

# 聚变裂变混合堆设计中的中子学问题

刘成安

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

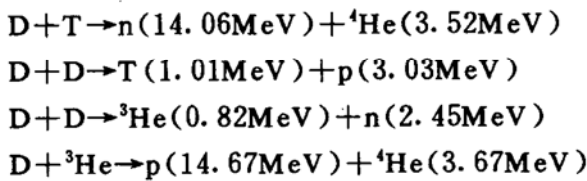
**摘要** 本文简要叙述了聚变裂变混合堆包层设计所涉及的中子  $\gamma$  光子耦合输运方程、核子数密度方程及有关计算机程序系统;介绍用于聚变堆设计的核数据工作现状及未来工作重点.

**关键词** 聚变裂变混合堆, 中子  $\gamma$  光子耦合输运, 评价核数据库.

## 1 引言

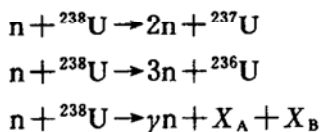
聚变裂变混合堆是利用聚变反应和裂变反应产生能量并同时生产裂变核燃料的堆型. 它通过聚变反应与裂变反应的耦合, 使聚变产生的高能中子在包层中倍增, 经过倍增的富裕中子把包层中的  $^{238}\text{U}$  转化为  $^{239}\text{Pu}$ , 或者  $^{232}\text{Th}$  转化为  $^{233}\text{U}$ , 把 Li 同位素转化为氦.  $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{233}\text{U}$  用作裂变堆的核燃料, 氦用来支持混合堆堆芯所需氦的消耗. 混合堆中基本的核反应如下:

### 1) 堆芯中

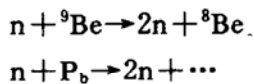


### 2) 包层中

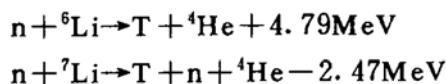
#### (1) 中子增殖反应



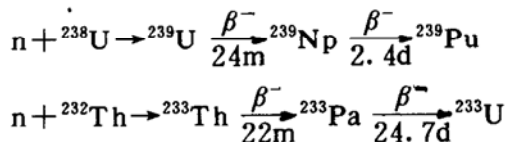
( $X_A$ 、 $X_B$  为裂变碎片)



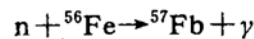
#### (2) 造氦反应



#### (3) 转化裂变核燃料的反应



#### (4) 结构材料的俘获中子反应



混合堆的整个核过程都涉及到中子  $\gamma$  光子的耦合输运问题. 中子  $\gamma$  光子输运计算不仅关系到混合堆输出功率、氦和裂变材料生产量的设计精度, 中子学的计算结果也是热工水力分析、结构设计、放射性剂量、材料后处理分析的依据.

聚变裂变混合堆中子学和核子数密度计算涉及到复杂的核反应类型和很宽的能量范围(热能区  $\sim 15\text{MeV}$  的中子). 现正通过国际合作建立和完善聚变堆设计专用核数据库.

本文拟对聚变裂变混合堆设计中的中子  $\gamma$  光子耦合输运计算、核子数密度计算, 评价核数据库及群常数制作的有关问题和程序系统作一简要介绍.

## 2 中子 $\gamma$ 光子耦合及核子数密度方程

### 2.1 中子 $\gamma$ 光子耦合输运方程及边界条件微分方程

$$\begin{aligned}
(\vec{\Omega} \cdot \nabla + \Sigma_r) \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) &= \int' f \Phi' d\vec{\Omega}' dE' + Q(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) \quad (1)
\end{aligned}$$

式中,  $\vec{\Omega}$  是中子或  $\gamma$  光子的运动方向,  $\Sigma_r$  是宏观输运截面;  $\Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  对中子,  $\Phi = \psi = N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)v$ ; 对于  $\gamma$  光子,  $\Phi = I = fh\nu c$ ,  $f = f(\vec{r}, \vec{\Omega}, \nu)$  是单位体积和单位能量间隔的光子数. 方程右边第一项是由于相互作用, 在  $\vec{r}$  处单位距离内粒子由  $(\vec{\Omega}', E')$  转移到  $(\vec{\Omega}, E)$  的总几率.  $Q(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  是独立源, 即与所涉及的粒

子密度无关的源;对  $\gamma$  光子,  $Q(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  含有中子与核相互作用产生的  $\gamma$  的贡献.

设平板系统  $\mu = \vec{\Omega} \cdot \vec{e}_z$

球对称系统  $\mu = \vec{\Omega} \cdot \vec{e}_r$

柱系统  $\mu = \sqrt{1 - \xi^2} \cos \omega$   
 $\eta = \sqrt{1 - \xi^2} \sin \omega$   
 ( $\omega$  是  $\vec{\Omega}$  绕  $\xi$  轴旋转的角度)  
 $\mu^2 + \eta^2 + \xi^2 = 1$

则守恒方程(1)在不同几何下的形式为

平板  $\mu \frac{d\Phi}{dX} + \Sigma_{tr} \cdot \Phi = \iint \sigma' f \Phi' d\vec{\Omega}' dE' + Q$

球  $\frac{\mu}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial [(1 - \mu^2)\Phi]}{\partial \mu}$

$+ \Sigma_{tr} \cdot \Phi = \iint \sigma' f \Phi' d\vec{\Omega}' dE' + Q$

柱  $\frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\Phi) + \frac{\eta}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} + \xi \frac{\partial \Phi}{\partial Z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \omega} (\eta\Phi)$

$= \iint \sigma' f \Phi' d\vec{\Omega}' dE' + Q$

1) 边界条件

(1) 真空边界  $\Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) = 0$ ; 当  $\vec{\Omega} \cdot \vec{n} < 0$ ,  $\vec{n}$  是几何曲域边界外法线方向. (2) 全反射边界  $\Phi_{in}(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) = \Phi_{out}(\vec{r}, -\vec{\Omega}, E)$ , 在反射边界上. (3) 周期边界条件  $\Phi(\vec{A}, \vec{\Omega}) = \Phi(\vec{B}, -\vec{\Omega})$ , 即离开一个边界的角通量等于前一个边界上进入的角通量. (4) 反照率边界条件

$$\Phi_{in}(\vec{\Omega}_m) = \beta \frac{\int_{\vec{\Omega}} (\vec{\Omega}\Phi)_{out} d\vec{\Omega}}{\int_{\vec{\Omega}} \vec{\Omega}_{out} d\vec{\Omega}}$$

即边界上出射的角通量在对角度积分后又在此边界各向同性地反射回  $\beta$  部分,  $0 < \beta \leq 1$ .

### 2.2 粒子数密度方程

关于链的线性近似. 设  $X_i$  是第  $i$  种核素名,  $X_i$  发生反应后生成  $X_{i+1}$ , 表示为  $X_i \rightarrow X_{i+1}$ , 则线性链的形式为  $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \dots X_i \rightarrow X_{i+1} \dots X_L$ ,  $L$  称为链长. 如果  $X_1$  可以变为  $X_2$ , 也可以变为  $X_3$ , 通常称为分支链. 可用两条线性链表示,  $X_1 \rightarrow X_2, X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$ . 如果有  $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_1$  的形式, 称之为循环链. 循环链的计算有特殊的表示.

核子数密度方程为

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1^a N_1$$

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1}^c N_{i-1} - \lambda_i^a N_i$$

$$(i = 1, 2, \dots, L) \tag{2}$$

初始条件:  $N_i|_{t=0} = N_i^{(0)}$ , 其中  $N_i$  是  $X_i$  的核子数密度. 而

$$\lambda_i^a = \lambda_i + \int \sigma_i^a \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) d\vec{\Omega} dE \tag{3}$$

$$\lambda_i^c = \lambda_i f_{i,i+1} + \int \sigma_{i,i+1} \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) d\vec{\Omega} dE \tag{4}$$

两式中,  $\lambda_i$  是  $X_i$  的衰变常数;  $\sigma_i^a$  是  $X_i$  的吸收截面;  $f_{i,i+1}$  是从  $X_i$  衰变为  $X_{i+1}$  的分支比;  $\sigma_{i,i+1}$  是  $X_i$  反应生成  $X_{i+1}$  的反应截面.  $N_i$  的自变量是  $t$ ,  $\vec{r}$  是参变量.

方程(2)的解析解可近似地表示为

$$N_i(t) \cong \sum_{k=1}^i N_k(0) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i_1, i_2}}^i d_{kj}^i e^{-\lambda_j^a t} + \sum_{k=0}^{i_1} N_k(0) d_{k,i_1}^i e^{-\lambda_{i_1}^a t} + \sum_{k=0}^{i_2} N_k(0) d_{k,i_2}^i e^{-\lambda_{i_2}^a t} \tag{5}$$

对线性链:

$$d_{kj}^i = \frac{\prod_{l=k}^{i-1} \lambda_l^c}{\prod_{\substack{l=k \\ l \neq j}}^i (\lambda_l^a - \lambda_j^a)} \quad (d_{k,i_1}^i = d_{k,i_2}^i = 0) \tag{6}$$

对循环链:

$$d_{kj}^i = \frac{\prod_{l=k}^{i-1} \lambda_l^c}{\prod_{\substack{l=k \\ l \neq j}}^i (\lambda_l^a - \lambda_j^a)} \quad d_{k,i_1}^i = \frac{\prod_{l=k}^{i-1} \lambda_l^c}{\prod_{\substack{l=k \\ l \neq i_1, i_2}}^i (\lambda_l^a - \lambda_{i_1}^a)}$$

$$d_{k,i_2}^i = - \frac{\prod_{l=k}^{i-1} \lambda_l^c}{\prod_{\substack{l=k \\ l \neq i_1, i_2}}^i (\lambda_l^a - \lambda_{i_2}^a)} \tag{7}$$

### 3 输运计算和核子数密度计算程序

引进、开发了包括一维、二维和三维几何的中子  $\gamma$  光子耦合输运程序和一维粒子数密度计算程序.

1) 一维几何输运计算程序 ANISN, BISON(定态)是用离散纵标——差分法求解一维定态中子 $\gamma$ 光子耦合输运方程的程序,可计算外源问题、特征值问题及反应性问题等。计算量小,速度快,可用于物理规律的研究和材料组合设计的研究。

2) 二维几何输运计算程序 DOT3.5和 TRIDENT-CTR 分别是离散纵标——差分法矩形网格和离散纵标间断有限元、三角网格求解二维定态中子 $\gamma$ 光子耦合输运方程的程序,可用于工程设计。与热工设计和力学结构设计相配合,可做总体方案设计。

3) MCNP 是用蒙特卡罗方法求解定态中子 $\gamma$ 光子耦合输运问题的多功能程序。可以处理任意三维几何的问题,几何界面可以是平面、二次曲面及某些特殊的四次曲面。既可用连续能量的截面参数,也可用能量群平均截面参数。该程序可用于精确设计和最后方案的落实计算。

4) 核子数密度计算程序 BISON1.5,可计算核子数密度随时间变化的一维几何问题。它将中子输运计算和线性化核子数方程耦合在一起。可以计算各种反应率、核子数密度、裂变核燃料和氙生成量随时间的变化等。这些量是混合堆设计的重要积分参量。

#### 4 中子学计算参数的现状

中子学计算参数,是混合堆设计中最重要参数。由于混合堆和聚变堆系统存在大量的聚变中子(14.1MeV),所以参数涉及到的能量范围,较裂变堆参数宽(热能 $\sim$ 15MeV)和反应道复杂。其中,包括中子 $\gamma$ 光子输运计算参数、中子倍增参数、活化参数、核衰变参数、用于辐射损伤研究的带电粒子产生参数及燃料循环参数等。国际原子能机构核数据部,近年来为支持国际热核实验堆(ITER)的设计,组织了广泛的国际合作,从事建立聚变堆专用核数据库(FENOL)的工作。到1994年9月为止,先后召开了四次国际

核数据专家会议,即:1990年11月成都“聚变堆第一壁和包层材料的中子增殖核数据”会议;1991年11月维也纳“聚变堆评价核数据库和有关的基准计算”会议;1993年11月东京“聚变堆评价核数据多群截面和不确定性文件评审”会议;1994年9月慕尼黑“FENDL的改进数据和积分实验数据的检验”会议。

1993年12月,已在 FENDL 库的基础上完成了多群截面和蒙特卡罗计算用截面数据的研制。现在正在对 FENDL-1库做积分检验和在 FENDL-1基础上改进、充实,建立由各子库组成的、完善的聚变堆设计用的核数据库 FENDL-2。其专用子库是:

- FENDL/E 评价核数据库;
- FENDL/A 活化核数据库;
- FENDL/DS 剂量核数据库;
- FENDL/D 衰变常数库;
- FENDL/C 入射带电粒子库;
- FENDL/MC 蒙特卡罗数据库;
- FENDL/MG 多群截面库;
- FENDL/U 不确定性数据库。

为满足需要,现已引进美国研制的 ENDF/B-VI 评价核数据库,开发了国际通用的处理核数据程序系统 NJOY,研制了群常数共振自屏效应参数制作程序 SSES。并参与了 FENDL 库研制的国际合作。

#### 5 结束语

我们已简要介绍了聚变裂变混合堆中子学计算的有关问题。随着国际热核实验堆(ITER)计划的实施,对中子学计算和核参数数据精度提出了更高的要求。通过国际间的共同努力,各种高精度核数据更完善、效率和精度更高的计算方法和程序会不断地研制出来。这也对我国混合堆、聚变堆的发展提供很有利的外部条件。进一步提高中子学计算精度和核数据精度仍是我国聚变堆工程发展的重要课题。

(下转57页)

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.