

# 关于聚变中子学积分实验研究

沈冠仁

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘 要** 聚变中子学积分实验研究是当前国际上聚变堆设计中的重要研究课题. 在对国内外的实验研究工作进行仔细调研的基础上, 提出了充分利用中国原子能科学研究院将建成的强流短脉冲高压倍加器和配套的实验测量设备, 开展高水平的聚变中子学积分实验研究的必要性和重要性、近期和较长远的实验工作设想.

**关键词** 聚变中子学, 积分实验研究, 14MeV 中子.

## 1 引 言

聚变中子学积分实验研究是当前国际上的热门研究课题. 它起源于核武器研制的需要, 现已逐步发展到军民两用的实验研究项目中. 其研究内容涉及聚变反应装置研究的各个方面. 例如, 评价中子核数据的基准积分检验, 核武器选用材料、部件和设计思想的积分检验, 聚变堆包层的能量沉积、连续工作的燃料循环-氙的生产和在聚变-裂变混合堆中裂变燃料增殖, 堆第一壁的中子增殖、结构和屏蔽材料选择, 设计需要的专项积分量测量, 总体设计思想的检验等. 它是进行精确的聚变中子学计算、保证总体设计思想的正确、提供工程设计中需要的一些积分量、使用材料的合理选择和应用、降低成本和提高工程的成功率等, 不可缺少的实验研究方法. 无论对核武器研制, 还是聚变堆研究, 都是非常重要的. 我国已把聚变能源研究列入 863 高科技项目. 在堆芯的等离子体物理方面已投入较大的力量开展研究工作, 无论是托卡马克型磁约束等离子体, 还是强激光惯性约束聚变, 都已取得了不少研究成果. 但我国聚变中子学积分实验工作还开展得很少.

## 2 现 状

国际上已进行了大量的聚变中子学积分实验研究工作. 早期为了原子弹和裂变反应

堆设计和制造进行裂变中子学积分实验研究. 50 年代末, 由于热核武器研制的需要, 开展了聚变中子学积分实验研究. 随着热核武器的发展及聚变能研究的深入, 研究工作在不断扩大, 对实验设备的要求也越来越高. 目前, 聚变中子学积分实验研究, 主要围绕着 D-T 反应产生的 14MeV 中子源进的.

### 2.1 积分实验工作的国际现状

#### 2.1.1 评价中子核数据的基准实验

50 年代以后, 美国、西欧、前苏联、日本、国际原子能机构和我国等先后建立了 ENDF/B、JEF、BROND、JENDL、FENDL 和 CENDL 等评价中子数据库, 它们是各国进行聚变中子学计算的基础数据. 美国还建立了专供核武器研制用的 ENDL 库. 为了不断地改进这些评价中子数据和提高质量, 各国都进行了大量的基准积分实验和中子学计算工作. 例如, 美国 LBL 实验室于 1971 年发表脉冲球计划, 在随后的二十多年内, 在 LBL 的绝缘芯变压器中子发生器上, 用脉冲中子源和快中子飞行时间谱仪以及其他测量设备, 并与 LANL、ORNL 和 GAI 等实验室合作, 对美国 ENDF/B 库和 ENDL 库数据进行基准积分实验. 也对中子学计算理论模型和计算机程序进行检验. 前苏联及欧洲部分国家为 JEF 和 BROND 库数据进行了大量类似的测量工作.

80 年代以来, 日本利用原子能研究所的

聚变中子源装置和大坂大学强流短脉冲中子发生器,进行了大量的脉冲球实验,用于 JENDL 库评价中子数据的检验.配合脉冲球实验,大坂大学在 OKTAVIAN 设备上采用简单的单元素板状几何样品,脉冲中子源置于样品外面,用 TOF 方法测量泄漏中子谱,进行基准积分实验工作.同时测量不同角度的穿透中子谱,检验次级中子双微分截面在中子学计算中的作用.

国际原子能机构核数据科在 ENDF/B-VI、JEF-2、BROND-2 和 JENDL-3 库数据基础上,为国际热核聚变实验反应堆 ITER 建立的 FENDL 库,正合作进行基准积分实验和中子学计算工作,并不断地进行修改.

### 2.1.2 专项积分量测量

专项积分量测量是为聚变堆材料选择和部件设计进行的积分实验.通常用单元素或合金或复合材料做实验样品,在有 14MeV 中子的几个平均自由程(mfp)厚度时,质量一般为几十千克,也有重达数吨的.在一定几何形状的宏观样品上,进行诸如裂变率分布  $P_f(R)$ 、造氙率分布  $P_T(R)$ 、 $(n, \gamma)$  俘获率、中子能谱测量(包括穿透和泄漏中子能谱),中子倍增率  $M$ 、透射率  $T$ 、 $\eta$  值以及积分反应截面等专项积分量测量,以满足设计工作的需要.这类样品的加工难度大,价格也高.

60 年代以来, $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$  等核的裂变率分布  $P_f(R)$ 、 $(n, \gamma)$  俘获率, $^6\text{Li}$ 、 $^7\text{Li}$  的造氙率分布  $P_T(R)$  一直是重点测量的参量.1961 年英国原子武器中心(AWRE)进行的有名的 Weale 实验,70 年代在 LANL 进行的浓缩铀球实验( $^{235}\text{U}$  的浓度为 93.5%),及金属锂球和氘化锂球实验等,已经取得了很好的成果.

Pb 和 Be 是聚变堆中子增殖层的重要候选中子倍增材料,对提高其中子倍增率  $M$  以及穿透和泄漏中子能谱等积分量的精度和质量有重要的意义.80 年代以来,国际上许多实验室都在进行这样的测量.国际原子能机构组织国际合作进行测量,相互比对.这些实验数据中的分歧和矛盾还没有全部解决.

一些重要的结构和屏蔽材料(如 Fe、Co、Ni、Mn、Cu、V 及其合金材料不锈钢、钒合金等)的辐射损伤研究,例如气体产生截面、中子透射率  $T$  及一些积分反应截面,如长寿命放射性核素产生反应等,将是专项积分量测量的另一个重点.

### 2.1.3 面向聚变装置设计的积分实验

面向设计的积分实验是在根据物理思想概念设计建立的核聚变装置上进行的实验,用来检验总体思想的可行性和准确性.因此,实验需要的几何形状和样品的成份与概念设计要求的应尽可能地接近.一般都在较复杂的专用设备上进行,实验的成本相当昂贵.在聚变堆研究中,进行国际合作是当前积分实验发展的主要趋势.以前国际上进行的主要工作基本上都在美国 LBL 实验室的 RINS-I、RINS-1,日本的 FNS、OKTAVIAN 和瑞士 LOTUS 的 D-T 聚变中子源实验装置上完成的.以瑞士的 LOTUS 装置为例,加以说明.

瑞士原子能所(IGA)于 1983 年建成的 LOTUS 装置,是为检验各种核装置的概念设计而建立的典型 D-T 聚变中子源积分实验装置,国际上许多实验室参与了这实验计划.

LOTUS 的中子发生器是密封管道形的,中子产额可达  $5 \times 10^{12} \text{n/s}$ .将  $\text{d}^+$  束打到 T 靶上产生 14MeV 中子,整个中子发生器放在  $2.4 \times 3.6 \times 3.0 \text{m}^3$  的小房间内,墙厚 2m,可将  $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{m}^3$ ,重 8 吨的实验装置放在里面进行实验.

在 LOTUS 上进行的三个实验是:IGA 的包层模型、普林斯顿等离子体实验所(PP-PL)的锂包层模型(LBM)和锂铅模型(EL<sub>2</sub>M).

IGA 的模型是多用途的,可将各部分组合成各种不同的模拟增殖区.它包括第一壁的不锈钢 Pb 或 Be 的中子增殖层、产氙的  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 、作为聚变-裂变混合堆的燃料增殖区的氧化钍及石墨反射层.用这些部分可组成以下两种不同类型的装置——LBA 和 LBM.

LBA-H(LOTUS Blanket Assembly-Hybrid)用氧化钍组成聚变裂变混合堆. LBA-F(LOTUS Blanket Assembly-Fusion)不用氧化钍的纯聚变堆. 进行了产氚率、活化反应率及不同位置中子能谱的测量. 在不锈钢(厚6.2cm)、Pb(15cm)、Be(18cm)和C(25cm)板的泄漏中子谱上,可以看出高能区的实验值都比计算值高,这主要是由墙壁的散射引起的. 实验大厅的空间较小是LOTUS的一个不足之处.

LBM是一个边长为80cm的准正方体,是为TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)设计的,他们用LBM和LBM+5cm厚的Pb增殖层进行了类似的测量.

EL2M(Experiment Lithium-Lead Module)是TMR(Tandem Mirror type of fusion Reactor)的实验模拟体,可灵活地改变样品的成分,在其上进行活化反应率、氚增殖率(TBR)和能谱测量. 用ANISN程序进行了理论计算和比较.

FNS设备是日本NAKA聚变科学研究院进行各类聚变中子积分实验研究的聚变中子源,OKTAVIAN主要用于双微分截面和活化截面和JENDL-3库数据的基准检验,已经做了大量的工作.

## 2.2 积分实验工作的国内现状

在中国西南物理化学所进行了一些积分实验. 他们的中子发生器,直流束中子产额达 $3 \times 10^{11} \text{ n/s}$ ,有一台可产生脉冲中子,束宽为3ns,平均流强为几个 $\mu\text{A}$ ,还有裂变中子源系统. 在 $\Phi 600\text{mm}$ 浓缩 $^6\text{LiD}$ 与 $^7\text{LiH}$ 球形样品和 $\Phi 600\text{mm}$ 贫化铀球与 $\Phi 400\text{mm} \times 250\text{mm}$ 贫化铀柱补充装置上,进行了TBR和裂变率分布 $P_i(R\infty)$ 测量,用TOF方法测量了U、Al、Fe、Li、水、聚乙烯、硼化聚乙烯等样品球的泄漏中子谱. 同时测量了E-T二维谱和 $\gamma$ 谱.

1988年,与美、日和俄等国合作,用慢化法测量了分别用水和聚乙烯慢化并吸收中子Be球的中子倍增率M. Be球的最大厚度为14.85cm,用ANISN程序和ENDF/B-N进

行了理论计算和比较.

从80年代积分实验的总体情况看,在各核大国中进行了大量有用的、水平不断提高的评价中子核数据的基准积分实验,使中子核数据库版本不断更新. 同时也进行了大量的聚变堆研究材料选择和整体部件专项积分量的测量,及面向设计的积分实验研究. 有条件的中小国家也开展了不少各类积分实验.

## 3 重要性和必要性

### 3.1 开展积分实验研究的重要性

由上面论述可见,中子学积分实验研究对核武器和聚变堆研究都是非常重要的. 同时,也是进行精确的聚变中子学计算、检验核工程设计、提供设计中需要的一些积分量、合理选择和使用材料及降低成本和提高成功率等,不可缺少的实验研究方法. 特对下列几个重要方面的作用作以简述.

#### 1) 评价中子核数据的检验

评价中子核数据是中子学计算的基础数据,直接影响中子学计算的结果. 对用不同实验方法测量的微分数据进行收集整理、分析取舍、评价处理;用理论模型计算数据进行内插、外推和填补空白后,得到的评价中子核数据,进而制作成群常数,其正确性须经过积分实验的检验. 国际上有重大影响的评价中子数据库,如美国的ENDF/B、ENDL,日本的JENDL等核数据库都进行了大量积分检验.

#### 2) 中子学计算理论的检验

在中子学计算中,需要建立不同的模型,如几何条件、中子输运理论及其编制的计算机程序都可能使用某些近似,由此引进的误差是计算结果误差的主要来源之一,理论及使用的近似公式是否合理? 须用积分实验方法来进行检验. 应用简单或复合材料,进行各反应道的专项积分测量,与模型计算结果比较,进行检验,可不断地完善计算模型,减少计算误差.

#### 3) 专项积分量测量

在聚变堆第一壁、包层、磁铁、结构、屏蔽和控制等有关材料研究中,对各种材料选择和整体部件的性能,如氙的增殖率、中子倍增率、能量沉积及结构材料的氙产生截面和杂质中长寿命放射性核的累积量等,都需要进行专项积分量测量。

#### 4) 设计思想的检验

根据聚变装置的概念设计,建造模拟装置进行积分实验检验设计的总体特性,指出存在问题和改进方向.其测量的积分量,可供聚变装置设计及其它应用。

### 3.2 开展积分实验研究的必要性

国际上虽然已经开展了大量中子学积分实验的工作,但我们认为仍有建立我国自己的实验基地的必要,且应尽快建立.理由如下:(1)积分实验测量的积分量强烈地依赖于源中子空间场和样品的几何条件、元素的组成及其结构,并与理论计算紧密结合.无论是基准积分实验,还是面向核装置设计的积分实验,获得的测量结果都要与相应的理论计算值进行比较,才能进行分析研究,作出必要的结论.详尽地了解实验条件是进行理论计算的必要前提.在有关积分实验的文献中,可以找到简单的实验条件介绍和结果的比较,但这些只能作参考,难以具体应用.因为,很多属于军民两用的结果是不发表的.(2)在研究中,要有我们自己设计特色的核装置,只能进行自己的积分实验研究.在国际上已经进行的工作是很难代替我们应做的事.(3)在当前面临要求全面禁止核试验的国际条件下,建立一个高水平聚变中子学积分实验研究基地,对我国的核武器研制尤为重要.(4)与微分实验相比,开展积分实验需要较多的经费.但与用聚变实验堆和核试检进行检验相比,是极小的一部分。

## 4 建立基地的目的和意义

近年来,在美国普林斯顿大学(San Diego)聚变试验堆 TFTR、欧洲核聚变环形

装置 JET (Garching)、日本的聚变堆等离子体研究中心(Naka)JT-60 为代表的三大托卡马克型磁约束聚变装置上,聚变能源的研究取得了重大的突破性进展,特别是 1993 年 12 月 10 日在 TFTR 上实现输出能量达到 3MW 和 5.6MW.与此同时,惯性约束聚变也取得了很大的进展.国际聚变界相信磁和惯性约束聚变可以得到高能量增益,其经济效益将可与石化燃料相竞争.当然聚变能源目前还处于研究阶段,离进入实用还有一段相当长的路要走,聚变堆技术中的很多问题还需要研究解决.在国际原子能机构协调下,由美国、俄罗斯、日本及西欧联合建立了国际热核聚变实验堆 ITER,预计总耗经费 49 亿美元、费时约 20 年,在 2000 年建立实验堆,2020 年建成示范动力堆,2030~2050 年建成商用堆.有 100 多个与 ITER 有关的研究项目正在世界各国进行,还有 700 多个项目在计划中。

我国已把聚变堆的研究列入 863 高科技项目之中.当前侧重于推进聚变裂变混合堆技术的发展.在堆芯等离子体物理方面已经开展研究工作.例如,西南工程物理研究院的环流器一号托卡马克装置,正在更新和发展;安徽等离子体研究所与俄合作建设的大型托卡马克装置;中国原子能科学研究所和西南物理化学研究所进行的强激光惯性约束聚变研究等.该院将建成的强流短脉冲中子产生器以及有关实验测量设备是国内唯一的,在国际同类实验设备中也是先进的设备.该院在“八五”期间,先开展评价中子核数据积分检验工作,实验与理论计算相结合,以取得更多的经验.从“九五”开始,逐步建成一个对全国开放的小型聚变中子学积分实验研究基地.开展以国内有关用户的需要和聚变能源开发为主要内容的中子学积分实验工作.其主要目的意义有:(1)根据国防科研和聚变能源研究需要,该基地向国内有关兄弟单位开放,并相互合作,积极开展与核武器研制和聚变研究工作特点相结合的中子学积分实验研究.(2)跟综国际上聚变中子学积分实验研

究.进行一些国际上较为典型的中子学积分实验工作,积累经验,培养人才,为我国的聚变能源研究,打下坚实的基础.(3)在当前聚变堆研究中,国际合作正在加强.需具备一定的实验设备和技术的实力,才能参加进去.另外,聚变堆研究初期在国际上曾经有过相互保密的历史,聚变能源进入到实用阶段时,为了各国商业上的利益,极有可能重新回到在技术上相互保密的年代.利用这些条件,参加到国际合作行列中去,尽可能多地了解国际上聚变堆研究现状和发展方向,获取技术,为我所用.(4)开展积分实验测量,有利于我国核数据工作的深入发展,尤其是聚变中子学积分实验的开展,国际原子能机构及世界上一些开展聚变能源研究的国家对此都很感兴趣的课题.如果我们做出一些有特色的工作将会受到重视,对扩大我国在国际聚变能源研究中的影响有良好的作用.

## 5 主要工作设想

根据国内外发展的实际情况,将要开展的聚变中子学积分实验研究的工作有:

1)对中国核数据中心研制的评价中子核数据库 CENDL-2 的一些重点核开展基准积分实验研究,使之不断改进和提高,满足国防科研的需要.

2)积极开展军用聚变中子学积分实验研究.例如,有关的单元素或复合材料和部件的

专项积分量.条件成熟时,建立模拟核装置,直接为国内有关用户服务.

3)争取加入 FENDL 基准检验. FENDL 库是国际原子能机构为国际热核实验反应堆 (ITER) 研制而建立的评价核数据库.其基准检验,正在国际上合作进行.我们加入进去,为了 FENDL 库数据的不断改进作出我国应有的贡献.同时,也可了解国际上对核数据的需要和聚变堆研究的动态,并使 FENDL 库数据为我所用,有很大的好处.

4)在裂变聚变堆和聚变堆研究中,所涉及到的第一壁、包层、结构和屏蔽等候选材料很多,根据国内外研究工作中选择的堆型和准备使用的材料,有重点的对单元素或复合材料进行穿透、泄漏中子能谱及能谱指标,中子倍增率  $M$ , 穿透率  $T$  以及其他积分截面的测量研究,为选择最佳堆用材料提供依据.同时,跟踪国际上聚变堆研究,对选择的各种材料进行工作,争取国际合作.

5)用强中子源照射聚变堆使用的材料,研究其辐照损伤、能量沉积和长命放射性核的积累等.材料辐照损伤研究重点是气体和材料变性的最低中子计量等.

6)根据国内外聚变堆研究状况,在取得上述积分实验工作经验的基础上,在各方面的条件成熟时,开展面向聚变装置设计的模拟实验.

# Integral Experimental Study on Fusion Neutronics

Shen Guanren

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** The Integral Experimental Study on the Fusion neutronics is an important question for study in the fusion reactor design. After it was made an investigation, developing integral experimental study of the fusion neutronics is importance and necessary, a suggestion that the intense beam of ns plused cockcroft walton accelerator and the experimental facilities in CIAE should be widely used in the research work was made.

**Key Words** fusion neutronics, Integral experimental study, 14MeV neutron.