

CNIC-00393  
SUINST-0001

CW9200551

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

天然 Fe, Al 中子总截面实验编评

THE EVALUATION OF NEUTRON TOTAL CROSS  
SECTION FOR NATURAL IRON AND ALUMINIUM  
(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

# 天然 Fe, Al 中子总截面实验编评

刘世瑞 王春浩 赵德芳

(四川大学原子核科学技术研究所, 成都)

## 摘 要

收集了 Fe 从 1keV~20MeV 能区中子总截面实验激发函数, 择优推荐了该能区 2277 个能点上的  $\sigma^{\text{Fe}}$  数据; 同时收集了 Al 从 4.07keV~20MeV 能区中子总截面实验激发函数曲线, 择优推荐了该能区 1302 个能点上的  $\sigma^{\text{Al}}$  数据; 还特意推荐了 Fe 在 keV 能区的中子总截面最小值。此外, 还简要讨论了 Fe 和 Al 两种核素的中子总截面共振结构问题。为了建立中重核中子总截面实验编评工作特有的规范, 认真总结了 30 年代至 70 年代这 50 多年间有关 Fe 和 Al 两种核素的全部中子总截面实验工作。针对中重核中子总截面共振结构稠密的特点, 提出了优选  $\sigma_0$  的两个判据:  $\sigma_0$  的精确度与中子源的相关性;  $\sigma_0$  的准确度与中子谱仪分辨率的相关性。

# THE EVALUATION OF NEUTRON TOTAL CROSS SECTION FOR NATURAL IRON AND ALUMINIUM

*(In Chinese)*

Liu Shirui Wang Chunhao Zhao Defang  
(INSTITUTE OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY,  
SICHUAN UNIVERSITY, CHENGDU)

## ABSTRACT

The experimental data of total cross section were collected and evaluated for natural iron in the energy region from 1 keV to 20 MeV and for natural aluminium from 4.07 keV to 20 MeV. The evaluated data were recommended in the regions for them. The minimum values of Fe total cross section in the keV region were specially recommended. The resonance structures were briefly discussed for both Fe and Al. To make the evaluation better, all experimental measurements of neutron total cross section relative to Fe and Al were studied. Considering the resonance feature of medium weight nuclides, two criterions for selecting total cross section were presented: 1) the correlation between the precision of total cross section and neutron source; 2) the correlation between the accuracy of total cross section and the resolving power of the neutron spectrometer.

## 序 言

Fe, Al 两元素中子总截面的测量研究工作是 30 年代中期开始的<sup>[1]</sup>, 前期的目的多是为了通过总截面的研究推算核半径<sup>[2-4]</sup>, 探索可能的核能级, 测定能级间距、共振参数及复合核能级间角动量大小的分布。铁铝作为反应堆防护和结构材料的研究是后来的事, 50 年代初期由于反应堆设计的需要, 人们才开始 Fe, Al 中子总截面的编评工作, 跨进 60 年代, 白光中子源飞行时间法从慢中子区发展到快中子区以后, 中子总截面的测量工作出现了大飞跃。人们为了不同的目的, 在快中子区做了大量的工作, 到目前为止, 研究工作仍在继续进行。

Fe, Al 的中子总截面测量技术, 前期多用单色源单能点透射法, 后期多用白光源宽能区飞行时间法, 测量准确度大多数在 1% 左右, 少数用反应堆慢中子源的测量准确度是 5~10%。

前期测量所用中子源的能散度都比较大, 谱仪的分辨率也不高, 因此发现的共振结构很少, 如 Forsberg 1963 年的编评<sup>[5]</sup>, BNL-325 第二版<sup>[6]</sup>, 在 MeV 能区只观测到少数共振结构。然而从 60 年代后期开始, R. B. Schwartz, Cierjarks, A. D. Carlson 等人先后用白光源高分辨飞行时间谱仪, 分别在 0.5~15MeV, 0.5~32MeV, 0.5~9MeV 能区作了 Fe 和 Al 的中子总截面测量, 结果发现了大量的共振结构, 在 1keV~20MeV 能区, Fe 和 Al 的中子总截面激发函数曲线包含有稠密共振区及连续平滑区两个部分。

Fe 和 Al 的中子总截面测量, 绝大多数是用截面激发函数曲线给出实验测量结果, 只有少数几家单能点测量直接给出测量数据。因此我们提供的 Fe 和 Al 中子总截面推荐数据(已存入中国核数据库), 绝大部分是从激发函数曲线上读取的。考虑到使用者的方便, 既可以获取设计工作直接需要的数据, 同时也可以使设计者有一个直观的物理图象, 因此我们给出了  $\sigma_t$  的推荐数据表, 及原始实验激发函数曲线图。

## 1 $\sigma_t$ 的精确度与中子源

中子截面测量常用的中子源分单色源和白光源(连续谱中子源)两种, 中子的生成装置多用加速器。

### 1.1 单色中子源

单色中子源的生成装置多用 Van-de-Graaff 加速器, 使加速的带电粒子与轻核相互作用生成近于单能的中子, 既能做成连续束也能做成脉冲束, 这种装置最有利于快中子截面测量工作。常用的反应有如下几种:

#### (1) ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$

当质子能量  $E_p \leq 2.3\text{MeV}$  时, 生成的中子能量  $E_n$  从 0.1~0.6MeV, 在这个能区某些实验可达到的最佳能量分辨是 1~2keV。

${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  反应也可以用来产生更高能量的中子, 然而当  $E_p > 2.25\text{MeV}$  以后, 要出现复杂的第二群中子, 这会影响中子源的单色性。

#### (2) $\text{T}(p, n){}^3\text{He}$

当  $E_p \leq 5\text{MeV}$  时, 生成的中子能量  $E_n$  从 1.5~4.2MeV, 在这个能区实验可达到的能量分辨是 2~5keV。当  $E_p > 5\text{MeV}$  以后, 反应就要出现次级过程。

#### (3) $\text{D}(d, n){}^3\text{He}$

当  $E_d$  从 0.1MeV 增至 5MeV 时, 获得的中子能量是  $2.4 \leq E_n \leq 8.2\text{MeV}$ , 在这个能区使用

单色中子的某些实验获得的能量分辨达 20keV。

当  $E_d$  超过 5MeV 以后,即要发生 D 核的分解过程,增加  $\sigma(d, np)$  本底中子。

(4)  $T(d, n)^3\text{He}$

当入射氘的能量是  $0.1\text{MeV} \leq E_d \leq 4\text{MeV}$  时,生成中子的能量是  $14\text{MeV} \leq E_n \leq 21\text{MeV}$ 。当  $E_d > 4\text{MeV}$  以后,就要出现  $T(d, np)T$  本底中子。

上面四种反应生成中子的能量均指向前方向发射的中子。

实验证明使用上述单色源,单能点总截面测量的准确度可高达 1%,然而要想用这种单色源去完成一段能区的截面测量,必须花费很长时间,一个能点一个能点地测量。这样必然增加了偶然误差及系统误差,获得的数据重复性很差,因而统计精确度不高。

## 1.2 白光中子源

利用高能电子或带电粒子与重核相互作用能生成宽能区的连续快中子谱,经慢化也能获得慢中子谱。常用的白光源中子源生成装置有电子直线加速器、同步回旋加速器及等时性回旋加速器,应用较多的是电子直线加速器。

电子直线加速器用  $U(\gamma, n)$  反应(电子能量为 100~140MeV)生成连续中子谱<sup>[7,8]</sup>(如图 1 所示),按时间平均,中子流强达  $10^{14}\text{n/s}$ ,提供的中子脉冲持续时间为 5~10ns,实验证明这种白光源接飞行时间谱仪现已达到的能量分辨为 0.3keV(500keV 处)~30 keV(10MeV 处)。

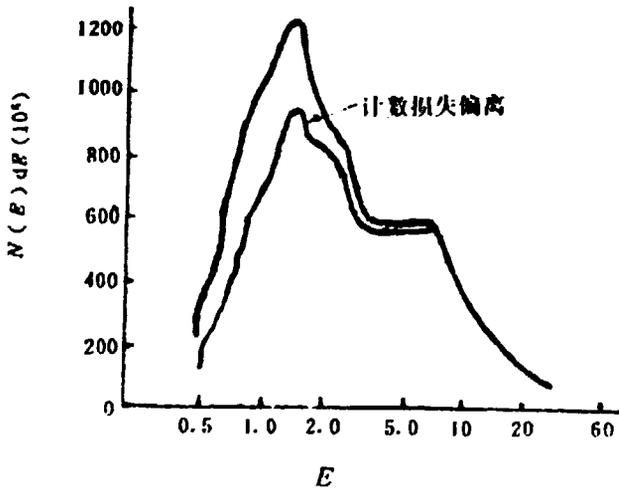


图 1 电子直线加速器获得的典型中子谱

等时性回旋加速器用  $U(d, n)$  反应生成的连续快中子谱<sup>[9-11]</sup>示于图 2, 氘的能量是 6~50MeV, 中子流强按时间平均达  $3 \times 10^{14}\text{n/s}$ , 中子脉冲持续时间为 1ns, 实验证明这种白光源接飞行时间谱仪获得的能量分辨是 0.2keV(0.5MeV 处)~20keV(10MeV 处)。

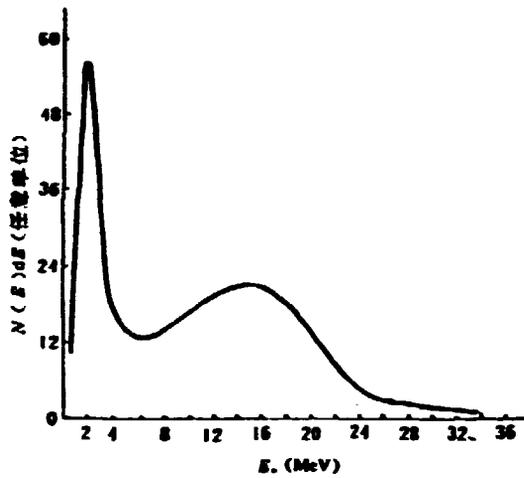


图2 等时性回旋加速器获得的典型中子谱

实验证明,白光源与飞行时间法配合,在一次实验中即可测得宽能区的整条截面激发函数曲线。这不仅比单色源逐点测量速度快得多,而且测量的精度高、能区宽、本底小、分辨率高,尤其是分辨率不受靶厚及入射粒子能散度的影响。另外,白光源中子流强度高,飞行路程可以加长,从而构成优良的几何条件,散入效应也可以不必考虑了。

对比白光源中子谱及其对应能段的中子总截面激发函数曲线,可以看出,截面实验值的统计精确度与中子谱的形状有密切的联系。凡是对应于中子流强度高的能段,其截面实验值的统计精确度高,凡是对应于中子流强度低的能段,其截面实验值的统计精确度较低,凡是对应于中子谱低能始端及高能末端的实验截面值统计精确度更差,甚至表现出明显的波动起伏。白光源在总截面测量中显示出的这种特征,对于不同的白光源并非尽皆相同,因此必须留心重视,这对于分析评价那些使用不同白光源测得同一能段的截面激发函数曲线是极其有用的。例如, R. B. Schwartz 用电子直线加速器生成的白光源测得 15MeV 附近的中子总截面激发函数曲线值,要比 S. Cierjaks 用等时性回旋加速器生成的白光源测得 15MeV 附近的中子总截面值偏高、而且有较大的波动。其原因之一就是由于 R. B. Schwartz 在 15MeV 附近测得的总截面数据正对电子直线加速器生成的白光源中子谱末端的缘故。

## 2 $\sigma_t$ 的准确度与谱仪分辨率

实验数据的准确度是实验值偏离真值尺度的标志,做到实验数据的高准确度是实验工作最根本的要求。中子总截面测量是相对测量,无需测定中子源的通量,因此准确度较高。然而要想准确测量 Fe 和 Al 的中子总截面,还有许多因素需细致考虑。

透射法测量中子总截面的计算公式是:  $\sigma_t = -\frac{1}{nL} \ln T$

这个算式是基于中子在物质中的衰减遵从指数规律的假设推导出来的。

$n$  是每平方厘米透射样品中的原子数,  $n$  是与样品的温度、密度、均匀度、纯度有关的量,只要这些因素中的一个发生变化,都会引起  $\sigma_t$  的变化。对这些因素修正的不准确,就会造成测量数据的误差源,一旦这些因素的修正固定下来,待实验一开始就构成实验数据的固定误差。

$L$  是样品的厚度,对不同实验来说,有可能与  $n$  修正时带入的固定误差一起构成系统误差。

$T$  是样品的透射率,其数值是有样品与无样品时净计数率之比,测量值的准确性取决于本底扣除、死时间修正、内散射修正以及计数的统计性等。这些因素的修正误差对于测量中的固定误差、偶然误差、系统误差都可能做出贡献。

以上因素即使做到误差很小,对于 Fe 和 Al 在稠密共振区的中子总截面测量来说,只能认为测量值的精确度很高,而准确度不一定很好。只有在共振峰完全被分解的情况下,高精度的测量才可能是接近真值的高准确度测量。如果谱仪的分辨率还不能分解出共振峰,其测量的结果必然使测量的峰值低于共振峰的真值,或使测量的谷值高于共振峰谷的真值。因此可以说在稠密共振区高准确度的测量,除与前面讨论的修正因素的误差有关以外,还取决于谱仪的分辨率。谱仪的分辨率愈高,共振结构分解得愈清楚, $\sigma_{\text{t}}$  与  $\sigma_{\text{a}}$  的测量值就愈准确。

### 3 高分辨数据的评价与推荐

#### 3.1 对 $\sigma_{\text{t}}$ 数据的评价与推荐

$\sigma_{\text{t}}$  的激发函数曲线在 1keV~6MeV 能段共振结构很复杂,无法实现多家拟合,因此分能段并优选一家测量结果作为推荐值。1~60keV 及 250~410keV 推荐 Hibdn(57)的测量值;60~250keV 推荐 Rohr(66)的测量值;410keV~500keV 从 BNL-325(76)上读取数据;0.5MeV~9MeV 推荐 Carlson(70)的测量值;9MeV~20MeV 推荐 Cierjaks 的测量值。以上测量都是给出截面激发函数曲线,没有给出实验数据表,我们推荐的数据表 1 和 2 是从各家测得的截面激发函数上读下来的,读数时带进的截面绝对误差小于 25mb。

##### 3.1.1 几家高水平的实验测量

(1)Hibdn(1957,ANL)<sup>[12]</sup> 在静电加速器上采用薄 Al 金属靶,通过  ${}^7\text{Li}(p,n)$  反应产生近乎单能的可变能量的中子,记录装置是由 86 个 BF<sub>3</sub> 正比计数管组成,排列放在石蜡圆筒中,石蜡圆筒又放在大的防护箱内,记录相对于质子束方向为 120°角发射的中子(120°角发射的中子能量分散大约只有向前方向发射的中子能量分散的 1/2),中子的能量分散从 0.3~0.7keV。测得 1~410keV 能区 Fe 的中子总截面激发函数曲线。

控制质子能量在 2.07MeV 附近,中子产额几乎不变。但是测量的能量分辨率不太高,所以测得的截面峰值偏低,而截面谷值又偏高。例如本实验在 242keV 处的截面峰值是 4.156b,而 Rohr1966 年在 KFK 测量 244keV 处的截面峰值是 5.400b,本实验在 25.5keV 处的截面谷值是 0.7b,而 Rahn<sup>[20]</sup>1972 年在哥伦比亚大学测得 24.4keV 处的截面谷值是 0.51b。

到目前为止,1~60keV 及 250~410keV 两个能段内尚无更高分辨率的测量,因而暂取该实验在这两个能段的测量作为推荐数据。

(2)Rohr<sup>[13]</sup>(1966,KFK) 用飞行时间法测量了天然 Fe 在 60~250keV 能区的中子总截面。中子源是一台脉冲化的 3MeV 范德格拉夫加速器,采用  ${}^7\text{Li}(p,n)$  反应生成中子,脉冲宽度为 1ns,飞行路程是 10m,谱仪的时间分辨率约为 0.39ns·m<sup>-1</sup>。

使用的探测器有两种:较低能段使用硼板探测器,硼板被 4 个平行联接的 NaI(Tl)闪烁探测器环绕着。这种安排大大降低了本底,而且本底与时间无关。硼板探测器的分辨时间是 2.8ns。较高能段使用塑料闪烁体与 2 个光电倍增器连成符合形式,用以甄别掉倍增器噪音。这种探测器的时间分辨率为 3.9~3ns。

该实验的分辨率较高,几何条件优良,本底也较小,故作为 60~250keV 能段的推荐数据,其截面激发函数曲线示于图 3。

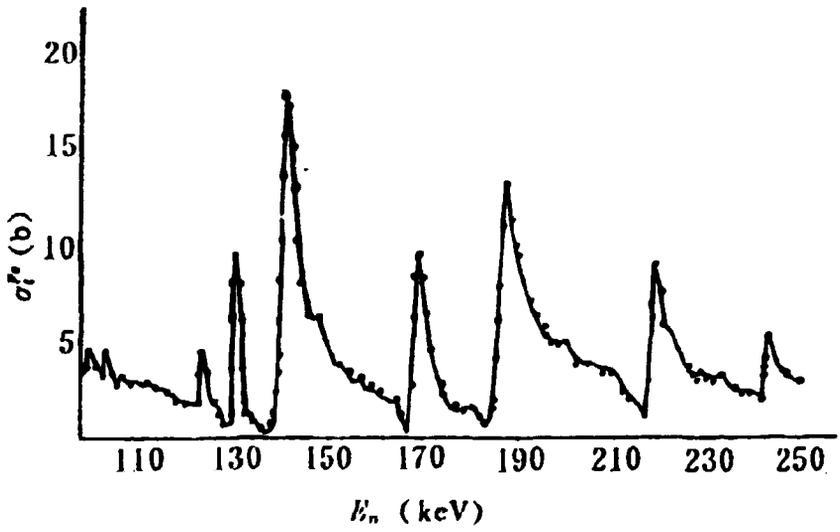
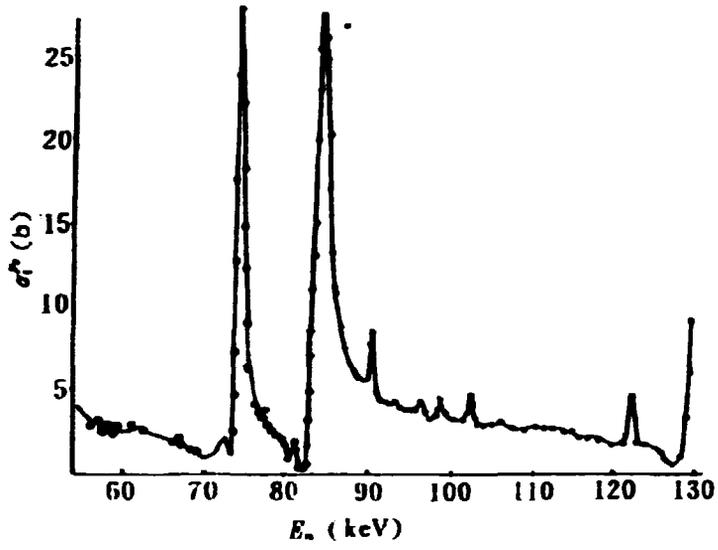


图3  $\sigma_n^d$  的微发函数(60~250keV)

(3) A. D. Carlson<sup>[3]</sup>(1970, GA) 用大型快中子飞行时间谱仪, 完成了天然 Fe 在 0.5MeV~9MeV 能区的中子总截面测量, 获得全能区单条总截面激发函数曲线。中子源是用电子直线加速器经  $U(\gamma, n)$  反应生成白光谱, 脉冲宽度是 7ns, 中子流强是  $10^{11} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 飞行路程是 226.75m, 谱仪最佳分辨率是  $0.035 \text{ns} \cdot \text{m}^{-1}$ , 时幅分析器的道宽是 1.6ns, 记录系统用电子计算机。样品是标准的 Armco 铁, 化学纯度是 99.94%, 厚度是 0.386nuclei/b。

用两个  $^3\text{He}$  探测器监测中子通量, 用一个 3.1cm 厚的铀过滤器减少  $\gamma$  脉冲的影响, 用一个厚 5cm、半径 2.5cm 的圆柱型 NE-211 闪烁体接 56AVP 光电倍增管探测中子, 用  $\gamma$  脉冲的时间分布确定中子脉冲宽度, 用电子甄别器去掉大的  $\gamma$  射线对低能中子测量的干扰, 用精度  $\approx 0.01\%$  的光电测距仪测量飞行路程, 将影响谱仪分辨率的各个因素的时间分布转换成等效的高斯分布, 再根据各个分布极大值半高处的等效宽度之和的均方根计算出谱仪的总分辨率是  $0.039 \text{ns} \cdot \text{m}^{-1}$  (1MeV 处)  $\sim 0.035 \text{ns} \cdot \text{m}^{-1}$  (9MeV 处), 并且用碳在 2.076MeV 处的共振宽度做了校核, 获得的分辨率是  $0.036 \text{ns} \cdot \text{m}^{-1}$ , 这就证明了测量值与计算值符合得很好。

控制测量时间在 1h 之内, 从而有效地消除了电子设备的漂移及中子谱微小变化带来的小误差, 测量时的本底计数小于 1%, 由于几何条件最佳, 内散射小于 0.001%, 可以忽略, 对死时间也做了修正。

本工作的特点是分辨率高, 各项误差修正仔细, 在 0.5~4MeV 能区统计误差是 3%~5%, 4MeV 以上能区统计误差是 2%~4%。与 Cierjaks 的测量对比(参见图 5), 共振结构及中子能量标度都符合得相当好, 而且截面激发函数的分辨还好于 Cierjaks 的测量结果, 因此某些共振峰的峰值更高、谷值更深, 是目前最好的工作。所以 0.5MeV~9MeV 能区推荐 A. D. Carlson 的工作, 全能区总截面激发函数见图 4。

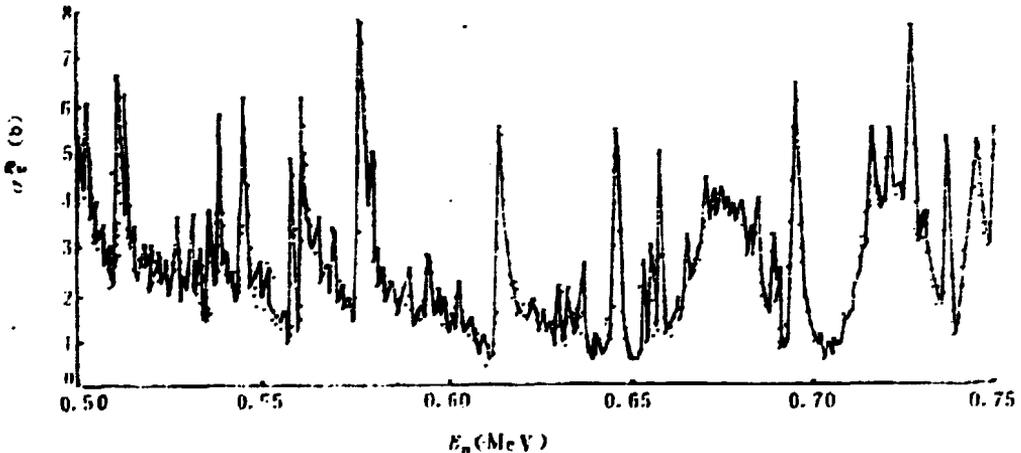


图 4-1  $\sigma_T^{\text{Fe}}$  的激发函数(0.50~0.75MeV)

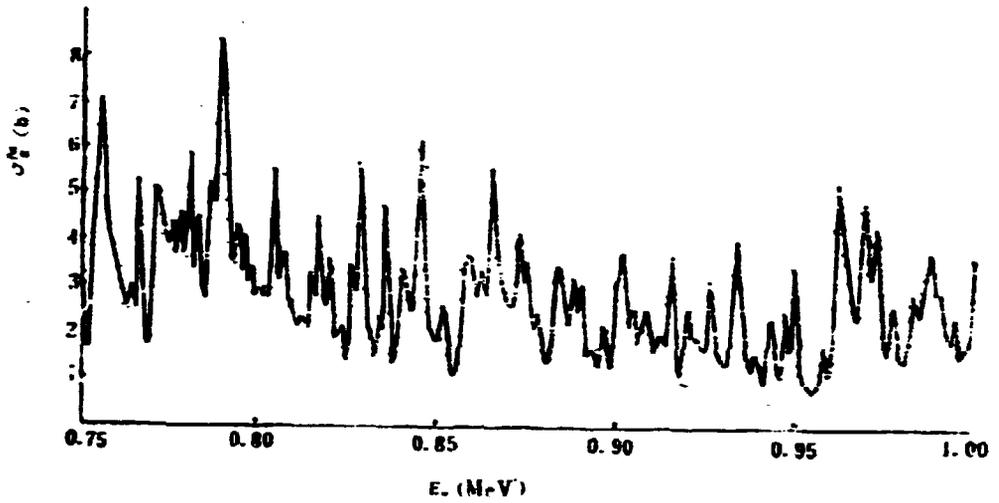


图 4-2  $\sigma_{differential}^{p,p}$  的激发函数(0.75~1.00MeV)

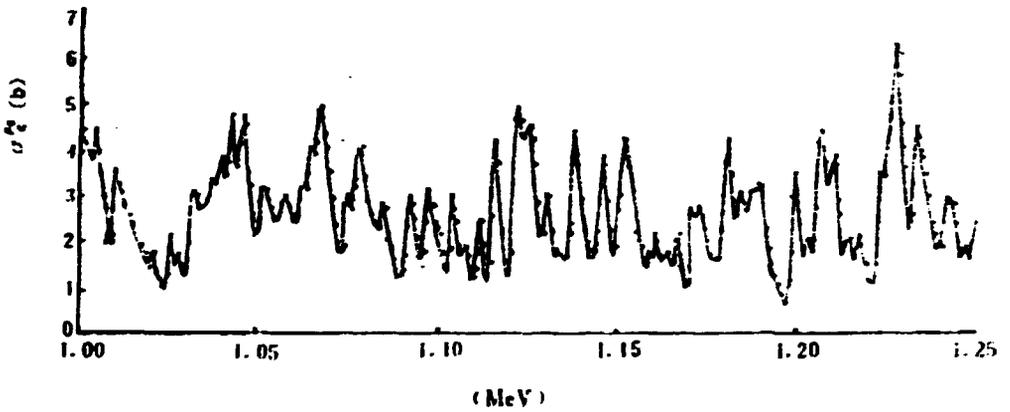


图 4-3  $\sigma_{differential}^{p,p}$  的激发函数(1.00~1.25MeV)

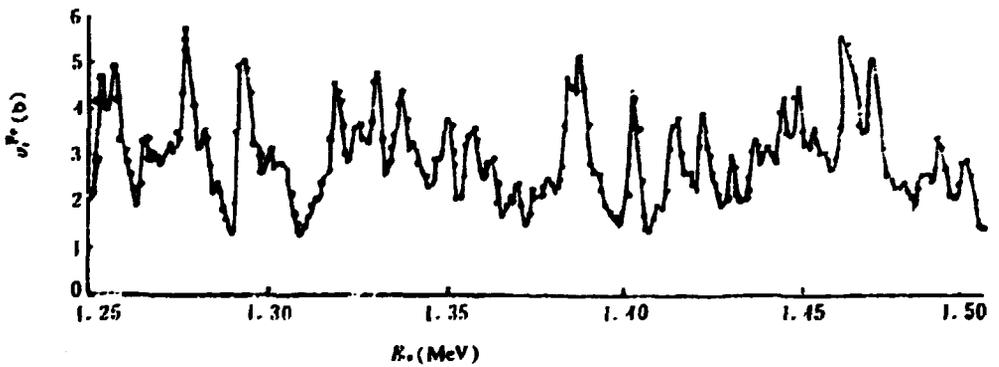


图 4-4  $\sigma_{differential}^{p,p}$  的激发函数(1.25~1.50MeV)

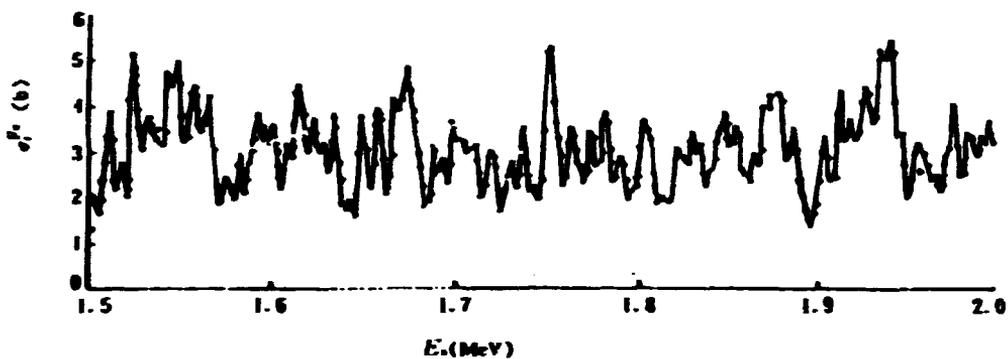


图 4-5  $\sigma^D$  的激发函数(1.5~2.0MeV)

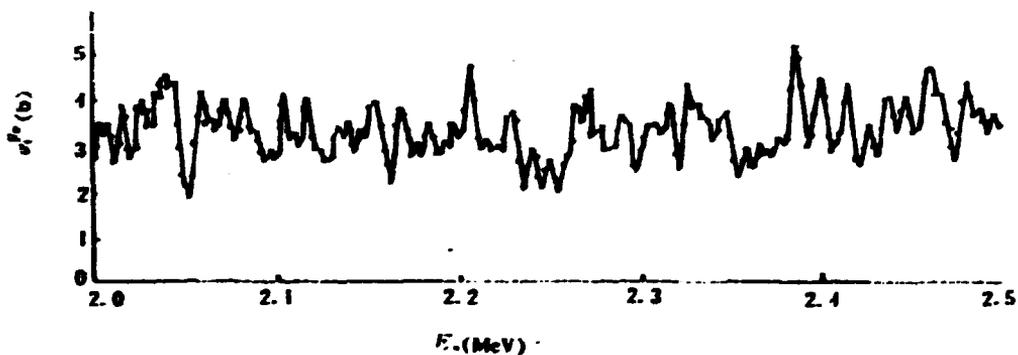


图 4-6  $\sigma^D$  的激发函数(2.0~2.5MeV)

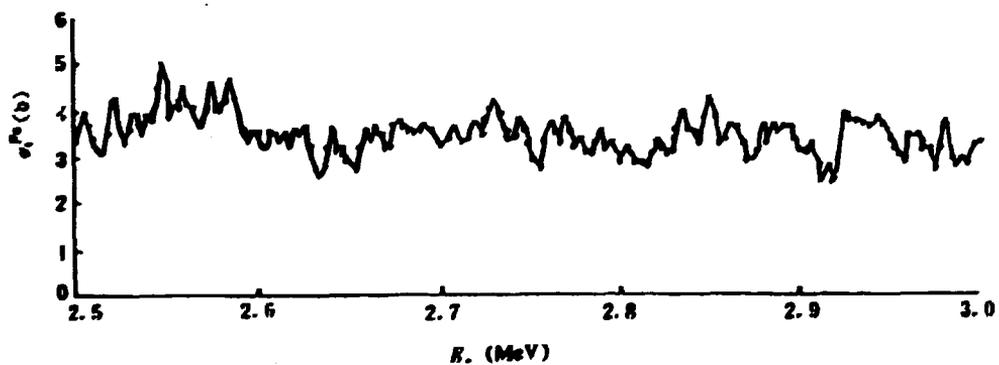


图 4-7  $\sigma^D$  的激发函数(2.5~3.0MeV)

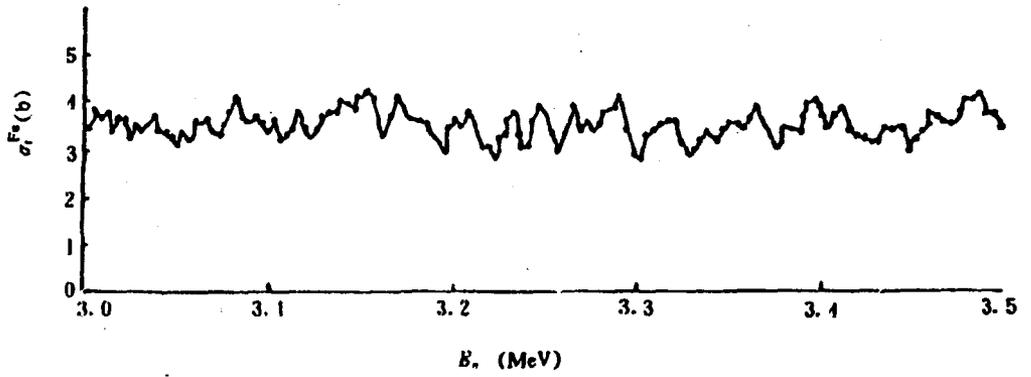


图 4-8  $\sigma_{f^0}$  的激发函数(3.0~3.5MeV)

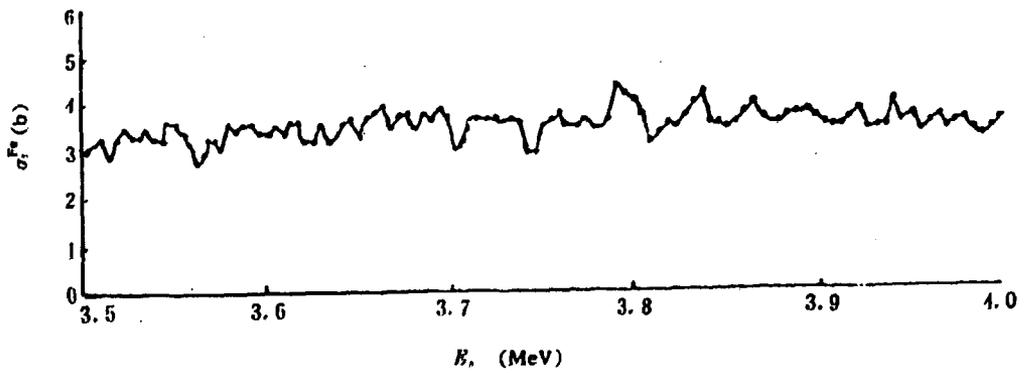


图 4-9  $\sigma_{f^0}$  的激发函数(3.5~4.0MeV)

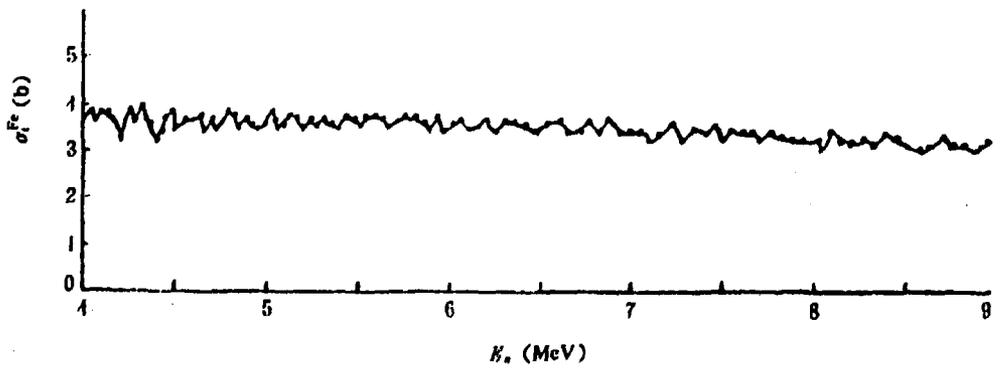


图 4-10  $\sigma_{f^0}$  的激发函数(4~9MeV)

(4) Cierjarks<sup>[14]</sup> (1968, KFK) 用大型快中子飞行时间谱仪完成了天然 Fe 在 0.5~32MeV 能区的中子总截面测量, 获得了全能区整条截面激发函数曲线。中子源是用等时性回旋加速器经 U(d,n) 反应生成白光源, 中子脉冲宽度为 1ns, 中子流强是  $2 \times 10^{14}$  n/s, 飞行路程为 57.393m, 获得谱仪的最佳分辨是  $0.043 \text{ ns} \cdot \text{m}^{-1}$ , 记录系统用 1ns 道宽的  $2 \times 8000$  道时间分析器, 并接有“在线”计算机自动记录。

对样品厚度、纯度都作了准确的测量, 尤其对死时间效应作了特别认真的复查, 并给出精确的修正表。

该工作的特点是: 几何条件优良, 测量能区最宽, 中子流强度高, 谱仪分辨率高, 观测到的共振结构最多, 是 Fe 在 MeV 能区具有代表性的高分辨高精度的测量。所以 9~20MeV 能段推荐 Cierjarks 的工作。

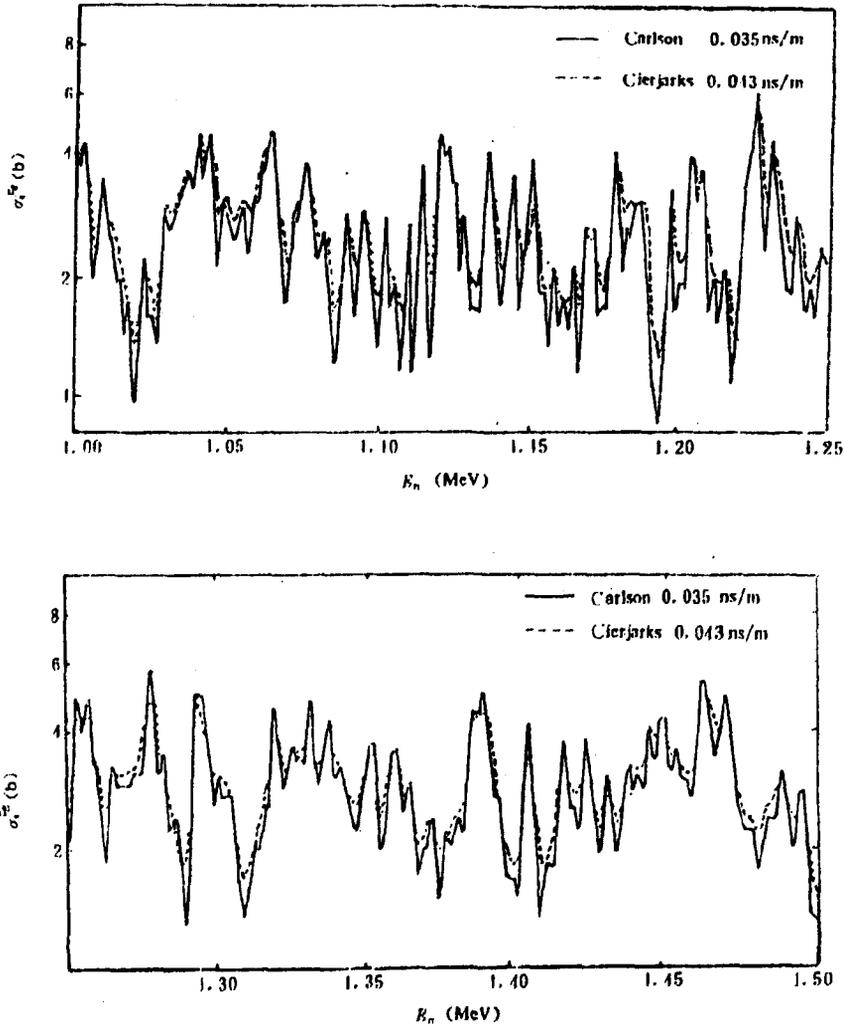


图5 Carlson 与 Cierjarks  $\sigma_t^{\text{Fe}}$  测量值的比较(1~1.5MeV)

### 3.1.2 有参考价值的几家高水平测量

(1)Schwartz<sup>[16]</sup>(1974,NBS) 用飞行路程 40m 的大型快中子谱仪测量了 Fe 在 0.5~15MeV 能区的中子总截面,谱仪分辨率从 0.2ns·m<sup>-1</sup>(0.5MeV 处)~0.08ns·m<sup>-1</sup>(15MeV 处)。中子源用电子直线加速器产生白光源,用 Ca 与 Be 构成组合靶,由 Ca 产生低能中子(中子流强高),由 Be 产生高能中子(中子流强低),获得全能区整条激发函数。

对样品杂质在共振区引进的波动作了修正(3%),对本底、死时间、内散射均作了修正。数据的准确度高于±1%,能量刻度误差为 0.04ns·m<sup>-1</sup>。

该测量属于中等分辨,所以发现的结构比 Carlson 和 Cierjarks 少,而且截面激发函数末端的统计精确度较差。所以选该测量作为参考。

(2)Macgregor<sup>[17]</sup>(1958) 在可变能量回旋加速器上采用 D(d,n)反应产生 7~29MeV 近乎单能的中子,测量了 7 个单能点的中子总截面。

用大的准直屏蔽体限制中子束,以便降低空气散射和各种本底,用温度控制系统稳定电子学测量系统;为了降低电子学可能增加的干扰,采用了几个定标器—甄别器并联的方法;用提高探测器偏压降低 γ 射线和低能中子的干扰,对内散射(<1%)、本底均做了修正,具有代表性的统计误差是 0.5%。

该测量与其他几家高分辨、高准确度测量结果符合得很好,故选作参考。下表是几个能点的测量结果:

$E_n(\text{MeV})$	7.05	8.70	10.22	12.30	14.5
$\sigma^{\text{t}}(\text{b})$	3.62±0.04	3.29±0.04	3.12±0.03	2.83±0.03	2.54±0.03

(3)Coon<sup>[2]</sup>(1952,LAS) 采用好的几何条件,通过透射实验测量得 14.12±0.04MeV 能点上的中子总截面为 2.60±0.05b。采用 T(d,n)<sup>4</sup>He 反应生成单能中子,用苾晶体闪烁探测器探测中子,样品放于中子源与探测器间的中点,用提高甄别阈限制 γ 射线及散射中子,保持本底低于 1%。

对散入效应(0.13%)、本底(<1%)均作了修正,数据准确度约为 1%,是 50 年代具有代表性的高准确度测量数据,曾为多家实验室所引证,故本文也选作参考。

(4)Goodman<sup>[2]</sup>(1952,ANL) 用 130keV 的氘打击氦(T(d,n)<sup>4</sup>He)反应生成单能中子,用苾晶体闪烁探测器测得 14MeV 中子的总截面为 2.4±0.2b。采用讯号放大后使用甄别的办法避开低于 12MeV 的反冲质子的被探测,对内散射、本底均作了修正,结果与 Coon 的测量在统计误差之内符合,故本文也选作参考。

### 3.2 对 $\sigma^{\text{t}}$ 数据的评价与推荐

1eV~4keV 能段,  $\sigma^{\text{t}}$  不随能量变化,从 BNL-325(76)读取的  $\sigma^{\text{t}}=1.4\pm 0.2\text{b}$ ,作为推荐值;4keV~8MeV 能段,  $\sigma^{\text{t}}$  的共振结构很多,无法实现每家拟合,我们按能段择优选一家测量作为推荐值;4keV~420keV 能段,推荐 Singh(75)的测量值;420keV~500keV 能段,从 BNL-325(76)上读取数值;0.5MeV~20MeV 能段,推荐 Cierjarks(68)的测量值。

Singh(75)和 Cierjarks(68)的测量都是给出截面激发函数曲线,没有给出截面数据表,我们推荐的  $\sigma^{\text{t}}$  数据(表 3 和 4)都是从  $\sigma^{\text{t}}$  的激发函数上读下来的,读数误差绝对值 ≤ 25mb。

#### 3.2.1 几家高水平的实验测量

(1)Singh<sup>[14]</sup>(1975) 用大型快中子飞行时间谱仪测量了天然 Al 在 4keV~420keV 能段的中子总截面,获得全能段截面激发函数曲线,用同步回旋加速器产生白光源中子流,在全能区的量程为 40ns,谱仪的总分辨率约为  $0.2\text{ns} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

用光谱仪对 Al 样品作了杂质分析,发现含有 Fe, Si, Cu, 实验证明 Si 和 Cu 对  $\sigma^A$  没有贡献,只有  $^{56}\text{Fe}$  在 28keV 处约有 0.3b 的贡献。

该测量是 keV 能区的高分辨率高精度测量,故予以推荐。

(2)Cierjarks<sup>[14]</sup>(1968, KFK) Al 的中子总截面测量与 Fe 的中子总截面测量是同时间、同实验室、同设备、同由 Cierjarks 测量,详见 Fe 的评价部分。差别是  $\sigma^A$  的测量飞行路程是 57.228m,谱仪的总分辨率  $\Delta t = 2.7\text{ns}$ ,测量能区是 0.5~32MeV。

该测量是高分辨率高精度的,观测到的共振结构最多,是目前最好的数据,故予以推荐。

### 3.2.2 有参考价值的几家实验数据

(1)Schwartz<sup>[16]</sup>(1974, BNS) 该家  $\sigma^A$  与 Fe 的总截面测量属于同实验室、同实验工作者,详见 Fe 的评价部分,  $\sigma^A$  的测量能区是 0.5~15MeV,给出了全能段激发函数曲线。

该测量是中等分辨,共振区测到的结构比 Cierjarks 测得的结构少,而且在 10MeV 以后截面值波动较大,14MeV 以后的截面值又比 Cierjarks 的测量值偏高,这可能是中子流造成的影响。

(2)Macgregor<sup>[17]</sup>(1958) 该  $\sigma^A$  与 Fe 的中子总截面测量属于同实验室、同设备、同由 Macgregor 测量,详见 Fe 的评价部分,测量结果如下:

E, (MeV)	7.01	8.68	10.46	12.70	13.97
$\sigma^A(\text{b})$	$1.99 \pm 0.22$	$1.79 \pm 0.02$	$1.69 \pm 0.01$	$1.77 \pm 0.02$	$1.75 \pm 0.02$

该测量数据与其他几家高分辨率高准确度测量符合得很好,选作参考。

(3)Coon<sup>[2]</sup>(1952, LAS) 该  $\sigma^A$  与 Fe 的测量属于同实验室、同设备、同由 Coon 测量,中子能量为  $14.12 \pm 0.04\text{MeV}$  的测量结果是  $\sigma^A = 1.73 \pm 0.03(\text{b})$ ,是 50 年代具有代表性产测量值,准确度达  $\approx 1\%$ ,该数据曾为每家有关实验引证,很有参考价值。

(4)Goodman<sup>[2]</sup>(1952, ANL) 该  $\sigma^A$  与 Fe 的测量属于同实验室、同设备、同由 Goodman 测量,14MeV 处的测量结果是  $1.8 \pm 0.1(\text{b})$ ,该测量与 Coon 的数据在统计误差内符合。

(5)Forsberg<sup>[19]</sup>(1963, AE) Forsberg 等人基于对 1963 年以前文献的调研和理论内插及估算,编评了天然 Al 从热能到 100MeV 能区的中子总截面,目的是为反应堆设计编制一份最佳截面数据表。

我们将这份编评与我们推荐的几家数据描在同一张图上比较,表明这份编评在 MeV 能区没有发现什么尖锐的共振结构,这就说明 1963 年以前中子谱仪的分辨率很低,能观测到稠密共振结构只是快中子飞行时间谱仪问世以后的事。

这份编评在 8MeV 以后的数据与我们推荐的几家高准确度测量,在统计误差之内符合,因此我们推荐作为参考。

这份编评在 1eV~4keV 能段的截面  $\sigma^A = 1.40\text{b}$ ,与 BNL-325(76)在 1eV~4keV 能段的截面值符合得很好,所以我们选取  $1.4 \pm 0.02\text{b}$  做为该能段的推荐值,0.02b 是我们给的误差。

#### 4 keV 能区 $\sigma_{Fe}$ 最小值的意义

keV 能区 Fe 的中子总截面最小值对于反应堆设计是具有特别重要意义的物理参数。铁及其钢制品或其他合金形式作为反应堆的结构材料,往往由于 Fe 的中子总截面在某些能级存在最小值而构成大量漏失中子的“空穴(holes)”,这些空穴允许相应能量的中子深度穿透,从而为解决防护问题造成严重困难,尤其会给增殖堆中有效倍增系数带来难以接受的错误。所以准确测定 keV 能区 Fe 的中子总截面最小值就成为一个十分重要的工作。

F. Rahn<sup>[20]</sup>(1972), I. Langner<sup>[21]</sup>(1968), Malaviy<sup>[22]</sup>(1970)都做了 keV 能区中子总截面最小值测量, Honeck<sup>[23]</sup>(1966, ENDF/B- I)和 penny<sup>[24]</sup>(1971, ENDF/B- I)也做了 Fe 中子总截面最小值的编评。我们推荐 F. Rahn 的测量值,并附 ENDF/B- I 的编评与之对照,数据列于下表。

$E_n(\text{keV})$	$\sigma_{Fe}(b)$ Rahn <sup>[20]</sup>	$\sigma_{Fe}(b)$ ENDF/B- I Mat <sup>o</sup> 1124
22.4	0.51	0.28
82	0.61	1.19
128	0.81	1.07
137	0.47	0.69
168	0.57	1.01
183	0.80	0.33
219	0.78	1.35
272	0.71	1.04
311	0.67	1.05
352	0.71	0.50
357	0.85	0.40
374	0.79	0.67
467	0.93	0.48

F. Rahn 的测量是用哥伦比亚大学大型快中子飞行时间谱仪,飞行路程是200m,用 Nevis 同步回旋加速器产生的白光源中子流,谱仪的总分辨率约为 $0.6\text{ns}\cdot\text{m}^{-1}$ 。实验采用“透射率差异法”完成了截面最小值的测量,对样品作了杂质分析,证明含 C-0.15%、含 Mn-0.41%,对 C 和 Mn 的贡献作了修正。由于采用透射率差异法,因而既准确地解决了本底鉴定问题,又大大减少了计数堆集问题。

图6是 F. Rahn 的测量结果。Rahn 指出自己的测量值比 Langner 的测量值偏低,而且认为自己的数据要可靠得多,同时还指出他在168keV, 219keV, 357keV, 375keV 和467keV 附近的截面最小值的可靠性要比低能量处的截面最小值的可靠性差一些。

在24.4keV 处 Rahn 测得的中子总截面最小值是 $0.51 \pm 0.02(b)$ , KEDAK 数据库的数据是 $0.557(b)$ , ENDF/B- I 的数据是 $0.156(b)$ , ENDF/B- II 的数据是 $0.28(b)$ , Malaviya(1970)从测量的完整谱得出结论, ENDF/B- I 和 ENDF/B- II 的数据过分偏低,倾向选择 KEDAK 的数据。

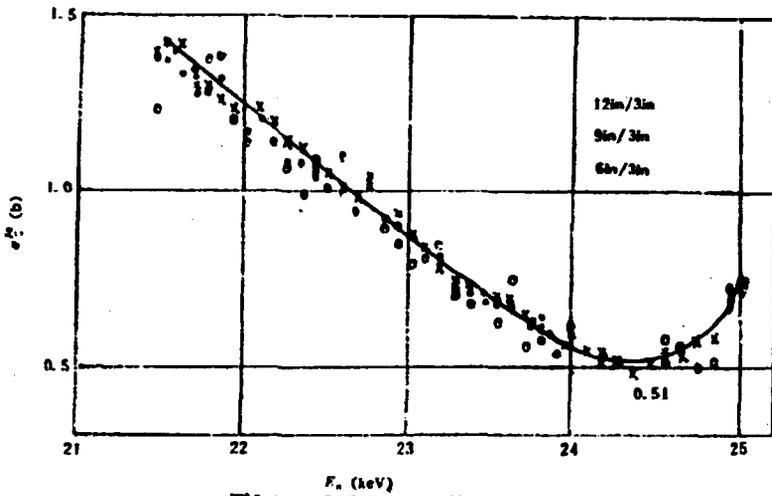


图6-1  $\sigma_p^0/\sigma_n^0$  在24.4keV的最小值

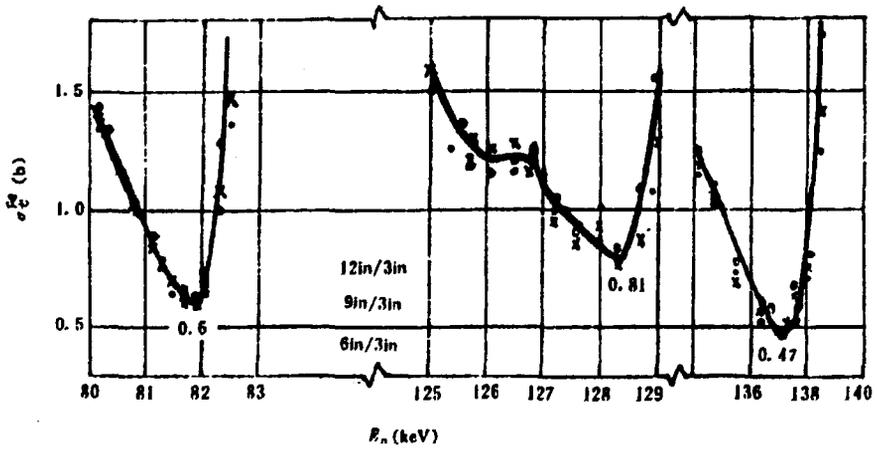


图6-2  $\sigma_p^0/\sigma_n^0$  在82,128,137keV的最小值

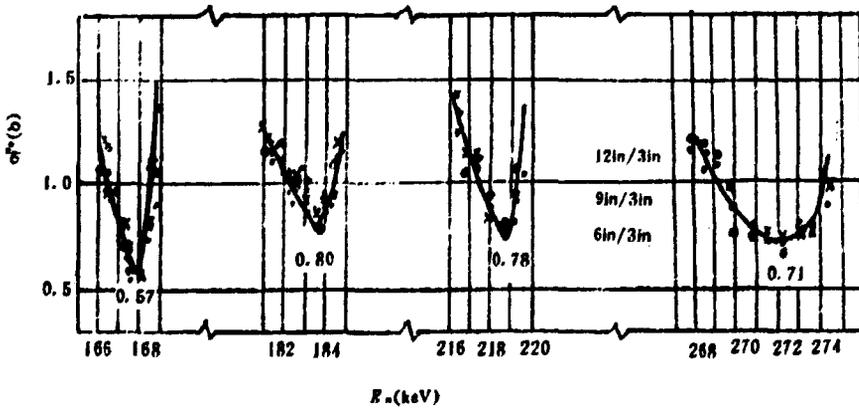


图6-3  $\sigma_p^0/\sigma_n^0$  在168,183,219,272keV的最小值

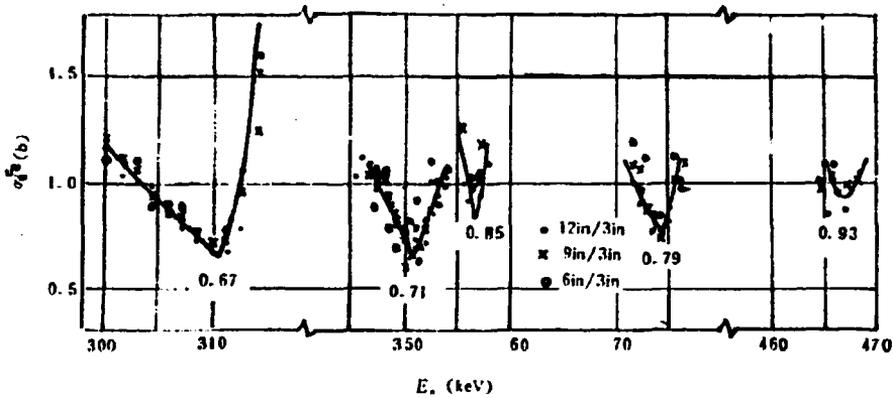


图6-4  $\sigma_n^0$  在311, 352, 357, 374及467keV的最小值

## 5 关于结构问题的讨论

60年代以前, Fe 和 Al 的中子总截面测量研究工作只在 keV 能区 ( $\approx 1 \sim 500 \text{keV}$ ) 观测到一些共振结构<sup>[12, 13, 14]</sup>。进入60年代以后, 白光源大型快中子飞行时间谱仪问世, 开始发现 Fe 和 Al 在 MeV 能区 ( $\approx 0.5 \sim 6 \text{MeV}$ ) 有大量的共振结构<sup>[15-16]</sup>, 而且谱仪的分辨率愈高观测到的结构愈多。然而在稠密共振区 (0.5~4MeV) 能级宽度与能级间隔仍有那么多的重迭。根据这种现象可以预知, 还有一些共振结构没有被观测到, 只有进一步提高谱仪的分辨本领, 才有可能使 Fe 和 Al 的全部共振结构被分解出来, 那么 Fe 和 Al 在 MeV 能区究竟有多少共振结构呢? 尚且难以做出肯定结论, 有待于日后的实验测量给出解答, 当然有的结构也许永远不会被分解出来。

目前国外一些实验室正在致力于提高谱仪分辨率的研究工作<sup>[8-10, 25-28]</sup>, 尽力改进测量系统的分辨时间, 提高中子流的流强, 优化脉冲宽度, 以便实现谱仪分辨本领的进一步提高, 使尽可能多的结构被分解出来。

必须指出, 在 Fe 和 Al 的共振结构尚未完全分解出来之前, 稠密共振区的现有测量数据的准确度是不好定论的, 实际上只能给出测量精确度。

## 6 结束语

本文推荐了 Fe 从 1keV~20MeV 能区的中子总截面实验数据, 除去  $\sigma_n^0$  在 1~60keV 及 250~410keV 两个能段的数据较老以外, 其余数据均系高分辨率高精度的测量。因此建议今后注意追索 Fe 在 1~60keV 及 250~410keV 两个能段的新测量。

本文推荐了 Al 从 1eV 到 20MeV 能区的中子总截面实验数据, Al 在 eV 能段的  $\sigma_n^0$  是一个不随  $E_n$  变化的常量, 我们推荐该能段的  $\sigma_n^0$  值是从 BNL-325(76) 上读取的。

Fe 在 keV 能区的中子总截面最小值, 对反应堆防护及增殖堆有效倍增常数  $k$  的设计都具有重要的意义, 目前国外也很重视这项参数的测量。我们在这次编评中特别推荐了 keV 能区 Fe 的中子总截面最小值, 希望今后还需继续跟踪追索扩大能区。

## 参 考 文 献

- [1] Dunning, *Phys. Rev.*, 48, 265 (1935)
- [2] J. H. Coon, *Phys. Rev.*, 88, 3, 562 (1952)
- [3] Goodman, *Ibid.*, 88, 3, 686 (1952)
- [4] C. T. Hibdon, *Ibid.*, 114, 1, 176 (1959)
- [5] L. Fornsberg, AE-117 (1963)
- [6] J. R. Stehn, BNL-325 (1964)
- [7] Lopez, W. M., Report GA-782 (1967)
- [8] S. Cierjacks, *Nuclear Data for Reactions 2* (1970)
- [9] S. Cierjacks, *Rev. Scient. Instrum.* 39, 1279 (1968)
- [10] H. H. Barshall, *Phys. Today*, 8, 59, (1969)
- [11] S. Cierjacks et al., *Conference on neutron cross section and technology*, 2 743 (1968)
- [12] C. T. Hibdon, *Phys. Rev.*, 108 414 (1957)
- [13] Rahr, 66 Paris I 137 (1966)
- [14] S. Cierjacks, KFK-1000 (1968)
- [15] R. B. Schwartz, NBS-138 (1974)
- [16] A. D. Carlson, NSE 42 28 (1970)
- [17] M. H. Macgregor, 58 Geneva 14 109 (1958)
- [18] U. N. Singh, *Phys. Rev.* V11, NO4 1117 (1975)
- [19] L. Fornsberg, AE-117 (1963)
- [20] F. Rahr, NSE 47 372 (1972)
- [21] L. Langner, KFK-750 (1968)
- [22] K. Malaviya, et al., *Trans. Am. Nucl. Soc.* 13 757 (1970)
- [23] H. C. Honeck, BNL-50066, ENDF-102 (1966)
- [24] S. K. Penny, ORNL-4617 (1971)
- [25] W. M. Lopez et al., GA-7820 (1968)
- [26] E. A. Strorker, *Nucl. Instrum. Methods*, 97 275 (1971)
- [27] R. L. Macklin et al., *Ibid.*, 91 565 (1971)
- [28] S. T. Friesenhahn, *Ibid.*, 93 477 (1971)
- [29] P. Staler et al., *Ibid.*, 91 541 (1971)

天然 Fe, Al 中子总截面实验编译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社激光照排中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本787×1092 1/16 ·印张1·字数24千字

1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷

印数1—100

ISBN7-5022-0293-5

TL·115

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



ISBN7-5022-0293-5  
TL·115

P.O.Box 2103  
Beijing, China

**China Nuclear Information Centre**