



考虑多因素的供水管网中H型节点不完全混合规律与经验模型

高金良¹, 李坤仪¹, 张佳文², 董文超^{3,4}, 殷晓明^{3,4}, 郑晓欣¹

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨功达给排水技术有限公司 技术研发部, 哈尔滨 150090; 3. 广东粤海水务投资有限公司 技术研发部, 广东 深圳 518003; 4. 哈尔滨工业大学 水资源国家工程研究中心有限公司 技术研发部, 哈尔滨 150090)

摘要: H型节点是供水管网中常见的一种节点类型, 然而, 来流在其中的不完全混合特性目前尚未明晰。为此, 采用结合计算流体力学(CFD)模拟和实验室实验的方式, 探究管径、三通间距、入口雷诺数比和出口雷诺数比等因素对H型节点不完全混合的影响规律。针对CFD模拟的F检验(自由度为2, 显著性水平为0.05)结果表明, 管径对H型节点不完全混合程度影响不大, 而三通间距和出入口雷诺数比有显著影响。通过对比可知, 实验室实验结果与CFD模拟结果吻合良好, 一方面验证CFD模拟的准确性, 另一方面也为建立H型节点的不完全混合经验模型提供可靠的数据支撑。建立的经验模型适用于具有不同三通间距的H型节点, 在实际应用中根据具体情况选择合适的经验模型, 能实现供水管网水质模拟准确性的提升。

关键词: 供水管网; H型节点; 不完全混合; 计算流体力学; 经验模型

中图分类号: TU991.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

H-junction incomplete mixing laws and empirical models considering multiple factors

GAO Jinliang¹, LI Kunyi¹, ZHANG Jiawen², DONG Wenchao^{3,4}, YIN Xiaoming^{3,4}, ZHENG Xiaoxin¹

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China; 2. Technical Research and Development Department, Harbin Gongda Water & Waste Water Technology Co. Ltd., Harbin 150090, P. R. China; 3. Technical Research and Development Department, Guangdong Yuehai Water Investment Co. Ltd., Shenzhen 518003, Guangdong, P. R. China; 4. Technical Research and Development Department, National Engineering Research Center for Water Resources of Harbin Institute of Technology Co. Ltd., Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: The H-junction represents a commonly encountered type of junction within the water supply network.

收稿日期: 2024-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203803); 揭榜制科研项目(CE602022000203); 黑龙江省重点研发计划项目(2022ZX01A06); 2023年度新一轮黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG2023-018)

作者简介: 高金良(1971-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事供水管网水质与漏损研究, E-mail: gjl@hit.edu.cn

Received: 2024-09-23

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3203803); Unveiling Scientific Research Program (No. CE602022000203); Key Research and Development Program of Heilongjiang Province of China (No. 2022ZX01A06); Collaborative Innovation Achievement Project of Heilongjiang Province's "Double World-class Project" Disciplines (No. LJGXCG2023-018)

Author brief: GAO Jinliang (1971-), associate professor, PhD, main research interest: water quality and loss in water supply networks, E-mail: gjl@hit.edu.cn.

However, the incomplete mixing characteristics of the inflow therein have remained poorly understood to date. To address this knowledge gap, the present study employed a combined approach integrating computational fluid dynamics (CFD) simulation and laboratory experiments to investigate the influence laws of several factors, including pipe diameter, tee spacing, inlet Reynolds number ratio, and outlet Reynolds number ratio, on the incomplete mixing of H-junctions. The F-test results (with a degree of freedom of 2 and a significance level of 0.05) derived from the CFD simulation revealed that the pipe diameter exerted a negligible impact on the incomplete mixing degree of H-junctions. In contrast, the tee spacing and the inlet and outlet Reynolds number ratios had significant influences. Comparative analysis demonstrated that the results from laboratory experiments were in excellent agreement with those of the CFD simulation. On one hand, this confirmed the accuracy of the CFD simulation. On the other hand, it furnished reliable data support for the establishment of an empirical model regarding the incomplete mixing of H-junctions. The established empirical model is applicable to H-junctions featuring different tee spacings. In practical applications, the selection of appropriate empirical models based on specific circumstances can contribute to the enhancement of the accuracy of water quality simulation within the water supply network.

Keywords: water supply network; H-junction; incomplete mixing; computational fluid dynamics; empirical model

水质预测模型对于供水管网水质保障具有十分重要的意义^[1]。EPANET 是目前供水管网水质建模常用软件,在其中水质模拟模块采用节点完全混合假说^[2]。然而,已有研究表明,在预测不完全混合情况下的节点出口浓度时,采用完全混合假说模拟误差甚至可能高达 250%,节点完全混合假说阻碍水质模型精确度的提高^[3]。因此,研究节点不完全混合规律成为水质模型改进的一个重要方向。

供水管网中十字形节点数量较多,并且在假设双 T 型节点的两三通间距离为 0 时,双 T 型节点也可以简化为十字形节点^[4]。因此,已有大量研究通过数值模拟^[5-7]与实验室实验^[8-10]研究管径与出入口雷诺数比等因素对十字形节点混合影响规律。双 T 型节点由于两三通之间间距的存在,入流在其中的混合规律与十字形节点不尽相同^[11]。在后续研究中,除管径与出入口雷诺数比之外,三通间距对入流在双 T 型节点中混合的影响规律也被重点考虑^[12-13]。

管网中除存在十字形节点和双 T 型节点外,还存在大量 H 型节点。H 型节点与双 T 型节点拥有相似的拓扑结构,即由两个三通及其连接管道构成,并且在两个三通之间具有一定间距。已有对 H 型节点与双 T 型节点对比研究显示,三通间距虽然与双 T 型节点不完全混合程度高度相关,但其对 H 型节点不完全混合的影响几乎可以忽略不计^[14]。这表明以三通间距为代表的因素对 H 型节点与双 T 型节点不完全混合规律的影响可能存在较大差异。

与其他类型节点相比,H 型节点绝大多数情况下出现在位于管网末梢的建筑(包括小区、居民住

宅与公共建筑)给水管网中,具有管径普遍较小与出入流方向可变性强的明显特点。在对建筑给水水质要求日益提高的当下^[15],迫切需要深化研究各因素对 H 型节点不完全混合影响规律,并构建数学模型实现对 H 型节点不完全混合影响规律的描述。

笔者采用计算流体力学(CFD)数值模拟与实验室实验相结合的方法,研究多因素影响 H 型节点处不完全混合现象规律,并构建不完全混合的 H 型节点水质经验模型。

1 物理量定义

节点混合评价指标能量化地反映节点混合程度,描述节点的混合状态。通常采用无量纲浓度(C^*)评估节点的混合程度,其定义为式(1)^[16]。

$$\begin{cases} C_3^* = \frac{C_3 - C_2}{C_1 - C_2} \\ C_4^* = \frac{C_4 - C_2}{C_1 - C_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C 为污染物浓度;下标 1 代表未受污染饮用水的入口,下标 2 代表受污染饮用水的入口,下标 3 和 4 分别代表混合后饮用水的两个出口。

C^* 仅可以反映单一出口污染物浓度大小,需要通过两个参数才能准确反映节点混合程度,不利于数学建模。因此,基于两个出口无量纲浓度推导出相对混合程度指标(f),其定义为式(2)。

$$f^* = \frac{C_3^*}{C_4^*} \quad (2)$$

f 同时包括两个出口的无量纲浓度信息,通过二者之比来表示两入流中污染物在节点处的混合

程度。 f 的数值范围为0~1。 f 为0时,表示污染物在该节点处未发生混合; f 为1时,表示两个出口污染物的浓度相等,发生瞬间完全混合。

如图1所示,H型节点由两个三通管件组合而成,两个三通管件的管道中心之间距离用 L 表示。

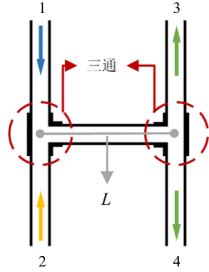


图1 H型节点

Fig.1 H-junctions

入口雷诺数比($Re_{1/2}$)和出口雷诺数比($Re_{3/4}$),在先前研究中已被确定为影响节点处污染物混合程度的关键因素^[17]。笔者重点考虑节点出入口管径相同的情况,在这个前提下, $Re_{1/2}$ 与 $Re_{3/4}$ 可表达为式(3)。

$$\begin{cases} Re_{1/2} = \frac{Re_1}{Re_2} = \frac{v_1}{v_2} \\ Re_{3/4} = \frac{Re_3}{Re_4} = \frac{v_3}{v_4} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Re_i 为编号为 i 的入口或出口的雷诺数; v_i 为编号为 i 的入口或出口的流速, $i=1,2,3,4$ 。

2 CFD数值模拟

2.1 方法与工况

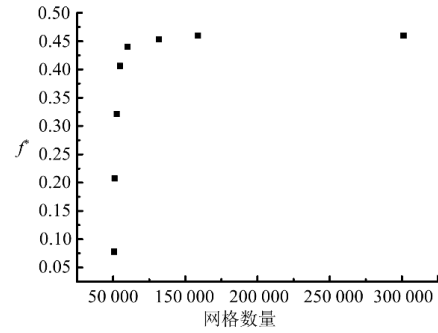
为分别研究管径(D)、两个三通管件的管道中心之间距离(L)、入口雷诺数比($Re_{1/2}$)和出口雷诺数比($Re_{3/4}$)对H型节点混合程度影响规律,采用控制变量法设计不同工况,使用Fluent进行CFD数值模拟。

按控制变量法设计的CFD数值实验工况如表1所示。表1的方括号中所罗列数值为各因素每个工况下所可能的取值,以逗号分隔。如图1所示,H型节点绝大多数情况下出现于管网末梢的小区供水管网与居民住宅当中,管径普遍小于DN50,最小可达DN10。因此,仅考虑管径小于DN50的H型节点(DN10、DN20、DN40、DN50),对于管径更大的H型节点的不完全混合规律研究将在未来进一步完善。

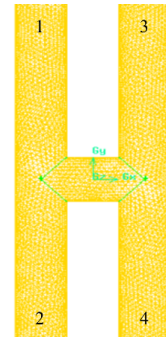
为使节点出口断面浓度均匀,H型节点几何模型出入口管段长度设计为 $20D$ 。

网格划分选用数值模拟中最为常用且网格划分效果较好的四面体。DN10模型的网格无关性验

证结果如图2(a)所示。网格数量从9万增加到32万, f 数值计算结果仅相差1.49%,认为网格数量为9万时, f 数值计算结果已达到与网格无关,此时最大网格大小为1 mm。采用同样的方式得到DN20、DN40和DN50模型网格无关时的最大网格大小为1.5、4.0、4.5 mm。DN10模型的网格划分结果如图2(b)所示。



(a)



(b)

图2 网格无关性验证与网格划分结果

Fig.2 Results of grid independence verification and grid partitioning

设定几何模型内部流体为液态水,水中污染物无量纲浓度变化过程由式(4)所示质量流量对流方程描述

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i C^* - \Gamma \frac{\partial C^*}{\partial x_i} \right) = S \quad (4)$$

式中: x_i 为 i 方向轴坐标; u_i 为 i 方向流体速度, ρ 为密度; Γ 为水中污染物扩散系数; S 为源项。

水在实际配水管网节点处流动一般为湍流。在节点污染物不完全混合研究中,更关注的是管道内部污染物的混合状态,由于水的黏性在近壁面产生的边界层对管道更靠近中心处污染物的混合影响几乎可以忽略不计。在Fluent软件中由众多湍流模型中,“Standard” $k-\epsilon$ 模型忽略分子间黏性,适用于完全湍流,在算法稳定的同时,又具有计算精度与计算量的平衡性,因此选为湍流模型。

$$\begin{cases} k=0.055v_{in}^2 \\ \epsilon=C_v\frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \end{cases} \quad (5)$$

式中： k 为动能； ϵ 为耗散率； C_v 为经验常数（约为0.09）； l 为湍流尺度（约为 $0.07D$ ）。

将图2(b)所示模型的1号和2号面设置为速度入口边界，按表1不同工况 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{3/4}$ 所需输入入

流速度值；3号和4号面设置为自由出流的出口边界。

求解方法采用SIMPLEC，将空间离散中压力、动量、湍流动能和比耗散率的差分格式均提高到二阶以提高计算精度。打开高阶项松弛，将松弛因子提高到1以加快收敛速率。

未提及的其他条件均保持Fluent默认值。

表 1 CFD 数值实验工况

Table 1 Working conditions of the CFD numerical experiments

研究因素	组别	D/DN	L/D	$Re_{3/4}$	$Re_{1/2}$
D	1	[10, 20, 40, 50]	2	1	0.5
	2	[10, 20, 40, 50]	2	1	1
	3	[10, 20, 40, 50]	2	4	2
	4	[10, 20, 40, 50]	2	0.25	1
L	1	20	[1, 5, 10, 12, 15]	1	0.5
	2	20	[1, 5, 10, 12, 15]	1	1
	3	20	[1, 5, 10, 12, 15]	1	2
$Re_{1/2}$	1	20	1	0.25	[0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5]
	2	20	1	1	[0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5]
	3	20	1	4	[0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5]
$Re_{3/4}$	1	20	1	[0.11, 0.25, 0.43, 0.67, 1, 1.5, 2.33, 4, 9]	0.5
	2	20	1	[0.11, 0.25, 0.43, 0.67, 1, 1.5, 2.33, 4, 9]	1
	3	20	1	[0.11, 0.25, 0.43, 0.67, 1, 1.5, 2.33, 4, 9]	2

2.2 结果分析

具有代表性的工况($D=DN50, L/D=2, Re_{3/4}=0.25, Re_{1/2}=1$)CFD数值模拟结果如图3所示，可以直观展示H型节点处污染物不完全混合状态。

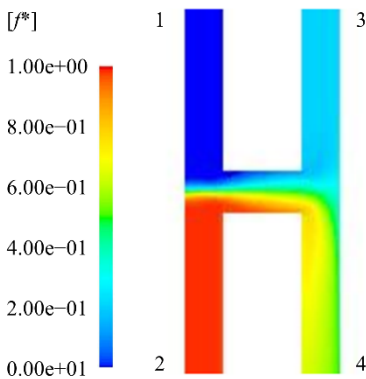


图3 代表性工况 CFD 数值模拟结果

Fig.3 CFD numerical simulation result of representative operating condition

2.2.1 管径影响

为研究管径对H型节点不完全混合影响，共设置4组数值模拟工况。组内各工况具有相同入口雷诺数比与出口雷诺数比，具有不同管径；组间各工况具有不同入口雷诺数比与出口雷诺数比。根据数值模拟结果，绘制每组实验 f^*-D 散点图如图4。

在 $L, Re_{1/2}$ 与 $Re_{3/4}$ 相同时， f^* 随管径变化仅有至多上下0.02波动。表明管径对H型节点不完全混合影响很小，几乎可以忽略不计。

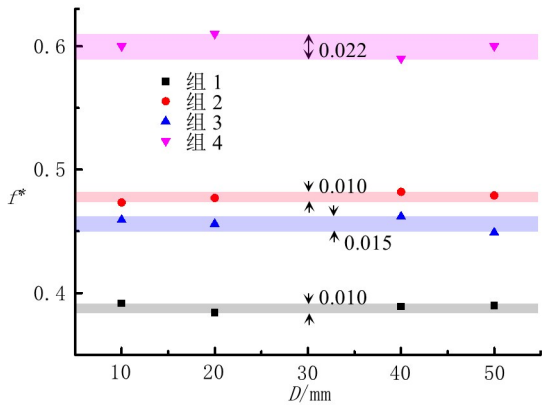


图4 CFD数值实验 f^*-D 散点图

Fig.4 f^*-D scatterplot of CFD numerical experiments

2.2.2 三通间距影响

为研究三通间距对H型节点不完全混合影响，共设置3组数值模拟工况。为避免受到过多因素干扰，各工况设置相同 $D(DN20)$ 与 $Re_{3/4}(Re_{3/4}=1)$ 。组内各工况具有不同 L ；组间各工况具有不同 $Re_{1/2}$ 。根据数值模拟结果，绘制每组实验 f^*-L 折线图如图5。对比组间折线，由于组间各工况具有不同入口雷诺数比， f^* 必然具有不同上升幅度。但是观察每

组 f^*-L 关系,发现3组实验均呈现出相同趋势,即随 L 增大, f^* 呈先快后慢的上升趋势。且即使入口雷诺数比发生变化,当三通间距趋近于无穷大时,最终总能达到完全混合。说明 L 与 f^* 存在强相关性,并且这种关系不受到入口雷诺数比的影响。

值得注意的是,这样的研究结果与文献[14]中 L 对H型节点不完全混合的影响几乎可以忽略不计的结果相悖。这可能是因为,文献[14]所研究的H型节点入流方向与本文不同。入流方向对H型节点不完全混合的影响将被纳入未来研究的考虑当中。

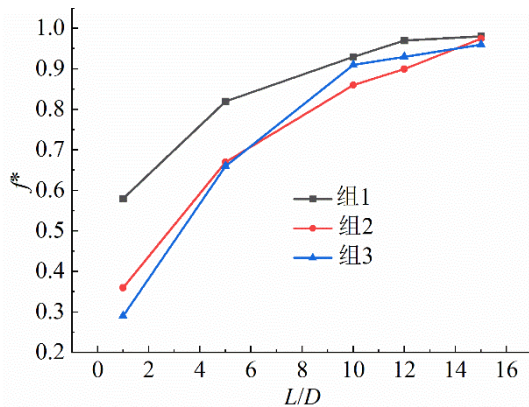


图5 CFD数值实验 f^*-L 折线图

Fig.5 f^*-L line graph of CFD numerical experiments

2.2.3 入口雷诺数比影响

为研究入口雷诺数比对H型节点不完全混合影响,共设置3组数值模拟工况。各工况具有相同 D (DN20)与相同 L ($L=D$)。组内各工况具有不同 $Re_{1/2}$;组间各工况具有不同 $Re_{3/4}$ 。根据数值模拟结果,绘制每组实验 $f^*-Re_{1/2}$ 折线图如图6。其他条件相同时,组2数值模拟结果为 f^* 随着 $Re_{1/2}$ 减小,以反比例趋势下降。在组3中,当 $Re_{1/2}=4$ 时, f^* 值有所回升,这样的现象在组1中也有存在(当 $Re_{1/2}=3$ 时)。组2结果表明,当 $Re_{1/2}$ 超过2后再增继续增加, f^* 继续降低的潜力大大减小,CFD数值模拟收敛性的波动导致组1和组3计算结果中 f^* 值有所回升。比较组间结果发现,在入口雷诺数比相同时,随出口雷诺数比增加,H型节点混合程度越大。

以组2为例,分析组内结果。当 $Re_{1/2}$ 趋近无穷时, f^* 无限趋近于0.25。结合图3来看,两股入流在第一个三通处汇合后,产生一个交汇边界,在两个三通的连接管中逐渐混合,然后分别流向两个出口。当 $Re_{1/2}$ 趋近无穷时,入口1未受污染水的流量远远大于入口2受污染水的流量, f^* 的值更多受到两个三通之间距离的影响。

当 $Re_{1/2}$ 接近0时, f^* 无限趋近1,但是这并不意味着完全混合现象的发生。此时,入口1未受污染

水的流量远远小于入口2受污染水的流量,出口污染物的浓度几乎未受H型节点处不完全混合的影响,使得出现“假性”完全混合现象。

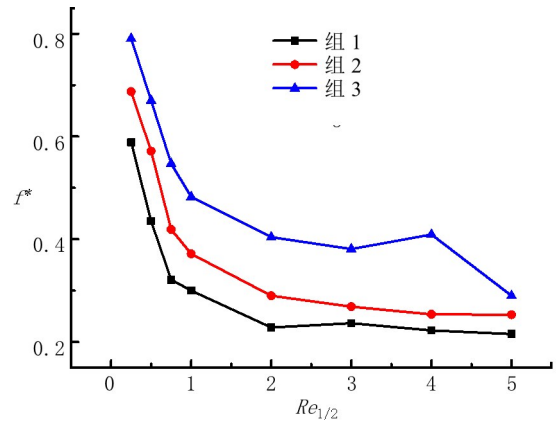


图6 CFD数值实验 $f^*-Re_{1/2}$ 折线图

Fig.6 $f^*-Re_{1/2}$ line graph of CFD numerical experiments

2.2.4 出口雷诺数比影响

为研究出口雷诺数比对H型节点不完全混合影响,共设置3组数值模拟工况。各工况具有相同 D (DN20)与相同 L ($L=D$)。组内各工况具有不同 $Re_{3/4}$;组间各工况具有不同 $Re_{1/2}$ 。根据数值模拟结果,绘制每组实验 $f^*-Re_{3/4}$ 折线图如图7。对比组间结果,由于组间各工况具有不同入口雷诺数比,在出口雷诺数相同时 f^* 必然有不同大小。但是3组实验结果均呈现出相同趋势,即随 $Re_{3/4}$ 增大, f^* 呈先快后慢的上升趋势。结合图3来看,两股入流在第1个三通处汇合后,来自于入口1的未受污染水更多地流出口3,来自于入口2的受污染水更多地流出口4。在入口雷诺数比不变的情况下,入口1和2的流量固定, $Re_{3/4}$ 增大使得出口3流量增加,入口1流量无法满足的部分由入口2来流补充,使得更多的入口2来流流出口3,加剧H型节点处污染物的混合。

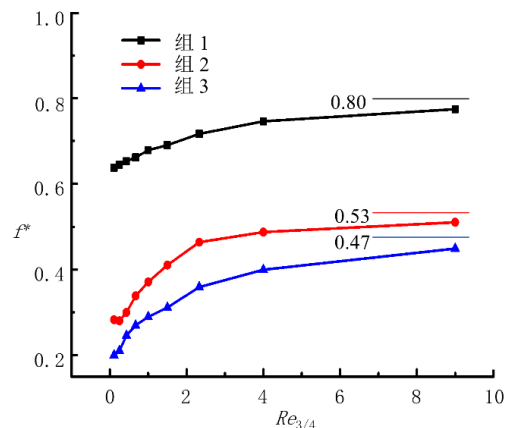


图7 CFD数值实验 $f^*-Re_{3/4}$ 折线图

Fig.7 $f^*-Re_{3/4}$ line graph of CFD numerical experiments

每组实验的组内分析结果表明,在入口雷诺数比相同情况下, f 存在一个小于1的极限值,随着出口雷诺数比值不断增加, f 无限接近这个极限值。比较组间 f 极限值,发现 f 极限值随入口雷诺数增大而减小。这说明 $f-Re_{3/4}$ 关系受入口雷诺数变化影响。结合图3来看,当入口雷诺数增大,入口1的未受污染水的流量增大,使得流入3号出口的未受污染水的流量增加,降低3号出口污染物浓度,进而降低了 f 极限值。

2.2.5 各因素影响程度排序

基于CFD数值模拟结果,采用F检验进行各因素显著性检验。自由度为2,显著性水平为0.05时,各因素F值从大到小依次为 L (10.054)、 $Re_{1/2}$ (8.403)、 $Re_{3/4}$ (7.269)、 D (0.132),F临界值为2.463。可见 L 、 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{3/4}$ 对H型节点 f 具有显著

影响,而 D 则影响不显著。

3 实验室实验

3.1 平台与工况

H型节点混合实验平台示意图如图8所示。其由水箱、水泵、监测点、阀门、H型节点与排水渠组成。水箱分为盛装有未受污染饮用水的水箱,与盛装受污染饮用水的水箱,采用分析纯NaCl代表污染物。监测点包括流量计、压力计与电导率仪,它们均具有在线远传功能,上传数据时间间隔为1 min。采用有机玻璃加工制作DN20、DN40和DN50方形透明三通模具,与PVC透明管道组合形成H型节点。实验工况设计如表2。表2的方括号中所罗列数值为各因素每个工况下所可能的取值,以逗号分隔。

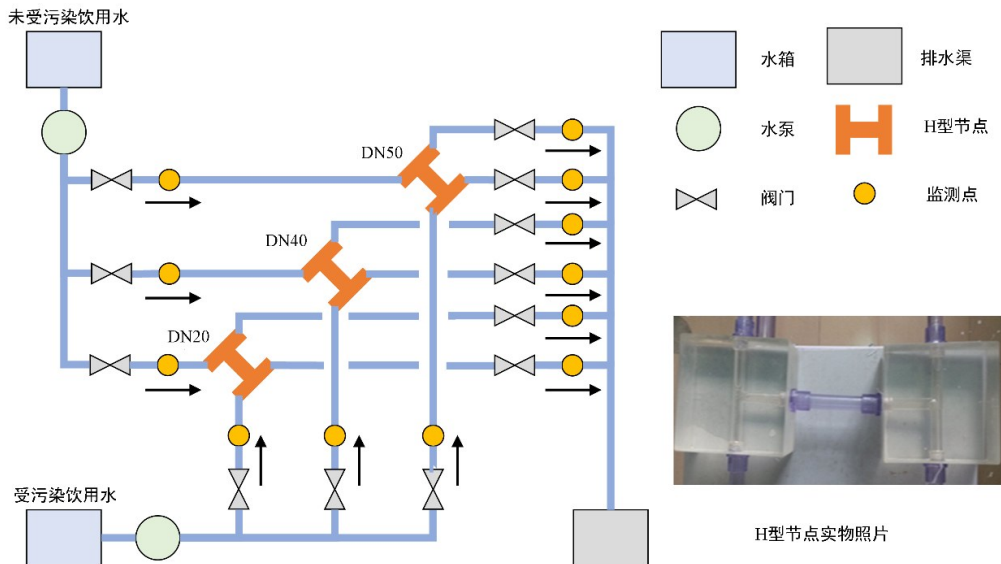


图8 H型节点混合实验平台
Fig.8 H-junctions mixing experiment platform

表2 实验室实验工况
Table 2 Laboratory experiment conditions

组别	D/mm	L/D	$Re_{3/4}$	$Re_{1/2}$
1	20	1	[0.11, 0.25, 0.67, 1, 1.5, 2.33, 4, 9]	[0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5]
2	20	5	[0.11, 0.25, 0.67, 1, 1.5, 2.33, 4, 9]	[0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5]
3	20	10	[0.11, 0.25, 0.67, 1, 1.5, 2.33, 4, 9]	[0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5]

3.2 结果分析

实验室各组实验结果散点图如图9所示。对比相同工况下实验室实验结果与CFD模拟结果后发现,两者之间差异均在10%之内,证明CFD模拟结果的有效性。

4 H型节点不完全混合经验模型

4.1 经验模型建立方法

在供水管网水质模拟中,式(2)中 C^* 并非先验

条件,而是水质模拟所求得的结果。水质模型又以水力模型为基础。如何建立水力指标与 f 之间关系,成为建立H型节点不完全混合模型的关键问题。水力指标 L 、 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{3/4}$,与 f 的变化密切相关。因此,选取 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{3/4}$ 为自变量,以 f 为因变量,分别在 L 为 D 、 $5D$ 、 $10D$ 情况下拟合H型节点不完全混合实验室实验数据,建立H型节点不完全混合经验模型。

所采用8种回归模型分别为Cosine函数、

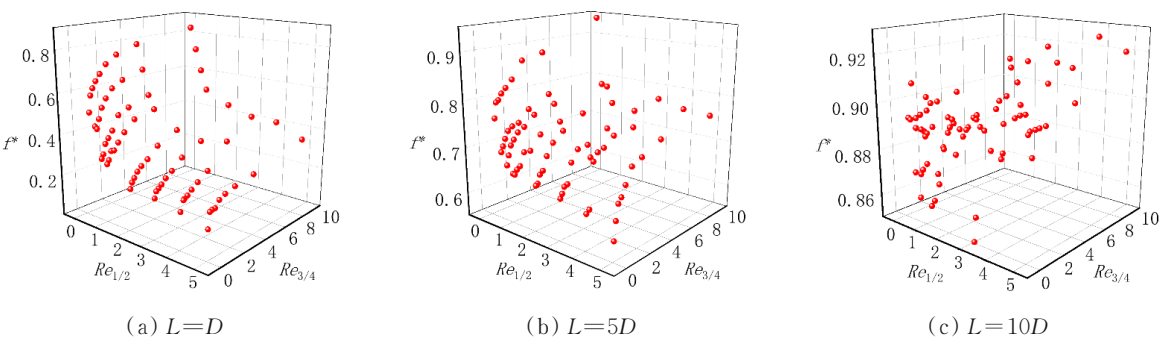


图9 组2~组4实验室实验结果散点图

Fig.9 Scatter plot of laboratory experiment results for groups 2 to 4

Fourier 2D 函数、Parabola 2D 函数、Plane 函数、Poly 2D 函数、Polynomial 2D 函数、Rational 2D 函数和 Rational Taylor 函数。其中 Rational 2D 函数与 Rational Taylor 函数是有理函数模型,使用有理表达式拟合数据,可以捕捉数据中的局部变化;Plane 函数是用于拟合三维空间中平面的线性模型;

Cosine 函数与 Fourier 2D 函数是基于三角函数的模型;Parabola 2D 函数、Poly 2D 函数与 Polynomial 2D 函数是多项式模型。

4.2 拟合结果分析

8 种回归模型拟合效果如表 3 所示。

表 3 8 种回归模型拟合效果

Table 3 Effectiveness of 8 regression model fits

函数	L=D			L=5D			L=10D		
	自由度	残差平方和	R ²	自由度	残差平方和	R ²	自由度	残差平方和	R ²
Cosine	66	0.023	0.875	66	0.086	0.701	66	0.12	0.379
Fourier 2D	65	0.849	0.539	65	0.12	0.529	65	0.56	0.156
Parabola	67	0.233	0.877	67	0.09	0.649	67	0.78	0.356
Plane	69	0.613	0.687	69	0.15	0.426	69	0.39	0.214
Poly 2D	66	0.227	0.879	66	0.09	0.645	66	0.34	0.342
Polynomial 2D	61	0.034	0.980	61	0.02	0.918	61	0.16	0.567
Rational 2D	62	0.027	0.985	62	0.03	0.878	62	0.67	0.619
Rational Taylor	62	0.032	0.982	62	0.02	0.915	62	0.01	0.597

当 $L=D$ 时,对 8 种模型 R^2 与残差平方和进行综合比较考虑。Rational 2D 函数 R^2 最大,为 0.984 8;Cosine 函数残差平方和最小,为 0.023。比较二者 R^2 与残差平方和。Rational 2D 函数的 R^2 比 Cosine 函数大 0.109,而残差平方和仅比 Cosine 函数大 0.004。由 R^2 所评价 Rational 2D 函数拟合能力比 Cosine 函数更优,而由残差平方和所评价 Rational 2D 函数拟合能力与 Cosine 函数相差不大。因此,认为 Rational 2D 函数拟合效果优于 Cosine 函数,在 8 种对比模型中拟合效果最好。

当 $L=5D$ 时,8 种模型 R^2 较 $L=D$ 时均有所降低,拟合效果变差。此时,Polynomial 函数具有最优的拟合能力,其 R^2 为 8 种模型中最大,而残差平方和为最小。Rational 2D 函数仍然具有较为理想拟合效果, R^2 与残差平方和分别为 0.878 与 0.03。与 Polynomial 函数相比, R^2 仅相差 0.04,而残差平方和仅相差 0.01,拟合能力差距几乎可以忽略不计。考虑到前后建模一致性,仍选取 Rational 2D 函数拟合

$L=5D$ 时 H 型节点实验数据。

当 $L=10D$ 时,8 种模型 R^2 较 $L=D$ 时均大幅度下降,残差平方和均大幅度增加,拟合效果均不佳。图 7(c)表明,当 $L=10D$ 时,各工况实验的 f 结果均高于 0.85,个别工况实验的 f^* 结果甚至超过 0.92。可见 $L=10D$ 时,H 型节点处污染物几乎为瞬时完全混合。因此,可认为没有建立 $L=10D$ 时 H 型节点不完全混合模型必要。在实际应用中,对于 $L>10D$ 的 H 型节点,采用完全混合模型进行节点混合现象模拟即可。

Rational 2D 函数表示如式(6)

$$f^* = \frac{z_0 + aRe_{1/2} + bRe_{3/4} + cRe_{3/4}^2 + dRe_{3/4}^3}{1 + eRe_{1/2} + fRe_{1/2}^2 + gRe_{1/2}^3 + hRe_{3/4} + kRe_{3/4}^2}$$

(6)

式中: z_0 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 和 k 均为经验参数,拟合所得各参数如表 4。

该模型建立的目的是应用于水质模拟实际工程当中,通过在水质模型建立过程中考虑 H 型节点

不完全混合现象,提升水质模拟准确程度。基于动力学模型、深度学习模型等的H型节点不完全混合模型将在未来进行更为深入的研究。 $L=10D$ 时各

回归模型拟合效果不佳的结果也将对后续更先进模型的建立产生指导作用。

表4 Rational 2D函数中经验参数
Table 4 Empirical parameters in Rational 2D function

L	z_0	a	b	c	d	e	f	g	h	k
D	0.093	0.01	0.64	0	0.004	3.38	-0.93	0.09	0.39	-0.03
$5D$	0.026	0.043	0.162	0.016	0	0.143	0.039	0.005	0.206	0.021

5 结论

- 1)H型节点处污染物不完全混合程度与两个三通之间距离和出口雷诺数比均呈正相关关系,与入口雷诺数比呈反比例关系,而管径则对不完全混合程度影响不显著。
- 2)Rational 2D函数对H型节点实验室实验数据拟合效果最好,可用来建立三通间距为1倍和5管径时的H型节点污染物不完全混合经验模型。
- 3)当三通间距为10倍管径时,H型节点处污染物几乎为瞬时完全混合,建议当H型节点三通间距超过10倍管径时,采用完全混合模型。

参考文献

[1] 毛湘云, 徐冰峰, 孟繁艺. PSO-SVM与BP神经网络组合预测供水系统余氯的方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(4): 159-164.
MAO X Y, XU B F, MENG F Y. Prediction of residual chlorine in water supply system by PSO-SVM and BP neural network combined model [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(4): 159-164. (in Chinese)

[2] YOUSEFIAN R, DUCHESNE S. Modeling the mixing phenomenon in water distribution networks: A state-of-the-art review [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2022, 148(2): 03121002.

[3] VAN BLOEMEN WAANDERS B, HAMMOND G, SHADID J, et al. A comparison of navier stokes and network models to predict chemical transport in municipal water distribution systems [C]//Impacts of Global Climate Change. Anchorage, Alaska, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2005: 10.1061/40792(173)12.

[4] HO C K, O'REAR L Jr. Evaluation of solute mixing in water distribution pipe junctions [J]. Journal AWWA, 2009, 101(9): 116-127.

[5] PANKAJ B S, JAYKRISHNAN G, OSTFELD A. Optimizing water quality treatment levels for water distribution systems under mixing uncertainty at junctions [J]. Journal of Water Resources Planning and

Management, 2022, 148(5): 04022013.

[6] GRBČIĆ L, KRANJČEVIĆ L, DRUŽETA S, et al. Efficient double-tee junction mixing assessment by machine learning [J]. Water, 2020, 12(1): 238.

[7] HERNÁNDEZ CERVANTES D, LÓPEZ-JIMÉNEZ P A, ARCINIEGA NEVÁREZ J A, et al. Incomplete mixing model at cross-junctions in epanet by polynomial equations [J]. Water, 2021, 13(4): 453.

[8] YU T C, SHAO Y, SHEN C. Mixing at cross joints with different pipe sizes in water distribution systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(5): 658-665.

[9] SHAO Y, ZHAO L, YANG Y J, et al. Experimentally determined solute mixing under laminar and transitional flows at junctions in water distribution systems [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 3686510.

[10] 陈健勋, 高金良, 齐世华, 等. 供水管网交叉型节点水质混合规律研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 10-19.
CHEN J X, GAO J L, QI S H, et al. Study on mixing law of water quality at cross junctions in water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(8): 10-19. (in Chinese)

[11] GRBČIĆ L, KRANJČEVIĆ L, LUČIN I, et al. Large Eddy Simulation of turbulent fluid mixing in double-tee junctions [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12 (1): 789-797.

[12] CHOI C Y, SHEN J Y, AUSTIN R G. Development of a comprehensive solute mixing model (AZRED) for double-tee, cross, and wye junctions [C]//Water Distribution Systems Analysis 2008. Kruger National Park, South Africa. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009: 10.1061/41024(340)89.

[13] SHAO Y, YANG Y J, JIANG L J, et al. Experimental testing and modeling analysis of solute mixing at water distribution pipe junctions [J]. Water Research, 2014, 56: 133-147.

[14] 齐世华. 基于给水管网节点混合流态模拟的非完全混合模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
QI S H. Study on incomplete mixing model based on simulation of mixed flow pattern of water supply network nodes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,

2020. (in Chinese)

[15] 陈少林, 邹民虎, 刘赫南, 等. 超高层建筑二次供水系统水质安全保障措施分析[J]. 给水排水, 2023, 59(Sup1): 344-348.

CHEN S L, ZOU M H, LIU H N, et al. Analysis of water quality safety guarantee measures for secondary water supply system of super high-rise building [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(Sup1): 344-348. (in Chinese)

[16] SONG I, ROMERO-GOMEZ P, ANDRADE M A, et al. Mixing at junctions in water distribution systems: An experimental study [J]. Urban Water Journal, 2018, 15(1): 32-38.

[17] YU T C, TAO L, SHAO Y, et al. Experimental study of solute mixing at double-Tee junctions in water distribution systems [J]. Water Supply, 2015, 15(3): 474-482.

(编辑 XXX)