

# 中子学积分实验

陈 渊 刘 荣 郭海萍 江文勉 沈寄安

(核物理与化学研究所 成都 610003)

**摘 要** 从60年代开始,我所就开展了裂变中子积分实验,完成了造氙率、裂变率、穿透率及泄漏中子能谱测量等研究课题.1987年以来承担了“863”计划的裂变裂变混合堆包层中子学积分实验,开展了 Be、Pb 的14MeV 中子倍增率实验,其中 Be 实验为中、美、日国际合作,实验误差为2.8%,实验结果为理论计算提供积分检验.新一轮中、美、俄的更大厚度的 Be 中子倍增率实验国际合作正在进行之中.现在,中美关于核聚变合作已经确定了17个项目,我所承担了其中的“关于 ITER 和推荐的聚变堆包层及屏蔽系统的中子学积分实验”这一项目.

**关键词** 聚变中子, 包层, 倍增率, 积分实验, 屏蔽实验.

## 1 引 言

核武器与核工程的设计都离不开精确的理论计算,除了计算方法之外,核数据决定了计算的精度.核数据是通过实验测量和一定条件下的计算得到的,因此必须通过编评和宏观检验后方可利用.美、俄等发达国家为了发展核武器都建立了许多基准装置,进行核数据的积分检验.美国利弗莫尔实验室二十多年前制定的脉冲球计划是一个明显的例子,它包括了与核武器相关的16种材料的一维球对称装置的14MeV 中子穿透实验,分别测量穿透率、泄漏中子和  $\gamma$  能谱.我院从60年代初开始,开展了裂变中子积分实验,建立了大体积氘化锂-6、贫化铀、聚乙烯球等12个基准装置,并完成了造氙率、裂变率、穿透率和泄漏中子能谱测量等研究课题,为我国核数据编评提供积分检验,为我院核武器事业作出了贡献.80年代末以来,除了完成有关宏观参数的预研项目之外,还承担了“863”计划的裂变裂变混合堆包层中子学积分实验,开展了 Be 和 Pb 的14MeV 中子倍增实验,其中 Be 的实验是中、美、日合作项目,并且得到了国际原子能机构的资助,Be 和 Pb 的倍增率实验也是国家自然科学基金和院预研基金的资助项目.倍增率实验结果为 Be 和 Pb 的核数据提供了很好的积分检验,但各实验室测量

结果的差异还大于理论计算所希望的3%的精度,因此,关于 Be 的倍增率实验认为有必要开展新一轮国际合作.俄罗斯库尔恰托夫研究所在中、美组合铍球14.85cm 厚度的基础上另加工一厚度5cm 的铍壳,使其组合后的铍球总厚度达到19.85cm,这一合作实验正在进行之中.中国已于1995年初通过美国加入 ITER\* 组织.中美关于核聚变合作已经确定了17个项目,除了 Be 中子倍增率实验之外,我所还承担了另一个项目——关于 ITER 和推荐的聚变堆包层及屏蔽系统的中子学积分实验.

## 2 基准实验

实验装置是均匀单一材料组成的球形几何.(D-T)或(D-D)源中子置于球心,用伴随  $\alpha$  粒子监视中子源强.在球形装置的径向孔道内测量反应率,对全球积分并归一到一个源中子.根据中子源强和探测器效率选择实验装置和探测器之间合适的距离测量泄漏中子和  $\gamma$  能谱.实验可以分为反应率、泄漏能谱和倍增率测量三大类.造氙率、裂变率和造钚率<sup>[1~2]</sup>的实验结果列于表1.

中子能谱用反冲质子法测量.NE213或芪晶体闪烁谱仪测量的能量范围是1~

\* ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor. 它由美、日、欧共体和俄罗斯四个会员国出资兴建.中国和加拿大已分别通过美国和欧共体加入 ITER,但不作为会员国.

14MeV,球形含氢正比计数管谱仪测量的范围是20~1500keV,单能中子响应矩阵分别用05S和SPEC4两种程序计算.闪烁探测器和计数管的 $\gamma$ 本底分别用“上升时间法”和“除法”两种方法甄别.测量的反冲质子谱利用解

逆矩阵方法处理成中子谱.对于闪烁谱仪,能谱测量误差是(7~10)%,对于含氢正比计数管谱仪是(10~20)%.已经测量泄漏中子能谱的基准装置有氘化锂-6、氘化锂-7、聚乙烯、铁和去离子水等.

表1 造氡率、裂变率和造钚率

材料	内/外直径(cm)	造氡率	裂变率	造钚率	源中子
氘化锂-6	8/62	0.94±0.06			D-T
		0.94±0.08			D-D
氘化锂-7	8/62	0.79±0.05			D-T
贫化铀	8/60		0.91±0.04	2.46±0.09	D-T

### 3 中子倍增率实验

国际上普遍看好 Be 和 Pb 是聚变堆包层中用于增加氡增殖率的优良材料,因为它们都有较大的(n,2n)反应截面.但是倍增率的实验结果和计算值之间差别较大,而且各实验结果间也很不一致,尤其是 Be,计算的倍增率比实验的高(15~20)%,因此对 Be 和 Pb 的核数据进行积分检验是十分必要的.我所承担“863”计划的聚变裂变混合堆包层中子学积分实验,对倍增率数据也是非常关心的.

泄漏中子倍增率是利用聚乙烯全吸收探测器(TAD)和相对方法测量的<sup>[3~4]</sup>.从样品球(Be或Pb)泄漏出来的中子在TAD中得到充分的慢化,除了碳的吸收和小部分泄漏出慢化体之外全部被氢吸收.<sup>6</sup>Li和<sup>55</sup>Mn吸收热中子和H一样都具有l/v特性,因此可能利用这些探测器来模拟氢的吸收.表现和实际的泄漏中子倍增率是

$$M_a = {}^mH_A / {}^0H_A = {}^mLi / {}^0Li_A = {}^mMn_A / {}^0Mn_A \quad (1)$$

和

$$M_L = M_a(1 - {}^0X_A - {}^0L) + {}^mX_A + {}^mL + Re(n,x) \quad (2)$$

式中, $M_a$ 为表现倍增率, $M_L$ 为实际倍增率, $m,0$ 为系统中有无样品的情况, ${}^mH_A, {}^0H_A$ 分

别为系统中有无样品时,TAD中的氢对中子的吸收率, $X_A$ 为慢化体中非氢吸收物质对中子的吸收, $L$ 为中子泄漏出慢化体, $Re(n,x)$ 为样品对由慢化体反射回来的中子的吸收.

${}^mH_A$ 对 ${}^0H_A$ 的比率是等于在全吸收探测器中l/v探测器的中子积分计数率之比.有无样品时的计数用伴随 $\alpha$ 粒子归一.

全吸收探测器是一个高密度聚乙烯球,它的内外直径分别为48cm和138cm,在赤道面上有靶室孔道和五个测量孔道,它们与D<sup>+</sup>束成0°、40°、80°、120°和150°.

实验测量的表现倍增率 $M_a$ 经过(2)式,修正后得到实际的泄漏中子倍增率 $M_L$ .对于铅厚度19.6和23.1cm,实际倍增率为1.713和1.745.对于铍厚度10.45和14.85cm,实际倍增率为1.661和1.776.包括测量和修正量计算在内的实验误差为2.8%.Be和Pb的纯度分别为0.99和0.999,由于杂质吸收中子引起的对倍增率的影响可以忽略.方程(2)中的修正量是利用ANISN程序和ENDF/B-VI数据库计算的,计算的条件是:30个能群,10<sup>-4</sup>eV截止能量,中子在TAD输运考虑热化的影响.实验测量值和计算结果在误差范围内是一致的.

Be的倍增率的几个实验和计算结果的比较表示在图1中.

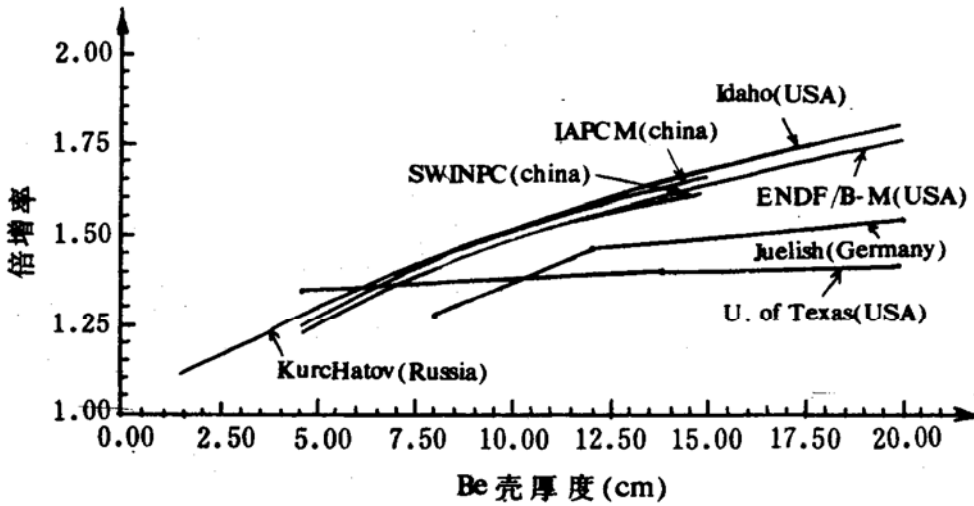


图1 Be 倍增率实验和计算结果比较

### 4 关于 ITER 的中子屏蔽实验

关于 ITER 和建议的聚变堆包层及屏蔽系统的中子学积分实验经中美有关专家认真讨论后,确定了合作的领域. 这包括: 用 316 不锈钢和水(80%/20%重量比)组成的交替

多层球壳组合装置模拟 ITER 屏蔽; 采用交替多层圆盘构成一个外加的圆柱体代替 ITER 的一个特定的厚屏蔽区; 在外加的圆柱体端面 and 球体之间放上超导材料以研究理论计算超导材料的核损伤参数的不确定性程度; 开展中子深穿透实验; 发展在聚变环境下的核部件中的中子参数测量所需的技术.

为使实验能更好地为 ITER 中子学的研究发展的需要服务, 根据现有的条件, 双方商定了今明两年及以后的实验安排: (a) 直径 70cm 的铁球实验; (b) 铁、水交替的球柱组合, 实验装置如图 2 所示; (c) 在两实验的基础上, 开展具有孔道泄漏中子的模拟实验.

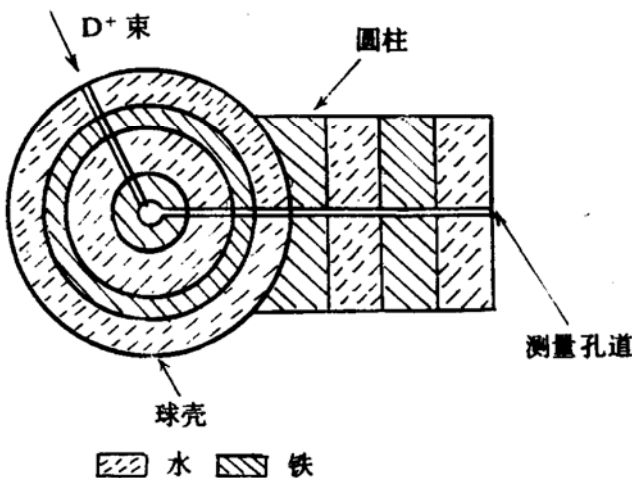


图2 球和柱的组合装置

### 参 考 文 献

- 1 陈佐禹等. 核聚变, 1980, 4
- 2 王大伦等. 中国核科技报告, CNIC-00506, SINPC-0001
- 3 CHEN Y, et al. Fusion Technol., 1991, 19:1919
- 4 CHEN Y, et al. Fusion Technol., 1993, 23:68

## Neutronics Integral Experiments

Chen yuan Liu Rong Guo Haiping Jiang Wenmian Shen Jian  
(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

**Abstract** Since 1960s, the fusion neutronics integral experiments have been carried out in our institute. Several research subjects, including the measurements of the tritium pro-

duction rate, the fission rate, the leakage rate and the neutron energy spectra, have been finished. Since 1987, neutronics integral experiments of the blanket in the fusion-fission hybrid reactor in the "863" project have been taken on. The experiments of 14MeV neutron multiplication in Be and Pb have been performed and the experimental error is 2.8%. The experimental results have been used to provide the integral check for theoretical calculation. And the experiments in Be is the international cooperation subject of China, America and Japan. The new international cooperation subject, the experiment of neutron multiplication in Be, of China, America and Russia is in progress with the thicker Be spherical shells. Now China and America have determined the seventeen cooperation subjects on nuclear fusion, in which we take on "neutronics integral experiments for ITER and proposed fusion power reactor blanket and shield systems".

**Key Words** fusion neutrons, blanket, multiplication, integral experiments, shield experiments.

(上接63页)

## Neutronics Issues in Fusion-fission Hybrid Reactor Design

Liu Chengan

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088*)

**Abstract** In this paper, the coupled neutron and  $\gamma$ -ray transport equations and nuclear number density equations, and its computer program systems concerned in fusion-fission hybrid reactor design are briefly described. The current status and focal point for coming work of nuclear data used in fusion reactor design are explained.

**Key Words** fusion-fission hybrid reactor, coupled neutron and  $\gamma$ -ray transport, evaluation nuclear data library.