

文章编号: 1007-4627(2017)03-0514-06

## 20 MeV 以下快中子与 $^{56}\text{Fe}$ 非弹性散射截面的分歧研究

钱晶, 葛智刚, 刘廷进, 卢涵林, 周祖英, 阮锡超, 陈国长, 王朝辉, 聂阳波, 吴海成

(中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

**摘要:**  $^{56}\text{Fe}$  的非弹性散射截面在核装置中子输运计算中扮演着重要的角色, 但无论从实验数据还是从评价数据, 非弹性散射截面都存在很大分歧, 它的数据直接影响到核装置的设计、建造与运行维护。本工作从实验数据本身出发, 深入分析了不同实验室测得的 847 keV 的  $\gamma$  产生截面的分歧, 经转化后补充非弹性散射截面的实验空白能区, 并同时利用满足全截面、去弹截面等截面自洽关系的评价方法推荐了高精度的快中子与  $^{56}\text{Fe}$  的非弹反应截面结果。积分检验表明, 新的非弹截面的改进使得评价数据与积分实验结果一致, 较 CENDL-3.1 的评价数据结果有显著改善。

**关键词:**  $^{56}\text{Fe}$ ; 非弹性截面; 实验数据评价; 核数据

**中图分类号:** O571.55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.514

### 1 引言

近年来, 能源发展对核能的需求日益增长, 特别是新一代核能系统对关键核素的中子反应截面数据提出了新的、更高的要求。由于铁 (Fe) 是核电站与反应堆中重要的结构材料, 同时也是军用核装置中非常重要的结构材料, 我国国防核装置的研发始终把 Fe 列为 16 个最重要的核素中仅有的四个结构材料核之一。现今, 国际合作评价工作组 (WPEC) 把它列为最重要的 6 个核素之一 ( $^1\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{235,238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ), 因此其准确的中子核数据无论对现在正在运行的核电站还是对正在研发的第四代核反应堆以及国防核装置和核聚变装置 (如 ITER) 都是非常重要的。 $^{56}\text{Fe}$  (丰度 91.75%) 是铁中最重要的同位素, 描述  $^{56}\text{Fe}$  与中子相互作用的全套中子数据的质量好坏将会直接影响到这些核装置的设计、建造与运行维护。因而评价出准确可靠  $^{56}\text{Fe}$  的全套中子数据将会对核能发展以及国防建设有重大的经济与社会效益。

$^{56}\text{Fe}$  的非弹性散射截面 (以下简称非弹截面) 在核装置中子输运计算中扮演着重要的角色。核装置是一个包含裂变材料、结构材料、慢化材料等多种核素的复杂系统, 系统要达到临界 (反应堆运行)、超临界 (爆炸) 是中子与这些核素综合作用的结果。而这些核素的中子反应截面都是与中子能量密切相关的, 例如在反应堆中子能谱范围内, 随着能量的增加, 使中子减少的 (n,  $\gamma$ ) 截面迅速降低, 而使中子倍增的 (n, 2n) 截面很快增加。

中子能谱不仅取决于产生中子的裂变聚变反应, 也取决于随后中子与系统中各种核素反应过程而造成的慢化, 其中  $^{56}\text{Fe}$  的非弹反应过程是核装置系统中中子慢化过程中能量损失的重要部分, 因此在很多核能系统的设计中对  $^{56}\text{Fe}$  的非弹截面提出了很高的需求。

然而, 目前  $^{56}\text{Fe}$  的非弹截面数据还存在诸多问题。国际著名核数据专家美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Chadwick 教授在 2013 年 Nuclear Data Sheets 上发表的文章中<sup>[1]</sup> 明确指出  $^{56}\text{Fe}$  的非弹截面数据无法满足新一代反应堆系统的要求, 提出需要在 0.5~20 MeV 中子能量区开展  $^{56}\text{Fe}$  的非弹截面测量, 将不确定度降到 2%~10% 之内。2012 年 Florida 大学 Wenner<sup>[2]</sup> 的铁球宏观实验测量表明,  $^{56}\text{Fe}$  的去弹截面在 6~11 MeV 能区有问题, 而原因就在于非弹截面。此实验的研究者 Wenner 认为虽然目前国际上各大评价数据库 ENDF/B-VII.1<sup>[3]</sup>, JEFF-3.1<sup>[4,5]</sup>, JENDL-4.0<sup>[6]</sup> 和 CENDL-3.1<sup>[7]</sup> 在 6~11 MeV 能区去弹截面虽然是一致的 (约为 1.4 b), 但他们的宏观实验表明该截面应下降到 1.1~1.0 b 之间。而去弹截面中主要的贡献来自非弹, 故建议非弹截面在中子能量  $E_n$  为 6.2, 8.2 和 10.8 MeV 应分别下调 21%, 29% 和 35%, 图 1 中黑色实心点即为铁球实验建议的下降的位置, 不同颜色的实线为国际上各大评价数据库给出的非弹截面的结果。

到目前为止, 在入射中子能量 5~20 MeV 能区,  $^{56}\text{Fe}$  的非弹截面直接测量的实验数据不多, 除了

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-05-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (11505294)

作者简介: 钱晶 (1979-), 女, 安徽安庆人, 副研究员, 博士, 从事粒子物理及原子核物理研究; E-mail: qianj@ciae.ac.cn

EXFOR<sup>[8]</sup> 数据库中收录的仅在 14.5 MeV 附近 1982 年之前的实验数据之外, 国际上再无最新的非弹截面的直接测量数据。而在评价数据方面, 虽然国际上各大评价数据库 (ENDF/B-VII.1, JENEL-4.0, EFF-3.3, CENDL-2.1, CENDL-3.1) 均给出了<sup>56</sup>Fe 的评价数据, 且在 10 MeV 以上各库的非弹截面曲线具有相似的形状, 但各库间仍有较大差异, 例如在 10 MeV, 各库间相差最大达到~10%, 即使在实验数据与评价数据符合得比较好的 14 MeV 能区, 实验数据也仍有~5% 的差别。总的来说, 不仅微观数据的本身存在差异, 宏观实验结果和微观数据有着更明显的分歧。

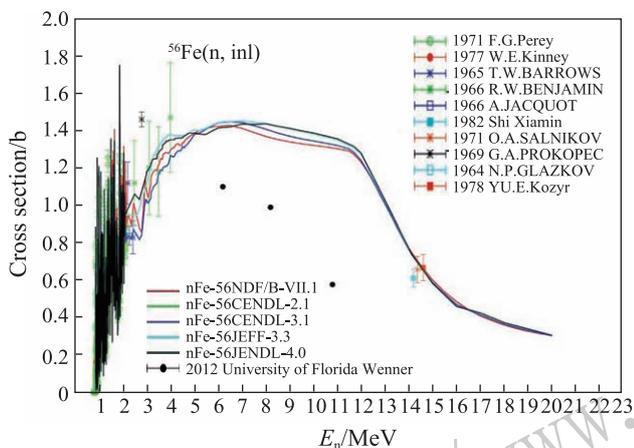


图 1 (在线彩图) <sup>56</sup>Fe 非弹截面数据分歧情况

本工作对非弹截面的实验数据进行仔细的分析评价, 给出 20 MeV 以下<sup>56</sup>Fe 快中子区高质量的非弹截面评价结果。

## 2 非弹截面分歧研究

### 2.1 非弹截面实验数据收集及修正

非弹截面的实验数据测量通常有三种方法: 直接测量法、符合测量法和 $\gamma$ 产生数据测量法。直接测量法是直接测量非弹性散射中子的微分截面, 经过角度积分得到截面值, 虽然各种修正少, 但是由于能量分辨很低, 很多能级分不开, 从而导致实验测量结果误差偏大。

符合测量法是同时测量 $\gamma$ 与中子数据, 虽然能量分辨高, 不需要能级纲图, 但是探测器效率较低, 误差给得比较大。

$\gamma$ 产生数据测量法是用HPGe探测器测量非弹的 $\gamma$ 数据, 利用衰变纲图数据获得非弹反应截面, 这种方法在有准确的能级纲图情况下, 具有极高的能量分辨, 基本上可将所有非弹 $\gamma$ 峰都分开, 精度较好。由于<sup>56</sup>Fe已有准确的能级纲图, 衰变分之比数据非常精确, 因此从实验数据来讲,  $\gamma$ 产生数据测量法精度更高, 能区更

宽。另外, 近来国际上在关注<sup>56</sup>Fe的非弹截面的同时, 欧洲正在利用瞬发 $\gamma$ 法测量<sup>56</sup>Fe的 $\gamma$ 产生截面。随着 $\gamma$ 探测技术发展, 国际上正在发展利用最新的 $\gamma$ 产生数据并依据理论关系转换成非弹截面的方法, 而国内一直没有开展这方面的工作。本工作将收集美国和欧洲高精度的 $\gamma$ 产生数据并转换成非弹截面, 以补充<sup>56</sup>Fe非弹截面直接测量实验数据覆盖不到的能区。

1970年以来, 有多家(n, n' $\gamma$ )截面测量数据, 多为单能点的测量, 90年代以后, 随着实验条件改进, 可测能量范围开始扩大, 目前有四家重要的能区比较宽的 $\gamma$ 产生截面的实验测量数据, 情况如下。

#### (1) 美国橡树岭国家实验室

1991年Dickens<sup>[9]</sup>开展了产生截面的测量, 利用橡树岭电子直线加速器(OREAL)获得能量范围为1~40 MeV的中子。探测器测量角度为125°, 样品是63 g的<sup>56</sup>Fe, 探测器与样品的距离为40 cm。同时还开展理论计算工作进行比对。

#### (2) 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室

2004年洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL LANSCE)及Livermore国家实验室联合开展<sup>56</sup>Fe的 $\gamma$ 产生截面的测量, Nelson<sup>[10]</sup>利用LANSCE/WNR (Weapon Neutron Research)<sup>[11]</sup>武器中子研究中子源, 强度达到 $10^3 \sim 10^6 \text{ n} \cdot \text{eV}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 中子能区为100 keV~800 MeV。探测器采用的是GEANIE (the Germanium Array for Neutron-Induced Excitations), 样品为天然铁。他们用三种方法获得高精度 $\gamma$ 产生数据。

(a) 绝对测量。实验中用<sup>235,238</sup>U裂变室进行中子定量, 用MCNP模拟修正探测器模拟中子在样品中的多次散射, 模拟 $\gamma$ 射线在样品中的吸收。图2中标出了大多的 $\gamma$ 产生截面的实验测量, 最上面点数较多的点为Nelson的<sup>56</sup>Fe 847 KeV的 $\gamma$ 产生数据, 实线为ENDF/B-VI库的非弹截面, 由图可知, 2004年之前的实验测量形状和数据值差距很大, 虽然Nelson的数据形状与Dickens的结果相似, 但是从数据结果上看, 相差了20%。

(b) 相对测量。除了开展绝对测量外, Nelson还开展了14.5 MeV的相对测量, 由于<sup>52</sup>Cr(n, n' $\gamma$ )在入射中子能量达到14.5 MeV时非弹出射 $\gamma$ 能量为1434 keV截面的不确定度很小, 达到3.8%, 样品选用388 mg/cm<sup>2</sup>的Cr和Fe。此外, 考虑到11.4 MeV以上, <sup>nat</sup>Fe(n, n1' $\gamma$ )847 MeV截面的贡献包括来自<sup>56</sup>Fe(n, n' $\gamma$ )和<sup>57</sup>Fe(n, 2n $\gamma$ ), 作者进行了修正。

(c) Nelson还将获得的14.5 MeV的结果与评价库的非弹截面进行比对, 因为从理论上来说14.5 MeV

的  $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$  截面应该低于甚至近似于非弹性散射截面, 如表 1 最后一列为绝对与相对测量的  $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$  截面结果, 当时的 ENDF/B-VI 的结果低了 7%。

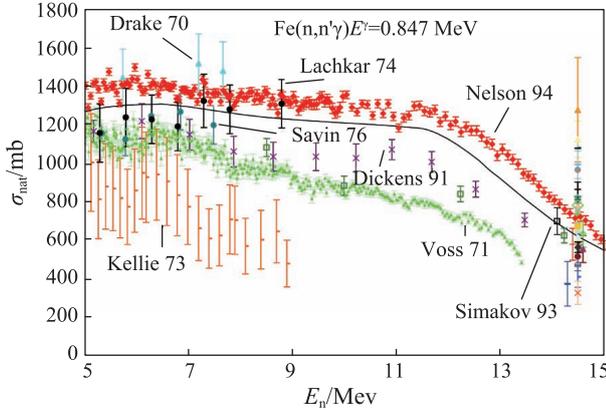


图 2 (在线彩图) 绝对测量实验结果与其它实验数据的比对

表 1 14.5 MeV 847 keV  $\gamma$  产生截面

| 数据                | $\sigma(\text{nat Fe})/\text{mb}$<br>$^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma) +$<br>$^{57}\text{Fe}(n, 2n\gamma)$ | $\sigma(\text{nat Fe})/\text{mb}$<br>$\text{nat Fe}(n, n'\gamma)$ | $\sigma(^{56}\text{Fe})/\text{mb}$<br>$^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$ |
|-------------------|---|---|---|
| 绝对测量              | $705 \pm 56$  | $683 \pm 57$  | $744 \pm 62$  |
| 相对测量              | $684 \pm 45$  | $669 \pm 46$  | $730 \pm 50$  |
| Simakov<br>评价结果   | $785 \pm 48$  |   |   |
| Savin<br>评价结果     | $621 \pm 62$  |   |   |
| ENDF/B-VI<br>非弹截面 |   |   | 681   |

### (3) 比利时GEEL实验室

2014 年, 比利时 GEEL 实验室 Negret 等<sup>[12]</sup> 开展了采用瞬发  $\gamma$  法测量  $^{56}\text{Fe}$  的  $\gamma$  产生截面的实验研究。他们采用的中子源为白光源 GELINA(Geel Electron LINear Accelerator) 中子飞行距离为 198.68 m, 时间分辨率好于 1 ns, 能量范围为 0.1 ~ 18 MeV, 能量分辨非常高, 能区非常宽。8 个 Ge 探测器组成的 GAINS(Germanium Array for Inelastic Neutron Scattering) 阵列分别放置在  $110^\circ$  和  $150^\circ$ 。样品与探测器之间的距离分别是 15.4 和 11.9 cm。

### (4) 德国 HZDR 研究中心

2014 年, Beyer 等<sup>[13]</sup> 在德国 HZDR (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf) 超导电子加速器上进行了  $\gamma$  产生截面的测量, 其  $\text{BaF}_2$  探测器与靶核相距 20 cm 处, 角度为  $125^\circ$ 。

针对以上四家  $\gamma$  产生数据的测量结果, 本工作首先对实验数据进行了修正(包括扣除  $^{57}\text{Fe}(n, 2n\gamma)$ ; 标准截

面修正; 天然 Fe 到  $^{56}\text{Fe}$  修正), 其次将这四家  $\gamma$  产生数据转换成非弹截面, 为非弹截面评价提供实验依据。

## 2.2 847 keV $\gamma$ 产生截面转换成非弹截面

早在 20 世纪 50 年代就已经有了  $\gamma$  产生截面转换成非弹截面的方法研究, 1992 年 Vonach<sup>[14]</sup> 给出了非弹截面与第一激发态的  $\gamma$  产生截面的关系  $R$ ,

$$R = \frac{\sigma(n, n')}{\sigma(n, n1'\gamma)}$$

如图 3。依据此关系, 本工作将 847 keV 的  $\gamma$  产生截面转换成非弹截面。

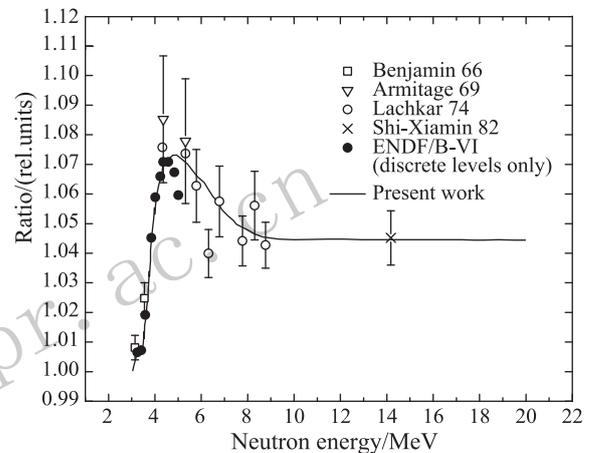


图 3 847 keV  $\gamma$  产生截面的关系  $R$

图 4 中为修正并转换成非弹截面的四家实验数据的情况, 紫色实心点为美国橡树岭家实验室 Dickens 在 1991 年的实验数据, 绿色三角为美国洛斯阿拉莫斯实验室 2004 年 Nelson 的实验数据, 灰色圆点为比利时 GEEL 实验室 Negret 在 2014 年的实验数据。从图中可看出四家数据存在很大分歧, 特别是在 6~13 MeV 中子能区。1991 年 Dickens 的数据比 Negret 的数据低了 10%, 并且比 2004 年 Nelson 的数据低了 20%。

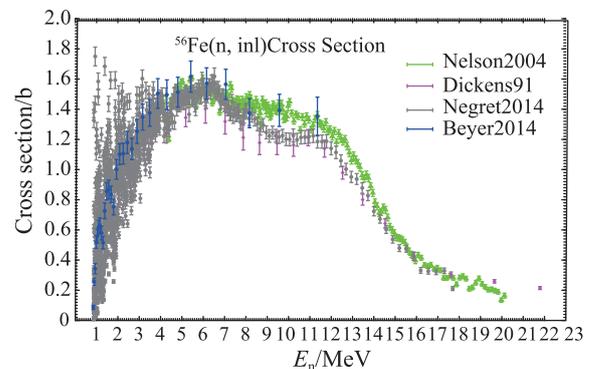


图 4 (在线彩图)  $^{56}\text{Fe}(n, n\gamma)$  第一分立能级  $\gamma$  产生数据修正后转换成非弹截面结果

而Beyer的2014年的测量结果除了8 MeV的数据与Negret的数据重合以外,其它均与Nelson的数据一致。

### 2.3 实验数据分歧讨论

在实验数据评价中,由于装置不同,中子源不同,需做仔细的分析甄别。Dickens的数据年代较早,中低能区数据误差比较大。

GEEL实验室Negret的数据由于采用白光源,是一个连续谱中子源,所以配合飞行时间方法可以将中子能量分群,能量间隔给得非常细。但Negret文章表明不同样品厚度,实验获得的数据结果不同,这说明中子的衰减没有很好的考虑进去,或者考虑不足。

Nelson除了开展 $\gamma$ 产生数据的绝对测量外,还开展了14.5 MeV的相对测量,相对测量与绝对测量的结果达到了一致。

上述四家实验数据,除Dickens的数据外,在低能区( $\sim 6$  MeV以下)数据的一致性较好。但是6 MeV以后,三家数据开始有分歧。Negret数据明显在6 MeV以后均低于Nelson的数据。本工作分析认为这可能是级联效应带来的分歧。

实验测量已发现,一次核衰变同时放出几条射线,而这几条有可能同时被探测器记录。此时形成能量的相加,相加能量形成脉冲形式有别于已知能量谱的特性致使全能峰部分丢失。级联修正即是修正原效率,最后将数据结果向更高的结果修正,补充丢失的全能峰计数。此项修正在低位测量,即探测器与样品距离非常近时尤为重要。图5即为不同距离获得的 $^{24}\text{Na}$ 能谱情况, $L=5$  cm时的测量,明显计数丢失。图6则为实验获得的修正曲线,显然,距离越近,修正需越多。而 $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$ 的三家实验数据中,只有Negret的实验样品与探测器的位置最近,只有15.4和11.9 cm,特别是它的探测器的效率非常高,很有可能造成计数的丢失而致使截面结果偏小,这在入射中子能量高的时候,就会出现级联问题。

### 2.4 依据截面关系评价实验数据

评价工作不仅从实验测量本身来分析实验数据,同时,需考虑核反应过程中全截面、去弹截面、弹性散射截面之间的自洽关系,利用这种关系,可以对部分中子能区 $^{56}\text{Fe}$ 的各反应截面进行评价,因此可利用其它反应道部分能区可靠性高的实验信息来评价推荐非弹截面。

对于 $^{56}\text{Fe}$ 的各个反应道,由图7可以看出,在

6~11 MeV能区,  $(n, 2n)$  截面没有开道, 满足

$$(n, \text{inl}) = (n, \text{tot}) - (n, \text{el}) - (n, \text{p}) - (n, \alpha) - (n, \gamma)$$

的关系。此能区全截面  $(n, \text{tot})$  的测量非常精准, 不确定度达到了1%~5%,  $(n, \text{p})$  反应道是标准截面, 可以直接选用IRDFv1.05 (International Reactor Dosimetry and Fusion File) 的评价数据<sup>[15]</sup>。而  $(n, \alpha)$  和  $(n, \gamma)$  在此能区非常小, 可以忽略不计。因此如果能够获得可靠的弹性散射截面  $(n, \text{el})$ , 即可获得可靠性较高的非弹截面。图7的红色方块即为可获得一家1994年测得的弹性散射截面实验数据(Schimdt<sup>[16]</sup>), 实验测量精度都小于5%。图8上的红色方框点即为利用此方法获得的

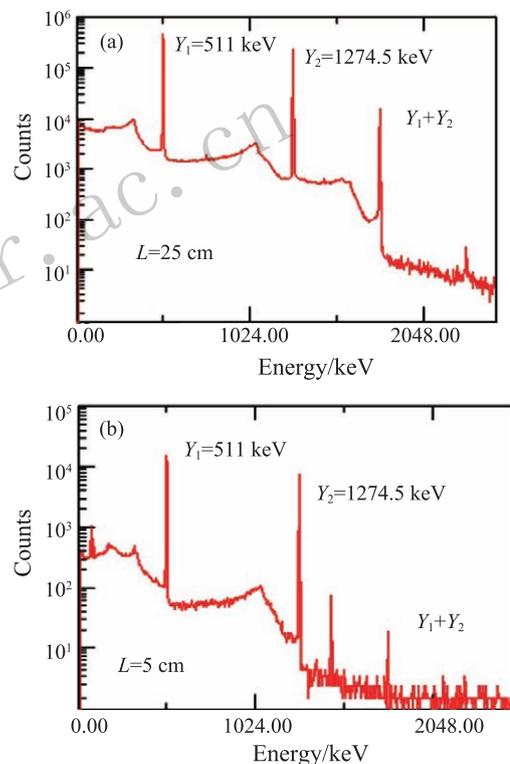


图5 (在线彩图)60%HPGe探测器距离远近不同对比(1000 s计数)

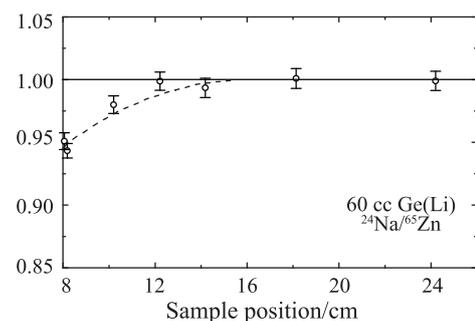


图6 探测器效率修正因子与样品位置的关系

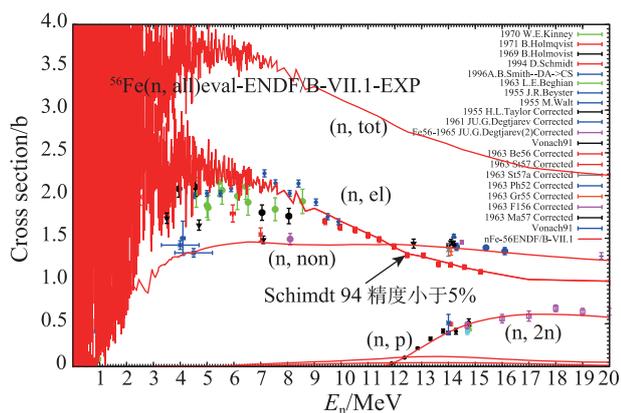


图 7 (在线彩图)  $^{56}\text{Fe}$  各截面之间的关系

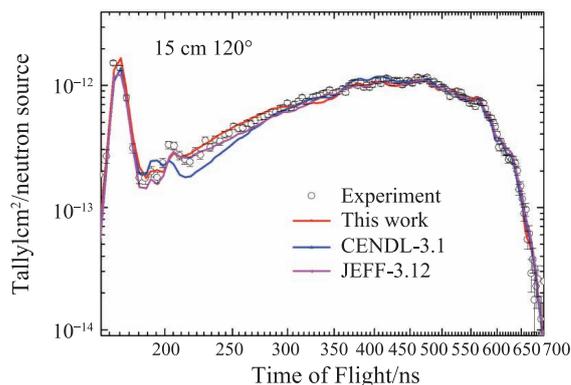


图 9 (在线彩图) 泄漏谱积分实验结果与评价数据比对

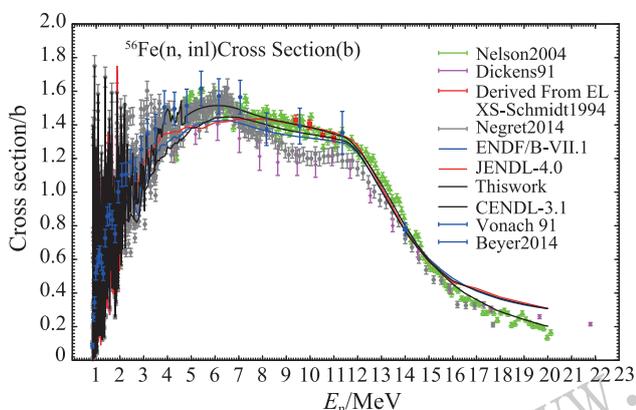


图 8 (在线彩图) 评价的非弹截面的结果及比对

可靠性较高的评价数据。此数据与 Nelson 的测量结果完全符合。因此本工作在 6 MeV 以下直接拟合 Negret 的实验数据, 6 MeV 以上拟合 Nelson 的实验数据, 如图 7 中的黑色实线即为评价推荐结果。并给出了本工作的结果与其它各评价库的比对情况。本工作的结果较 CENDE-3.1 的结果(黑色虚线)及其它评价库(ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0)有很大变化。

### 3 积分实验验证

依据非弹截面的实验数据评价数据, 本工作完成了理论计算工作, 获得了全套中子数据评价结果, 并给出了 ENDF 格式文档。并将评价库结果与其它国际上已有的评价库及积分实验进行比对。中国原子能科学研究院核数据重点实验室测量部近期开展了中子泄露谱大角度和小角度的积分实验测量。图 9 为本工作(红色实线)及国际上各评价库所给的评价数据与积分实验测量结果的比对, 从结果上看本工作比 CENDL-3.1 库(蓝色实线)有很大改进, 比欧洲库 JEFF-3.12 与实验数据(黑色空心圆点)符合得更好, 特别是在非弹的贡献部分改进显著。

## 4 总结

本工作对各反应截面进行了详细的实验数据的收集和细致评价, 发展利用  $\gamma$  产生数据转换成非弹截面的方法补充直接测量实验数据的不足, 深入分析了  $\gamma$  产生截面实验数据之间的分歧的可能原因, 同时利用满足全截面、去弹截面等截面自洽关系的同时评价方法给出非弹截面的评价结果, 获得了非弹截面的推荐值。从与积分实验的比对结果看,  $^{56}\text{Fe}$  非弹截面的改进使得评价数据与实验结果符合一致, 较之前的 CENDL-3.1 的评价数据有很大的改进。

**致谢** 本工作感谢美国核数据中心主任 M.Herman 和 IAEA 国际原子能机构核数据科科长 R.Capote 的指导。同时还要感谢原子能院核数据重点实验室刘廷进研究员、卢涵林研究员、周祖英研究员、葛智刚研究员、阮锡超研究员、陈国长研究员的指导及张玥副研究员、陈永静研究员的帮助。

### 参考文献:

- [1] CHADWICK M B, DUPONT E, BAUGE E, *et al.* Nuclear Data Sheets, 2014, **118**, 1.
- [2] WENNER M, HAGHIGHAT A, ADAMS J M, *et al.* Nucl Sci Eng, 2012, **170**, 207.
- [3] CHADWICK M B, HERMAN M, OBLOZINSKY P, *et al.* Nuclear Data Sheets, 2011, **112**, 2887.
- [4] KONING A J, FORREST R, KELLETT M, *et al.* JEFF Report 21, 2006, NEA No.6190.
- [5] KONING A J, DEAN C, FISCHER U, *et al.* JEFF Report 23, 2013, NEA No.7079.
- [6] SHIBATA K, IWAMOTO O, NAKAGAWA T, *et al.* J. Nucl Sci Tech, 2011, **48**: 1.
- [7] GE Z G, ZHAO Z X, XIA H H, *et al.* J Korean Phys Soc, 2011, **59**(2): 1052.
- [8] IAEA <http://www-nds.iaea.org/EXFOR>.

- [9] DICKENS J K, FU C Y, HETRICK D M, *et al.* Proc Int Conf Jilich, Germany, 1991, 13 - 17 May.
- [10] NELSON R O, FOTIADES N, DEVLIN M, *et al.* International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, 2004, PART ONE, **769**: 838.
- [11] LISOWSKI P W, BOWMAN C D, RUSSELL G J, *et al.* Nucl Sci Eng, 1990, **106**: 208.
- [12] NEGRET A, BORCEA C, DESSAGNE PH, *et al.* Phys Rev C, 2014, **90**: 034602.
- [13] BEYER R, SCHWENGER R, HANNASKE R, *et al.* Phys Rev A, 2014, **927**: 41.
- [14] VONACH H, PAVLIK A, TAGESEN S, *et al.* Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 1992: 906.
- [15] ZOLOTAREV K I, International Nuclear Data Committee, 2002, CCCP-438.
- [16] SCHMIDT D, MANNHART W, KLEIN H, *et al.* Phys Techn Bundesanst, 1994, Neutronenphysik Reports No.20.

## Research on Discrepancy of Inelastic Cross Section for $^{56}\text{Fe}$ in Fast Neutron Range

QIAN Jing<sup>1)</sup>, GE Zhigang, LIU Tingjin, LU Hanlin, ZHOU Zuying, RUAN Xichao, CHEN Guochang,  
WANG Zhaohui, NIE Yangbo, WU Haicheng

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

**Abstract:** Knowledge about the inelastic scattering cross section of  $^{56}\text{Fe}$  is very important in neutron transportation calculation. However there are great discrepancies not only between experimental data but also between evaluated data. More detail analysis was performed for inelastic scattering cross section in the fast range up to 20 MeV where there are significant differences among the main evaluated libraries, mainly caused by the different inelastic scattering cross section measurements. The large discrepancies on  $^{56}\text{Fe}(n, n_1'\gamma)$  cross section which could fill the neutron energy blank of the  $^{56}\text{Fe}(n, \text{inl})$  were clarified and were converted to the inelastic scattering cross section of  $^{56}\text{Fe}$ . And the high-quality results were evaluated by using the unitarity constrain among total cross section, noelastic reaction and other reactions. The integral experiment result indicates that the new evaluated result of inelastic cross section brings greater improvement than that of CENDL-3.1.

**Key words:**  $^{56}\text{Fe}$ ; inelastic cross section; experimental data evaluation; nuclear data

**Received date:** 8 Dec. 2016; **Revised date:** 25 May 2017

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (11505294)

1) E-mail: [qianj@ciae.ac.cn](mailto:qianj@ciae.ac.cn).