

文章编号: 0258-0926(2017)03-0137-04; doi:10.13832/j.jnpe.2017.03.0137

RELAP5 一维硼追踪模型改进

杨帆¹, 周科¹, 魏宗岚¹, 张丹¹, 李松蔚¹,
邓坚², 李仲春¹

1. 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; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 基于二阶 Godunov 方法对压水堆系统最佳估算分析程序 RELAP5 的一维硼追踪模型进行改进, 在原有模型的基础上进一步考虑湍流扩散引起的质量扩散效应。采用经典的对流-扩散问题的精确解对改进模型进行验证; 同时, 对流速适用范围、节块划分对求解精度的影响进行敏感性分析。该方法能够较好地模拟低流速情况下的含硼溶液扩散过程, 且能保证不同网格精度下的求解精度。

关键词: 硼追踪; 湍流扩散; 系统程序

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A

Improvement of 1-D Boron Tracking Model of RELAP5

Yang Fan¹, Zhou Ke¹, Wei Zonglan¹, Zhang Dan¹, Li Songwei¹,
Deng Jian², Li Zhongchun¹

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

Abstract: In this study, a modified boron tracking model which takes into account the mass diffusivity caused by the turbulence flow is developed and embedded into RELAP5 code based on second order Godunov method. This method is validated by the analytical solution of linearized Burges question. At last, the sensitivity studies of the inlet velocity and refinement of node scheme are performed, which demonstrates the model's capability of capturing turbulent diffusion transient under low velocity condition and the adaptability to different node schemes.

Key words: Boron tracking, Turbulent diffusion, System code

0 前言

含硼溶液在堆芯内的扩散特性是核电厂安全分析和安全审查中关注的重点问题之一。在事故瞬态过程中, 注入后的硼酸溶液在反应堆压力容器下降段及下腔室中的输运扩散特性, 堆芯内硼浓度的分布及瞬态变化情况都会对反应堆堆芯功率的变化产生重要影响。急剧变化的硼浓度(如硼稀释瞬态)可能会导致反应性的激增, 进而威胁到反应堆的安全。

国外对于堆芯硼扩散过程的计算流体动力学数值模拟^[1-3]研究表明: 在含硼溶液扩散过程中, 湍流脉动引起的质量扩散效应对于硼扩散过程有显著影响。而在工程实践中, 多采用一维热工水

力系统程序对压水堆一回路冷却剂系统内的硼输运过程进行分析, 一维系统分析程序多采用简化模型模拟含硼溶液在反应堆内的流动迁移过程。RELAP5 程序的硼追踪模型中, 假设含硼溶液内的硼酸流动速度与整体流动速度一致, 不考虑湍流搅混引起的硼扩散效应。为提高硼浓度计算精度, 应当在系统分析程序中考虑湍流扩散效应对硼输运过程的影响。

本次研究中, 首先对压水堆系统最佳估算分析程序 RELAP5 基于二阶 Godunov 方法^[4]的硼追踪模型进行改进, 在原有程序模型中进一步添加湍流引起的硼质量扩散项; 其次采用经典对流扩散问题精确解对改进模型进行验证; 最后, 模型

收稿日期: 2017-02-20; 修回日期: 2017-02-24

作者简介: 杨帆(1982—), 男, 高级工程师, 现从事核反应堆热工水力与安全分析工作

适用的流速范围、控制体划分对计算精度的影响讨论。

1 物理模型

在原有 RELAP5 程序硼追踪模型的基础上进一步考虑硼扩散所引起质量传递效应,其基于控制容积的硼质量守恒方程为:

$$\int_V \frac{\partial \rho_b}{\partial t} dV + \int_A \left(\rho_b v_f - D \frac{\partial \rho_b}{\partial t} \right) dA = 0 \quad (1)$$

式中, ρ_b 为溶液中的硼酸密度, kg/m^3 ; v_f 为冷却剂液相流速, m/s ; D 为质量扩散系数, m^2/s ; V 为单元控制体容积; A 为控制体界面; t 为时间。

质量扩散可分为由浓度差引起的布朗扩散以及由于湍动引起的湍流扩散,即:

$$D = D_B + D_{\text{eddy}} \quad (2)$$

式中, D_{eddy} 为湍动引起的质量扩散系数; D_B 为由硼浓度差引起的布朗扩散系数。

相比于 D_{eddy} , D_B 很小,其数量级在 10^{-6} 至 10^{-7} 之间,约为 D_{eddy} 的 0.1%,因此忽略 D_B 对于硼扩散过程的影响:

$$D \approx D_{\text{eddy}} \quad (3)$$

对于 D_{eddy} ,采用管内流动实验^[1]结果,有:

$$D_{\text{eddy}} = ul \left(\frac{3.0 \times 10^7}{Re^{2.1}} + \frac{1.35}{Re^{0.125}} \right) \quad (4)$$

式中, u 为流速, m/s ; l 为控制体当量直径, m ; Re 为雷诺数。

2 离散算法实现

如图 1 所示, K 、 L 、 M 为相邻控制体编号, $j-1, \dots, j+2$ 为相邻控制体界面编号, Δx 为相邻控制体中心间距。

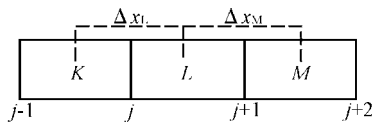


图 1 控制体及界面编号说明

Fig. 1 Nomenclature of Control Volumes and Interfaces

对于不考虑湍流扩散项的硼质量守恒方程,参见文献[5-6],采用 Godunov 离散求解方法的硼浓度求解格式可表示为:

$$\rho_{b,L}^{n+1} = \rho_{b,L}^n + \frac{\Delta t}{V_L} A_j F_j^n - \frac{\Delta t}{V_L} A_{j+1} F_{j+1}^n \quad (5)$$

式中, $\rho_{b,L}^n$ 为控制体 L 第 n 时间步内的硼浓度, kg/m^3 ; V_L 为控制体 L 容积, m^3 ; A_j 为接管 j 的流通面积, m^2 ; F_{j+1}^n 表示第 n 时间步 $j+1$ 界面处的质量通量, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,可表示为:

$$F_{j+1}^n = \frac{1}{2} \left[v_{j+1}^{n+\frac{1}{2}} \left(\rho_{b,j+1}^{n,Z} + \rho_{b,j+1}^{n,Y} \right) + \left| v_{j+1}^{n+\frac{1}{2}} \right| \left(\rho_{b,j+1}^{n,Z} - \rho_{b,j+1}^{n,Y} \right) \right] \quad (6)$$

$$v_{j+1}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left(v_{j+1}^{n+1} + v_{j+1}^n \right) \quad (7)$$

$$\rho_{b,j+1}^{n,Z} = \rho_{b,L}^n + \frac{1}{2} \Delta x_L \left(1 - \frac{v \Delta t}{\Delta x_L} \right) \bar{S}_L \quad (8)$$

$$\rho_{b,j+1}^{n,Y} = \rho_{b,M}^n - \frac{1}{2} \Delta x_M \left(1 + \frac{v \Delta t}{\Delta x_L} \right) \bar{S}_M \quad (9)$$

式中,上标 Z, Y 分别指示界面 $j+1$ 左、右侧; Δx_L 、 Δx_M 表示控制体 L 和 M 的长度, m ; v 为控制体中心流速, m/s ; \bar{S}_L 和 \bar{S}_M 为控制体中心浓度梯度限制因子。

在式 (8) 和式 (9) 的基础上进一步考虑湍流引起的质量扩散效应,参考文献[6-7]中对扩散项的处理方法,考虑了湍流扩散项 φ_L 、 φ_M 之后的界面硼酸密度离散格式可表达为:

$$\rho_{b,j+1}^{n,Z} = \rho_{b,L}^n + \left[\frac{1}{2} \Delta x_L \left(1 - \frac{v \Delta t}{\Delta x_L} \right) - \varphi_L \right] \bar{S}_L \quad (10)$$

$$\rho_{b,j+1}^{n,Y} = \rho_{b,M}^n - \left[\frac{1}{2} \Delta x_M \left(1 + \frac{v \Delta t}{\Delta x_L} \right) - \varphi_M \right] \bar{S}_M \quad (11)$$

为保证数值求解格式的稳定性,需对湍流扩散项 φ_L 进行限制,参见 Freixa^[6]等人的研究,有:

$$\varphi_L = \min \left(\frac{\Delta x}{2C_r}, \frac{D_{\text{eddy}}}{v_L} \right) \quad (12)$$

式中, C_r 为控制体当地库朗数。

将式 (10)、式 (11) 替代原有求解格式 (8)、式 (9),代入式 (5) 中即可得到下一步时间步长的硼酸密度值。

3 模型验证

3.1 算例描述

如图 2 所示:一维水平单通道接管长 0.9 m,

内径为 0.1 m, 初始 $t=0$ 时刻接管内部充满含硼水, 初始硼浓度 C_{b0} 为 3000 mg/kg, 管内初始压力、温度分别为 0.1 MPa 和 25 。从 $t=10.0$ s 开始, 由一端向管道内部注入清水 ($C_b = 0$), 入口流速 V 为 0.1 m/s, 假设质量扩散系数 D 为 $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$, 需计算管内不同位置 x 处和不同时刻 t 对应的硼浓度变化规律 $\theta(x, t)$ 。

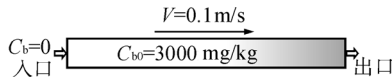


图 2 计算问题示意图

Fig. 2 Description of Problem Model

该问题的一维对流-扩散偏微分方程为：

$$\theta_t = D\theta_{xx} - V\theta_x \quad (13)$$

初始条件满足：

$$\theta(x, 0) = \begin{cases} C_{b0}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

该方程精确解形式^[7]如下：

$$\theta(x, t) = \frac{C_{b0}}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Vt-x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (15)$$

3.2 程序计算结果对比

将改进后的程序模型对上节所述问题进行模拟, 并将距离管道入口 0.805 m 处的硼浓度变化

瞬态结果与程序改进前的模拟结果以及式 (15) 所表达的精确解进行对比, 结果如图 3 所示。由计算结果可见, 初始条件及扩散系数完全一致的情况下, 修改之后的程序模拟结果与精确解符合较好, 两者相对偏差是由数值离散求解所造成的。

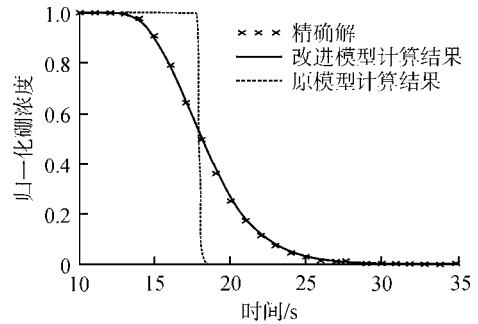


图 3 管道入口下游 0.805 m 处归一化硼浓度

Fig. 3 Normalized Boron Concentration at $X=0.805$ m Downstream the Inlet

4 讨论

4.1 单元控制体长度对计算结果的影响

对于第 3 节所描述的管内含硼溶液扩散问题, 建立不同精细度的控制体划分方案。采用修正后的程序模型重新模拟, 并比较管内不同位置处的硼浓度。控制体划分方案及测点位置见表 1。

图 4 至给出了不同控制体节块划分方案下的

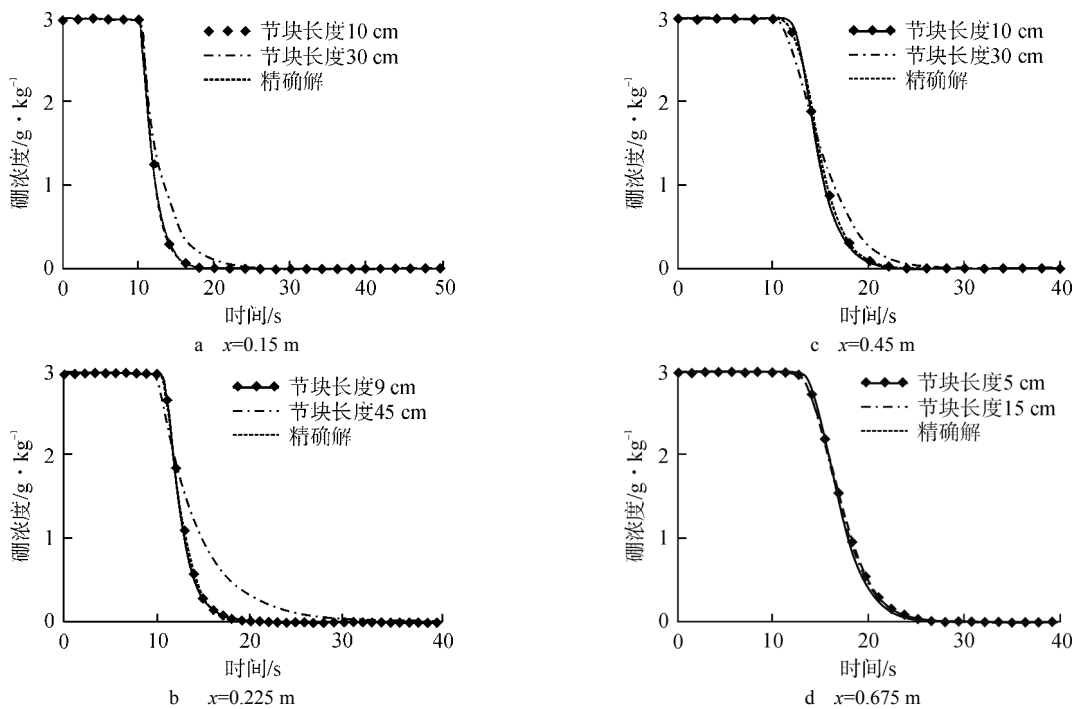


图 4 管道下游不同位置处的硼浓度变化规律

Fig. 4 Boron Concentration Transients at Different Inlet Downstream Locations

表1 控制体划分敏感性计算方案
Table 1 Sensitivity Study of Different Node Schemes

测点位置 x/cm	单元控制体长度 $\Delta x/cm$
15	10.0, 30.0
22.5	9.0, 45.0
45	10.0, 30.0
67.5	5.0, 15.0

管内各处硼浓度瞬态计算值与解析解比较。从图中可知,当控制体节点数大于3(单元控制体长度小于30 cm)时,计算结果与解析解符合较好,增加节点数对最终计算结果影响很小。表明修改后的模型能够较好地适应不同精细度的网格划分方案并有效降低因为不同控制体划分所带来的数值扩散效应^[8]。

4.2 不同进口流速下的硼浓度计算结果比较

入口流速0.1 m/s和1.0 m/s工况下的管道出口硼浓度变化趋势如图5所示。由计算结果可知,在入口低流速情况下(0.1 m/s),湍流扩散对于硼扩散的影响较为显著,而在入口流速等于1.0 m/s时,湍流扩散效应的影响较弱,硼运输主要依靠流体的整体流动携带。还对入口流速为0.5 m/s和2.0 m/s的工况进行了模拟,表明当入口流速大于

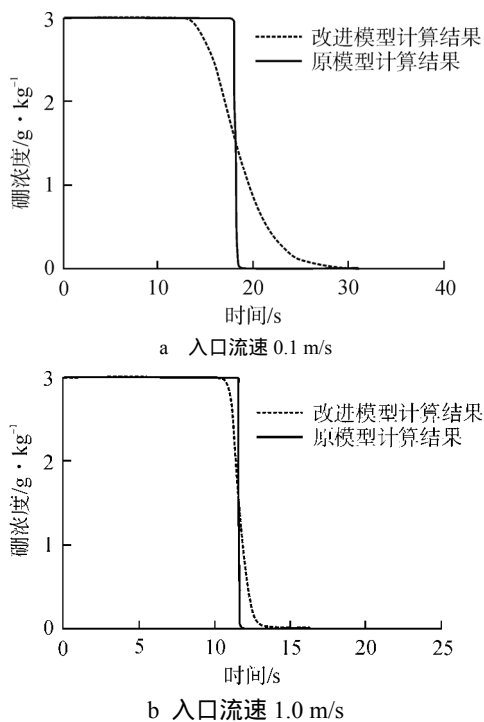


图5 不同流速条件下入口下游 $x=0.805$ m 处的硼浓度变化规律

Fig. 5 Boron Concentration at $x=0.805$ m Downstream

Tube Inlet for Different Inlet Velocity

0.5 m/s 时,湍流扩散效应对硼浓度扩散的影响不明显,而当入口流速大于2.0 m/s 时,湍流扩散引起的扩散效应可忽略。

5 结束语

对 RELAP5 程序基于二阶 Godunov 方法的一维硼追踪模型进行了改进。通过在硼浓度离散求解表达式中添加扩散项模拟湍流脉动引起的质量扩散效应,改进后的模型与管内含硼溶液对流-扩散问题精确解符合较好。主要结论如下:

(1) 对不同进口流速条件下的管内硼浓度稀释过程的计算表明:低流速条件下湍流脉动引起的质量扩散效应较为明显,随着流速的增加,湍流脉动所引起质量扩散逐渐减弱,硼浓度迁移由整体流动所主导。

(2) 节块划分敏感性分析结果显示:改进后的模型对节块划分精度不敏感。这表明当节块划分尺寸在一定范围内变化时,该模型可保证计算结果的准确性。

参考文献:

- [1] Rafael Macian-Juan, Jhon H. Mahaffy. Numerical diffusion and the tracking of solute fields in system codes Part I. One-dimensional flows[J]. Nuclear Engineering & Design, 1998(179): 297-319.
- [2] Höhne T, Kliem S, Bieder U. Modeling of a buoyancy-driven flow experiment at the ROCOM test facility using the CFD codes CFX-5 and TrioU[J]. Nuclear Engineering & Design, 2006(236): 1309-1325.
- [3] Kliem S, Höhne T, Rohde U. Experiments on slug mixing under natural circulation conditions at the ROCOM test facility using high-resolution measurement techniques and numerical modeling[J]. Nuclear Engineering & Design, 2010(240): 2271-2280.
- [4] Rider, Woodruff. High-order solute tracking in two-phase thermal-hydraulics[C]. Proceedings of the Fourth International Symposium on Computational Fluid Dynamics. 1991, 957-962.
- [5] Li S Z, Liu X J, Cheng X. Development of boron transport model based on subchannel approach. NUTHOS-11[C]. Gyeongju Korea, N11P1234.
- [6] Freixa J, Reventos F, Pretel C. Boron transport model with physical diffusion for RELAP5[J]. Nuclear Technology, 2007(160): 205-215.
- [7] Anderson D C, Trannehill J C, Pletcher R H. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer[M]. New York: Taylor and Francis, 1984: 153-160.
- [8] 陶文铨 编著. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001, 135-142.

(责任编辑:张明军)