

# 中子学实验近期进展\*

刘荣 鹿心鑫<sup>†</sup> 安力 朱传新 温中伟 王玫 蒋励 娄本超

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

**摘要** 文章作者采用核活化法和核裂变法实验研究了加速器 D-T 中子、D-D 中子以及  $^{252}\text{Cf}$  自发裂变中子在纯水泥体上的反射中子, 获得了反射中子引起的 6 种高阈能活化箔的活化反应率以及  $^{235}\text{U}$  (包镉) 和  $^{238}\text{U}$  裂变反应率. 采用反冲质子法测量了 4 种厚度 (4.5, 9, 18, 27cm) 聚乙烯板的角度中子谱. 获得了聚乙烯铁铍组合壳体内距装置中心 0, 9.7, 12.8 和 17.3cm 4 个位置 1MeV 以上的中子能谱. 采用铝核素标准截面相对测量法, 获得了  $^{175}\text{Lu}$ 、 $^{89}\text{Y}$  核素的 (n, 2n) 反应截面. 文章还分析了实验的不确定度.

**关键词** 反射中子, 中子角度谱, 介质内中子能谱, 反应截面

## Recent progress of neutronics experiments

LIU Rong LU Xin-Xin<sup>†</sup> AN Li ZHU Chuan-Xin  
WEN Zhong-Wei WANG Mei JIANG Li LOU Ben-Chao

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The reflected neutrons from pure cement bombarded by D-T and D-D fusion neutrons, and  $^{252}\text{Cf}$  spontaneous fission neutrons were studied using the methods of nuclear activation and uranium fission. The absolute activation reaction rates of six kinds of foils with high threshold energy, and the absolute fission reaction rates of  $^{235}\text{U}$  (wrapped by cadmium) and  $^{238}\text{U}$  nuclides, were measured. The angular neutron spectra from polyethylene slabs with thicknesses of 4.5, 9, 18, and 27cm were measured using the method of proton recoil. The neutron energy spectra above 1MeV were also measured this way in the multi-shell assembly which was made of beryllium, stainless steel and polyethylene. The measuring positions were 0, 9.7, 12.8 and 17.3cm away from the center of the assembly. By the relative measurement method with an Al sample, the (n, 2n) reaction cross sections of Ru and Y nuclides were obtained. The experimental uncertainties in all the results were analyzed.

**Keywords** reflected neutron, angular neutron spectrum, neutron spectra in medium, reaction cross section

开展中子学实验研究, 测量中子与宏观样品相互作用的积分参数, 用于检验中子输运计算所使用的程序、方法和数据. 测量 D-T 聚变中子与样品相互作用的 (n, 2n) 反应截面, 用于检验中子输运计算所使用的微观参数. 在核材料的库存中, 混凝土是引起裂变系统临界安全问题的重要因素, 因各种固定式屏蔽中都使用混凝土, 所以国外的文献报道中对混凝土的中子反射性能理论研究较多, 但实验方面

的研究很少<sup>[1-3]</sup>. 本实验室开展了纯水泥体反射中子的宏观特性实验研究. 在核工程设计的中子输运计算中, 必须考虑次级中子的角度分布<sup>[4-6]</sup>, 虽然 C 和 H 的微观截面比较精确, 但其若干个自由程厚度时的宏观特性尚存在问题, 本实验室开展了以聚乙烯板为散射体的宏观检验实验研究. 国内外开展介

\* 中国工程物理研究院科学基金(批准号:990212)资助项目  
2009-11-11 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: luxinxin 5187@sohu.com

表 1 活化箔的实验参数

活化箔	厚度 /mm	反应道	$\gamma$ 射线能量 /keV	$\gamma$ 射线发射几率	半衰期	反应阈能 /MeV
钢	0.3	$^{115}\text{In}(n,n)^{115m}\text{In}$	366.2	0.461	4.3h	1.2
铁	0.3	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	846.6	0.99	2.58h	6.3
铝	0.4	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1368.55	1	15.03h	7.2
铌	0.2	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	934.53	0.955	10.16d	9
聚四氟乙烯	0.5	$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	511	1.934	109.8min	11
锆	0.2	$^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$	909.2	0.9987	78.44h	12

质外中子能谱测量的实验较多,而介质内的相对较少<sup>[7]</sup>,本实验室利用具有能产生中子增殖的材料铍、结构材料铁和轻材料聚乙烯组合球壳装置,测量 D-T 聚变中子外入射到装置内的中子能谱,以研究中子在装置内的空间分布.对于 $^{175}\text{Lu}$ , $^{89}\text{Y}$ 核素(n,2n)反应截面实验研究,不同方法得到的实验结果尚存在有差异,本实验室利用 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 标准截面法,测量了 $^{175}\text{Lu}$ , $^{89}\text{Y}$ 核素(n,2n)反应截面,其结果与已公开的实验结果和评价数据进行了比较.

本文简述了近几年一些中子学实验的进展.

### 1 纯水泥材料的反射中子实验

反射中子的测量是指在源中子和测点之间放入铁和含氢材料的组合体,用于屏蔽源中子,在测点处测量反射体反射中子和部分直穿中子.反射体厚约 50cm,其材料采用纯水泥,以使其密度均匀,便于计算分析.实验安排如图 1 所示.使用三种中子源,即 D-T、D-D 中子源和 $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变中子源,探测器为一组不同阈能的高阈能活化箔及浓缩铀和贫化铀固体径迹探测器,它们定位在含铁球壳内表面上测量反射中子,可观测特定的小空间内反射中子的情况.

活化反应率是指每个源中子经屏蔽慢化和反射等作用后引起的每个活化箔物质原子活化反应的几率.选取 6 种活化箔,活化箔直径  $\phi 18\text{mm}$ ,纯度大于 99.9%,实验参数见表 1.用 HPGe 探测器测量中子活化  $\gamma$  射线.实验测点在球壳内表面水平赤道方向上的  $0^\circ\text{--}180^\circ$  范围内,每隔  $30^\circ$  或  $60^\circ$  一个测点,测量了不同角度下 D-T 中子源产生的反射中子引起的绝对活化反应率分布<sup>[8]</sup>.有水泥体实验不确定度为 7.2%—8.0%(置信度  $k=1$ ,下同),无水泥体为 5.1%—6.2%.活化箔 Al 和 Zr 在不同测量点的活化反应率的变化结果如图 2 所示.

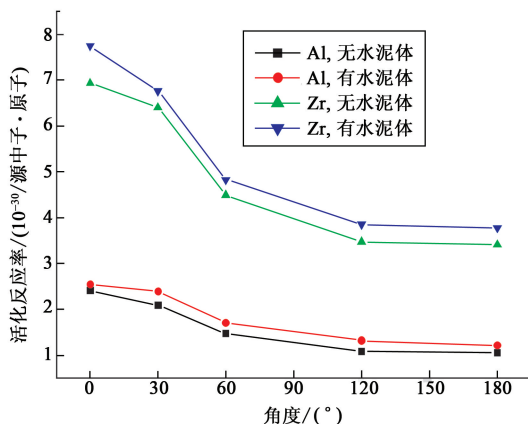


图 2 D-T 中子源活化箔 Al 和 Zr 活化反应率分布

裂变反应率是指每个源中子经屏蔽慢化和反射等作用后引起的每个 $^{235}\text{U}$ 和 $^{238}\text{U}$ 原子裂变反应的几率.固体径迹探测器采用聚酯膜作信号膜,浓缩铀和贫化铀作为转换靶,由 10 片铀镀片( $\phi 24\text{mm}$ )与 10 片信号膜做成夹心饼干状.用火花自动计数器记录裂变碎片在信号膜上产生的径迹.浓缩铀镀片外包裹 0.8mm 厚度的镉以测量能量为 0.5eV 以上中子,贫化铀中的同位素 $^{235}\text{U}$ 对裂变计数的贡献采用浓缩铀裂变室的测量和迭代法相结合的方法来扣除,表 2 列出了贫化铀或浓缩铀的同位素丰度.

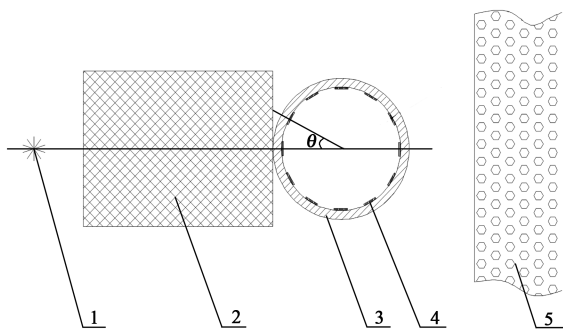
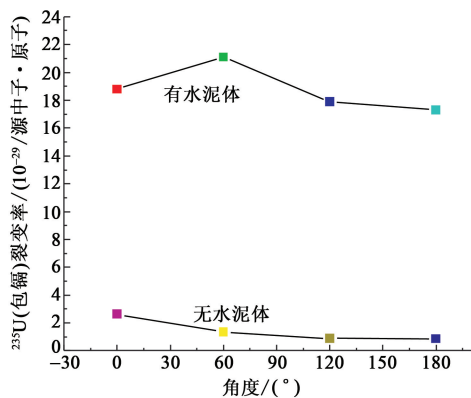


图 1 实验安排示意图(1——中子源;2——中子屏蔽体;3——含铁球壳;4——裂变电离室或活化箔;5——纯水泥体)

表 2 贫化铀和浓缩铀的丰度

同位素丰度(%)	$^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{236}\text{U}$
贫化铀	99.528	0.4154	0.00236	0.03037
浓缩铀	8.62858	90.2666	1.10486	—

实验测点在球壳内表面水平赤道方向上的  $0^\circ$ — $180^\circ$  范围内,每隔  $60^\circ$  一个测点,对裂变计数经过计数时间、同位素丰度、记录裂变碎片的探测效率等进行修正后,测量了不同角度下  $^{252}\text{Cf}$  自发裂变源中子和 D-D 源中子产生的反射中子引起的绝对裂变反应率分布<sup>[9,10]</sup>.对 D-D 中子源  $^{235}\text{U}$ (包镉)裂变率,有、无水泥体的实验不确定度分别为  $7.4\%$ — $7.6\%$  和  $5.5\%$ — $5.7\%$ ;对  $^{238}\text{U}$  裂变率,有、无水泥体分别为  $7.6\%$ — $7.8\%$  和  $5.6\%$ — $5.9\%$ .对  $^{252}\text{Cf}$  中子源  $^{235}\text{U}$ (包镉)裂变率,有、无水泥体分别为  $10.7\%$  和  $9.7\%$ ;对  $^{238}\text{U}$  裂变率,有、无水泥体分别为  $10.8\%$  和  $9.6\%$ .D-D 中子源在不同测量点引起的  $^{235}\text{U}$ (包镉)裂变反应率的变化结果如图 3 所示.

图 3 D-D 中子源  $^{235}\text{U}$ (包镉)裂变反应率分布

## 2 聚乙烯板中子角度谱实验

采用反冲质子法对聚乙烯板的中子角度谱 ( $>1\text{MeV}$ )进行了实验研究<sup>[11]</sup>.中子角度谱为在聚乙烯板后表面中心点,单位立体角内对应一个源中子的出射中子随能量变化的平均通量.由于中子角度谱测量的是由散射体经一次或多次散射的中子,其通量低,本底比较强,在实验上,关键是要消除源中子直接或经慢化后进入探测器,并减弱大厅散射中子本底对测量中子角度的影响,实验上采用屏蔽探测器的方式测量中子角度谱.

聚乙烯板长、宽各 100cm,厚度选为 4.5cm,

9cm,18cm,27cm 四种,距离中子源靶室中心 17.8cm.实验模型主要由 D-T 中子源、聚乙烯板、阴影体、准直器、探测器屏蔽体组成.各装置组成部分的中轴线或中心均处于同一水平面上,且探测器屏蔽体和准直器的轴线经过聚乙烯板后表面的中心点.实验装置如图 4 所示.

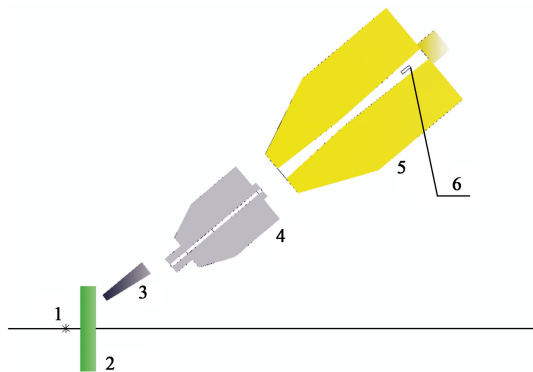


图 4 实验装置示意图(1——中子源;2——聚乙烯板;3——阴影体;4——准直器;5——探测器屏蔽体;6——中子探测器)

中子探测器选用 BC501A 液体闪烁探测器,闪烁体尺寸为  $\phi 50.8\text{mm} \times 50.8\text{mm}$ ,采用上升时间法进行  $n-\gamma$  分辨,分两段测量反冲质子谱.聚乙烯板轴线方向与加速器的  $\text{D}^+$  束方向成  $0^\circ$  夹角,入射中子能量为  $15.1\text{MeV}$ .

测量了固定厚度不同角度、固定角度不同厚度的中子谱.本底中子的测量是用铁柱和聚乙烯柱将准直器的准直孔完全塞住,其他部件均不变动,然后用探测器测量,测得本底中子实验谱.从含本底的中子角度谱扣除本底谱后的中子计数即为中子角度谱.

中子角度谱  $>5.5\text{MeV}$  能段的本底中子份额一般低于  $20\%$ , $3.5$ — $5.5\text{MeV}$  区间的本底中子份额为  $20\%$ — $35\%$ , $3.5$ — $1\text{MeV}$  能段的本底中子份额为  $40\%$ — $70\%$ .本底中子份额随着散射体厚度和测量角度的增大而增大.中子角度谱实验不确定度在大于  $3.5\text{MeV}$  能段约为  $6.2\%$ — $9.2\%$ ,在  $1$ — $3.5\text{MeV}$  能段约为  $8.6\%$ — $25\%$ .在  $40^\circ$  方向上不同厚度聚乙烯板的中子角度谱如图 5 所示,为便于比较,图 5(b)给出了中子角度积分谱.

## 3 聚乙烯铁铍组合球壳内的中子能谱实验

采用反冲质子法利用苾晶体探测器测量了实验装置内  $1\text{MeV}$  以上的中子能谱,可以获得源到装置距离变化时介质内中子能谱的变化情况.实验装置

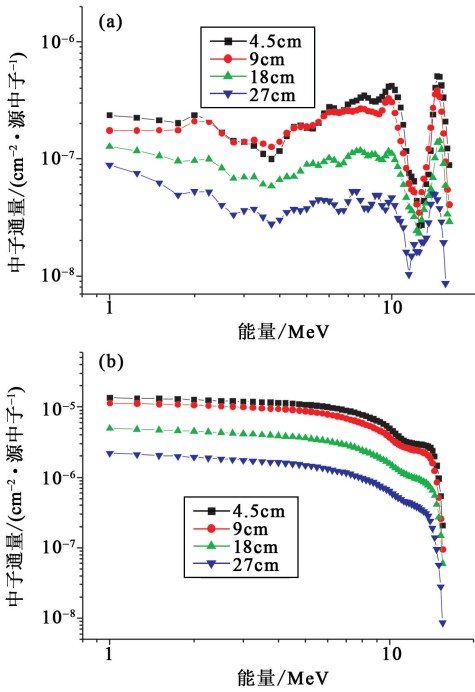


图 5 40°方向上不同厚度聚乙烯板的中子角度谱((a)微分谱;(b)积分谱)

是由铍、不锈钢和聚乙烯三壳层组成。D-T 中子源距装置 30cm 和 50cm,其中 30cm 时与 D<sup>+</sup>束成 0°方向中心位置的中子能谱测量实验装置如图 6 所示。实验装置的几何中心在 D<sup>+</sup>束线上,装置由三维支架支撑,其中心离地面 146.5cm。

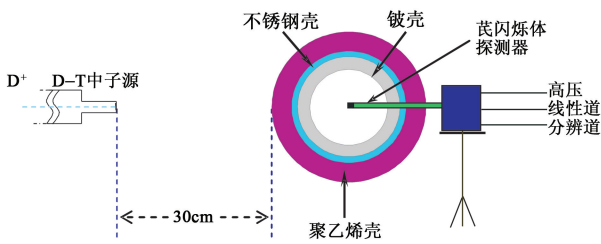


图 6 介质内中子能谱实验装置示意图

铍壳的成份如下:铍为 99%,杂质 C, Al, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni 占 1%,密度  $1.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。不锈钢为 1Cr18Ni9Ti,密度  $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。聚乙烯密度为  $9.5 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ 。其尺寸铍为  $\phi 194-256\text{mm}$ 、铁为  $\phi 256-286\text{mm}$ 、聚乙烯为  $\phi 286-386\text{mm}$ 。每一壳层径向有  $\phi 20\text{mm}$  的孔用于放置探测器。探测器选用  $\phi 18\text{mm} \times 20\text{mm}$  茈晶体,通过 D-D、D-T 单能中子源以及 Am-Be 中子源入射探测器正面和侧面等不同方向,并利用互换性定理<sup>[12]</sup>,对茈晶体探测器的探测效率的各向异性进行了标定<sup>[13]</sup>。

实验获得的反冲质子谱,用逆矩阵解谱法获得中子能谱。在中子源到装置球表面分别为 30cm 和

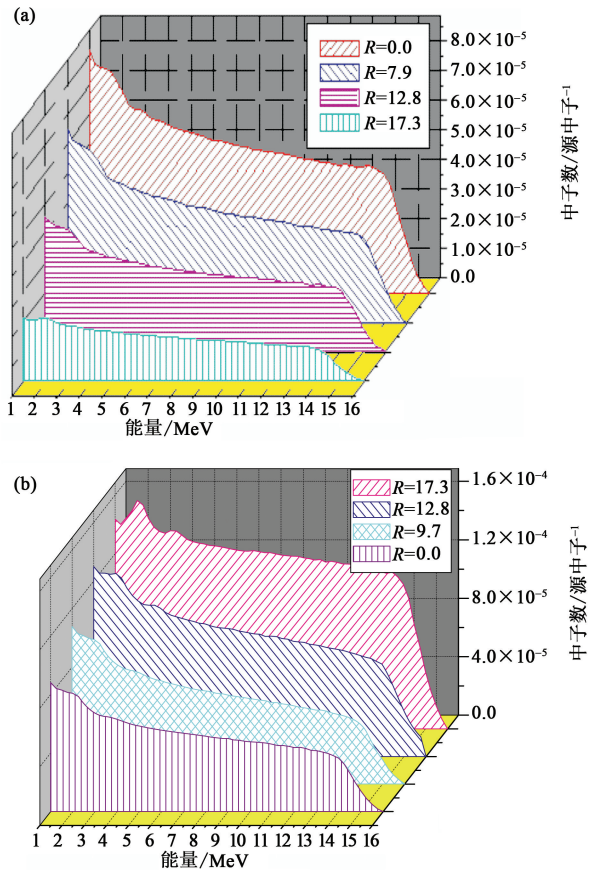


图 7 源距装置 30cm,0°和 120°方向 4 条积分谱的比较((a)0°方向;(b)120°方向)

50cm 时,在与 D<sup>+</sup>束成 0°和 120°二个方向上距装置中心为 0,9.7,12.8 和 17.3cm 的 4 个位置上,测量了 1MeV 以上的中子能谱。测量离中心 12.8cm 和 17.3cm 两位置能谱时,内壳层用同种材料填充。源与装置距离 30cm 时 0°和 120°方向 4 个位置的积分谱的变化情况见图 7。实验不确定度为 7.7%。

#### 4 <sup>175</sup>Lu, <sup>89</sup>Y 核素(n,2n)反应截面测量

采用相对测量法测量<sup>175</sup>Lu<sup>[14]</sup>、<sup>89</sup>Y 核素(n,2n)反应截面。根据国际核数据中心公布的标准数据,<sup>27</sup>Al(n,α)<sup>24</sup>Na 标准反应截面的不确定度已经在 0.5% 左右,非常适合作为相对测量反应截面使用。铝核素与待测核素在相同条件下照射,使得中子源到样品的距离、中子注量率的绝对值等参量的不确定因素相互抵消,相对测量结果的准确性将大大好于绝对测量<sup>[15-17]</sup>。

圆形薄样品 Lu, Y, Al 片直径均为 20mm,厚度分别为 0.50mm,0.56mm,0.55mm,每一片样品的两侧圆面各紧贴一片 Al 样品。样品的圆心正对 TiT 靶的中心,在与 D<sup>+</sup>束成 0°,45°,60°,90°,120°和 150°共 6 个方向上放置样品,从而可以得到与入射中子

能量 13.4—14.8 MeV 相应的反应截面,入射中子能量可利用铈钨截面比的方法测量得到。 $^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174}\text{Lu}$  反应产物  $^{174}\text{Lu}$  的半衰期,基态为 3.31a,激发态为 142.01d,  $^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174}\text{Lu}$  总反应截面由这两个截面求和得到。 $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$  反应产物  $^{88}\text{Y}$  半衰期为 106.6d. 中子源由 K-400 中子发生器提供,中子产额用伴随  $\alpha$  粒子法监测. 用 HPGe 探测器测量样品的  $\gamma$  活性.

表 3  $^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174}\text{Lu}$  和  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$  的反应截面

$^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174}\text{Lu}$		$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	
En/MeV	$\sigma/\text{mb}$	En/MeV	$\sigma/\text{mb}$
13.44	1994 $\pm$ 70	13.49	629 $\pm$ 11
13.64	2106 $\pm$ 74	13.74	762 $\pm$ 13
13.95	2116 $\pm$ 74	14.09	863 $\pm$ 15
14.22	2042 $\pm$ 71	14.45	935 $\pm$ 16
14.34	2064 $\pm$ 72	14.60	983 $\pm$ 17
14.57	1973 $\pm$ 69	14.82	1053 $\pm$ 18

实验得到了  $^{175}\text{Lu}$ ,  $^{89}\text{Y}$  核素在 13.4—14.8 MeV 区间的 (n, 2n) 反应截面,实验结果见表 3.  $^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174}\text{Lu}$  反应截面的实验不确定度为 3.5%,  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$  反应截面为 1.7%. 实验结果与其他实验结果的比较示于图 8.

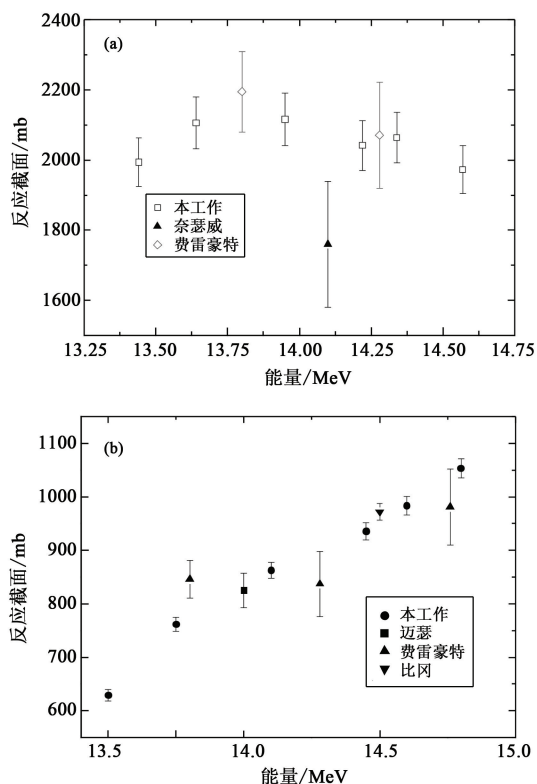


图 8 实验结果与国外结果的比较((a)  $^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174}\text{Lu}$  反应截面; (b)  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$  反应截面)

## 5 结束语

近几年来,我们开展了与中子学宏观检验实验相关的积分参数测量与研究,其中包括研究一些材料反射中子的特性,测量含氢材料的中子角度谱、多壳层组合装置内的中子能谱等,取得的实验结果为核工程中子学理论设计提供了实验数据. 我们同时还测量了一些核素(n, 2n)反应截面,提供了可供检验的微观核参数,并与国外的有关数据进行了分析与比较,所获得的实验结果已提供理论检验和工程使用.

## 参考文献

- [1] Maerker R E. Nucl. Sci. Eng., 1965,22:458
- [2] Monahan S P. LA-UR-95-21:1995, 96
- [3] Walter Meyer *et al.* Nuclear Science and Engineering, 1976,60:405
- [4] Sharma A. Annals of Nuclear Energy, 2001,28:715
- [5] Fischer U, Batistoni P *et al.* Fusion Engineering and Design, 2000,51—52:663
- [6] Yuan chen, Rong Liu, Jian Shen *et al.* Fusion Technology, 1998,34:1023
- [7] 安力,陈渊,郭海萍等. 原子能科学技术,2004,38(增刊):89 [An L,Chen Y,Guo H P *et al.* Atomic Energy Sci. Technol., 2004,38(suppl.):89(in Chinese)]
- [8] 刘荣,蒋励,王玫等. 核技术,2009,32(9):679 [Lin R, Jiang L, Wang M *et al.* Nucl. Technol., 2009,32(9):679 (in Chinese)]
- [9] 温中伟,王玫,林菊芳等. 固体径迹法测量水泥反射体中 $^{252}\text{Cf}$ 中子源反射中子. 中国核科技报告, CNIC-01908,2009:16
- [10] 王玫,温中伟,林菊芳等. 固体径迹法测量 D-D 中子源水泥反射中子. 四川省核电子学与核探测技术 2009 年学术年会论文集,四川宜宾,2009:62
- [11] 鹿心鑫,刘荣,朱通华等. D-T 中子穿透厚聚乙烯板的  $40^\circ$  方向上中子能谱测量. 四川西昌:四川省核学会核物理与加速器专业委员会,2009:113
- [12] Bethe, The Reciprocity Theorem in Neutron Scattering. June 20, 1952 Los Alamos Scientific Laboratory, Technical information Service, Oak Ridge, Tennessee
- [13] 王新华,陈渊,牟云峰等. 核电子学与探测技术,2006,26(2):240 [Wang X H,Chen Y,Mou Y F *et al.* Nucl. Electron. & Detect. Technol., 2006,26(2):240 (in Chinese)]
- [14] 朱传新. 铈(n, 2n)反应截面测量. 中国核科技报告, CNIC-01928,2008:10
- [15] Frehaut J, Bertin A, Bois R. Nucl. Sci. and Eng., 1980, 74:29
- [16] Zhuravlev B V, Kazakov L E, Kononov V N *et al.* Investigations of the Interactions of Neutrons with  $^{238}\text{U}$  Nuclei. International Nuclear Data Committee. INDC (CCP)-154/L, 1980
- [17] Frehaut J, Mosinski G. Measurement of (n, 2n) and (n, 3n) Cross-Sections for Incident Energies between 6 and 15MeV. Proc. Conf. Nuclear Cross Sections and Technology. Washington, D. C., March3—7, 1975, CONF-750303, Vol. 2, 855