

快堆燃料组件热工流体力学计算研究

刘一哲, 喻宏

(中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

摘要:对于钠冷快堆,在燃料和包壳最高温度等设计限值下,为获得较高的堆芯出口温度,需深入分析燃料组件内的热工流体力学问题,准确预测组件内的冷却剂温度分布。本文在 CRT 模型和 F. C. Engel 等人工作的基础上,提出了 ICRT 压降关系式,用以计算冷却剂在湍流区、过渡流区和层流区的棒束压降;引入 CRT 模型和 WEST 对流传热模型,改进了 SUPERENERGY 子通道分析程序,并将改进程序与原程序计算结果进行了对比,结果表明:最热子通道出口温度略有降低,液膜温压略有增加;并用计算流体力学软件 CFX 对中国实验快堆单盒燃料组件活性段进行了三维数值模拟,将计算结果用 CRT 模型、ICRT 压降关系式及改进后的 SUPERENERGY 子通道分析程序进行了验证,相互符合较好。

关键词:快堆;单盒燃料组件;压降;流速分布;温度分布

中图分类号:TL33 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2008)02-0128-07

Thermal-Hydraulic Analysis of Fuel Subassemblies for Sodium-Cooled Fast Reactor

LIU Yi-zhe, YU Hong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-95, Beijing 102413, China)

Abstract: Thermal-hydraulic analysis of fuel subassemblies for the sodium-cooled fast reactor is important in respecting design limits while achieving higher outlet temperature, and it is essential to predict, reliably and accurately, the coolant temperature distribution in individual fuel subassembly. Based on F. C. Engel's work and CRT model, three semiempirical correlations ICRT were developed to calculate laminar, transition, and turbulent parallel flow pressure drop across wire-wrapped rods. With CRT model and the heat transfer coefficient WEST, reasonably accurate temperature distribution in a fuel subassembly was obtained by the improved subchannel analysis code SUPERENERGY. The results indicate lower coolant temperature and higher film temperature in internal regions. The code CFX was used to show the 3D flow field and temperature distribution in a rod bundle, and the numerical results show good agreement with CRT model, ICRT correlation and the improved SUPERENERGY code.

Key words: fast reactor; fuel subassembly; pressure drop; velocity distribution; temperature distribution

单盒燃料组件内冷却剂的流动和传热特性是钠冷快堆堆芯热工流体力学分析的基础。美国、俄罗斯及日本等国家在 20 世纪 70 年代进行过大量的试验并开发出 1 批子通道分析程序。90 年代中后期,随着韩国和印度等国家进入快堆领域,数值计算与试验工作逐步深入。2000 年,在 IAEA 组织召开的国际快堆热工流体力学会议上,各国专家指出,快堆燃料组件三维热工程序的开发应用是未来的研究方向^[1]。但到目前为止,国内在该领域开展的研究和试验并不很多。

本文的目的在于研究快堆燃料组件的热工流体力学特性,详细分析冷却剂流经棒束时的压力损失、速度分布和温升,改进压降关系式和 SUPERENERGY 程序,论述重要参数的选取,并探索 CFD 方法在该领域的应用。

1 棒束压降关系式研究

在快堆燃料组件的设计中,绕丝缠绕燃料棒的间隔技术已被广泛采用。快堆燃料元件通常按三角形栅格形式排列,采用金属绕丝定位组成棒束装在 1 根六角形外套管内,外套管与端部联接件一起组成 1 盒燃料组件(图 1)。

棒束及堆芯的压力损失通常约占反应堆总压力损失的 40%和 80%。由于棒束结构特殊,冷却剂压降较难确定,在设计阶段通常由经验或半经验公式计算给出,但偏差较大,如经典的 Novendstern 关系式^[2]对中国实验快堆(CEFR)和快中子注量率试验装置(FFTF)的计算值与试验数据的相对偏差分别为±17%和±14%^[3]。本文在 Chiu-Rohsenow-Todreas (CRT)模型^[2]和 F. C. Engel 等^[4]工作的基础上,对几个半经验公式进行改进,用以计算冷却剂在湍流区、过渡流区和层流区的棒束压降。

1.1 棒束压降关系式

在 $Re \geq 5\ 000$ 湍流工况下,CRT 模型给出了内子通道和边子通道中的冷却剂压降关系式^[2]:

$$\Delta p_1 = f_{s1} \frac{L}{D_{e1}} \cdot \frac{\rho v_1^2}{2}$$

$$\left[1 + C_1 \frac{A_{r1}}{A_1} \cdot \frac{D_{e1}}{H} \cdot \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2} \right] \quad (1)$$

$$\Delta p_2 = f_{s2} \frac{L}{D_{e2}} \cdot \frac{\rho v_2^2}{2}$$

$$\left\{ 1 + \left[C_2 n \left(\frac{v_T}{v_2} \right)_{\text{间隙}} \right]^2 \right\}^{1.375} \quad (2)$$

式中: f_{si} 为基于无绕丝通道的表面摩擦系数,无量纲; L 为棒束长度,m; D_{ei} 为子通道水力当量直径,m; ρ 为冷却剂密度,kg/m³; A_{ri} 为在子通道里 1 个螺距范围内单根绕丝的投影面积,m²; A_i 为在子通道内没有绕丝时的流通面积,m²; n 和 $(v_T/v_2)_{\text{间隙}}$ 分别通过公式计算给出; C_i 是由试验确定的常数,无量纲。

为获得湍流区棒束压降,本文基于 CRT 模型,认为:

$$A_{\text{tat}} \Delta p = A_{1\text{tat}} \Delta p_1 + A_{2\text{tat}} \Delta p_2 \quad (3)$$

则

$$\Delta p = \frac{N_1 A_1}{N_1 A_1 + N_2 A_2} \Delta p_1 + \frac{N_2 A_2}{N_1 A_1 + N_2 A_2} \Delta p_2 \quad (4)$$

其中, N_i 、 A_i 分别为子通道的个数和流通面积。

选取合适的管内摩擦因子,将式(4)称为改进型 CRT 模型(或 ICRT 关系式)。

采用工程中用到的 Fanning 摩擦因子,表达式为:

$$f_s = 4f \quad (5)$$

其中, f 为 Moody 摩擦因子,经过选取, f 由 Colebrook 公式^[5]给出,有:

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -4 \lg \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{1.255}{Re f^{0.5}} \right) \quad (6)$$

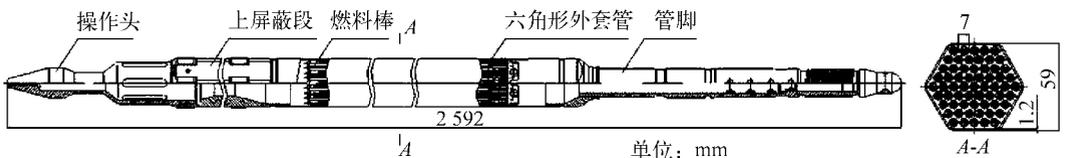


图 1 中国实验快堆单盒燃料组件

Fig. 1 Fuel subassembly of China Experimental Fast Reactor

结合 Westinghouse 的 F. C. Engel 等^[4]的工作,并与CEFR试验数据^[6]进行拟合,分别给出过渡流区和层流区的压降关系式。

在 $400 < Re < 5\ 000$ 的过渡流区,压降关系式为:

$$\Delta p = \left[\frac{\varphi}{Re\sqrt{H}} \left(\frac{P}{D} \right)^{1.5} (1 - \Psi)^{0.5} + \frac{0.3M_1}{Re^{0.25}} \Psi^{0.5} \right] \frac{L}{D_e} \cdot \frac{\bar{\rho}^2}{2} \quad (7)$$

φ 近似看作是一与水力当量粗糙度 ϵ 有关的无量纲参数,经线性拟合后为:

$$\varphi = 24.925 + 350\ 000\epsilon \quad (8)$$

Ψ 称为间断因子,是一分别连接湍流区和层流区的参数, $\Psi = \frac{Re - 400}{4\ 600}$ 。

Westinghouse 的试验报告分析指出:从湍流区到过渡流区,再到层流区,燃料组件内的压降变化较为平缓。

在 $Re \leq 400$ 的层流区,压降关系式为:

$$\Delta p = \left[\frac{\varphi}{Re\sqrt{H}} \left(\frac{P}{D} \right)^{1.5} \right] \frac{L}{D_e} \cdot \frac{\bar{\rho}^2}{2} \quad (9)$$

上述公式的适用范围如下:1 盒燃料组件内有 19 ~ 271 根燃料元件,元件直径为 5 ~ 12 mm, P/D 为 1.06 ~ 1.42, H/D 为 8 ~ 90,全雷诺数工况。

1.2 关系式验证

分别选取 CEFR、意大利燃料和材料辐照考验实验快堆(PEC)和 FFTF,用 ICRT 关系式对其棒束压降进行计算,燃料组件参数列于表 1。结果表明,ICRT 关系式计算值与 CEFR 试验数据的相对偏差为 $\pm 5\%$ (图 2,水温 $90\ ^\circ\text{C}$),与 PEC 专有关系式计算值的相对偏差

亦为 $\pm 5\%$,与 FFTF 试验数据的相对偏差为 $\pm 7\%$ (图 3)。在高雷诺数区,相对偏差进一步减小,计算值与试验值极为接近。

2 对 SUPERENERGY 程序的改进

子通道分析程序 SUPERENERGY 于 1976 年由美国阿贡程序中心开发。引进到国内后,为适应设计的需要,对源程序做了以下改进^[7]:1) 对燃料组件内径向功率分布采用内插法输入,这样可减少工作量;2) 增加了对燃料棒包壳温度和燃料温度的计算功能;3) 增加了寻找最热子通道、包壳和燃料最高名义温度及它们所在位置的功能,而不必输出所有节点的计算值,直接输出所需要的结果。

结合文献^[8],本文对程序中的速度模型和对流传热模型进行了修改。

2.1 速度模型

在程序中,冷却剂在内子通道、边子通道和角子通道中的近似轴向流速 (v_1 、 v_2 和 v_3) 由 Novendstern 模型确定。研究表明,Novendstern 模型的计算值与试验值相比有较大分歧,而 CRT 模型的计算结果更接近试验值^[3]。

Novendstern 模型为:

$$v_i = \frac{A_T \bar{v}}{\sum_{j=1}^3 N_j A_j \left(\frac{D_{ej}}{D_{ei}} \right)^{0.714}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

CRT 认为,内子通道和边子通道中的流速分别为:

$$v_i = X_i \bar{v} \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

X_i 为割流参数,其中:

表 1 燃料组件参数

Table 1 Parameters of fuel subassembly

快堆名称	燃料组件参数							
	N	P/mm	D/mm	s/mm	$D_{\text{flat}}/\text{mm}$	H/mm	L/mm	P/D
CEFR	61	7	6	0.95	55.6	100	1 350	1.167
PEC	91	7.9	6.7	1.2	77.8	160	1 650	1.179
FFTF	217	7.31	5.84	1.47	110	305	2 380	1.252

注: N 、 P 、 D 、 s 、 D_{flat} 、 H 、 L 、 P/D 分别表示 1 盒燃料组件中燃料棒根数、棒节距、棒直径、绕丝直径、外套管内对边距、绕丝螺距、棒束长度、棒节距-直径比

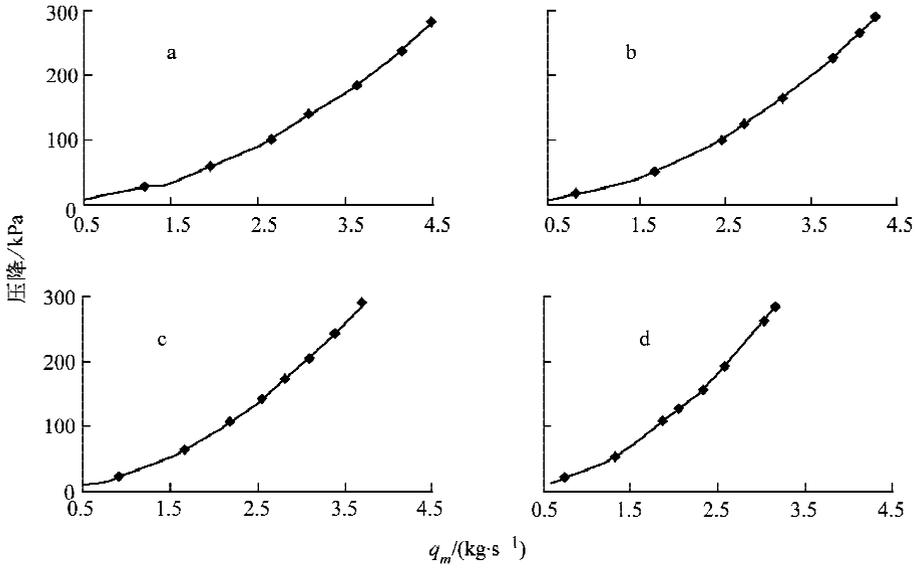


图2 CEFR不同流量区的燃料组件压降

Fig. 2 Pressure drop through fuel subassembly in different flow zones of CEFR under experiment with water

实线——ICRT关系式计算值; ◆——试验值

a——第1流量区; b——第2流量区; c——第3流量区; d——第4流量区

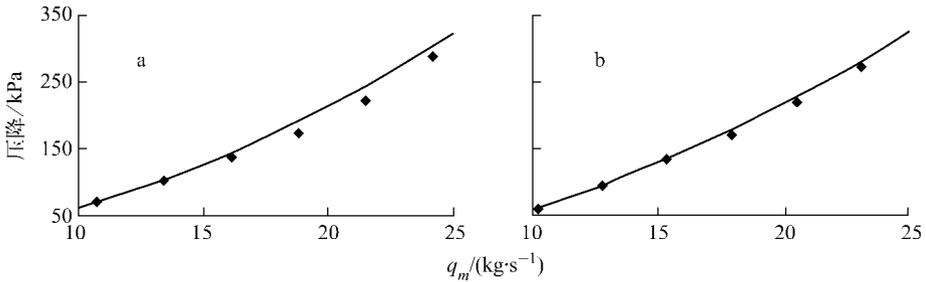


图3 FFTF燃料组件棒束压降

Fig. 3 Pressure drop through rod bundle of FFTF

实线——ICRT关系式计算值; ◆——试验值

钠温, °C: a——427; b——593

$$X_1 = A_T \left/ \left(N_1 A_1 + (N_2 A_2 + N_3 A_3) \left(\frac{D_{e2}}{D_{e1}} \right)^{0.714} \cdot N_2 A_2 + N_3 A_3 \right) \right. \quad (13)$$

$$\left. \left(\frac{1 + C_1 \frac{A_{r1}}{A_1} \cdot \frac{D_{e1}}{H} \cdot \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2}}{C_3 \left(1 + \left(C_2 n \left(\frac{v_T}{v_2} \right)_{\text{间隙}} \right)^2 \right)^{1.375}} \right)^{0.571} \right) \quad (12)$$

$$X_2 = A_T \left/ \left(N_1 A_1 \left(\frac{D_{e1}}{D_{e2}} \right)^{0.714} \cdot \right. \right.$$

$$\left. \left. \left(\frac{C_3 \left(1 + \left(C_2 n \left(\frac{v_T}{v_2} \right)_{\text{间隙}} \right)^2 \right)^{1.375}}{1 + C_1 \frac{A_{r1}}{A_1} \cdot \frac{D_{e1}}{H} \cdot \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2}} \right)^{0.571} \right) \right. +$$

2.2 对流传热模型

在程序中,包壳与冷却剂间的对流传热模型使用的是 Seban-Shimazaki 关系式^[9]:

$$Nu = 5.0 + 0.025 Pe^{0.8} \quad (14)$$

式(14)主要用于计算圆管内均匀壁温情况下的对流传热。对于液态金属钠,流道的几何形状对热传递影响大,非圆形管道的对流传热系数公式不能简单地用圆形管道的公式代替。在冷却剂流经棒束时,流道情况非常复杂,需采用更加合理的对流传热关系式。

这里采用 Westinghouse 的 Kazami 和 Carelli 在研究 CRBRP 的过程中给出的 WEST 关系式^[10]：

$$Nu = \left[-16.15 + 24.96 \frac{P}{D} - 8.55 \left(\frac{P}{D} \right)^2 \right] Pe^{0.3} \quad (15)$$

式(15)的适用条件为： $1.05 \leq P/D \leq 1.15$ ， $150 \leq Pe \leq 1000$ 。

对于 $Pe \leq 150$ ，采用下式：

$$Nu = 4.496 \left[-16.15 + 24.96 \frac{P}{D} - 8.55 \left(\frac{P}{D} \right)^2 \right] \quad (16)$$

在 P/D 值高于 1.15 时，采用以下关系式：

$$Nu = 4.0 + 0.16 \left(\frac{P}{D} \right)^{5.0} + 0.33 \left(\frac{P}{D} \right)^{3.8} \cdot \left(\frac{Pe}{100} \right)^{0.86} \quad (17)$$

该式的适用条件为： $1.15 \leq P/D \leq 1.30$ ， $10 \leq Pe \leq 5000$ 。

2.3 计算结果对比

在对速度模型和交混参数分析的基础上，以 CEFR 为例进行了对比计算，割流参数 X 用 CRT 模型计算(表 2)。

表 2 由不同模型得到的 CEFR 燃料组件割流参数
Table 2 Parameters of flow split from different models for CEFR'SA

模型	X_1	X_2	X_3	$(X_2 - X_1)/X_1$
Novendstern	0.946 4	1.113 8	0.882 4	0.177
CRT	0.966 6	1.060 3	1.060 3	0.097

从表 2 可看出，对于内子通道中的冷却剂流速，CRT 模型计算值高于 Novendstern 模型计算值；在边子通道中，CRT 计算值低于 Novendstern 计算值。即对于 $(x_2 - x_1)/x_1$ ，Novendstern 计算值约为 17.7%，CRT 计算值约为 9.7%。文献[11]指出，边子通道中的冷却剂流速通常比内子通道约高 10%。CRT 模型的计算结果与上述结论接近，表明了 CRT 模型的合理性。

CRT 模型的引入对程序计算结果产生了一定影响，因内子通道中冷却剂流速较原程序增大，故出口温度略低于原程序值(表 3)。由表 3 中的 CEFR 计算结果可知，最热子通道出口温度比原程序计算值低 4~5℃，而边子通道出口温度则略低于原程序值。这一结果与韩国的一些试验结果相符^[11]，即最热子通道出口温度的试验值略低于 SUPERENERGY 计算值。同时，由于 WEST 对流传热模型的引入，液膜温压略有增加(表 4)。

表 3 由不同模型计算得到的 CEFR 各流量区最热子通道出口温度

Table 3 Outlet temperature of hottest subchannel from different models for different flow zones of CEFR

流量区	热组件盒功率/kW	最热子通道出口名义温度/℃	
		Novendstern 模型	CRT 模型
1	968.9	602	597
2	870.4	604	600
3	777.8	603	599
4	705.7	607	603

表 4 由不同模型得到的 CEFR 最热子通道液膜温压计算结果对比

Table 4 Comparison of film temperature in the hottest subchannel with different models for different flow zones of CEFR

流量区	子通道出口最高名义温度/℃	Nu		液膜温压/℃	
		WEST	Seban-Shimazaki	WEST	Seban-Shimazaki
1	597	5.37	6.65	9.7	7.8
2	600	5.27	6.51	9.1	7.4
3	599	5.19	6.38	8.5	6.9
4	603	5.11	6.26	8.2	6.7

3 数值模拟计算

详细了解冷却剂在快堆燃料组件中的流速分布和温度分布,对确定局部包壳温度的详细分布和确定组件套管温度梯度极为重要。在棒束的内部区域,流动机理通常为:湍流交混、流动扫掠和横流交混;在棒束的外围区域,流体沿盒壁流动,即存在周向绕流。

采用 CFX 程序对 CEFR 单盒燃料组件活性段进行了三维数值模拟。几何模型和物理模型详情参见文献[12],在此,仅给出部分计算结果,并对结果予以讨论。

截取 9 个截面的数据进行比较和分析,结果表明:

1) 由于绕丝的同向性,燃料组件棒束段的冷却剂在靠近壁面的区域存在周期性旋涡流动,平均绕流速度约为 0.28 m/s,是从绕丝角预测的 1.08 倍;

2) 可观察到冷却剂在各子通道间的交混情况,内子通道中流动状况较复杂,冷却剂在子通道间交混剧烈,但轴向流速周期性变化不明显,在边子通道中,由于绕丝的同向性,冷却剂轴向流速呈现明显的周期性变化,是平均轴向流速的 1.01~1.14 倍;

3) 边子通道与内子通道中的冷却剂平均轴向流速之比约为 1.102,CRT 模型的计算结果为 1.096,两者相对偏差为 0.5%,相互符合很好;

4) 子通道轴向温升的计算结果与改进后的 SUPERENERGY 程序计算结果比较表明,最热子通道轴向温升计算值间的相对偏差为 -7.6%(图 4);

5) 轴向压降的计算结果与 ICRT 关系式计算结果比较表明,在额定流量下,两计算值间的相对偏差为 -3.4%,相互符合较好(图 5)。

4 结论

1) 对 CEFR、PEC 和 FFTF 燃料组件的计算验证表明,ICRT 棒束压降关系式计算值能与试验值较好地符合,该关系式可用于快堆燃料组件的初步热工设计和热工分析。

2) 由 CRT 模型得到的冷却剂在子通道内的近似轴向速度分布与试验结果符合较好,在此基础上,对 SUPERENERGY 子通道分析程

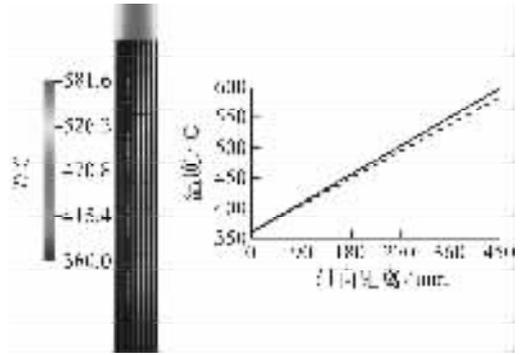


图 4 CEFR 单盒燃料组件最热子通道出口温度计算结果对比

Fig. 4 Comparison of outlet temperature of the hottest subchannel from different codes for fuel sub-assembly of CEFR

实线——SUPERENERGY 计算值;虚线——CFX 计算值

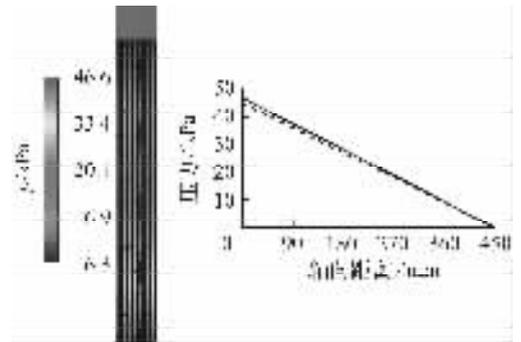


图 5 CEFR 单盒燃料组件压降计算结果对比

Fig. 5 Comparison of pressure drop from different codes for fuel sub-assembly of CEFR
实线——ICRT 计算值;虚线——CFX 计算值

序进行了改进,结果表明,由于 CRT 速度模型和 WEST 对流传热模型的引入,燃料组件最热子通道出口温度较原程序计算值略有降低,液膜温压略有增加。

3) 为实现分析模型的精细化,探索了 CFD 程序 CFX 在该领域的使用。对 CEFR 单盒燃料组件活性段进行了数值模拟,计算结果表明:周向绕流是存在的,由于绕丝的作用,冷却剂在棒束内剧烈交混,有效地降低了温度梯度;同时,部分计算结果与 CRT 模型 ICRT 压降关系式及改进后的 SUPERENERGY 子通道分析程序计算结果较好符合,表明了 CFD 方法在该领域有一定的应用前景。

需指出的是,快堆燃料组件三维热工程序的开发应用是国际上的热点和难点课题,这是

快堆堆芯热工分析的一个目标和任务,也是发展方向。本文将压降关系式、子通道分析程序和 CFD 方法结合起来考虑,并对计算结果进行了相互比较和验证,获得了部分重要数据和参数,而这一方面的研究还将持续深入下去。

参考文献:

- [1] IAEA. LMFBR core thermohydraulics: Status and prospects, IAEA-TECDOC-1157 [R]. Vienna: IAEA, 2000.
- [2] WALTAR A E, REYNOLDS A B. 钠冷快增殖堆[M]. 苏著亭, 叶长源, 阎凤文, 等, 译. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [3] 刘一哲. 快堆单盒燃料组件内冷却剂流场温度场计算研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院快堆工程部, 2007.
- [4] ENGEL F C, MARKLEY R A. Laminar, transition, and turbulent parallel flow pressure drop across wire-wrap-spaced rod bundles[J]. Nuclear Science and Engineering, 1979, 69: 290-296.
- [5] JAMAL M S. 流体流动手册[M]. 邓敦夏, 译. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [6] 佚名. CEFR 堆芯组件模拟件水力特性实验研究[R]. 北京: 中国原子能科学研究院快堆工程部, 2002.
- [7] 杨福昌. 平衡态氧化铀堆芯稳态热工设计[R]. 北京: 中国原子能科学研究院快堆工程部, 2002.
- [8] KIM W S, KIN Y G. Development of subchannel analysis code MATRA-LMR for KALIMER sub-assembly thermal-hydraulics [C]//LMFBR Core Thermohydraulics: Status and Prospects, IAEA-TECDOC-1157. Vienna: IAEA, 2000; 207-222.
- [9] 赵兆颐, 朱瑞安. 反应堆热工水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [10] 俞冀阳, 贾宝山. 反应堆热工水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] ITAGAWA K, SENZAKI M, KAZITANI M, et al. Flow velocity distribution in the wire-wrapped fuel subassembly(II)[C]// Annual Progress Report of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Tokai Works. Japan: Ibaraki, 1979; 34-43.
- [12] 刘一哲, 喻宏. 中国实验快堆单盒燃料组件内冷却剂流场温度场数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(增刊): 230-234.
LIU Yizhe, YU Hong. Numerical simulation of flow and temperature field of fuel subassembly for China Experimental Fast Reactor[J]. At Energy Sci Technol, 2007, 41(Suppl.): 230-234 (in Chinese).