 首先, 将圆柱形样品放在距探测器晶体表面 10 cm 处, 模拟测量伽马射线, 记录计数值为 N_3 ; 然后, 使用理想点源代替样品, 在相同条件下进行模拟测量, 记录的计数值为 N_4 ; 通过计算 N_3 与 N_4 的比值, 可以得到几何修正系数. 修正系数为

$$f_g = N_3/N_4; \quad (8)$$

通过 (8) 式计算, Mo 的修正系数为 0.9912, Nb 的修正系数为 0.9930.

4.2.5 散射中子修正

在样品辐照过程中, 中子与靶物质相互作用产生的散射会产生一定比例的低能散射中子. 由于待测反应与监测反应的阈值不同, 低能散射中子的影响不同, 可能导致测量数据偏差, 因此需要对中子散射进行修正. 本工作用 Target 程序模拟了 0—180° 范围内 T-Ti 靶面发出的中子能谱^[11], 并结合 SolidWorks 对加速器中子靶进行建模, 模拟了中子在靶物质中的散射行为以及中子能谱^[12,13].

利用 Geant4 对中子能谱进行了模拟分析, 模拟结果如图 4 所示, 结合 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ 和 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 的激发函数形状, 分别计算了两个反应由于低能散射中子引起的修正, 其中 Mo 的有效阈值为 1 MeV, Nb 阈值为 9.06 MeV. 如 (9) 式和 (10) 式所示:

$$f_{cx} = \frac{\int_{E_p^-}^{E_p^+} \sigma_x(E)\phi(E)dE}{\int_{E_{thx}}^{E_p^+} \sigma_x(E)\phi(E)dE}, \quad (9)$$

$$f_{ca} = \frac{\int_{E_p^-}^{E_p^+} \sigma_a(E)\phi(E)dE}{\int_{E_{thm}}^{E_p^+} \sigma_a(E)\phi(E)dE}. \quad (10)$$

计算结果分别为 0.9600 与 0.9900.

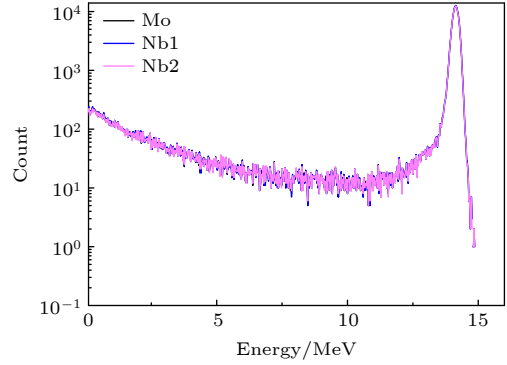


图 4 模拟得到的散射中子能谱

Fig. 4. Simulated scattered neutron energy spectrum.

最终获得的各项修正因子列于表 2 中. 通过修正之后计算求得比截面值为

$$\sigma_x/\sigma_a = 0.1625.$$

表 2 待测样品与监测片修正因子汇总表

Table 2. Summary of correction factors for test samples and monitoring plates.

样品	f_s	f_g	f_c
Mo	0.9750	0.9912	0.9600
Nb	0.9836	0.9930	0.9900

5 不确定度分析

本工作对不确定度源项进行了详细评估, 具体如表 3 所列.

表 3 不确定度评价表

Table 3. Uncertainty evaluation table.

不确定度来源	相对不确定度/%		
	$^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$	$^{93}\text{Nb-1}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	$^{93}\text{Nb-2}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$
样品质量	≤0.01	≤0.01	≤0.01
半衰期	0.2	0.2	0.2
计数统计	1.33	0.38	0.36
中子能谱/散射中子修正	1	1	1
丰度不确定度	0.7	—	—
几何自吸收不确定度	0.36	0.7	0.7
监测反应截面不确定度	0.55	—	—
比截面不确定度(不包括监测反应截面不确定度)	1.85	—	—
总不确定度	1.93	—	—

为更好地验证本工作的测量结果及不确定度, 根据 IRDFF-II 数据库中该能点 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面的推荐数据 (459.66 ± 2.51) mb (相对不确定度为 0.55%, $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$), 导出了本工作的实验结果为 (74.7 ± 1.4) mb (相对不确定度为 1.93%). 相比现有测量精度最高的赵文荣数据的 (69 ± 2) mb (相对不确定度为 2.9%), 本工作的不确定度降低明显. 这表明本工作的测量方法对改善测量不确定度有重要应用意义.

6 结果讨论

我们收集了 EXFOR 数据库中 14.1 MeV 能量点的 7 家 [14-20] 实验数据和相应的不确定度. 有些实验没有直接提供 14.1 MeV 的数据, 所以采用插值法获得这个能量点的截面值和不确定度. 如图 5 所示. 在这些数据中, 1972 年 Kanda 的实验结果与其他实验结果有显著差异, 这可能是由于其实验年限较早, 半衰期、探测效率、中子产额测量等的不确定度都比较大, 因此测得的数据可能需要进一步验证. 从图 5 可看出, 本工作的测量值与其他测量值在不确定度范围内一致, 但测量不确定度明显降低.

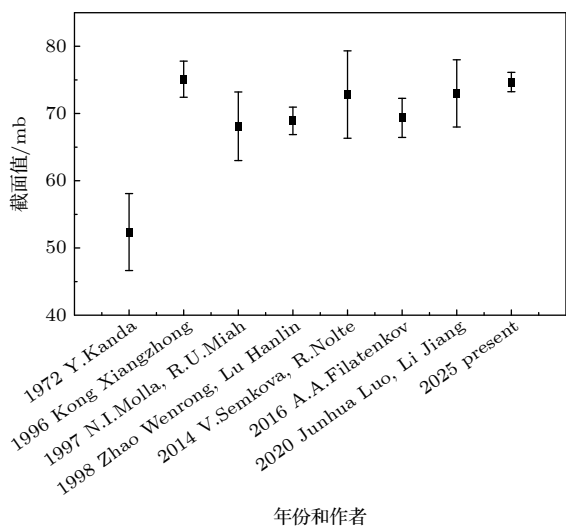


图 5 本实验截面值和现有数据比较
Fig. 5. Comparison between the cross-sectional values of this experiment and existing data.

7 结论

为合理降低测量数据的不确定度, 本文提出了一种新的实验测量方法, 通过 CIAE 600 kV 高压

倍加器上的实际测量, 并与其他测量方法结果的比较, 验证了该方法的有效性.

在这项工作中, 我们测量了 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ 的反应截面值, 并通过 (5) 式获得了待测反应与监测反应的比截面值为 0.1625. 实验获得的最终截面值为 (74.7 ± 1.4) mb. 由于本次实验使用的样品与监测片产品相同, 消除了多项不确定度来源, 相对不确定度为 1.93%, 达到了目前最好的水平.

本工作的实验方案可以推广到 $^{59}\text{Co}(n,2n)$ 与 $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 等反应, 可以利用其产物核相同的性质提高数据的准确性. 我们的下一步计划是使用这种方法开展更多的实验, 提高关键核数据的精度.

参考文献

- [1] Bai X D, Zeng Y, Sun Y J 2021 *Chin. Molybdenum Ind.* **45** 12 (in Chinese) [柏小丹, 曾毅, 孙院军 2021 中国钼业 **45** 12]
- [2] Zhang Y, Wang X Y, Yu J, Cao W C, Feng P F, Jiao S J 2017 *Mater. Rep.* **31** 83 (in Chinese) [张勇, 王雄禹, 于静, 曹维成, 冯鹏发, 焦生杰 2017 材料导报 **31** 83]
- [3] Hu J S, Zuo G Z, Wang L, Ding R, Yu Y W, Zhang Y, Xu W 2020 *J. Univ. Sci. Technol. Chin.* **50** 1193 (in Chinese) [胡建生, 左桂忠, 王亮, 丁锐, 余耀伟, 张洋, 徐伟 2020 中国科学技术大学学报 **50** 1193]
- [4] Zhu C X, Zheng P 2009 *China Nuclear Science and Technology Report* 43 (in Chinese) [朱传新, 郑普 2009 中国核科技报告 43]
- [5] Qiu Y J, Liu T, Zhan X W, Lan C L, Kong X Z 2018 *At. Energy Sci. Technol.* **52** 1729 (in Chinese) [邱奕嘉, 刘通, 占许文, 兰长林, 孔祥忠 2018 原子能科学技术 **52** 1729]
- [6] Qiu J Z 2002 *Phys. Exp.* **22** 40 (in Chinese) [仇九子 2002 物理实验 **22** 40]
- [7] Jiang L Y, Li J W, Chen X J, Han X G, Zhong Q P, Yu W X 2012 *At. Energy Sci. Technol.* **46** 641 (in Chinese) [江历阳, 李景文, 陈雄军, 韩晓刚, 仲启平, 于伟翔 2012 原子能科学技术 **46** 641]
- [8] Ye E L, Shen C X, Nan H J 2023 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **43** 409 (in Chinese) [叶二雷, 沈春霞, 南宏杰 2023 核电子学与探测技术 **43** 409]
- [9] Qin C, Wang D Z, Yu W D, Zhang S 2011 *Nucl. Tech.* **34** 437 (in Chinese) [秦超, 王德忠, 于文丹, 张适 2011 核技术 **34** 437]
- [10] Guo H, Li Q, Zhang C L, Jiang L Y, Ruan X C 2023 *Appl. Radiat. Isot.* **200** 110948
- [11] Yao Z E, Yue W M, Luo P, Tan X J, Du H X, Nie Y B 2008 *At. Energy Sci. Technol.* **42** 400 (in Chinese) [姚泽恩, 岳伟明, 罗鹏, 谭新健, 杜洪新, 聂阳波 2008 原子能科学技术 **42** 400]
- [12] Li Q, Jiang L Y, Zhang C L, Ruan X C, Ge Z G 2022 *Appl. Radiat. Isot.* **186** 110260
- [13] Yang L T, Chen C F, Jin X X, Lin G, Huang Y J 2017 *At. Energy Sci. Technol.* **51** 323 (in Chinese) [杨立涛, 陈超峰, 金晓祥, 林冠, 黄彦君 2017 原子能科学技术 **51** 323]
- [14] Kanda Y 1972 *Nucl. Phys. A.* **185** 177
- [15] Kong X Z, Wang Y C, Yuan J Q, Yang J K 1996 *J. Lanzhou Univ.* **32** 41 (in Chinese) [孔祥忠, 王永昌, 袁俊谦, 杨景康 1996 兰州大学学报 **32** 41]
- [16] Luo J H, Jiang L 2020 *Chin. Phys. C* **44** 114002 (in Chinese)
- [17] Molla N I, Hossain S M, Basunia S, Miah R U, Rahman M,

- Sikder D H, Chowdhury M I 1997 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **216** 213 (in Chinese)
- [18] Semkova V, Nolte R 2014 *EPJ Web of Conferences.* **66** 03077 (in Chinese)
- [19] Filatenkov A A 2025 <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/X4sGetSubent?reqx=12324&subID=41614070> [2025-5-25]
- [20] Zhao W R, Lu H L, Yu W X, Han X G, Huang X L 1998 *Chin. Nucl. Sci. Technol. Rep. A* **4** 7

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

Accurate measurement of cross section of $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ reaction induced by 14.1-MeV neutrons*

ZHOU Xiaoyuan¹⁾ JIANG Liyang^{1)†} LI Wenlin¹⁾ GUO Hao¹⁾
 WU Wenruo¹⁾²⁾ RUAN Xichao¹⁾ HUANG Xiaolong¹⁾

1) (*Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

2) (*School of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China*)

(Received 29 May 2025; revised manuscript received 26 June 2025)

Abstract

Molybdenum, as an important structural material, has been widely used in nuclear energy systems. Therefore, the high-precision neutron reaction cross-section of molybdenum is of great significance for developing nuclear energy systems. This paper uses activation and relative measurement methods to measure the reaction cross section of $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$. The sample is irradiated at a 90° angle using nanosecond pulse neutron generator (CPNG) from the China Institute of Atomic Energy. After a period of cooling time, the activities of the activated product nuclei of the irradiated sample are measured using a high-purity germanium detector, and the reaction cross section and correction factors are calculated. The traditional correction factors include neutron fluence fluctuation, cascade, self-absorption, geometry and scattered-neutron corrections. Finally, the reaction cross section of $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ at 14.1-MeV energy point is obtained. In order to reduce the uncertainty of experimental measurements, this work proposes a strategy in which the test product and the monitoring product are the same nuclide, effectively eliminating the uncertainties caused by the half-life and decay branch ratio of the product nucleus, gamma detection efficiency, and beam fluctuations during irradiation. This method significantly enhances the measurement accuracy, achieving the highest precision experimental data to date. This experiment aims to minimize the overall measurement uncertainty, so the stringent requirements are imposed on both the sample mass-thickness and the operating environment. The mass and thickness of each sample are therefore determined through five independent measurements using a 0.1 mg-precision analytical balance and a vernier caliper, respectively, and the mean values are taken. After the experiment, the measured data are carefully compared and analyzed with other datasets, The value of cross-section is not significantly different from others in the database and is located within the error range, which further verifies the feasibility of this method, providing high-precision experimental support for evaluating the nuclear-data of this reaction channel.

Keywords: (n,p) reaction, activation method, uncertainty, reaction cross-section

PACS: 29.30.Kv, 14.20.Dh, 24.10.-i, 29.25.Dz

DOI: 10.7498/aps.74.20250700

CSTR: 32037.14.aps.74.20250700

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFA1606603) and the Continuous-Support Basic Scientific Research Project, China (Grant No. BJ010261223282).

† Corresponding author. E-mail: jiangly@ciae.ac.cn



14.1 MeV中子诱发 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应截面的精确测量

周小媛 江历阳 李文琳 郭浩 武文若 阮锡超 黄小龙

Accurate measurement of cross section of $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92\text{m}}\text{Nb}$ reaction induced by 14.1-MeV neutrons

ZHOU Xiaoyuan JIANG Liyang LI Wenlin GUO Hao WU Wenruo RUAN Xichao HUANG Xiaolong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 172901 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250700

CSTR: 32037.14.aps.74.20250700

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250700>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

14 MeV附近 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应截面实验研究

Measurement of $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ cross section near 14 MeV

物理学报. 2022, 71(19): 192501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220776>

K-M花样分析法测定薄晶体厚度和消光距离的不确定度评定

Evaluation of uncertainty in measuring thin crystal thickness and extinction distance by Kossel-Mllenstedt pattern analysis

物理学报. 2022, 71(14): 146803 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212271>

可搬运铯光晶格钟系统不确定度的评估

Evaluation of systematic uncertainty for transportable ^{87}Sr optical lattice clock

物理学报. 2021, 70(3): 030601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201204>

基于变分自编码器的伽马单中子出射反应截面实验数据离群点研究

Outliers identification of experimental (γ, n) reaction cross section via variational autoencoder

物理学报. 2025, 74(8): 082501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241775>