

快堆燃料组件水力特性计算

丁 振 鑫

(中国原子能科学研究院, 北京)

文章用理论计算和工程经验相结合的方法给出了我国自行设计的快堆燃料组件(参考设计)的水力特性。并与国际上发表的多种关系式计算结果进行了比较, 吻合较好。该计算结果对燃料组件的设计和热工计算有一定的参考价值。

关键词 快堆燃料组件, 水力特性计算, 理论计算与工程经验结合。

一、引 言

目前国际上很多国家, 象美国、日本、西德、法国和意大利对快堆燃料组件的水力特性都进行了大量的理论和实验研究, 发表了不少研究结果。这些研究成果对于我们研究和分析自行设计的快堆燃料组件的水力特性具有相当的参考价值。本文借用国际上公开发表的研究结果, 对我们自行设计的第一座钠冷快中子增殖实验堆(FFR)的燃料组件(参考设计)的水力特性进行计算, 并结合本人的工程经验作适当修正。试图将计算结果供燃料组件设计和热工初步计算作参考。当然, 精确的结果还应通过实验方能得到。因为理论计算的不确定因素较多, 组件间的几何参数也不尽相同。

二、计 算 方 法

绕丝组件的摩阻计算, 国际上通常采用的方法主要有以下三种:

1. 首先按管内流动的常用的水力当量直径方法求出光棒束(不考虑绕丝的影响)时的摩阻系数, 然后再根据组件的具体几何参数求出绕丝组件的压降倍增系数, 用这个倍增系数与光棒束的摩阻系数相乘, 乘积即为绕丝棒束的实际摩阻系数。光棒束的摩阻系数通常用达西关系式计算:

$$f_B = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (1)$$

式中, f_B 为光棒束的摩阻系数, Re 为绕丝棒束组件的流动雷诺数。

倍增系数(M)是绕丝棒束组件几何参数的函数, 如 Novendstern^[1]用下式计算 M 值:

$$M = [1.034 / (P/D)^{0.124} + 29.7(P/D)^{6.94} \cdot Re^{0.086} / (H/D)^{2.289}]^{0.885} \quad (2)$$

式中, P/D 为组件的棒栅距与棒径之比, H/D 为绕丝螺距与棒径之比。

最后得到绕丝棒束组件的摩阻系数:

$$f_w = M f_B = 0.3164 M / Re^{0.25} \quad (3)$$

式中, f_w 为绕丝组件的摩阻系数。

2. 考虑到绕丝引起的旋流的影响, 使用“有效流速”的概念, 对通常管内流动时的雷诺数、摩阻系数按照组件的几何参数进行修正, 得到绕丝棒束组件的摩阻系数。如 Rehme^[2]

就采用这种方法:

$$(W_{eff}/W_B)^2 = (P/D)^{0.5} + [7.6(d_w/H) \cdot (P/D)^2]^{2.16} \quad (4)$$

$$F = (P/D)^{0.5} + [7.6(d_w/H)(P/D)^2]^{2.16} \quad (5)$$

则:

$$f' = (f/F) \cdot (s_i/s_b) = [\Delta P / (\rho/2)(L/D_c) W_B^2 F] (s_i/s_b) \quad (6)$$

$$Re' = Re \sqrt{F} = (D_c/\nu) W_B \sqrt{F} \quad (7)$$

$$f' = 64/Re' + 0.0816/(Re')^{0.133} \quad (8)$$

式中, W_{eff} 为考虑到绕丝引起的围绕棒的旋转流后的有效流速; W_B 为棒束的轴向平均流速; d_w 为绕丝的直径; s_i 为组件的总润湿周长(包括棒、绕丝和组件套管内壁); s_b 为棒束的润湿周长(不包括组件套管内壁); ρ 为流体的密度; ν 为流体的运动粘性系统; L 为组件的轴向长度; f' 和 Re' 分别为修正摩擦系数和修正雷诺数。

3. 借用前人的经验或半经验公式进行计算, 作一定修正。

本计算采用第三种方法, 借用意大利PEC快堆燃料组件的经验关系式进行计算, 然后作些修正。借用PEC堆的经验关系式, 是考虑到它的几何参数与我们组件的几何参数比较接近, 算出的结果与实际情况会较吻合。两组组件的几何参数列于表 1。

表 1 本组件和PEC组件的几何参数

Table 1 The geometrical parameters of FFR assembly and PEC's assembly

组 件	棒数 N_R	棒径 D/mm	绕丝直径 d_w/mm	棒 栅 距 P/mm	绕丝螺距 H/mm	P/D	H/D
PEC组件 ^[3]	91	6.70	1.20	7.91	160	1.18	23.88
本组件 ^[4]	61	6.00	0.95	7.00	144	1.17	24.00

在具体计算中, 采用各段叠加的方法, 把组件按流道的横截面形状分成 10 段, 先计算各段压降, 然后把各段压降加起来, 即得到组件的总压降。这 10 段分别为(图 1):

(1) 燃料元件段: 包括燃料棒束段、上下再生段和下屏蔽段, 这部分的流道截面相同; (2) 上屏蔽段; (3) 进口段; (4) 出口段; (5) 燃料元件支承架; (6) 上屏蔽元件支承架。其余几段流道为过渡段。

三、计 算 公 式

1. 燃料元件段的摩擦系数^[3]

$$f_1 = 0.475 Re^{-0.268} \quad (9)$$

式中 Re 为燃料元件段的平均流动雷诺数。

2. 上屏蔽元件段的摩擦系数^[5]

$$f_2 = 0.55 Re^{-0.25} \quad (10)$$

式中 Re 为上屏蔽元件段的平均流动雷诺数。

3. 流道突然扩大时的阻力系数

$$K_c = (1 - F_1/F_2)^2 \quad (11)$$

式中, F_1 和 F_2 分别为小流道和大流道的流通面积, 在计算压头时, 用小流道中的流速计

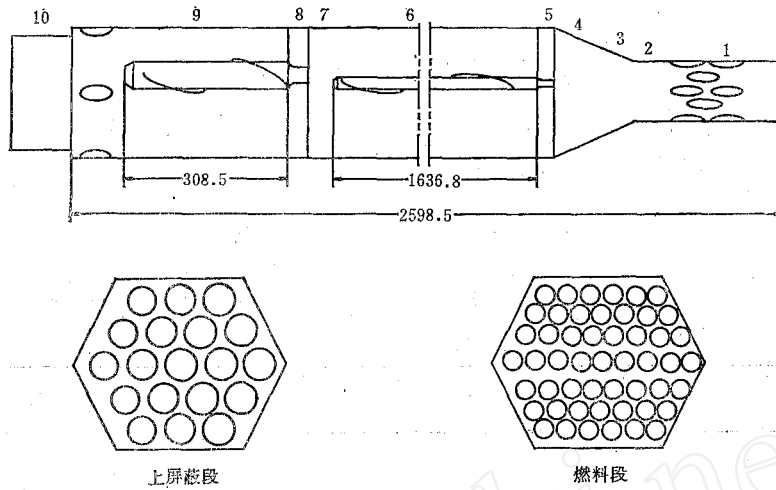


图 1 燃料组件流道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flow channel in the fuel assembly

算速度头。

4. 流道突然收缩时的阻力系数

$$K_c = 0.4(1.25 - F_1/F_2), \quad F_1/F_2 < 0.715 \quad (12)$$

$$K_c = 0.75(1.0 - F_1/F_2), \quad F_1/F_2 \geq 0.715 \quad (13)$$

式中, F_1 和 F_2 分别为小流道和大流道的流通面积, 并以小流道处的流速计算速度头。

5. 流道逐渐扩大时的阻力系数

$$K = 3.5(\tan \alpha)^{1.22} \cdot (1 - m) \quad (14)$$

式中, α 为扩散角, $m = F_1/F_2$, F_1 和 F_2 分别为扩散管中小流道和大流道的流通面积, 并以小流道中的流速计算速度头。

四、组件各段的水力几何参数

根据燃料组件的几何尺寸^[4], 计算组件内各段的水力几何参数, 结果列于表 2。

表 2 各级的水力几何参数

Table 2 The hydraulic geometrical parameters of various sections

水力几何参数	燃料元件	上屏蔽元件	燃料元件 支承架	上屏蔽元 件支承架	进口段	出口段	渐扩段 大流道	渐扩段 小流道
流通面积 B/mm^2	996.59	937.45	1300	1.078	2389	2507	2164.80	804.2
水力直径 D_e/mm	2.61	4.06						
流道长度 L/mm	1636.8	308.5						

五、组件各段的阻力系数

根据表 2 给出的各段的参数和上面给出的阻力系数，计得到各段的阻力系数，结果列于表 3。

表 3 各段的阻力系数
Table 3 The resistance factors of various sections

阻力系数	进口段 K_1	2 段到 3 段 K_2	3 段到 4 段 K_3	5 段 K_4	6 段 K_6	7 段到 8 段 K_7	9 段 K_8	10 段 K_9
阻力系数	1.50	0.0239	0.0002	1.50	1476.15	1.50	124.73	1.00

六、组件的压降计算

仍将组件分成 10 段 (图 1)，分别计算各段压降，然后加起来得到组件的理论计算压降值。

$$\Delta P_1 = K_1(v_1^2/2g)\gamma \quad (15)$$

$$\Delta P_{2 \rightarrow 3} = K_2(v_2^2/2g)\gamma \quad (16)$$

$$\Delta P_{3 \rightarrow 4} = K_3 v^{0.25}(v_6^{1.75}/2g)\gamma \quad (17)$$

$$\Delta P_5 = K_4(v_5^2/2g)\gamma \quad (18)$$

$$\Delta P_6 = K_6 v^{0.268}(v_6^{1.732}/2g)r \quad (19)$$

$$\Delta P_{7 \rightarrow 8} = K_7(v_8^2/2g)\gamma \quad (20)$$

$$\Delta P_9 = K_8(v_9^2/2g)\gamma \quad (21)$$

$$\Delta P_{10} = K_9(v_{10}^2/2g)\gamma \quad (22)$$

$$\Delta P_{\text{总}} = \sum_{i=1}^{10} \Delta P_i \quad (23)$$

上述式中， g 为重力加速度， γ 和 ν 为 500°C 时钠的密度和运动粘性系数 ($\gamma = 829 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.289 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)。

将上述各式中的流速按质量守恒转换成燃料元件段的流速 (v_6)，并把表 3 中的阻力系数及 500°C 时钠的热物性代入式 (23)，经化简后得到组件的理论压降关系式：

$$\Delta P_{\text{总}} = 0.007 v_6^2 + 0.0122 v_6^{1.75} + 0.1103 v_6^{1.732} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (24)$$

根据作者计算高通量堆组件压降的经验，由于所采用的阻力系数公式和数据与实际情况的差异，应在上述计算结果的基础上加上 15% 的工程裕度；另外，据文献 [4] 指出各段叠加起来的总压降要比整组件测的要低 6%，因此，作为工程上采用的压降应为：

$$\Delta P_{\text{实,总}} = 1.15 \times 1.06 \Delta P_{\text{计,总}} = 1.15 \times 1.06 (0.007 v_6^2 + 0.0122 v_6^{1.75} + 0.1103 v_6^{1.732}) \quad (25)$$

用式 (25) 对组件不同流量进行了压降计算，得到结果列于表 4—6。

表 4 组件的压降
Table 4 The pressure drop of the assembly

燃料元件段流速/ $m \cdot s^{-1}$	3.0	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5
组件压降/MPa	1.05	1.75	2.60	3.57	4.12	4.68	5.28

表 5 燃料段压降占总压降的比率
Table 5 The rate of the pressure drop of fuel section to the total pressure drop

燃料元件段流速/ $m \cdot s^{-1}$	3.0	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5
燃料段压降占总 压比例/%	83.34	82.85	82.58	82.28	82.10	81.91	81.60

表 6 总压降与流量的关系
Table 6 The relationship of the total pressure drop versus flow rate

组件流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	10.76	14.35	17.94	21.53	23.32	25.11	26.91
组件总压降/MPa	1.05	1.75	2.60	3.57	4.12	4.68	5.28

用线性回归法, 从表 6 得到组件总压降与流量的关系如下:

$$\Delta P = 0.0160 Q^{17624} \quad (26)$$

式中, Q 为组件流量(m^3/h), ΔP 为组件的总压降($\times 10^5 Pa$)。

七、计算结果的讨论

从表 5 可以看到, 在本组件中, 燃料元件段(包括燃料棒束、上下再生段和下屏蔽段)的压降是主要的压降, 占80%以上。因此, 这段压降计算是整个组件压降计算的关键。为了可靠起见, 又用国际上发表的几个不同公式进行了计算, 并与用 PEC堆的公式计算的结果进行比较, 比较情况列于表 7。

表 7 用不同摩阻公式计算的元件段压降($\times 10^5 Pa$)
Table 7 The pressure drops of the fuel section calculated with different formulas

流速/ $m \cdot s^{-1}$	3.0	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5
$f = 0.475 Re^{-0.268}$ (本计算)	0.7246	1.1927	1.7531	2.4030	2.7652	3.1429	4.0225
$f = 0.18 Re^{-0.18}$ [5]	0.6806	1.1470	1.7266	2.4013	2.7737	3.1783	4.1017
$f = 0.436 Re^{-0.268}$ [6]	0.6988	1.1552	1.7012	2.3282	2.6775	3.0544	3.9062
$f = M \times 0.3164$ $Re^{-0.25}$ [1]	0.6731	1.1133	1.6527	2.2755	2.6218	2.9838	3.8421
$f = 0.131$ $Re^{-0.17}$ [2]	0.6092	1.0308	1.5511	2.1696	2.5088	2.8837	3.7050

从表7可以看到,用不同公式计算的结果都比较接近,最大的差别也小于10%。故本计算结果较可靠,可供组件设计和热工计算作参考。

参 考 文 献

- [1] de Stordeur, A.N., *Nucleonics*, 19, 74(1961).
- [2] Rehme, K., *Nucl.Technol.*, 17, 15(1973).
- [3] Grazzini, R., Tirelli, D., CNEN-RT/ING, 1971, 12.
- [4] 谢光善, 快堆燃料组件设计(参考组件), 中国原子能科学研究院资料(1988)。
- [5] Cheng Shihkuei, Todreas, N.E., *Nucl. Eng. Des.*, 92, 227(1986).
- [6] Fench, H., Bemit, F.O., *Nucl. Eng. Des.* 104-105, 83(1987).

(编辑部收到日期: 1991年3月30日)

THE CALCULATION OF THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF FFR'S FUEL ASSEMBLY

DING ZHENXIN

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

ABSTRACT

The hydraulic characteristics of the China FFR's fuel assembly (reference design) is presented in the paper by combining the theoretical calculation with engineering experience. This result is in agreement with the results calculated with other different formulas published in international magazines. This result is useful for reference to the assembly design and thermal calculation.

Key words FFR'S fuel assembly, Calculation of hydraulic characteristics, Combinig of theory calculation with engineering experiences.