

中子诱发⁵²Cr 非弹性散射截面测量*

谭博宇¹⁾ 王朝辉^{1)†} 吴鸿毅^{1)‡} 韩银录¹⁾ 肖石良²⁾ 王昊¹⁾
汪文焯¹⁾ 王记民¹⁾ 李昱兆¹⁾ 刘颖一¹⁾ 王金成¹⁾ 陶曦¹⁾ 阮锡超¹⁾

1) (中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

2) (湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

(2024 年 11 月 28 日收到; 2025 年 1 月 26 日收到修改稿)

新一代反应堆对运行效率和安全性提出了更高的要求, 迫切需要更精确的非弹性散射截面数据. 不锈钢作为关键结构材料, 其中关键元素铬的非弹性散射截面的实验测量在国内仍处于空白, 同时国外的测量结果分歧较大, 严重限制了核反应堆计算的准确性. 在中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器, 利用瞬发 γ 射线测量法, 在国内首次测量得到 647.47 keV, 935.54 keV, 1333.65 keV, 1434.07 keV 和 1530.67 keV 五条非弹性散射 γ 的实验产生截面, 获得了三个能量 (5.62 MeV, 6.24 MeV 和 7.95 MeV) 的中子轰击⁵²Cr 的非弹散射截面实验结果. 同时, 利用理论模型计算了能量小于 20 MeV 的中子与⁵²Cr 的非弹性散射截面. 结果表明, 三个中子能点得到的 γ 产生截面与 Mihaiilescu 等的结果 [Mihaiilescu L C, Borcea C, Koning A J, Plompen A J M 2007 Nucl. Phys. A 786 1] 在误差范围内吻合, 且不确定度更小, 实验测量数据支持 Mihaiilescu 等的结果. 理论模型计算与实验数据有较大差异, 可能来源于⁵²Cr 能级纲图的高激发态部分的实验信息缺失.

关键词: 中子非弹性散射, γ 产生截面, 瞬发 γ 射线法, 高纯锗探测器

PACS: 29.30.Kv, 29.85.Fj

DOI: 10.7498/aps.74.20241660

CSTR: 32037.14.aps.74.20241660

1 引言

核数据是用于描述粒子与原子核相互作用的核反应数据及描述单个核素基本性质的核结构和放射性衰变数据的统称. 核数据的质量直接影响相关装置及产品的有效性、安全性、可靠性和经济性^[1]. 中子核数据, 即中子诱发核反应的核数据在核能开发与核技术的广泛应用中具有很高的价值^[2]. 随着第四代核能系统等新型核装置的开发, 中子能区显著扩大, 对中子核数据提出了更高的要求.

第四代 (GenIV) 计划的废物嬗变和可持续封闭燃料循环概念的提出, 使得人们对具有快中子能

谱的核反应堆重新产生了兴趣. Aliberti 等^[3] 研究了核数据的不确定性对加速器驱动系统的反应堆参数不确定性的影响, 此外在铅和铋以及结构材料确定的情况下, 非弹性散射的不确定性对预测有效增殖因子 k_{eff} 不确定性的巨大影响. 对于快中子反应堆来说, 非弹性散射的重要性早已确立^[4,5].

铬是不锈钢的重要组成部分, 与铁和镍一起用于反应器的结构部件, 同时钢材被大量应用于核设施的结构材料, 反应堆中结构材料的核素如铁、铬、镍等的中子非弹性散射截面占总截面约 30%, 它们的非弹性散射的准确性将直接影响核反应堆计算的准确性.

表 1 列出了 EXFOR 收录的部分关于⁵²Cr 的

* 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: ngamma@163.com

‡ 通信作者. E-mail: wuhongyi@qq.com

非弹性散射实验信息, 包括实验设施、探测器和入射中子能量等^[6]. 收录在数据库里的实验数据最早可追溯到 1954 年, 最近的为 2020 年. 这些实验都依赖于不同的实验方法, 比如 TOF 飞行时间法、瞬发 γ 射线法^[7] 等. 实验用到了不同的探测器, 比如正比计数器、闪烁体探测器、 ^3He 管探测器和 HPGe 探测器等. 代表性的实验有 2007 年 Mihailescu 等^[8] 利用 HPGe 探测器和 TOF 技术, 在白光中子源 GELINA 上测量了 ^{52}Cr 从非弹反应阈值到 18 MeV 的连续能区的非弹性散射截面. 对于白光中子源, 能谱结构复杂, 在束本底较强, 中子能量通过飞行时间法确定, 能量分辨受限于 HPGe 探测器的时间分辨.

在 ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-5, BROND-3.1 和 CENDL-3.2 核数据评价库中, 均包含了 ^{52}Cr 非弹性散射截面的评价数据. 不同评价库提供的截面值之间存在显著差异, 特别是在 5—12 MeV 中子能量区间, 评价库数据与 Mihailescu 等^[8] 的实验数据出现了明显的差异, 并且实验数据本身也具有较大的不确定性. 鉴于此, 为了提升核数据的准确性, 并为核数据评价库提供更加可靠的原始数

据, 有必要开展更为精确且涵盖更广能点的实验测量工作, 这将有助于缩小理论与实验之间的差距, 提高核数据评价的可靠性.

2 实验设置

瞬发 γ 射线法的装置布局如图 1 所示^[9]. 该平台的束流管道由 R70 支线提供, HI-13 串列加速器能够加速 D^+ 至不同能量, 并通过 R70 支管道引导至靶头. D^+ 束流随后击中 D_2 气体靶, 通过 $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ ^3He 反应生成一系列不同能量的单能中子.

经过屏蔽和准直后, 中子沿 0° 方向入射到样品上, 四个 CLOVER 型高纯锗 γ 探测器围绕样品布置, 用于测量中子与样品反应产生的 γ 射线. 这些探测器在水平面上相对于中子束流方向分别以 $30^\circ, 70^\circ, 110^\circ, 150^\circ$ 的角度放置, 前端距离样品中心 25 cm. 4 个角度下测量 $^{52}\text{Cr}(\text{n}, \text{n}'\gamma)$ 截面的 CLOVER 探测器阵列立体图如图 2 所示. 为了减少辐照损伤和 γ 本底, 探测器侧面使用了 2.5 cm 厚的铅屏蔽, 探测器通过可灵活调节的支架固定.

表 1 文献中 (EXFOR) 部分 $(\text{n}, \text{n}'\gamma)$ 反应截面测量汇总^[6]

Table 1. Summary of the main characteristics of $(\text{n}, \text{n}'\gamma)$ cross section measurements from the literature (EXFOR)^[6].

作者(年份)	实验设施	探测器	入射中子能量范围/MeV
Van Patter D W (1962)	Van de Graaff	NaI	0.98—3.31
Voss F, et al. (1975)	Isochronous cyclotron	Ge(Li)	0.5—10
Tessler G, et al. (1975)	Van de Graaff	Ge(Li)	3—6
Lychagin A A, et al. (1988)	Cockcroft-Walton accelerator	NaI	14.1
Simakov S P (1992)	Weapons Neutron Research (WNR)	NaI	14.1
Mihailescu L C (2007) ^[8]	Linear accelerator EC Joint Research Centre, Geel	2 large volumn HPGe	非弹反应 阈值—18
Grozdanov D N (2020)	TANGRA setup on the basis of ING-27 neutron generator	Silicon detector, BGO, HPGe	14.1

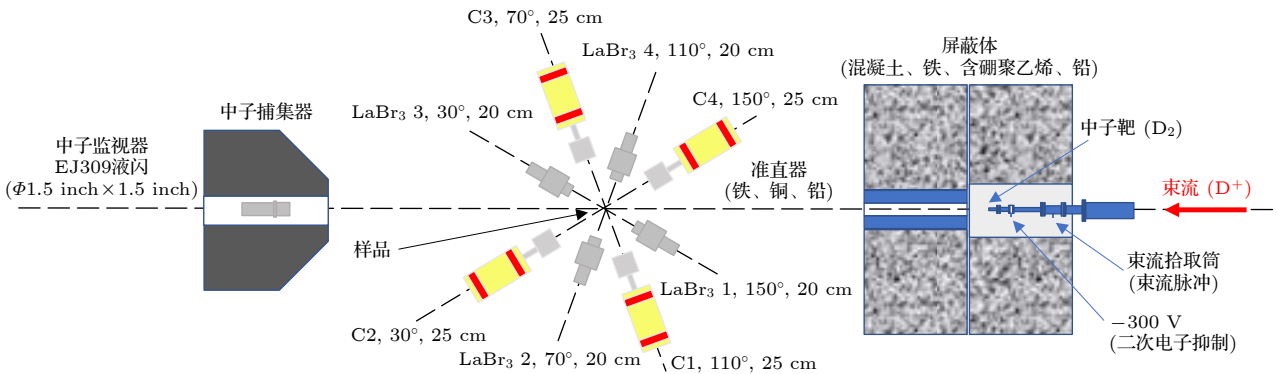


图 1 瞬发 γ 射线法在线实验平台

Fig. 1. Prompt γ -ray method online experimental platform.

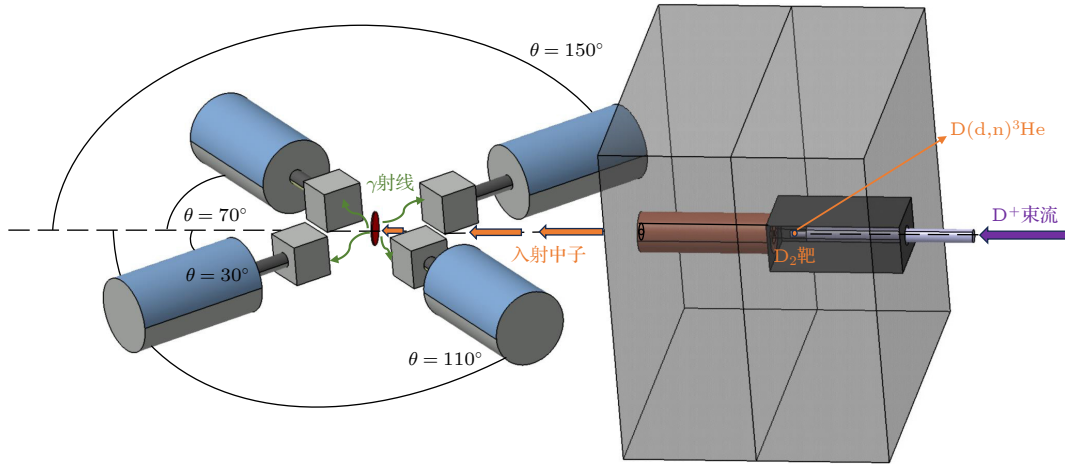


图 2 4 个角度下测量 $^{52}\text{Cr}(n, n' \gamma)$ 截面的 CLOVER 探测器阵列立体图

Fig. 2. The 3D schematic of the CLOVER detector array for measuring the cross section of $^{52}\text{Cr}(n, n' \gamma)$ at 4 detection angles.

实验中使用了一个 $\Phi 1.5 \text{ inch} \times 1.5 \text{ inch}$ 的 EJ-309 液闪探测器作为中子束流监视器, 它位于束流后端中子捕集器内, 正对中子束, 以监测中子强度并归一实验数据. 中子捕集器用于收集准直器过来的中子, 减少散射中子本底. 捕集器的外壳为 1 cm 厚的铁, 内部有一个由铜和铅组成的 20 cm 内径的通长圆环, 周围填充石蜡.

数据采集使用北京大学开发的通用数字化获取系统^[10-12], 本实验使用 100 MSPS 14 位和 500 MSPS 14 位 Pixie-16 模块. 所有的 CLOVER 探测器信号输入到 100 MSPS 模块, 其余的液闪探测器、束流积分仪以及 LaBr_3 探测器信号输入到 500 MSPS 模块.

采用 LISE++^[13] 程序计算了三种能量的氘离子束在束窗上的能量损失, 分别为 0.7992 MeV, 0.7247 MeV 和 0.5807 MeV. 进一步使用 TARGET^[14] 程序对 3.5 MeV, 4.0 MeV 和 5.5 MeV 的氘离子束撞击气体靶的过程进行了模拟, 相应的中子峰能量分别为 5.62 MeV, 6.24 MeV 和 7.95 MeV, 半高宽 (FWHM) 分别为 0.463 MeV, 0.394 MeV 和 0.279 MeV.

实验测量用到 Cr 样品、用来做标准截面的 Ti 样品和分析本底条件的 Fe 样品, 如图 3 所示. 其中 Cr 的尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 密度为 7.15 g/cm^3 , 质量取天平称量 5 次后的平均值 56.3182 g; Ti 样品的尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 密度为 4.54 g/cm^3 , 质量为 35.9331 g; Fe 样品的尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 密度为 7.86 g/cm^3 , 质量为 62.7848 g. 考虑到样品厚度对 γ 射线的衰减影响, 以及四个 CLOVER

探测器的位置关系, 实验时把样品放置在与束流方向成 80° 角的位置, 尽量平衡样品对四个 CLOVER 探测器的厚度差异. 样品中心与中子靶的距离为 270 cm, 尽量减少中子通量随距离的衰减效应. 图 4 展示了不同探测器 γ 探测效率曲线. 借助效率刻度参数可以计算出每个探测器对不同能量 γ 射线的探测效率.

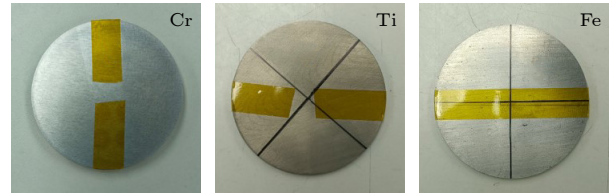


图 3 实验样品图

Fig. 3. Image of the experimental sample.

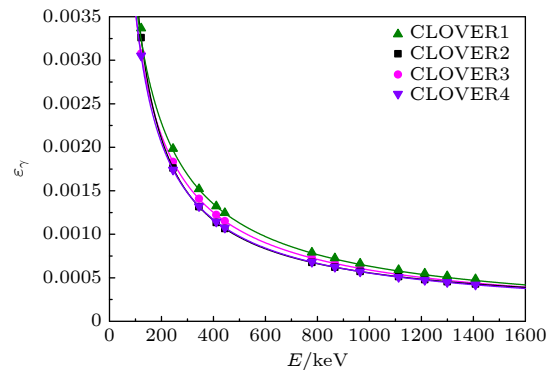


图 4 γ 探测效率曲线

Fig. 4. The γ detection efficiency curves.

3 实验测量

特定角度处能级跃迁微分截面可以通过相应的公式进行计算^[15]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_\gamma, \theta) = \frac{1}{4\pi} N_\gamma(E_\gamma, \theta) \frac{1 + \alpha}{C_a \varepsilon_\gamma N_T \phi t}, \quad (1)$$

其中 $N_\gamma(E_\gamma, \theta)$ 是该角度下探测器探测到的特征 γ 射线全能峰净面积; α 是内转换系数; C_a 代表通过模拟计算得出的校正因子; ε_γ 表示探测器对于特定角度 θ 和能量 E_γ 的特征 γ 射线的绝对探测效率; N_T 是指在中子束流照射范围内的样品靶核的数量; ϕ 表示单位时间、单位面积上样品所接收到的中子数量, 其单位是 cm^2/s ; t 代表实验的测量时间, 单位是 s .

得到微分截面后, 对不同探测器、不同角度产生能量为 E_γ 的特征 γ 射线微分截面进行积分, 得到该能量特征 γ 射线的产生截面:

$$\sigma(E_\gamma) = \pi \sum_{i=1}^n w_i \frac{d\sigma_j}{d\Omega}(\theta_i, E_\gamma). \quad (2)$$

n 表示实验探测器相对束流放置的角度个数, 即 $30^\circ, 70^\circ, 110^\circ, 150^\circ$ 四个角度. 式中 w_i 代表角度分布权重系数, γ 射线角分布可以用偶阶勒让德多项式^[16]与反应相关系数乘积的组来表示由于对称性, 30° 和 150° 采用同一系数 $w_1 = 0.69571$; 70° 和 110° 采用同一系数 $w_2 = 1.30429$.

图 5 给出了 7.95 MeV 中子能量下 CLOVER 探测器测到的 γ 能谱, 其中包含后续要分析的几条特征 γ 射线, 如红色部分所示. 除此之外, 能谱中还标注了来自于实验本底的特征 γ 射线, 如黑色部分所示.

实验数据处理过程中存在修正项, 往往通过蒙特卡罗模拟程序对其进行分析计算. 自吸收系数与样品大小、形状等因素有关, 样品较薄时, 自吸收效应影响很小, 可以忽略, 本实验使用 4 mm 厚的

样品, 需进行自吸收效应修正. 自吸收主要由样品对 γ 射线的吸收引起, 通过 MCNP^[17] 模拟, 对实验中测量到的能量为 E_γ 的特征 γ 射线进行各向同性出射模拟, 分别记录有样品和无样品情况下各个角度的特征 γ 射线计数, 有样品时的计数与无样品时的计数之比即能量为 E_γ 的特征 γ 射线在样品中的自吸收系数 C_1 :

$$C_1(E_\gamma) = \frac{N_{\text{sample}}}{N_{\text{nosample}}}, \quad (3)$$

其中 N_{sample} 表示有样品时的计数; N_{nosample} 表示无样品时的计数. 同样, 通过 MCNP 程序对实验条件进行模拟分析, 确定了中子通量衰减、多次散射和通量监测的影响因子.

本次实验不确定度的分析主要分为几个部分: 实验测量不确定度、修正项不确定度和标准截面不确定度. 其中实验测量不确定度包括 CLOVER 探测器特征 γ 峰的统计涨落、中子注量率测量波动、样品定量以及 CLOVER 探测器对特征 γ 射线的探测效率差异. 总不确定度通过 (4) 式计算得到, 不确定度来源见表 2.

$$\Delta_{\text{tot}} = \sqrt{\Delta_N^2 + \Delta_n^2 + \Delta_m^2 + \Delta_\varepsilon^2 + \Delta_c^2 + \Delta_\sigma^2}. \quad (4)$$

表 2 不确定度来源
Table 2. Sources of uncertainty.

符号	不确定度来源	数值/%
Δ_N	统计	3.5
Δ_n	中子注量率	3.0
Δ_m	样品定量	0.2
Δ_ε	探测效率	1.5
Δ_c	修正项	3.0
Δ_σ	标准截面	3.0
Δ_{tot}	总不确定度	6.5

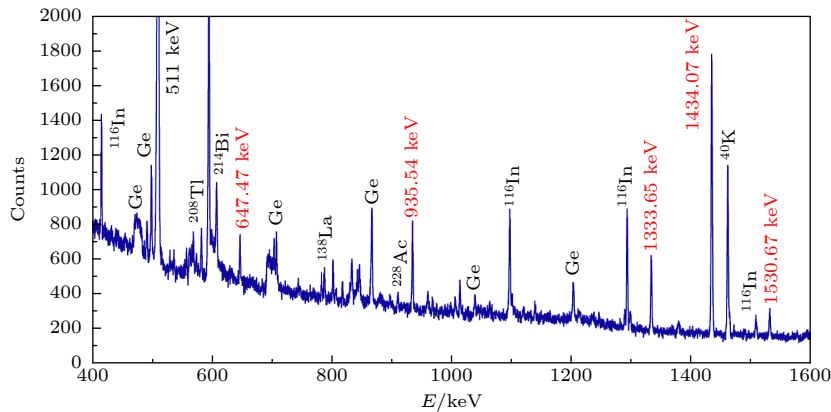


图 5 7.95 MeV 中子诱发 ^{52}Cr 在束 γ 能谱

Fig. 5. 7.95 MeV neutron-induced ^{52}Cr beam γ spectrum.

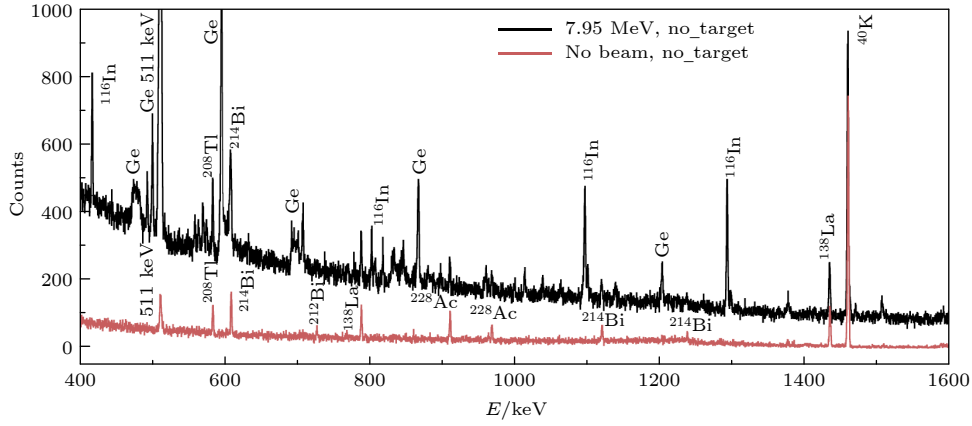


图 6 ^{52}Cr ($n, n' \gamma$) 环境本底和用 7.95 MeV 入射中子在 110° 角度下得到的在束本底

Fig. 6. ^{52}Cr ($n, n' \gamma$) Background obtained with the room and 7.95 MeV incident neutron at a detection angle of 110° .

实验本底来源包含环境本底和在束本底, 为了研究上述本底, 实验时进行了无束无样和 5.62 MeV, 6.24 MeV 以及 7.95 MeV 三种中子能量下有束无样的测量. 图 6 为 $^{52}\text{Cr}(n, n' \gamma)$ 环境本底和用 7.95 MeV 入射中子在 110° 角度下得到的在束本底. 环境本底来源广泛, 包括宇宙放射和地球上的天然放射性源等. 气体靶上产生的中子在样品上和大厅内发生散射后会入射到探测器中的 Ge 晶体上, 发生非弹反应后会产生特定的效应峰. 实验还使用 LaBr_3 探测器, 从图 6 中还能观察到 789 keV, 1435.79 keV 这两条探测器自身发射的 γ 特征峰. ^{52}Cr 的 1434.07 keV 这条特征峰的干扰来源有两个, 一个是由于 ^{138}La 自发放射性发出的 1435.79 keV 特征 γ 射线, 与测量时间相关; 另一个是中子与周边屏蔽材料里的 ^{138}Ba 非弹反应发出的 1435.8 keV 特征 γ 射线, 与束流强度相关. 通过对比分析环境本底和在束本底, 去除了对 ^{52}Cr 特征 γ 峰造成影响的干扰峰.

相对测量法测量 γ 产生截面时, 需要利用标准截面作为参考分析. 在入射中子能量为 5—9 MeV 区间内, 中子与 ^{48}Ti 发生非弹性散射产生 983.5 keV 特征 γ 射线的截面波动不大且平稳, 曲线很平滑, 没有阶梯性的波动, 如图 7 所示. 所以本次实验采用 983.5 keV 特征 γ 射线的产生截面作为标准截面.

本次实验总共测量了五条特征 γ 射线的产生截面, 能量分别是 647.47 keV, 935.54 keV, 1333.65 keV, 1434.07 keV 和 1530.67 keV. 利用 UNF^[19] 和 TALYS^[20] 程序对 ^{52}Cr 中子非弹性散射截面进行计算, 其中 UNF 的理论基础是球形光学模型、统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型; TALYS 程序是基于多种核反应模型, 同时结合数据库和核结构

模型来实现核反应的理论计算, 计算过程涉及光学模型、复合核统计理论、直接反应和预平衡过程等, 所有参数为程序提供的优化默认值, 其中能级密度使用的是 B-S 型费米气体模型. 计算使用的版本为 TALYS 1.95.

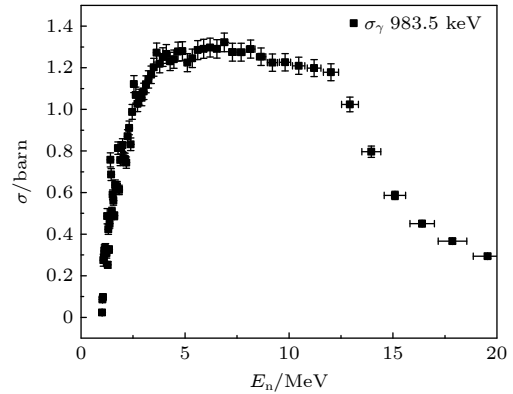


图 7 ^{48}Ti 的 983.5 keV 产生截面^[18]

Fig. 7. The ^{48}Ti 983.5 keV production cross section^[18].

实验结果与前人的测量工作、UNF 理论计算结果以及 TALYS 理论计算结果进行了比较, 如图 8 所示. 与其他实验测量相比: 935.54 keV, 1333.65 keV, 1434.07 keV, 1530.67 keV γ 射线测量结果与 Mihailescu 等^[8] 测量结果吻合; 647.47 keV γ 射线测量结果处于 Mihailescu 等和 Voss 测量结果之间. 与理论计算相比: 647.47 keV, 1333.65 keV, 1530.67 keV γ 射线测量结果高于 UNF, TALYS 计算结果; 935.54 keV, 1434.07 keV γ 射线测量结果在大部分能点与 UNF, TALYS 计算结果符合较好. 五条 γ 射线的测量不确定度均小于 Mihailescu 等^[8], 本次实验测量不确定度低于 Mihailescu 等^[8] 测量

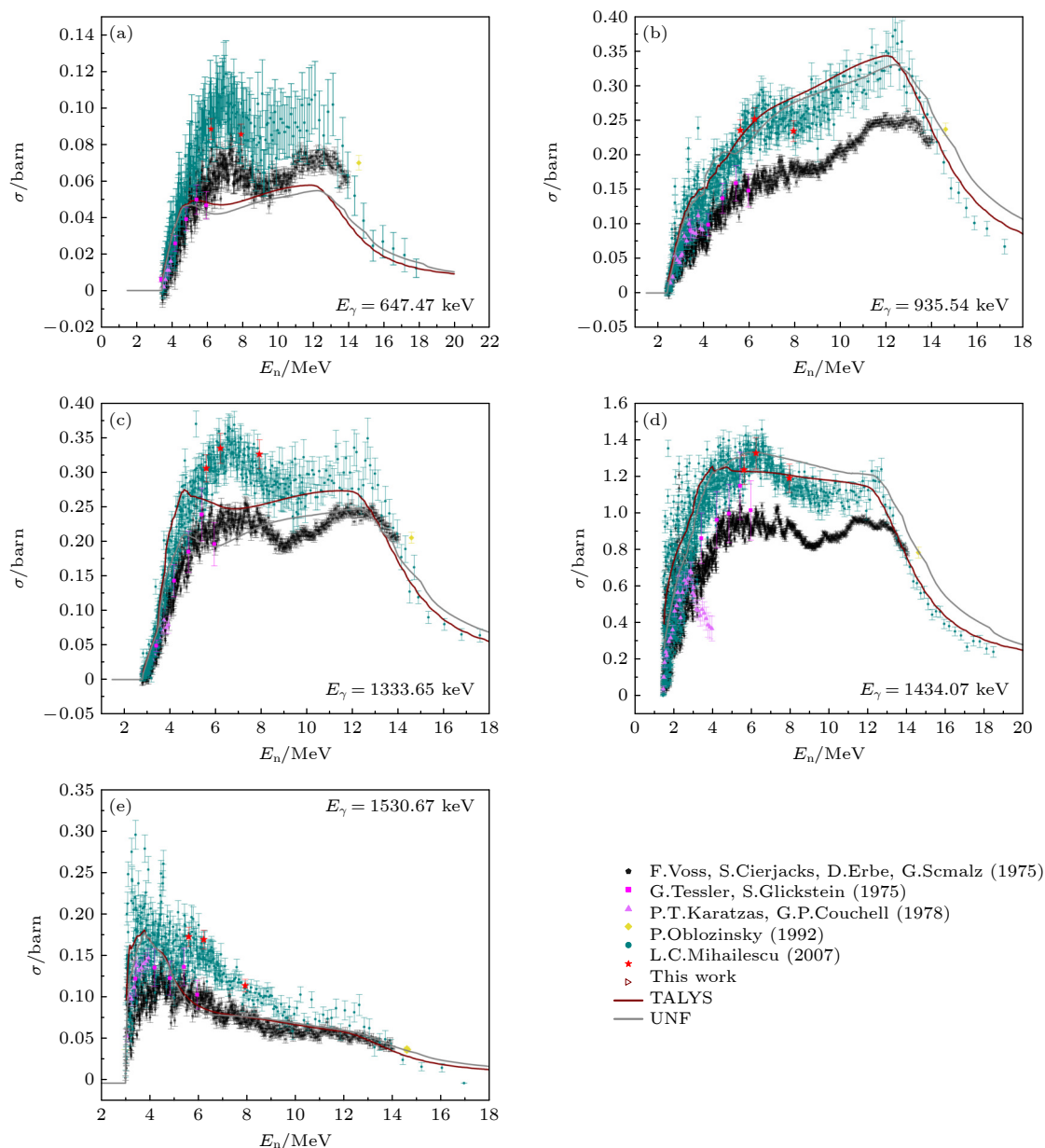


图 8 五个能量特征 γ 峰的产生截面 (a) 647.47 keV; (b) 935.54 keV; (c) 1333.65 keV; (d) 1434.07 keV; (e) 1530.67 keV

Fig. 8. Production cross sections of the five energy characteristic γ peaks: (a) 647.47 keV; (b) 935.54 keV; (c) 1333.65 keV; (d) 1434.07 keV; (e) 1530.67 keV.

不确定度. 如图 8(a), (c), (e) 所示, 647.47 keV, 1333.65 keV, 1530.67 keV 三条 γ 射线的测量值均高于 UNF, TALYS 理论计算结果, 可能是由于这三条 γ 射线均源自 ^{52}Cr 高激发态退激, 但 ^{52}Cr 能级纲图的高激发态部分信息缺失, 从而导致理论计算结果偏低. 总之, Mihailescu 等^[8]在 GELINA 的 GAINS 装置上测量的实验数据是各评价库在进行数据评估时最推荐的参考标准. 在误差允许范围内, 本次实验数据最支持 Mihailescu 等^[8]的测量结果.

因为 ^{52}Cr 高激发态的能级纲图不完善, 所以本工作选取统计较好且处于低激发态的两条特征 γ 射线 (935.54 keV, 1434.07 keV), 计算出 5.62 MeV, 6.24 MeV 和 7.95 MeV 三个中子能点 ^{52}Cr 的非弹性散射截面, 结果展示在图 9 中. 结果显示, ^{52}Cr 的非弹性散射截面在 5—9 MeV 能量范围内呈现下降趋势, 这与 Mihailescu 等^[8]的研究结果基本一致. 在数值上, 三个中子能量的实验结果与 JEFF-3.3 评价库的结果最为接近, 这表明 JEFF-3.3 评价库在这些特定能量点上可能提供了较为准

确的 ^{52}Cr 非弹性散射截面数据. 尽管此次实验结果在趋势上支持了 Mihailescu 等^[8]的发现, 但要彻底解决现有的分歧, 还需要更多的实验数据来加以验证.

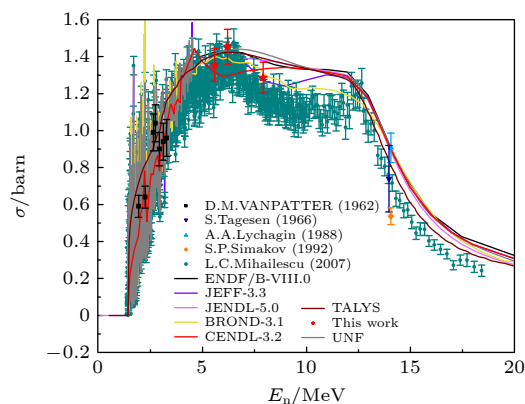


图 9 ^{52}Cr 非弹性散射截面

Fig. 9. ^{52}Cr inelastic scattering cross section.

4 结 论

三种中子能量处于存在较大分歧的 5—12 MeV 能区, 通过开展实验测量可以澄清分歧, 降低截面测量不确定度, 同时填补我国 ^{52}Cr 中子非弹性散射截面测量的空白. 不仅如此, ^{52}Cr 中子非弹反应的测量还彰显了当前 ^{52}Cr 能级纲图的不完善, 尤其是高激发态退激的 γ 射线截面测量对核结构的研究具有指导意义. 为了进一步验证和提高这些截面测量的精确性, 未来的工作应包括更广泛的能量范围和更精确的实验方法.

参考文献

- [1] Ruan X C 2023 *Nucl. Tech.* **46** 080003 (in Chinese) [阮锡超 2023 核技术 **46** 080003]
- [2] Liu S L, Ge Z G, Ruan X C, Chen Y J 2020 *At. Energy Sci. Technol.* **54** 65 (in Chinese) [刘世龙, 葛智刚, 阮锡超, 陈永静 2020 原子能科学技术 **54** 65]
- [3] Aliberti G, Palmiotti G, Salvatores M, Stenberg C G 2004 *Nucl. Sci. Eng.* **146** 13
- [4] Palmiotti G, Salvatores M 1984 *Nucl. Sci. Eng.* **87** 333
- [5] Salvatores M, Palmiotti G 1985 *Ann. Nucl. Energy* **12** 291
- [6] ^{52}Cr Experimental Nuclear Reaction Data, Van Patter D W, Nath N, Shafroth S M, et al. <https://www-nds.iaea.org/exfor/>
- [7] Shi Z R 2002 *Nucl. Phys. Rev.* **19** 42 (in Chinese) [石宗仁 2002 原子核物理评论 **19** 42]
- [8] Mihailescu L C, Borcea C, Koning A J, Plompen A J M 2007 *Nucl. Phys. A* **786** 1
- [9] Sun Q, Wang Z H, Zhang Q W, Huang H X, Ren J, Ruan X C, Liu S L, Bao J, Luan G Y, Ding Y Y, Chen X J, Nie Y B, Liu C, Zhao Q, Wang J C, He G Z, Du S B 2022 *At. Energy Sci. Technol.* **56** 816 (in Chinese) [孙琪, 王朝辉, 张奇玮, 黄翰雄, 任杰, 阮锡超, 刘世龙, 鲍杰, 栾广源, 丁琰琰, 陈雄军, 聂阳波, 刘超, 赵齐, 王金成, 贺国珠, 杜树斌 2022 原子能科学技术 **56** 816]
- [10] Luo D W, Wu H Y, Li Z H, Xu C, Hua H, Li X Q, Wang X, Zhang S Q, Chen Z Q, Wu C G, Jin Y, Lin J 2021 *Nucl. Sci. Tech.* **32** 79
- [11] Wu H Y, Li Z H, Tan H, Hua H, Li J, Henning W, Warburton W K, Luo D W, Wang X, Li X Q, Zhang S Q, Xu C, Chen Z Q, Wu C G, Jin Y, Lin J, Jiang D X, Ye Y L 2020 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **975** 164200
- [12] Wu H Y, Li Z H, Wu J, Hua H, Wang X, Li X Q, Xu C 2021 *Chin. Sci. Bull.* **66** 3553 (in Chinese) [吴鸿毅, 李智焕, 吴婧, 华辉, 王翔, 李湘庆, 徐川 2021 科学通报 **66** 3553]
- [13] Tarasov O B, Bazin D 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **376** 185
- [14] Schlegel D, Guldbakke S 2000 *Monte Carlo 2000 Conference Lisbon, Portugal, October 23–26, 2000* p881
- [15] Hutcheson A, Angell C, Becker J A, Crowell A S, Dashdorj D, Fallin B, Fotiades N, Howell C R, Karwowski H J, Kawano T, Kelley J H, Kwan E, Macri R A, Nelson R O, Pedroni R S, Tonchev A P, Tornow W 2009 *Phys. Rev. C* **80** 014603
- [16] Olliver H, Glasmacher T, Stuchbery A E 2003 *Phys. Rev. C* **68** 044312
- [17] Pei L C, Zhang X Z 1980 *Monte Carlo Methods and Their Application in Particle Transport Problems* (Beijing: Science Press) pp163–174 (in Chinese) [裴鹿成, 张孝泽 1980 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用 (北京: 科学出版社) 第 163—174 页]
- [18] Dashdorj D, Mitchell G E, Becker J A, Agvaanluvsan U, Bernstein L A, Younes W, Garrett P E, Chadwick M B, Devlin M, Fotiades N, Kawano T, Nelson R O 2007 *Nucl. Sci. Eng.* **157** 65
- [19] Zhang J S 2002 *Nucl. Sci. Eng.* **142** 207
- [20] Koning A, Hilaire S, Gorieli S 2023 *Eur. Phys. J. A* **59** 131

Neutron-induced inelastic scattering cross-section measurement of ^{52}Cr *

TAN Boyu¹⁾ WANG Zhaohui^{1)†} WU Hongyi^{1)‡} HAN Yinlu¹⁾
 XIAO Shiliang²⁾ WANG Hao¹⁾ WANG Wenye¹⁾ WANG Jimin¹⁾
 LI Yuzhao¹⁾ LIU Yingyi¹⁾ WANG Jincheng¹⁾
 TAO Xi¹⁾ RUAN Xichao¹⁾

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

2) (*School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

(Received 28 November 2024; revised manuscript received 26 January 2025)

Abstract

With the development of next-generation reactors, the demand for higher precision in nuclear data has increased significantly to ensure operational efficiency and safety. Especially, inelastic scattering cross-section is one of the key parameters in nuclear reactor physics calculations, which directly affects neutron economy, thermal-hydraulic design, and safety analysis. Stainless steel is widely used in the nuclear industry. Chromium (Cr) is one of the main alloying elements in stainless steel, and ^{52}Cr is the most abundant isotope in nature. However, the measurement of the inelastic scattering cross-section of ^{52}Cr has not been explored in China, so the study of the $^{52}\text{Cr}(n, n' \gamma)$ reaction cross-section is crucial for nuclear reactor calculations. In this study, the neutron beams with energies of 5.62, 6.24, and 7.95 MeV via the $\text{D}(d, n) \text{}^3\text{He}$ reaction are generated from the HI-13 tandem accelerator at the Institute of Atomic Energy in China. These neutrons are used to bombard a ^{52}Cr target. Four CLOVER detectors are located at 30° , 70° , 110° and 150° relative to the beam direction in the horizontal plane. The prompt γ -ray method is used to measure the inelastic scattering cross-section by using an HPGe detector array. This is the first time that the cross-sections of five inelastic γ -rays with energies of 647.47 keV, 935.54 keV, 1333.65 keV, 1434.07 keV and 1530.67 keV have been obtained experimentally in China. Additionally, theoretical model calculations are performed to determine the inelastic scattering cross-sections of neutrons with energies below 20 MeV interacting with ^{52}Cr . In the analysis of the experimental data, γ -ray self-absorption correction, neutron flux attenuation and multiple scattering correction are considered. The total experimental uncertainty includes the measurement uncertainty, correction term uncertainty, and standard cross-section uncertainty. The results show that the γ -ray production cross-sections obtained at the three neutron energy points are in good agreement with the data measured by Mihailescu et al. [Mihailescu L C, Borcea C, Koning A J, Plompen A J M 2007 *Nucl. Phys. A* **786** 1] within the error margins, and the uncertainties are smaller. However, significant discrepancies are observed between the theoretical model calculations and the experimental data, which may be attributed to the lack of experimental information about the high-excitation-energy levels in the ^{52}Cr level scheme. This study not only fills a gap in the measurement of the ^{52}Cr inelastic scattering cross-section but also provides important nuclear data for designing and optimizing the next-generation reactors.

Keywords: neutron inelastic scattering, γ -ray production cross-section, prompt γ ray method, high purity germanium detector

PACS: 29.30.Kv, 29.85.Fj

DOI: 10.7498/aps.74.20241660

CSTR: 32037.14.aps.74.20241660

* Project supported by the Continuous-Support Basic Scientific Research Project, China (Grant No. BJ010261223282).

† Corresponding author. E-mail: ngamma@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: wuhongyi@qq.com

中子诱发 ^{52}Cr 非弹性散射截面测量

谭博宇 王朝辉 吴鸿毅 韩银录 肖石良 王昊 汪文焯 王记民 李昱兆 刘颖一 王金成 陶曦 阮锡超

Neutron-induced inelastic scattering cross-section measurement of ^{52}Cr

TAN Boyu WANG Zhaohui WU Hongyi HAN Yinlu XIAO Shiliang WANG Hao WANG Wenye
WANG Jimin LI Yuzhao LIU Yingyi WANG Jincheng TAO Xi RUAN Xichao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 072901 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241660

CSTR: 32037.14.aps.74.20241660

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241660>

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

中子诱发伽马产生截面测量中的谱分析技术

Spectral analysis techniques in measuring neutron-induced gamma production cross-section

物理学报. 2024, 73(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231980>

非弹性中子散射谱仪及其应用

Inelastic neutron scattering spectrometer and its applications

物理学报. 2025, 74(1): 012501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241412>