

文章编号：0258-0926(2017)03-0132-05；doi:10.13832/j.jnpe.2017.03.0132

子通道分析中的湍流交混研究综述

刘 余，杜思佳，李仲春

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室，成都，610213

摘要：在子通道分析中，湍流交混是冷却剂通道间横向交混的重要组成部分，是由于流体脉动时自然涡团扩散引起的非定向交混。湍流交混的强弱程度将影响通道的局部热工参数，从而影响临界热流密度的预测，是反应堆热工水力设计与分析重点关注的对象。本文针对湍流交混的相关研究进行了综述，包括机理与模型、湍流交混系数、实验方法、计算流体力学（CFD）方法和子通道软件中的模型等，可作为自主化燃料组件设计和自主化子通道分析软件开发的参考。

关键词：子通道分析；湍流交混；CFD

中图分类号：TL333，TL334 **文献标志码：**A

Overview about Studies of Turbulent Mixing in Sub-Channel Analysis

Liu Yu, Du Sijia, Li Zhongchun

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In the sub-channel analysis, the turbulent mixing is one of the important parts of lateral mixing between coolant channels. It is non-directional cross-mixing due to the natural eddy diffusion during the fluid pulsation. The strength of turbulent mixing will affect the local thermal parameters of the sub-channel, thus affecting the critical heat flux prediction. It is an important input parameter for the reactor thermal hydraulic design and analysis. This paper aims to review the state-of-the-art studies of turbulent mixing in sub-channel analysis, in order to provide some reference during the fuel assembly design and sub-channel code development. Key issues in the turbulent mixing research were summarized, including the mechanism and models, turbulent mixing coefficient, experimental methods, CFD calculation methods and models in sub-channel code. The main theoretical model of turbulent mixing is in analogy to the molecular diffusion theory. Turbulent mixing coefficient β is a function of the sub-channel geometry and flow conditions of the coolant, and it can be obtained through experiments or CFD calculations. Turbulent mixing models in sub-channel code vary greatly. In practical applications, the choice of model depends on the specific object and the condition.

Key words: Sub-channel analysis, Turbulent mixing, CFD

0 前 言

对于采用开式通道燃料组件的反应堆，基于子通道模型的分析是热工水力设计与安全评价的主要方法。根据子通道模型，相邻子通道间冷却剂在流动过程中存在着横向动量、质量和能量的交换。这种横向的交换统称为交混。由于这种横向交混，各通道内的冷却剂流量沿轴向将不断发

生变化，热通道内冷却剂的温度和焓会有所降低。相应燃料元件的温度也会有所下降，临界热流密度有所增加。因此，准确地模拟横向交混是子通道分析的关键之一。

子通道间的横向交混过程十分复杂，为了确定其影响，通常将其处理成可分离的分量。研究中通常把交混分成 4 种基本形式：横流混合、湍

流交混、流动散射和流动后掠^[1]。对于存在强烈两相的情况，还有 2 种形式：空泡漂移和浮力漂移（针对水平子通道）。横流混合是由于相邻子通道间的压差导致的定向流动，可以直接在动量方程中体现，而流动散射和流动后掠跟燃料组件的一些结构相关，通常是在湍流交混中附加一个经验因子来考虑。另一方面，对于压水堆大多数工况而言，子通道中两相情况不强烈，因此本文主要综述与湍流交混相关的研究。

1 湍流交混机理及模型

湍流交混本质上是子通道间流体脉动时自然涡团扩散引起的非定向交混，属于自然交混。交混过程中一般无净质量转移，但有动量和能量转移。两相湍流交混如果采用等体积交换模型，流体间可能发生非等质量交换，即有净质量转移。

产生湍流交混的主要因素可能有：分子扩散、湍流扩散和密度差。在压水堆中，分子扩散通常比湍流扩散小一个数量级，同时如果通道不处于沸腾状态，则密度差也是很小的。所以，在充分发展湍流中，湍流扩散是主要的因素。

类比分子扩散理论，可以定义如下的湍流扩散模型^[2]：

质量方程：

$$\dot{m}_k = -\rho D_t \frac{dc}{dy} A = -C_t \frac{d(\alpha_k \rho_k)}{dy} A \quad (1)$$

动量方程：

$$\begin{aligned} \dot{I}_k &= -\rho v_t \frac{dU}{dy} A = -C_t \frac{d(\alpha_k \rho_k U_k)}{dy} A \\ &= -C_t \frac{dG_k}{dy} A \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程：

$$\begin{aligned} \dot{Q}_k &= -\rho c_p a_t \frac{dT}{dy} A = -C_t \frac{d(\alpha_k \rho_k c_{p,k} T_k)}{dy} A \\ &= -C_t \frac{d(\alpha_k \rho_k h_k)}{dy} A \end{aligned} \quad (3)$$

式中， m 、 I 、 Q 分别为质量、动量和能量；下标 k 表示流体状态（液相或汽相）； c_p 为比热容； y 为横向流动方向坐标； A 为与横向交混对应的流通面积； c 、 α 、 ρ 、 U 、 G 、 T 和 h 分别为浓度、空泡份额、密度、流速、质量流速、温度和比焓； D_t 、 v_t 和 a_t 分别表示湍流质量、动量和能

量扩散系数； C_t 为等效湍流扩散系数。与分子扩散不同， D_t 、 v_t 和 a_t 与流体的具体流动状态和位置相关，不是物性参数。通常，这 3 个扩散系数的数量级相当，在实际应用中假设其相等，即：

$$D_t = v_t = a_t = C_t。$$

引入无量纲湍流交混系数 β ：

$$\beta = \frac{C_t}{\Delta y \bar{U}} \quad (4)$$

对于式(1)~式(3)，在横流方向上利用差分替代微分，可得：

质量方程：

$$\dot{m}_k = -\beta \frac{\bar{G}}{\bar{\rho}} \Delta(\alpha_k \rho_k) A \quad (5)$$

动量方程：

$$\dot{I}_k = -\beta \frac{\bar{G}}{\bar{\rho}} \Delta G_k A \quad (6)$$

能量方程：

$$\dot{Q}_k = -\beta \frac{\bar{G}}{\bar{\rho}} \Delta(\alpha_k \rho_k h_k) A \quad (7)$$

式中， $\bar{\rho}$ 、 \bar{G} 、 \bar{U} 是相邻子通道的平均参数。

2 湍流交混系数

2.1 单相湍流交混系数

子通道分析中，一般采用湍流交混率 w' 来表征子通道间的湍流交混量，定义为相邻子通道间在主流方向单位长度上由于湍流交混引起的质量流量，单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

对于单相情况，由能量方程式(7)可得：

$$\dot{Q} = -\beta_{\text{SP}} \bar{G} \Delta h A = -\beta_{\text{SP}} \bar{G} \Delta h S_{ij} \Delta x \quad (8)$$

而根据 w' 的定义有：

$$\dot{Q} = -w'(h_j - h_i) \Delta x = -w' \Delta h \Delta x \quad (9)$$

从而：

$$w' = \beta_{\text{SP}} \bar{G} S_{ij} \quad (10)$$

式中， S_{ij} 为相邻子通道间的宽度； Δx 为主流方向上的节块高度； h_i 和 h_j 分别为 i 通道和 j 通道的比焓； β_{SP} 为单相湍流交混系数。利用质量方程或动量方程可得到同样的结果。

除了湍流交混系数 β 外，研究中也采用混合斯坦顿数或热扩散系数（TDC）来表征湍流交混效应。

由于湍流交混的复杂性，很难从理论上得到

湍流交混系数, 目前主要通过经验关系式来进行计算。从式(4)可以看出, β 跟子通道几何和冷却剂流动状态相关。因此, 对于单相湍流交混系数 β_{SP} , 大多数的关系式将其定义为与雷诺数 Re 、子通道水力直径 d_{hyd} 、相邻子通道间的宽度 d_{gap} (即 S_{ij})、燃料棒直径 d_{rod} 、相邻子通道中心距 Δy 等参数的函数, 即:

$$\beta_{SP} = f(Re, d_{hyd}, d_{gap}, d_{rod}, \Delta y) \quad (11)$$

以往研究中给出的一些关系式见文献[1-2], 典型的如下:

Beus (1970):

$$\beta_{SP} = 0.0035 Re^{-0.1} \frac{d_{hyd}}{d_{gap}} \quad (12)$$

Rogers and Tahir (1975):

$$\beta_{SP} = 0.005 \left(\frac{d_{gap}}{d_{rod}} \right)^{0.106} Re^{-0.1} \frac{d_{hyd}}{d_{gap}} \quad (13)$$

可以看出, 不同关系式的形式和系数有较大的差别, 其主要原因是关系式开发中所采用的实验对象和实验条件不同, 如矩形排列棒束、三角形排列棒束、燃料格架形式等。因此, 在实际应用中必须根据分析的对象和工况, 选择合适的关系式。

2.2 两相湍流交混系数

实验结果表明, 两相情况下湍流交混效应比单相的强, 子通道分析中常用的方法是借用单相湍流交混的关系式, 其中的参数用两相流混合参数, 同时再考虑一个倍增因子 θ_{TP} , 即:

$$\beta_{TP} = \theta_{TP} \beta_{SP} \quad (14)$$

式中, β_{TP} 为两相湍流交混系数; θ_{TP} 为含汽率的函数。

典型的如 Beus 提出的一个适用范围较广的模型^[1], 将整个两相流工况分为两区, 如图 1 所示。在交混峰值 (含汽率为 x_{max}) 之前是搅拌混

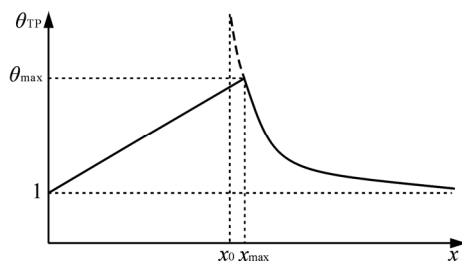


图 1 两相倍增因子与含汽率的关系 (Beus 模型)

Fig. 1 Two-Phase Multiplier vs. Quality (Beus Model)

合区, 该区的湍流交混主要是受汽团和汽团的搅拌作用支配; 峰值之后是环状流下的过渡混合区, 该区内采用双曲线来拟合实验数据。峰值出现在塞状流-环状流转变点。其他文献中给出的 θ_{TP} 的数值范围通常在 5~50 之间^[2]。

3 获得湍流交混系数的实验方法

湍流交混系数的实验研究主要是测定湍流交混率, 然后根据式(10)可计算得到湍流交混系数, 具体的实验方法可分为质量平衡法 (示踪剂法) 和能量平衡法^[3]。

质量平衡法的基本思想是测定示踪剂浓度在子通道中沿轴向的变化来推算湍流交混率的有效值。根据采用的示踪剂类型又可分为化学示踪剂 (如 K_2CrO_4 等) 法、放射性示踪剂法和活化示踪剂法等。

能量平衡法的基本思想是将棒束中的一根或几根棒加热, 使其周围子通道中的冷却剂升温, 然后在热棒下游不同距离的地方或出口处测量各子通道内的冷却剂温度, 再测量或计算各子通道内冷却剂的流量, 由此可计算出子通道间的湍流交混量^[4]。该方法的特点是实验条件更接近堆内实际工况。

在实际工程中, 子通道分析主要用于燃料组件或堆芯的热工分析, 因此针对工程设计的湍流交混实验, 往往测量总的湍流交混系数 (包含燃料格架的交混效应)。采用能量平衡法, 测量各子通道出口温度, 不直接计算湍流交混率, 而是采用子通道软件来模拟实验工况, 通过调整湍流交混系数, 计算得到各子通道出口温度, 采用统计分析或冷热分区计算的方法, 对比测量值与计算值, 从而得到湍流交混系数^[5-6]。这属于纯经验方法, 其结果只能宏观地反映燃料组件子通道内的交混效应。

4 计算湍流交混系数的 CFD 方法

近年来, 随着计算流体动力学 (CFD) 分析技术的发展, 有学者开始研究利用 CFD 方法来计算湍流交混系数。与子通道分析采用通道平均参数不同, CFD 计算得到的是流体局部参数, 因此该方法的关键之处在于如何利用局部参数来体现通道间的平均湍流交流效应。文献中给出了以下 2 种不同的方法。

4.1 间隙湍流粘度法

根据湍流交混系数的定义,将 C_t 与子通道间隙间的局部湍流粘度 $\tilde{\nu}$ 对应起来,通过 CFD 数值求解 $\tilde{\nu}$,从而得到湍流交混系数。根据式(4)有:

$$\beta = \frac{C_t}{\Delta y \bar{U}} = \frac{\bar{\rho}}{\Delta y \bar{G}} \tilde{\nu}_t \quad (15)$$

如果 CFD 计算采用 κ - ε 模型,可得:

$$\begin{cases} \tilde{\nu}_t = c_\mu \frac{\tilde{k}}{\varepsilon} \\ \beta = \frac{c_\mu \bar{\rho}}{\Delta y \bar{G}} \frac{\tilde{k}}{\varepsilon} \end{cases} \quad (16)$$

式中, c_μ 为经验常数; \tilde{k} 为湍流动能; ε 为湍流耗散率。需要注意的是式(16)中的参数并非 CFD 计算直接获得的局部值,需要在子通道间隙处进行平均处理,因此采用该方法通常会低估 β 值。为此,Ikeno 等提出了相关的修正方法,如考虑大涡的影响等^[2]。

4.2 间隙热流密度法

韩国学者 Jeong^[7]在研究钠冷却剂湍流交混系数时提出一种基于间隙热流密度的方法,其原理是将间隙的传热量分解为湍流交混导致的传热和冷却剂本身的导热。假设如图 2 所示的子通道模型,冷却剂在通道入口存在一定的温差,燃料棒不发热,则子通道 i 内的能量变化 Q_{tot} 就等于通过间隙传入的能量:

$$Q_{tot} = Q_{i,out} - Q_{i,in} = q_{tot} S_{ij} \Delta x \quad (17)$$

根据能量平衡可以得到:

$$\begin{aligned} q_{tot} S_{ij} \Delta x &= \dot{m}_i \Delta h_i \\ &= \underbrace{\rho_i U_i A_{i,f}}_{\dot{m}_i} \underbrace{c_p (T_{i,out} - T_{i,in})}_{\Delta h_i} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} q_{tot} &= \frac{\rho_i U_i A_{i,f} c_p (T_{i,out} - T_{i,in})}{S_{ij} \Delta x} \\ &= q_{turb} + q_{cond} \end{aligned} \quad (19)$$

式中, q 为热流密度; $A_{i,f}$ 为通道 i 在主流方向上的流通面积;下标 tot 表示总量, out 和 in 分别表示出口和入口, turb 和 cond 分别表示湍流和导热。

从而由于湍流交混而导致的热流密度为:

$$\begin{aligned} q_{turb} &= q_{tot} - q_{cond} \\ &= q_{tot} - \left[-k \frac{(T_{i,out} - T_{i,in})}{\Delta y} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

式中, k 为热导率。

根据能量方程式(7)可得:

$$\beta = \frac{q_{turb}}{\bar{c}_p \bar{\rho} \bar{U} (T_j - T_i)} \quad (21)$$

式中, T_j , T_i 分别为 i 通道和 j 通道温度。

在压水堆中,由于水的热导率较小,导热热流密度相比湍流热流密度可以忽略,从而得到:

$$\beta = \frac{q_{tot}}{\bar{c}_p \bar{\rho} \bar{U} (T_j - T_i)} \quad (22)$$

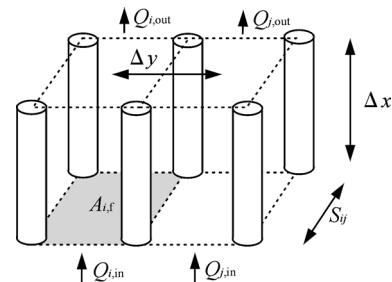


图 2 基于间隙热流密度计算湍流交混的子通道示意图

Fig. 2 Sub-Channel Model for Calculation of Single-Phase Turbulent Mixing Coefficient by Turbulent Heat Flux

基于上述方法,美国 PSU 大学的 Avramova 教授利用 CFD 研究了沸水堆燃料组件的湍流交混系数,与采用经验关系式的结果相近^[2]。

5 子通道软件中的湍流交混模型

5.1 COBRA-IV 软件

COBRA-IV 软件中单相湍流交混采用的关系式如下^[8]:

$$\text{选项 0: } w' = a S_{ij} \bar{G} \quad (23-1)$$

$$\text{选项 1: } w' = a Re^b S_{ij} \bar{G} \quad (23-2)$$

$$\text{选项 2: } w' = a Re^b \bar{d}_{hyd} \bar{G} \quad (23-3)$$

$$\text{选项 3: } w' = a Re^b (S_{ij} / \Delta y) \bar{d}_{hyd} \bar{G} \quad (23-4)$$

式中, a 和 b 为输入参数。对于选项 0,输入定常的湍流交混系数,即 $a = \beta$,而选项 1~选项 3 则为文献[2]中的 Stewart 模型。

另外,用于 AP1000 反应堆的 VIPRE-W 软件也采用上述模型。

5.2 FLICA III-F 软件

FLICA III-F 软件中将横向交混分解为分子扩散项(下标 m)和湍流扩散项(下标 t)^[9]:

$$\sigma_{ij} = (\mu_m + \mu_t) \frac{U_j - U_i}{\Delta y} \quad (24)$$

$$q_{ij} = (k_m + k_t) \frac{1}{c_p} \frac{h_j - h_i}{\Delta y} \quad (25)$$

式中, σ_{ij} 为子通道间的动量交混率; q_{ij} 为子通道间的热流密度; μ 为动力粘度。

基于经验模型, 假设湍流动力粘度和湍流热扩散系数分别在分子动力粘度和分子热扩散系数的基础上进行如下修正:

$$\mu_t = \mu_m [1 + M_t f(Re_t)] Y_0 \quad (26)$$

$$k_t = k_m [1 + K_t f(Re_t)] Y_0 \quad (27)$$

式中, M_t 和 K_t 为考虑燃料组件格架对交混的修正因子; $f(Re_t)$ 为雷诺数修正因子; Y_0 为两相修正因子。

在工程设计中, 通常取 $M_t = 0$, 对于单相情况 $Y_0 = 1$, 从而有:

$$\mu_t = \mu_m [1 + f(Re_t)] = \mu_m \quad (28)$$

由于冷却剂(水)的动力粘度非常小, 即近似地忽略湍流交混对横向动量的影响。

5.3 ASSERT 软件

ASSERT 是加拿大 AECL 公司用于 CANDU 堆的子通道分析软件, 其中采用了 Carlucci 提出的交混模型^[10], 将交混分为均匀和非均匀两部分, 并考虑了两相的情况:

对于液相(下标 l):

$$w'_l = (1-x)w'_{l, \text{hom}} + \Delta w'_{l, 2\phi} \quad (29)$$

对于汽相(下标 g):

$$w'_g = xw'_{g, \text{hom}} + \Delta w'_{g, 2\phi} \quad (30)$$

$$w_{\text{hom}} = \left[\mu_{\text{hom}} a' \left(\frac{d_{\text{gap}}}{d_{\text{rod}}} \right)^{b'} \left(\frac{Gd_{\text{hyd}}}{\mu_{\text{hom}}} \right)^{0.9} \right] \quad (31)$$

$$\mu_{\text{hom}} = \left(\frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \right)^{-1} \quad (32)$$

式中, x 为质量含汽率; w_{hom} 为均匀条件下的湍流交混率, 可采用单相湍流交混系数的形式进行计算; $\Delta w_{l, 2\phi}$ 和 $\Delta w_{g, 2\phi}$ 主要是用于考虑非均匀条件及两相影响的修正项, 由相应的经验关系式计算^[10]; a' 和 b' 为经验系数。

6 结束语

与单通道分析不同, 横向交混是子通道分析的主要特点, 根据其发生机理可以分为: 横流混合、湍流交混、流动散射、流动后掠、空泡漂移和浮力漂移等 6 种形式。其中, 湍流交混的机理模型主要类比分子扩散理论, 其交混效应可用湍流交混率或湍流交混系数 β 来具体表征。湍流交混系数 β 是子通道几何条件和冷却剂流动状态的函数, 可采用实验或 CFD 计算的方法获得。各子通道软件中的湍流交混模型差别较大, 在实际应用时需要根据具体的对象和工况范围选择合适的软件与模型。

参考文献:

- [1] 朱瑞安, 赵兆颐. 棒束中的冷却剂交混[J]. 核动力工程, 1983, 4(2):57-62.
- [2] Maria Avramova. Development of an innovative spacer grid model utilizing computational fluid dynamics within a subchannel analysis tool[D]. The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, PhD thesis. 2007.
- [3] 宗桂芳, 杨惠敏. 各类子通道单相湍流交混的实验研究[R]. CNIC-00189, 中国核科技报告, 1988.
- [4] 康森厚, 王正杰, 贾斗南. 九棒束单相湍流交混热态实验研究[J]. 核科学与工程, 1989, 9(2): 112-140.
- [5] 曹念, 郎雪梅, 卢冬华, 等. 燃料组件单相交混系数试验研究[J]. 核动力工程, 2009, 30(5): 22-25.
- [6] Motley F E, Wenzel A H, Cadek F F. The effect of 17×17 fuel assembly geometry on interchannel thermal mixing[R]. WCAP-8298, 1975.
- [7] Jeong H Y. Estimation of turbulent mixing model for the application to liquid metal-cooled reactors, Technical Report[R]. KAERI/TR-2607/2003, 2003.
- [8] Wheeler C L, Stewart C W, Cena R J, et al. COBRA-IV-I: an interim version of COBRA for thermal-hydraulic analysis of rod bundle nuclear fuel elements and cores[R]. BNWL-1963, 1976.
- [9] Raymond P, Spindler B, Lenam R. Pressurized water reactor thermal-hydraulic core analysis with the FLICA computer code[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 124: 299-313.
- [10] Carlucci L N, Hammouda N, Rowe D S. Two-phase turbulent mixing and buoyancy drift in rod bundles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 227: 65-84.

(责任编辑: 马 蓉)