

反应堆燃料棒束内 冷却剂混合效应的实验研究

朱炳艺 張龙根 何玉枝

反应堆燃料组件内冷却剂的混合效应,一般通过实验束测定。本文对化学示踪法的实验原理和数据处理过程作了扼要的叙述。试验是在一开式回路上用自来水作流体进行的,雷诺数范围为10000—50000。在试验组件上游进口端将 LiNO_3 溶液注入中央子流道,在其下游三个位置的中央子流道内取样,用光度计分析样品内锂离子的浓度变化。实验结果以贝克莱(Peclet)数给出。实验测得光棒束内的贝克莱数平均值为0.007,此值与国外早先报道的结果基本相吻合。对装有定位格架的棒束,实验测得的贝克莱数平均值为0.013,约为光棒束的2.5倍。

一、前 言

反应堆热工水力设计中的热管因子是指反应堆在额定工况下运行时,某个热流道的焓升或热通量离开名义值的最大偏差。例如,焓升热管因子就定义为冷却剂的最大焓升与名义焓升之比。热管因子本身又是若干分因子(混合分因子就是其中之一)的乘积。由于我们研究的某个流道是个热流道,所以热流道的流体温度总比邻近流道的温度要高。因此,反应堆在给定功率下运行,冷却剂的混合能够降低热流道(或热点)的温度;反之,在给定最大热流道(或热点)温度下,由于考虑了混合后,可使反应堆的运行功率提高一些。对于开栅反应堆来说更是如此,由于堆内各个燃料组件之间互相连通,因而冷热流道间的流体温度由于流体的流动混合而降低,亦就是说,由于热流道和邻近较冷流道间流体的混合,会使热流道的焓升降低。混合分因子一般都通过实验来测定。测定冷却剂在流道间的混合程度,对反应堆堆芯的热工水力设计和燃料棒束定位格架的设计,均具有重要的意义。

本实验的目的就在于,通过实验来分别测定流体在光棒束中的混合系数和流体在装有定位格架的棒束中的混合系数。

二、实验装置和实验方法

为了消除注入溶液对浓度测量的影响,实验是在一开式回路上进行的。用自来水作水源。水流经一个流量控制阀,通过涡轮流量计进入试验段,最后流过一个流量调节阀排入地沟。实验装置的主要部分示意于图1。

试验组件为 4×4 排列的棒束,长为1.7米,装有5个定位格架,不锈钢燃料棒棒径为10.08毫米,节距为13.30毫米。试验段外壳为拉制方管,总长2米。试验组件和试验

段(部分)可见图 2, 定位格架见图 3。

在试验段上开有一个注入孔和 3 个取样孔, 间距均为 450 毫米, 还有 4 个静压测孔。

注入探头和取样探头见图 4, 安装时它们都需细心地对准中央流道的中心。

测量流体在棒束流道间的混合效应, 方法很多。本实验采用一般常用的化学示踪剂法, 注入溶液为 LiNO_3 。试验时, 待回路的流量稳定一段时间后, 以恒定的压力将溶液(配制浓度随意)从压力容器内通过注入探头注入棒束的中央子流道, 约经一分钟后由三个取样探头同时取样。取得足够量的样品后停止取样, 然后进行下一个工况的试验。样品被收集在贴有标记的玻璃瓶内, 用光度计分析锂的浓度。将样品中锂的浓度跟标准溶液进行比较, 从而确定注入溶液在流道内的浓度变化。

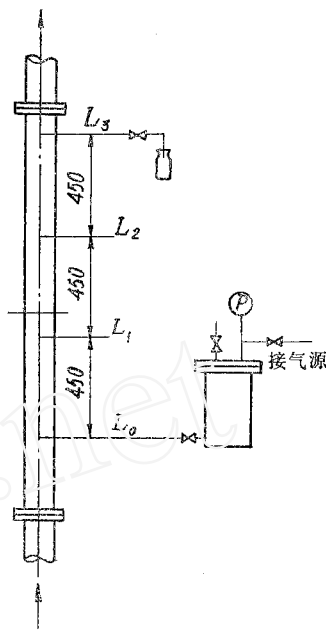


图1 实验装置示意图

三、实验原理

当流体处于湍流流动时, 冷却剂在流道间的混合程度与湍流扩散的强弱有关。在扩散理论中, 某种溶质通过单位面积的扩散率正比于该方向上的浓度梯度, 即:

$$N = -E \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

式中 E 称为扩散系数, 负号表示溶质扩散方向与浓度梯度变化相反。

当棒束为正方形排列时, 每 4 根棒就构成一个子流道, 如图 5 所示。任意两个相邻子流道 a、b 之间通过单位面积的扩散率与它在 Δx 方向上的浓度差成正比, 即:

$$N_{ab} = \varepsilon \frac{C_a - C_b}{\Delta x} \quad (2)$$

这个比例常数我们记作 ε 。与(1)式相比可以看出, ε 就是扩散系数, 不过这里是指湍流涡旋引起的横向扩散, 因而这个系数被称为湍流混合系数, 量纲为(长度)²/时间。

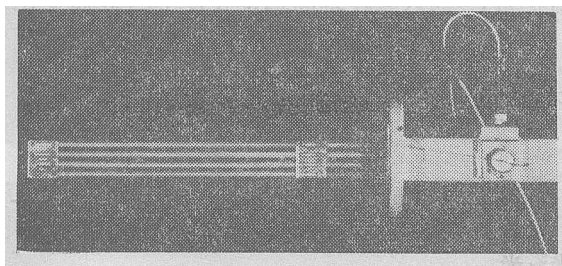


图 2 试验组件和试验段(部分)

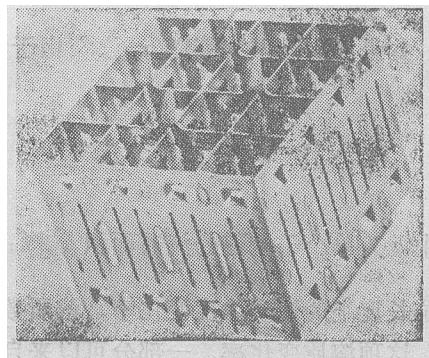


图 3 4×4 棒束定位格架

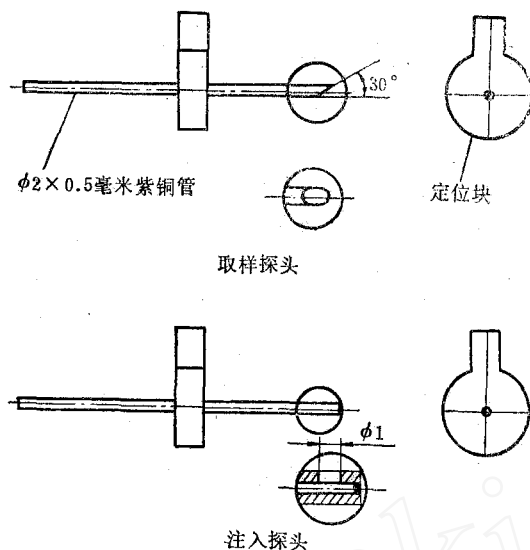


图 4 取样探头和注入探头

根据上述溶质扩散原理, 我们以每边棒数为偶数, 边界以内整流道数为奇数的中心对称棒束为例(见图 6), 来建立一个描述溶质在棒束中的扩散方程。

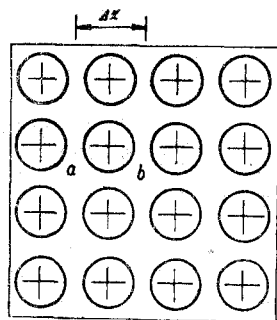


图 5 棒束为正方形排列的格栅

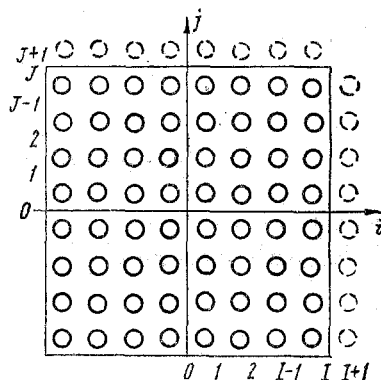


图 6 每边棒数为偶数, 边界内整流道数为奇数的中心对称棒束

如果溶质进入某流道 (i, j) , 由于湍流扩散, 那么它在轴向单位长度上的溶质变化率为:

$$aV \frac{\partial C_{i,j}}{\partial z},$$

式中 a 为单个子流道的流通面积, 米²; V 为流体在流道中的平均流速, 米/秒; $\frac{\partial C_{i,j}}{\partial z}$ 为单位长度上的溶质浓度变化率, 溶质数/米³·米。

这项溶质变化率, 一部分可以来自直接注入。设单位长度上的注入率为 $\theta_{i,j}$, 余者由邻近流道扩散而来。根据质量平衡, 可得:

$$aV \frac{\partial C_{i,j}}{\partial z} = \varepsilon [C_{i+1,j} + C_{i-1,j} + C_{i,j+1} + C_{i,j-1} - 4 C_{i,j}] + \theta_{i,j}. \quad (3)$$

(3)式和焓 H 的平衡方程:

$$G \frac{\partial H_{i,j}}{\partial z} = \varepsilon_H [H_{i+1,j} + H_{i-1,j} + H_{i,j+1} + H_{i,j-1} - 4 H_{i,j}] + q_{i,j}, \quad (3')$$

相比可知, 热扩散可用溶质扩散的方法来近似。

根据这个原理, 我们可在棒束上游的任意一个流道内注入某种盐溶液, 在下游不同平面上某些流道内取样, 测出浓度变化来确定混合系数 ε 。

四、数据处理和实验结果

文献[1]为求解方程(3)进行了一系列的数学处理, 它定义了一个无因次组合量:

$$\tau = \int_0^L \frac{\varepsilon}{aV} dz = \frac{\varepsilon L}{aV} = \frac{4}{\pi d^2} \left(\frac{\varepsilon}{V D_e} \right), \quad (4)$$

并令:

$$P_{i,j} = C_{i,j} / C_{00},$$

$$\phi_{i,j} = \theta_{i,j} / \varepsilon C_{00}.$$

式中 L 为注入平面到取样平面的距离, 米; D_e 为子流道的当量直径, 米; d 为棒径, 米; $C_{i,j}$ 为 (i, j) 流道的取样浓度, ppm; C_{00} 为注入浓度, ppm; $P_{i,j}$ 为取样溶液的相对浓度; $\phi_{i,j}$ 为单位长度上直接注入溶液的相对浓度; 无因次量 $\varepsilon / V D_e$ 称为贝克莱数, 用符号 Pe 表示。

于是方程(3)变成:

$$\frac{\partial P_{i,j}}{\partial \tau} = P_{i+1,j} + P_{i-1,j} + P_{i,j+1} + P_{i,j-1} - 4 P_{i,j} + \phi_{i,j}. \quad (5)$$

为了便于实验和简化数据处理, 我们作了下列两项简化:

(1) 溶质仅在试验组件的进口处注入, 别处都不注入, 则 $\phi_{i,j} = 0 (\tau \neq 0)$;

(2) 溶质只注入到棒束的中央流道, 因而 $\theta_{00} = 1$, 其余流道的 $\theta_{i,j} = 0$ 。

有了这两项简化后, 方程(5)的一般解为:

$$P_{i,j} = \sum_{m=0}^I \sum_{n=0}^J A_{mn} e^{-\alpha_{mn} \tau} \cos(\beta_m i) \cos(\gamma_n j). \quad (6)$$

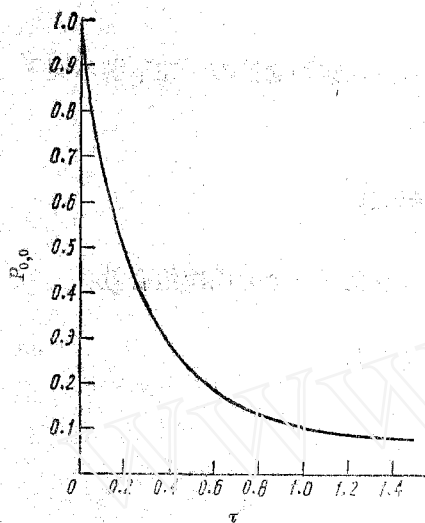
式中系数:

$$\alpha_{mn} = 4 - 2 \cos \beta_m - 2 \cos \gamma_n,$$

$$\beta_m = \frac{m\pi}{I},$$

$$\gamma_n = \frac{n\pi}{J}.$$

$$A_{mn} = \begin{cases} \frac{1}{IJ}, & 0 < m < I \text{ 和 } 0 < n < J \\ \frac{1}{2IJ}, & 0 < m < I \text{ 和 } n=0, J \text{ 或 } 0 < n < J \text{ 和 } m=0, I \\ \frac{1}{4IJ}, & m=0, I \text{ 和 } n=0, J \end{cases}$$

图 7 中央流道 $P_{0,0} \sim \tau$ 曲线

式中 I 为 i 方向上的整流道数目, J 为 j 方向上的整流道数; m, n 分别为与 i, j 相对应的标号。

从方程(6)可见,一旦流道数目与标号确定后,系数 $\alpha_{mn}, \beta_m, \gamma_n$ 和 A_{mn} 均可求得。这样可选定一系列的 τ 值(例如 $\tau=0.02 \sim 2.00$), 根据方程(6)算得一组 $P_{i,j}$ 值, 作出相应的 $P_{i,j} \sim \tau$ 曲线。图 7 表示中央流道的 $P_{0,0} \sim \tau$ 曲线。根据实验测出的 $P_{0,0} = (C_{0,0})_L / (C_{0,0})_0$ 值, 再从 $P_{0,0} \sim \tau$ 曲线上查出其对应的 τ 值, 最后由(4)式求出贝克来数或混合系数。

本实验对两种棒束组件的混合效应进行了实验测定:

1. 光棒束组件。流体在光棒束中的湍流混合, 是指棒束中没有定位格架(端部固定棒束用的格架

表 1 湍流混合的实验数据和计算的贝克来数

流量, 升/秒	L , 毫米	$(C_{0,0})_L$, ppm	$(C_{0,0})_0$, ppm	$P_{0,0}$	τ	$Pe, \times 10^3$
2.588	450	5.87	23.30	0.2446	0.450	7.92
	900	3.06		0.1313	0.800	7.04
	1350	1.98		0.0850	1.268	7.41
3.377	450	4.54	17.20	0.2552	0.429	7.55
	900	2.54		0.1427	0.739	6.50
	1350	1.56		0.0877	1.220	7.15
4.156	450	4.47	17.97	0.2487	0.442	7.77
	900	2.35		0.1308	0.802	7.05
	1350	1.45		0.0807	1.362	7.97

除外)时的自然混合。

实验数据和计算的贝克来数列于表 1。

实验测得的平均贝克来数 $Pe=0.007$ 。

2. 装有定位格架的组件。在光棒束上等距离地安装了三只带混合叶片的格架。装有定位格架组件的混合效应, 是由混合叶片的方向、位置和多少来决定的。由混合叶片引起的强迫混合迭加到湍流混合效应上, 一般可以达到湍流混合效应的好几倍。本实验测得的数据和计算的贝克来数列于表 2。

表 2 强迫混合的实验数据和计算的贝克莱数

流量,升/秒	L , 毫米	$(C_{0,0})_L$, ppm	$(C_{0,0})_0$, ppm	$P_{0,0}$	τ	$Pe, \times 10^3$
2.588	450	2.33	23.76	0.0981	1.06	18.64
3.377	450	1.80	17.62	0.1022	1.01	17.90
4.156	450	1.64	15.86	0.1004	1.00	17.60

当注入平面后的第一个格架位于注入平面和第一个取样平面的中间位置时, 实验测得的平均贝克莱数 $Pe=0.018$, 约为光棒束的 2.5 倍。

五、结果分析和讨论

1. 实验结果表明, 溶质注入量对实验工况没有影响。对不同的注入浓度, 由实验结果计算的贝克莱数基本上是一致的。考虑到混合机理的复杂性, 所以根据各种因素对所测贝克莱数的影响, 其相对误差在 15% 以内。

2. 湍流混合效应跟棒束节径比有关, 对节径比为 1.33 的棒束, 实验测得其湍流混合的贝克莱数为 0.007。这个结果跟国外早先报道的实验结果^[2]基本相符。

3. 由格架和混合叶片引起的强迫混合通常在其下游要消失的, 但是离它下游 多远的地方才消失, 即所谓格架的当量混合长度, 将有待于今后实验作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] R. E. Grimble & W. H. Bell, WAPD-TH-178(1956).
- [2] P. A. Nelson et al., WCAP-1607(1960).

《核电子学与探测技术》杂志征订启示

《核电子学与探测技术》是报道各种核仪器、核电子学及探测技术方面的科研成果、新产品介绍、先进使用经验、国际核准化和学术动态的科学技术交流刊物。由中国核学会、中国电子学会所属核电子学与核探测技术专业学会主办。读者对象为从事此领域的科研、生产、教学和管理人员, 应用核仪器的各有关专业人员。

此刊由原子能出版社出版, 新华书店发行。请注意新华书店《科技新书目》的预告, 按时到当地书店订阅。如书店订阅有困难, 也可直接与原子能出版社发行组联系订购。

《核电子学与探测技术》编辑部