

⑥ 320-333

第17卷 第4期

核科学与工程

Vol.17 No.4

1997年 12月

Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering

Dec. 1997

混合堆、聚变堆包层热工水力与中子学 综合分析模拟及 FEB 混合堆包层综合分析

肖炳甲 邱励俭 吴宜灿
(中国科学院等离子体物理所)

TL460.33'
TL460.2

摘要 为了混合堆及聚变堆包层分析的需要,开发了 BITH 程序,以对包层的热工水力学及中子学进行综合分析。简述球床的热工水力特征及其数学物理模型,介绍编制的包层热工水力分析程序 THPBHR,对 BISON1.5 全面改造,考虑了共振自屏效应,并与热工水力计算相耦合,并更换 BISON1.5 自带数据库,修改燃耗计算方法,以适应放射性废物处理、辐照损伤等计算需要。还对 FEB 混合堆外包层用 BITH 程序进行了分析。

关键词 包层 热工水力 中子学 程序 ~~数据库~~ 共振自屏

混合堆
聚变堆

1 前言

聚变能的利用是人类最终解决能源问题的出路。由于聚变能的利用还有相当长的时间,以增殖核燃料或处理核废料的聚变-裂变混合堆将是人类聚变能提前利用的可行阶段,并且混合堆的发展与研究也为聚变堆研究提供丰富的经验,从而推动聚变堆的发展。

在聚变堆或聚变-裂变混合堆中,包层担负着增殖燃料及传出能量的任务,因此,包层设计中,包层的热工水力学及中子学性能是关键因素。

从目前的中子学分析的软件来看,主要有 BISON1.5, ANISN, MCNP 等, BISON 由于其计算快捷,方便而备受青睐,但由于其自身的限制,如不考虑共振自屏,自带数据库很不全面等,不能适应混合堆处理核废料等计算的需要,因此,有必要对 BISON 及其所带数据库进行改造以使其应用更为广泛。

由于多普勒温度效应,中子学与热工水力学相互影响。在裂变堆设计中,已有大量的综合分析程序,如 Julich 的 THERMIX 等。但由于聚变堆自身的区别于裂变堆的特点,如 Tokamak 环型结构,聚变中子源等等, THERMIX 等不能用于包层的分析计算,而目前,国际及国内还没有相应的综合分析程序,因此,开发这样的系统分析工具是非常重要的。

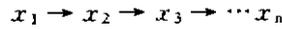
2 中子输运及燃耗计算

2.1 燃耗方程的求解

(1) Bateman 方法:

1996年4月25日收到。

对简单的燃耗线性链:



可用下述方程描述

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1^a N_1 \\ \frac{dN_i}{dt} &= \lambda_{i-1}^a N_{i-1} - \lambda_i^a N_i \quad (i = 2, n) \\ \lambda_i^c &= \lambda_i + \int \sigma_i^c \phi dE \\ \lambda_i^c &= f_{i,i+1} \lambda_i + \int \sigma_{i,i+1}^c \phi dE \end{aligned} \quad (1)$$

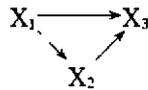
- 其中 N_i - x_i 的原子密度
- λ_i - x_i 的衰变常数
- σ_i^a - x_i 的中子吸收截面
- $f_{i,i+1}$ - 从 x_i 衰变到 x_{i+1} 的衰变分支比
- $\sigma_{i,i+1}^c$ - 反应截面从 x_i 到 x_{i+1} 的份额
- ϕ - 总中子通量

Bateman 给出上述方程的精确解

$$N_i = \sum_{k=1}^i \sum_{l=k}^i N_k^0 d_{kl}^i e^{-\lambda_l^a t}$$

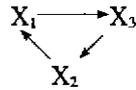
$$d_{kl}^i = \begin{cases} 1 & (k = i) \\ \frac{\prod_{j=k}^i \lambda_j^a}{\prod_{\substack{j=k \\ l \neq j}}^i (\lambda_j^a - \lambda_l^a)} & (k \neq i) \end{cases} \quad (2)$$

N_k^0 是 N_k 的初始值
对比较复杂的链(分支链), 如



可将其分解为两个简单的线性链: $X_1 \rightarrow X_3$
 $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$

对上述链可给出 Bateman 组合解, 而对于循环链:



可用下面的线性链进行近似: $X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1$

这样, 同一种核素 X_1 出现两次, 这样的线性链用 Bateman 方法解由下式给出:

$$N_i = \sum_{k=1}^i \sum_{\substack{j=k \\ j \neq m, n}}^i N_k^0 d_{kj}^i e^{-\lambda_j^a t} - \sum_{k=1}^m N_k^0 \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j^a}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq m, n}}^i (\lambda_j^a - \lambda_m^a)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, n}}^i d_{kj}^i \right\} e^{-\lambda_j^a t} \quad (3)$$

$$(\lambda_m^a = \lambda_n^a, m \leq n \leq i)$$

裂变产物可以集总形式处理,假定每个核素一次裂变产生的 FP(裂变产物)核素为 1,在一个时间步长内 FP 产物由下式给出:

$$N_{FP} = \sum_{j \neq i} \frac{N_j^0 + N_j^1}{2} \int \sigma_f^i \phi dE \quad (4)$$

其中 σ_f^i 是 X_i 的裂变截面。

Bateman 方法优缺点:

优点:经过物理近似后的燃耗链及其方程的解是精确解,计算时间短且准确。

缺点:链的分解、构造、终止等较为复杂,不易判别,且对不同的燃料循环形式来说,要求构造不同的链系列。

为了弥补 Bateman 方法的缺点,我们考虑用数值方法求解燃耗问题。

(2) 燃耗的数值求解

区别于 Bateman 在线性燃耗链中建立燃耗方程,提出用系统内的燃耗方程描述附录 4 所示的燃耗链。

$$\begin{aligned} \frac{dN_i}{dt} &= \sum_j \lambda_{j,i}^s N_j - \lambda_i^a N_i \\ \lambda_i^a &= \lambda_i + \int \sigma_f^i \phi dE \quad (i = 1, 2, 3 \cdots n) \\ \lambda_j^s &= f_{j,i} \lambda_j + \int \sigma_{f,i}^j \phi dE \end{aligned} \quad (5)$$

其中: n , 系统中核素的总个数。

$\sigma_{j,i}$, 从 j 到 i 的反应截面。

$f_{j,i}$, 从 j 衰变到 i 的份额。

上式的物理意义为:某一核素的变化率等于系统中产生此核素的反应率减去此核素的反应率及衰变率。

方程(5)是如下形式的一阶齐次微分方程组。用修正中点 + Burlirch-stoer 方法来求解。

考虑方程组(5)有:

$$y'_i = f_i(x, y_1, y_2, \cdots, y_n) \quad i = 1, 2, 3 \cdots n \quad (6)$$

其中 f_i 是已知的。

对于一个时间步长 X 到 $X + H$, 划分一系列子步长,

$h = H/n'$, n' 为 $[X, X + H]$ 时间区间内等分步长的数目。则

可以用下述方法将 y 从 x 推进到 $x + H$

$$\begin{aligned} z_0 &= y, \\ z_1 &= z_0 + hf_1(x, z_0) \\ &\vdots \\ z_{m+1} &= z_m + 2hf_1(x + mh, z_m) \\ &\vdots \\ y(x + H) &\approx y_n = \frac{1}{2} [z_n + z_{n-1} + hf(x + H, z_n)] \end{aligned} \quad (7)$$

这里 z_n 是中间近似。

如果对已作出的一系列 n' 的 y_n 值, 则可用外推的方法将越来越细的子步长外推到无穷细亦即 $h=0$ 时的 y 值。

n' 系列可由增长的 n' 组成, 例如: $n' = 2, 4, 6, 8 \dots$

逐次将每个 n' 进行试验, 进行有理函数或多项式外推, 当误差达到要求时, 停止试验, 反之, 则继续试验, 当然, 必须对 n' 有所限制, 例如 $n_{\max} = 96$, 如果到 n' 达不到要求, 则必须减小 H , 重新试验。

数值方法的优缺点:

优点是物理近似, 可以对数据库不加改变而适用所有的燃料循环形式, 缺点是达到很高精度时耗费大量的计算时间。

通过系统内有 33 个核素的计算表明, 计算时间是可以接受的 (计算精度选为最大相对误差 $1.E-6$)。

2.2 中子输运计算

中子输运计算取自 BISON1.5 程序^[1], 对其作了修改, 以考虑共振自屏效应。限于篇幅, 本文不再赘述中子输运方程的求解。

BISON1.5 中没有考虑共振自屏效应, 但对反应堆的设计来说, 共振自屏是必须考虑的因数之一, 对 BISON 程序的相应部分进行修改, 采用 Bondarenko 方法, 研究共振自屏效应的影响^[2,5,6]。

中子学中所用的等效群常数 \bar{a} 定义为:

$$\bar{a} = \frac{\int_{\Delta u} a(u) \varphi(u) du}{\int_{\Delta u} \varphi(u) du} \quad (8)$$

式中 $\varphi(u)$ 为中子能谱, 在慢化区内为 Fermi 谱时, 据此平均得来的截面为无限稀释截面, 也就是输运库中的截面, 但当群内截面随能量变化到共振截面时, 中子能谱偏离 Fermi 谱, 使按实际能谱平均的群截面小于无限稀释截面, 此即所谓的共振自屏效应, 当弱吸收窄共振二者之一满足时, 由于截面共振结构导致的能谱偏移可表述为:

$$\varphi(u) \propto \varphi_0(u) \frac{1}{\Sigma_r(u)} \quad (9)$$

于是, 有:

$$\bar{\Sigma}_c = \frac{\int_{\Delta u} \Sigma_c(u) \frac{\varphi_0(u)}{\Sigma_r(u)} du}{\int_{\Delta u} \frac{\varphi_0(u)}{\Sigma_r(u)} du} = \frac{\left(\frac{\Sigma_c}{\Sigma_r} \right)}{\left(\frac{1}{\Sigma_r} \right)} \quad (10a)$$

同理, 有:

$$\bar{\Sigma}_r = \frac{\int_{\Delta u} \Sigma_r(u) \frac{\varphi_0(u)}{\Sigma_r(u)} du}{\int_{\Delta u} \frac{\varphi_0(u)}{\Sigma_r(u)} du} = \frac{\left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma_r} \right)}{\left(\frac{1}{\Sigma_r} \right)} \quad (10b)$$

等等。

如果定义核 1 所分担的其他核的总截面为其本底截面 $\sigma_{0,1}$, 即

$$\sigma_{0,1} = \frac{\sum_{i \neq 1} N_i \sigma_{t,i}}{N_1} \quad (11)$$

可得

$$\sigma_c(\sigma_0) = f_c \sigma_c(\infty) \quad (12)$$

等。

其中 f_c 等为共振自屏因子, 为温度及本底截面的函数。

我们选取 $T = 300, 900, 2100\text{K}$, 及 $\sigma_0 = \infty, 10^4, 10^3, 10^2, 10^1, 0$ 作出共振自屏因子数据(数据来源于文献[3]), 实际使用过程中, 可选择合适的插值规则^[4], 在实际的温度及本底截面时, 插值得出实际截面。

2.3 输运库、响应函数库及燃耗库

由于 BISON1.5 所带数据库为 42 群中子, 21 群光子, 且核数很少, 与 FDKR(放射性及余热分析程序)程序耦合性差, 及不能用作铀系元素等高效废物的处理分析, 所以需要改进。在北京应用物理和计算数学研究所的大力支持下, 我们做了 100 个核素 46 群中子, 21 群光子的反应截面及输运截面。所包含的核素, 截面排列, 及分群情况见附录 1, 2, 3。

我们选取了所有可燃烧核及 ${}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}$ 的各种反应类型(参见附录 1, 2), 组成反应率计算所需的响应函数库。

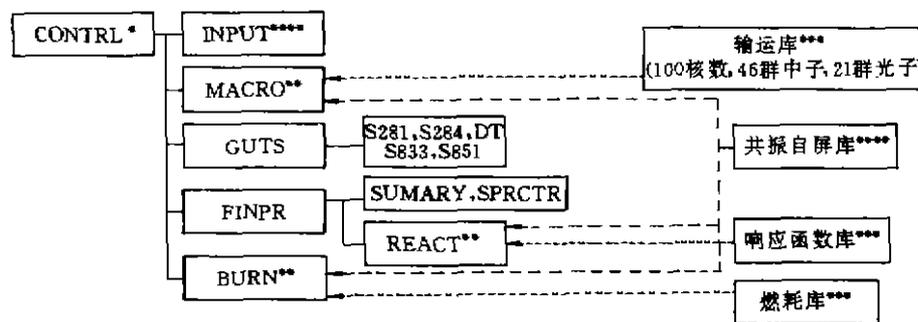


图 1 中子输运及燃耗计算流程图

Fig.1 The calculation procedure of neutron transport and burnup calculation in modified BISON1.5

说明(对 BISON1.5 修改):

- * 修改增加于热工水力程序 THPBHR 的接口、控制等及文件操作。
- ** 增加调用共振自屏库, 对截面进行修正。
- *** 新替换的数据库。
- **** 目前数据只为 42 群中子的 ${}^{238}\text{U}$ 的共振自屏因子, 取自文献[2], 本文中的共振自屏计算仍选用 BISON1.5 自带数据库。
- ***** 修改核及其密度输入, 增加子程序处理, 使得输入更直观, 简洁。

对 BISON 原来的燃耗链, 进行了扩充, 并且几乎考虑了所有可燃烧核的 $(n, 2n)$ 反应, 修改后的燃耗链如附录 4 所示。改进后的燃耗计算方法(数值方法-Burlirch-Stoer 自适应质量控制积分)使得完整求解这样的燃耗链成为可能。对燃耗链的描述在燃耗库中进行, 区别于原来的

分解为一系列线性链的方法,使用每个核素的生成途径来描述,相当于描述了方程(5),例如:



这意味着, ${}^{238}\text{U}$ 可由 ${}^{237}\text{U}$ 经 13 型反应 (n, γ) 和 ${}^{239}\text{U}$ 经 14 型反应 $(n, 2n)$ 生成。

2.4 程序结构图

选择 BISON1.5 程序作为中子学计算的参考程序,并对其进行修改。程序结构及对 BISON1.5 的修改情况如图 1 所示。

2.5 FEB 包层的中子学分析及比较

选取混合堆 FEB 设计作为参考设计,堆芯参数及包层分区情况列于表 1, 燃耗时间步为 2 年,5 个时间步(共 10 年)。我们用 BISON1.5 及自带的输运库、燃耗库和响应函数库,新做的 46 群输运库以比较数据库的差别,分别用 Bateman 方法和原燃耗链 + 新改变为 46 群的燃耗库相应反应,衰变数据和新响应函数库,以及 Burlirch-Stoer 方法求解燃耗和全新的数据库对参考包层进行计算,以比较两种方法,并讨论共振自屏对 FEB 中子学的影响。

表 1 堆芯参数、包层径向分区及材料分布

Tab.1 The core parameters, the blanket radial configuration and the material composition

R(大半径) = 4m, a(小半径) = 1m, P(裂变功率) = 150MW, 大环向包层个数 = 48			
分区	厚度, cm	材料及体积百分比	
1 等离子体	100	真空	
2 刮削层	15	真空	
3 石墨	0.5	C: 100%	
4 第一壁	1	SS: 70%, He 气: 70%	
5 第一氚增殖区	10.5	Li ₂ O: 20%, Be: 55%, He 气: 20%	
6 壁	1	SS: 100%	
7 第一铀增殖区	7	U(天然): 25%, C: 30%, SS: 5%, He 气: 40%	
8 壁	0.5	SS: 100%	
9 第二铀增殖区	13	U(天然): 45%, C: 10%, SS: 5%, He 气: 40%	
10 壁	0.5	SS: 100%	
11 第三铀增殖区	15	U(天然): 55%, SS: 5%, He 气: 40%	
12 壁	1	SS: 100%	
13 第二氚增殖区	20	Li ₂ O: 55%, SS: 5%, He 气: 20%	
14 发射层 O	5	C: 100%	

表 2a 对参考包层用 42 群中子截面, 燃耗用 Bateman 方法的计算结果

Tab.2a The calculation results for the reference blanket with 42 group neutron cross section library and Bateman method for burnup calculation

时间步	${}^{238}\text{U}$ 浓度(1. E23)			${}^{239}\text{Pu}$ 浓度(1. E20)			${}^{238}\text{U}(n, \gamma)$	${}^6\text{Li}(n, T)$	${}^7\text{Li}(n, n'T)$	K_{eff}
	反应率	反应率	反应率	反应率	反应率	反应率	反应率	反应率		
0	0.1177	0.2119	0.2590				0.6419	1.2612	1.5973E-2	0.306
1	0.1166	0.2110	0.2586	0.7355	0.6415	0.2903	0.6500	1.2778	1.5978E-2	0.324
2	0.1172	0.2115	0.2588	0.3711	0.3210	0.1443	0.6457	1.2697	1.5976E-2	0.316
3	0.1161	0.2106	0.2584	1.0917	0.9603	0.7375	0.6543	1.2861	1.5981E-2	0.334
4	0.1155	0.2101	0.2582	1.4396	1.2771	0.5858	0.6588	1.2844	1.5984E-2	0.343
5	0.1150	0.2096	0.2580	1.7794	1.5921	0.7354	0.6633	1.3028	1.5987E-2	0.353

(1) 42 群和 46 群库的计算比较

表 2a, 2b 给出了用 BISON1.5 程序, 42 群及 46 群数据库的计算比较结果。从表中可以看出, 42 群计算与 46 群的计算结果略有差距, 这种差距是由于库的分群差异, 以及产生分群数据库的原始数据库不一致所造成。

表 2b 对参考包层用 46 群中子截面, 燃耗用 Bateman 方法的计算结果

Tab. 2b The calculation results for the reference blanket with 46 group neutron cross section library and Bateman method for burnup calculation

时间步	^{238}U 浓度(1.E23)			^{239}Pu 浓度(1.E20)			$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	$^6\text{Li}(n, T)$	$^7\text{Li}(n, n' T)$	K_{eff}
							反应率	反应率	反应率	
0	0.1177	0.2119	0.2590				0.7054	1.1073	1.3970E-2	0.319
1	0.1173	0.2115	0.2588	0.4127	0.3584	0.1519	0.7296	1.1318	1.3979E-2	0.329
2	0.1168	0.2111	0.2586	0.8287	0.7271	0.3101	0.7546	1.1570	1.3989E-2	0.340
3	0.1164	0.2107	0.2585	1.2460	1.1044	0.4742	0.7802	1.1829	1.4000E-2	0.351
4	0.1159	0.2102	0.2583	1.6638	1.4902	0.6443	0.8065	1.2093	1.4011E-2	0.362
5	0.1154	0.2098	0.2581	2.0819	1.8842	0.8207	0.8334	1.2365	1.4022E-2	0.374

(2) 燃耗两种计算方法的比较

表 3 对参考包层用 46 群中子截面, 燃耗用 Burlirch-Stoer 方法的计算结果

Tab. 3 The calculation results for the reference blanket with 46 group neutron cross section library and Burlirch-Stoer method for burnup calculation

时间步	^{238}U 浓度(1.E23)			^{239}Pu 浓度(1.E20)			$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	$^6\text{Li}(n, T)$	$^7\text{Li}(n, n' T)$	K_{eff}
							反应率	反应率	反应率	
0	0.1177	0.2119	0.2590				0.7054	1.1073	1.3970E-2	0.319
1	0.1173	0.2115	0.2588	0.4127	0.3584	0.1519	0.7124	1.1157	1.3974E-2	0.329
2	0.1168	0.2111	0.2587	0.8202	0.7181	0.3063	0.7195	1.1243	1.3978E-2	0.339
3	0.1164	0.2107	0.2585	1.2209	1.0773	0.4625	0.7268	1.1331	1.3982E-2	0.348
4	0.1159	0.2103	0.2583	1.6146	1.4361	0.6206	0.7343	1.1421	1.3986E-2	0.358
5	0.1155	0.2099	0.2581	2.0014	1.7943	0.7806	0.7419	1.1513	1.3990E-2	0.368

表 3 给出用 46 群中子截面, 燃耗用 Burlirch-Stoer 方法的计算结果, 可以看出:

①用 Burlirch-Stoer 方法和新的燃耗链进行计算, 在第一个时间步处得的 ^{238}U 的浓度与用原来方法算得的完全一致, 由于从系统内在第一时刻从其他核转变至 ^{238}U (其它由 ^{238}U 转变的相关核如 ^{237}U , ^{239}U 的浓度甚小), 几乎可以忽略不计(Burlirch-Stoer 方法中自始至终计及这种影响), 所以这充分说明了用 Burlirch-Stoer 方法计算的结果是可靠的。

②随着燃耗的加深, 燃耗时间步的推移, ^{238}U 的浓度在两种计算中稍有区别(^{238}U 浓度在

本问题变化并不大,所以区别不明显),但²³⁸U的(n, γ)的反应率却有明显的区别,这是由于用两种方法算得的其它核的产额并不相同,而其他核对中子通量起了较大的贡献,同样,正由于此,⁶Li的产氚率(T值)也区别得较为明显。由此,可以看出,采用考虑全面的方法(如Burlirch-Stoer方法)及新的燃耗链对混合堆中子学分析是十分必要的。

结果表明:Burlirch-Stoer方法及新的燃耗链比原BISON1.5所用方法及链更全面地考虑了可能的反应类型,计算结果更可靠。

(3)共振自屏效应对 FEB 中子学的影响

为考察共振自屏效应对 FEB 中子学的影响,我们用 BITH 程序计算了 Pu 增殖在温度分别为 300K, 600K, 1000K 时考虑了²³⁸U共振自屏的中子学问题(不进行中子学与热工水力的耦合计算),还计算了不考虑共振自屏时的中子学问题,结果列于表 4。

结果表明,考虑共振自屏时,F值(²³⁸U(n, γ)反应率)略有下降,这是由于²³⁸U的群平均截面小于平均截面对反应率的影响大于由其所带来的中子能量的增大。另一方面,由于²³⁸U的吸收略有降低,从而中子通量略有提高,使得另一重要反应率⁶Li(N, α) + ⁷Li(N, α)的产氚反应率 T 略有增高,而 F + T 值则变化较小。由于多普勒展宽效应,F值随温度升高而增加,并使得包层内的能量沉积由于温度的升高而略有减小。图 2 给出了无共振自屏,考虑共振自屏(温度分别为 300K, 600K, 1000K)时功率密度分布情况。

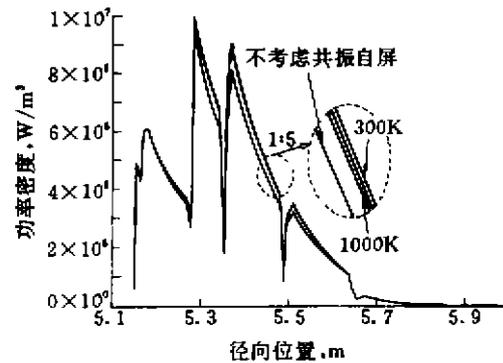


图 2 FEB 外包层径向功率密度分布
Fig.2 The radial distribution of the power density of FEB outboard blanket

表 4 不考虑共振自屏、考虑共振自屏(温度分别为 300, 600, 1000K 时)的主要反应率

Tab.4 The main reacton rates without or with self-resonance shielding effect taking into consideration(T = 300, 600, 1000K)

	能量沉积, MeV	²³⁸ U(n, γ)	T		²³⁸ U(n, f)	²³⁵ U(n, f)	²³⁵ U(n, α)
			⁶ Li(n, α)	⁷ Li(n, α)			
不考虑共振自屏	57.735	0.64193	1.2612	1.5973E-2	0.16206	3.1175E-2	3.9581E-2
300(K)	62.095	0.61223	1.2976	1.5977E-2	0.16423	3.9394E-2	5.1759E-2
600K	61.495	0.61624	1.2926	1.5976E-2	0.16391	3.8201E-2	4.9592E-2
1000K	60.901	0.62042	1.2874	1.5975E-2	0.16358	3.7018E-2	4.7924E-2

3 热工水力计算及 THPBHR 程序

球床包层已被用于聚变堆的设计中,如 ARIES, ITER 等。FEB 的概念设计也选择了球床作为包层的燃料元件形式^[5],这里我们给出球床的传热特征、热工水力模型及开发的分析程序 THPBHR 的简介。

3.1 球床传热特征^[7-11]

(1) 球床的有效导热系数

球床为固气两相介质,其传热过程十分复杂。为描述其传热,常引入有效导热系数 k_e , Zehner 给出表达式如下:

$$\frac{k_e}{k_g} = \frac{Pe}{K} + \frac{k_e^0}{k_g} \quad (13)$$

其中, k_g 为气体导热系数, K 为依赖于床和球尺寸的系数, k_e^0 为滞止有效热导。

(2) 球床壁面传热

球床壁面传热有别于中间部分的传热,壁面传热系数 h_w 给出如下:

$$Nu_w = h_w D_p / k_g + \beta Pe \quad (14)$$

式中, β : 系数, Pe : 贝克利数。

气体在球床中的与球间的对流传热系数给出为:

$$j_s = 0.58 Re_k^{-0.3} \quad (15)$$

其中, Re_k , 雷诺数, $j_s = h Pr^{2/3} / GCp$

3.2 传热及流动模型

当球床尺寸远大于球尺寸时,可以假设球床为均匀介质,气体在球床中的流动可简化为存在一热源(对流热源),对固体而言,对流热源表示为:

$$\dot{q}_k = -hA(T_s - T_f) \quad (16)$$

其中, h 为球与气体间的传热系数, A 为单位体积的传热面积。

类似地,对气体而言,对流热源数值相等,但符号相反,流体的存在与流动同时影响了球床的有效导热,于是得出固气两相宏观均匀宏观介质模型。

对固相来说,传热为导热方程:

$$\nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + \dot{q}_N + \dot{q}_k = \rho C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (17)$$

对气相来说,传热为类稳的对流-扩散方程

$$\nabla \cdot (k_g \nabla T_f) - \dot{q}_k = \rho C_p \vec{G} \cdot (\nabla T_f) \quad (18)$$

流动由 Darcy 形式的流阻方程给出:

$$\nabla(P) + c_f \frac{|\vec{G}|}{2\rho} \vec{G} + \rho \vec{g} = 0 \quad (19)$$

其中, p , 压力, $\rho \vec{g}$, 重力, c_f , 摩擦系数。

守恒方程: $\nabla \cdot (\vec{G}) = 0 \quad (20)$

可以用有限差分法求解上述方程,用松弛迭代得到收敛解。为此,编制了程序 THPBHR,用以对球床包层及第一壁进行二维传热及流动模拟。THPBHR 能对多区结构的包层的变物性、稳态、瞬态以及各种冷却方式的两维热工水力学进行分析。

4 BITH 程序及其特点

我们将 BISON1.5 全面加以改造,并与 THPBHR 相联接,形成了热工水力及中子学综合分析的软件包 BITH, BITH 程序有如下特点:

1) 考虑共振自屏效应、综合分析热工水力及中子学。

- 2)中子分析数据库为46群中子、21群光子,中子能群划分更细,且形成群数据库的原数据库为最新版本(ENDF/B-VI),因而数据更准确,计算更精确。
- 3)数据库中核素比原BISON1.5所带的核参数库更多,可以适应处理核废料及其它需要,且考虑的反应更全面,包括 $(n, 2n)$, (n, γ) , $(n, 3n)$, 位移截面, 裂变截面等。
- 4)输入比原BISON1.5直观,用户只需填写各区材料名称、体积比及核素构成而无需初期计算核密度,数据文件可由输入数据文件名指定,由程序实现文件与通道号连接,可适应不同FORTRAN编译程序需要和用户需要。
- 5)用户可自由选择单独计算中子学或中子学与热工水力综合分析。
- 6)用户无需构造燃耗链,就可进行各种燃料循环的计算,燃耗链更全面,计算更准确。

5 FEB 外包层热工水力与中子学耦合计算

表5列出用BITH程序对FEB外包层的中子学与热工水力的综合分析结果,结果表明,包层可以实现氦自给, F 值也能达到要求,热工水力设计保证了释氦温度窗口及包层内各区不超过温度极限,并且,从热工水力的角度来看,产氦区的低压载带氦气可有效地对其冷却。

表5 FEB 外包层中子学与热工水力综合分析结果

Tab.5 The analysis results of neutronics and thermal-hydraulics for FEB outboard blanket

冷却剂	氦气		
冷却剂系统压力	$20 \times 10^5 \text{Pa}$		
载氦氦气系统压力	$2 \times 10^5 \text{Pa}$		
区号	1	2	3
压降($\times 10^5 \text{Pa}$)			
氦增殖区	1.3	0.02	
铀增殖区	2	1	0.5
第一壁	0.1		
氦气进口速度(m/s)			
氦增殖区	4.97	2.76	
铀增殖区	2.72	1.90	1.37
第一壁	55		
氦气进口/出口温度(K)			
氦增殖区	623/985	623/614	
铀增殖区	423/695	423/654	423/554
第一壁	423/503		
最高温度(K)			
氦增殖区	1062	639	
铀增殖区	869	725	580
结构材料	957		
第一壁	550		
石墨瓦	570		
主要反应率			
$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	6.1566E-1		
$^6\text{Li}(n, \alpha)$	1.2933		
$^7\text{Li}(n, n' \alpha)$	1.5976E-2		

6 结束语

研制开发了热工水力与中子学综合分析软件包,其 FORTRAN 源程序共约 10,000 余条,可以对聚变堆及混合堆包层进行热工水力学及中子学的分析,可以适应不同包层类型(如处理核废料、增殖裂变燃料等)的计算分析,对参考包层的计算分析表明,共振自屏效应对包层中子学性能有相当的影响,温度效应也对中子学产生一定的影响,由于目前尚缺乏 46 群共振自屏因子的数据,进一步的工作将是补充这方面的数据,以对处理高放废物的包层进行设计与全面分析。

参 考 文 献

- 1 CCC-464, Bison 1.5. A One Dimensional Discrete Ordinate Neutron Transport and Burnup Calculation Code System. RSIC Computer Collection.
- 2 I. I. Bondarenko. Group Constants for Nuclear Reactor Calculation.
- 3 B. J. Xiao, L. J. Qiu. Steady State Thermal-hydraulic Models of Pebble Bed Blankets on Hybrid Reactor. Fusion Engineering and Design, 1995, 27.
- 4 R. B. Kidman. Cross Section Structure Interpolation Schemes. HEDL-TME-71-90.
- 5 王少杰,阮可强,李寿桐.核科学与工程,1993,4.
- 6 王少杰,原子能科学研究院硕士论文,1993.
- 7 S. Yagi, D. Kuni. Studies on effective conductivities in packed beds. AIChE J. 1957, 3(3):373-981.
- 8 D. Wakao, D. Vortmeyer. Pressure dependency of effective conductivity of particles. Chem. Eng. Sci., 1971, 26:1753-1765.
- 9 G. P. Willhite, D. Kuni, J. M. Smith. Heat transfer in beds of fine particles. AIChE J. 1962, 340-345.
- 10 R. Bauer, E. U. Schulander. Effective radial thermal conductivity of packings in gas flow, Int. Chem. Eng. 1978, 18(2):181-204.
- 11 高祖瑛. 高温气冷堆的热工水力. 清华大学报告, 1990.

THERMAL-HYDRAULIC AND NEUTRONIC SIMULATION AND ANALYSIS OF BLANKETS OF FUSION OR FUSION-FISSION HYBRID REACTORS

XIAO BINGJIA QIU LIJIAN WU YICAN

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica)

(Manuscript received 25 April, 1996)

ABSTRACT

BITH code was developed for the blanket thermal-hydraulic and neutronic analysis of fusion or fusion-fission hybrid reactor, with BISON1.5 neutronic code selected as reference code in neutronic transport. By modifying BISON1.5 to consider the resonance shielding effect and substituting BISON1.5 data library and improving the fuel burning calculation method, BITH code can be

used in the neutronic analysis of HLW transmutation and radiation damage etc. THPBHR code developed by the author was chosen as reference code in BITH thermal-hydraulic calculation. The systematical analysis of a reference blanket was also given.

Key words blanket thermal-hydraulics neutronics code data library
resonance shielding

附录 1

运输库中核素及其所在位置表(角度展开级:P5,中子:46群,光子:21群)

核素名	位置	核素名	位置	核素名	位置	核素名	位置
²⁴¹ Am	1	¹³⁴ Cs	151	⁹³ Nb	301	²⁴³ Pu	451
²⁴² Am	7	¹³⁵ Cs	157	⁹⁴ Nb	307	²⁴⁴ Pu	457
^{244m} Am	13	¹³⁶ Cs	163	⁹⁵ Nb	313	Sl	463
⁴²³ Am	19	¹³⁷ Cs	169	⁵⁸ Ni	319	⁸⁸ Sr	469
²⁴⁴ Am	25	⁶³ Cu	175	⁵⁹ Ni	325	⁸⁹ Sr	475
^{244m} Am	31	⁶⁵ Cu	181	⁶⁰ Ni	331	⁹⁰ Sr	481
¹⁰ B	37	¹⁹ F	187	⁶¹ Ni	337	¹⁸¹ Ta	487
¹¹ B	43	⁵⁴ Fe	193	⁶² Ni	343	¹⁸² Ta	493
⁹ Be	49	⁵⁶ Fe	199	⁶⁴ Ni	349	⁹⁹ Tc	499
Co	55	⁵⁷ Fe	205	²³⁷ Np	355	²³² Th	505
¹² C	61	⁵⁸ Fe	211	²³⁸ Np	361	Ti	511
Ca	67	¹ H	217	²³⁹ Np	367	²³² U	517
Cd	73	² H(D)	223	¹⁶ O	373	²³³ U	523
Cl	79	³ H(T)	229	²³¹ Pa	379	²³⁴ U	529
²⁴² Cm	85	³ He	235	²³³ Pa	385	²³⁵ U	535
²⁴³ Cm	91	⁴ He	241	²⁰⁶ Pb	391	²³⁶ U	541
²⁴⁴ Cm	97	¹²⁹ I	247	²⁰⁷ Pb	397	²³⁷ U	547
²⁴⁵ Cm	103	¹³⁰ I	253	²⁰⁸ Pb	403	²³⁸ U	553
²⁴⁶ Cm	109	K	259	²³⁶ Pu	409	²³⁹ U	559
²⁴⁷ Cm	115	⁶ Li	265	²³⁷ Pu	415	V	565
²⁴⁸ Cm	121	⁷ Li	271	²³⁸ Pu	421	¹⁸² W	571
⁵⁰ Cr	127	Mg	277	²³⁹ Pu	427	¹⁸³ W	577
⁵² Cr	133	Mo	283	²⁴⁰ Pu	433	¹⁸³ W	583
⁵³ Cr	139	¹⁴ N	289	²⁴¹ Pu	439	¹⁸⁶ W	589
⁵⁴ Cr	145	²³ Na	295	²⁴² Pu	445	⁹⁰ Zr	595

附录3 中子及光子群结构

46群中子序号	中子能量区间(eV)	21群光子序号	能量区间(MeV)
1	1.4918E7—1.3499E7	1	14.0—12.0
2	1.3499E7—1.2214E7	2	12.0—10.0
3	1.2214E7—1.1052E7	3	10.0—8.0
4	1.1052E7—1.0000E7	4	8.0—7.5
5	1.0000E7—9.0484E6	5	7.5—7.0
6	9.0484E6—8.1873E6	6	7.0—6.5
7	8.1873E6—7.4082E6	7	6.5—6.0
8	7.4082E6—6.7032E6	8	6.0—5.5
9	6.7032E6—6.0653E6	9	5.5—5.0
10	6.0653E6—5.4881E6	10	5.0—4.5
11	5.4881E6—4.9659E6	11	4.5—4.0
12	4.9659E6—4.4933E6	12	4.0—3.5
13	4.4933E6—4.0657E6	13	3.5—3.0
14	4.0657E6—3.6788E6	14	3.0—2.5
15	3.6788E6—3.3287E6	15	2.5—2.0
16	3.3287E6—3.0119E6	16	2.0—1.5
17	3.0119E6—2.7253E6	17	1.5—1.0
18	2.7253E6—2.4660E6	18	1.0—0.4
19	2.4660E6—1.8268E6	19	0.4—0.2
20	1.8268E6—1.3534E6	20	0.2—0.1
21	1.3534E6—1.0026E6	21	0.1—0.01
22	1.0026E6—7.4276E5		
23	7.4276E5—5.5023E5		
24	5.5023E5—4.0762E5		
25	4.0762E5—3.0197E5		
26	3.0197E5—2.2371E5		
27	2.2371E5—1.6573E5		
28	1.6573E5—1.2277E5		
29	1.2277E5—6.7379E4		
30	6.7379E4—3.1828E4		
31	3.1828E4—1.5034E4		
32	1.5034E4—7.1017E3		
33	7.1017E3—3.3546E3		
34	3.3546E3—1.5846E3		
35	1.5846E3—7.4852E2		
36	7.4852E2—3.5358E2		
37	3.5358E2—1.6702E2		
38	1.6702E2—7.8893E1		
39	7.8893E1—3.7267E1		
40	3.7267E1—1.7603E1		
41	1.7603E1—8.3153E0		
42	8.3153—3.9279		
43	3.9279—1.8554		
44	1.8554—0.87643		
45	0.87643—0.41399		
46	0.41399—0.02200		