

文章编号:1671-2021(2006)03-0470-04

低速条件下给水管线中余氯衰减模拟研究

康 华¹, 伍悦滨¹, 蒋白懿²(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:目的 研究低速条件下给水管线中水质的余氯的衰减变化状况. 方法 应用有限差分法求解水质模型, 用数值模拟给水管线中余氯的衰减变化规律来反映给水管网中的水质状况. 结果 当给水管线中流速较大, 水流处于高雷诺数紊流状态时, 氯的随流迁移在组分传输过程中占主导作用, 通常忽略扩散项, 采用一维水质传输模型数值模拟管线中的余氯变化规律. 但在管网末端或者夜晚供水时段, 管线中的流速可能较低, 忽略扩散作用将给模拟结果带来较大误差. 这时需考虑求解包含扩散项的一维水质移流扩散模型. 结论 给水管线在低速条件下, 需求解包含扩散项的一维水质移流扩散模型来数值模拟余氯的衰减变化规律, 以提高模拟结果准确性, 从而真实地反映给水管线中水质的变化状况.

关键词:给水管线; 低速; 数值模拟; 余氯衰减**中图分类号:** TU991.21 **文献标识码:** A

当给水管网中流速较大时, 水中可溶性物质的随流迁移在组分传输过程中占主导作用, 通常忽略扩散作用, 可采用一维水质传输模型模拟水质的变化规律^[1-2]. 但在管网末端或者在夜晚供水时段, 管线中的流速可能较低, 此时扩散的影响不可忽略, 因此需要求解包含扩散项的一维水质移流扩散模型.

笔者应用有限差分法求解水质移流扩散方程, 数值模拟了低速条件下给水管线中的余氯变化规律.

1 水质模型

对于水中的溶解性物质, 其物理过程主要有随流迁移和扩散 2 种基本方式. 随流迁移指物质随水体运动而产生的输移过程; 而扩散指由物质的质量浓度在梯度方向产生的非平流转移过程, 通常包括分子扩散、紊动扩散及剪切流离散.

给水管网一维水质移流扩散模型^[3]为

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + U \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} + KC(x, t) = 0 \quad (1)$$

式中: U 为管内水流平均流速, m/s ; $C = C(x, t)$ 为质量浓度, mg/L ; K 为一维反应系数, s^{-1} ; x 为位置坐标; t 为时间; D 为综合扩散系数, m^2/s , 为分子扩散系数、紊动扩散系数和剪切流离散系数的总和.

1.1 一维水质传输模型

当管线内流速较高, 水流处于高雷诺数紊流状态时, 扩散作用相对较小, 随流迁移在传输过程中起主导作用, 此时忽略扩散项, 所以模型简化为

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + U \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + KC(x, t) = 0 \quad (2)$$

称为一维水质传输模型^[4].

1.2 一维水质移流扩散模型

1.2.1 综合扩散系数

由于剪切流离散作用远远大于紊流扩散和分

收稿日期: 2006-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478025)

作者简介: 康华(1974-), 女, 博士研究生, 主要从事给水管网水力及水质模拟研究.

子扩散,因此综合扩散系数 D 主要为剪切流离散系数.管道内的一维剪切流离散指圆管断面上纵向流速分布不均匀所引起物质在纵向上随流散开的离散过程.泰勒定义层、紊流状态下剪切流离散系数为^[5]

$$\text{层流时 } D_{\text{disp}} = \frac{r^2 U^2}{48 D_{\text{diff}}} \quad (3)$$

式中: D_{disp} 为剪切流离散系数, m^2/s ; D_{diff} 为分子扩散系数, m^2/s ; r 为圆管半径, m .

$$\text{紊流时 } D_{\text{disp}} = 10.1 f U_* \quad (4)$$

式中: U_* 为剪切速度, $U_* = U \sqrt{f/8}$; f 为摩阻系数.

式(3)与式(4)均与实验符合得较好,至于在实际工程管道中,情况比较复杂,因此式中的系数需通过实验修正.

1.2.2 一维水质移流扩散模型数值解

设初始条件和边界条件已知,适当选取水力及水质时段,采用有限差分法将偏微分方程转变成有限差分方程进行数值求解^[6-10].

以一个时空网格建立的控制体如图 1 所示,

根据向前差分

$$\left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{x-1}^t = \frac{C_{x-1}^{t+1} - C_{x-1}^t}{\Delta t} \quad \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_x^t = \frac{C_x^{t+1} - C_x^t}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{x-1}^t + \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_x^t \right) = \frac{C_{x-1}^{t+1} - C_{x-1}^t + C_x^{t+1} - C_x^t}{2\Delta t} = \frac{(C_{x-1}^{t+1} + C_x^{t+1}) - (C_{x-1}^t + C_x^t)}{2\Delta t}$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x-1}^t = \frac{C_x^t - C_{x-1}^t}{\Delta x} \quad \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x-1}^{t+1} = \frac{C_x^{t+1} - C_{x-1}^{t+1}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{2} \left(\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x-1}^{t+1} + \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x-1}^t \right) = \frac{C_x^{t+1} - C_{x-1}^{t+1} + C_x^t - C_{x-1}^t}{2\Delta x}$$

根据中心差分

$$\left. \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right|_{x-1}^t = \frac{C_{x+1}^t - 2C_x^t + C_{x-1}^t}{\Delta x^2}$$

$$\left. \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right|_{x-1}^{t+1} = \frac{C_{x+1}^{t+1} - 2C_x^{t+1} + C_{x-1}^{t+1}}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left(\left. \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right|_{x-1}^{t+1} + \left. \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right|_{x-1}^t \right) = \frac{C_{x+1}^{t+1} - 2C_x^{t+1} + C_{x-1}^{t+1} + C_{x+1}^t - 2C_x^t + C_{x-1}^t}{2\Delta x^2}$$

将以上转换代入式(5),化简得

$$I_3 C_{x-1}^{t+1} + I_4 C_x^{t+1} - \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{x+1}^{t+1} = I_1 C_{x-1}^t + I_2 C_x^t + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{x+1}^t \quad (6)$$

式中: $I_1 = 1 + U \frac{\Delta t}{\Delta x} + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{K\Delta t}{2}$; $I_2 = 1 - U \frac{\Delta t}{\Delta x} - \frac{2D\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{K\Delta t}{2}$;

$I_3 = 1 - U \frac{\Delta t}{\Delta x} - \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{K\Delta t}{2}$; $I_4 = 1 + U \frac{\Delta t}{\Delta x} + \frac{2D\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{K\Delta t}{2}$.

式(6)即为—维水质移流扩散模型的有限差分方程形式,其数值解可通过编制计算机程序实

设水流在 $x-1$ 及 x 处分别流入及流出控制体,根据质量守恒,式(1)可写为

$$V \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} + UV \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - DV \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + KVC(x,t) = 0 \quad (5)$$

其中, V 为控制体体积.假设控制体的质量浓度为 4 个网格点上质量浓度的平均值,即

$$\bar{C} = \frac{C_x^t + C_x^{t+1} + C_{x-1}^t + C_{x-1}^{t+1}}{4}$$

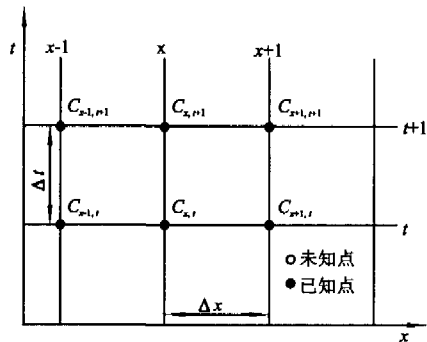


图 1 $x-t$ 网络控制体

现.

2 算例分析

有一长 1 000 m, 直径 500 mm 的简单管线, 见图 2. 一台离心泵位于系统进口, 将水从液面高度为 700 m 的水池提升到高度为 711 m 处, 管路摩阻系数为 0.036 6. 设系统入口处为投氯点, 投加氯的质量浓度保持为 1.0 mg/L, 即 $C(0, t) = 1.0 \text{ mg/L}$. 除投氯点外, 管路中各点初始氯质量浓度为零. 氯元素扩散系数为 $1.21 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 反应系数为 $6.417 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

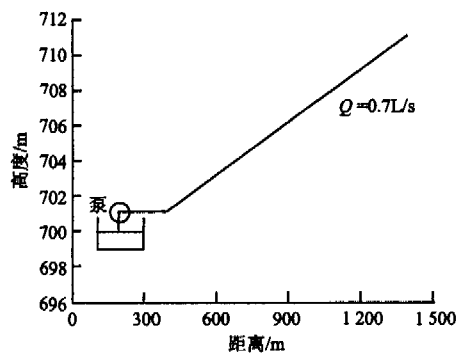


图2 算例管线

首先模拟恒定流量为 0.7 L/s 及 0.9 L/s 时管内余氯的衰减变化规律. 设水温为 15 °C, 此时管内水流雷诺数均在 2 000 左右, 接近层流状态. 由式(3)得 $D_{\text{disp}} = 13.68 \text{ m}^2/\text{s}$, 即综合扩散系数 D 为 $13.68 \text{ m}^2/\text{s}$. 分别应用一维水质移流扩散模型及一维水质传输模型数值模拟计算出 80 h 后余氯沿程变化状况, 结果见图 3. 通过分析, 流量为 0.7 L/s 时, 2 种模型求解的相对偏差为 82.1%; 当流量增加至 0.9 L/s 时相对偏差减少至 61.3%. 可见, 随着流速增大, 2 种模型的求解偏差逐渐减小. 这说明给水管线水流在低速条件下使用一维水质传输模型数值模拟将产生较大的误差.

再模拟流量为 10 L/s、20 L/s 及 50 L/s (即流速较大) 时管内余氯的衰减变化规律. 此时管内流态均处于紊流, 由式(4)得综合扩散系数 D 分别为 $0.0087 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $0.0174 \text{ m}^2/\text{s}$ 及 $0.0435 \text{ m}^2/\text{s}$. 应用一维水质移流扩散模型及一维水质传输模型分别用数值模拟计算出 10 L/s 在 5.5 h、20 L/s 在 2.7 h 及 50 L/s 在 1 h 后的余氯沿程变化状况, 见图 4. 可以看出 2 种模型算出的解基本一致, 曲线

重合.

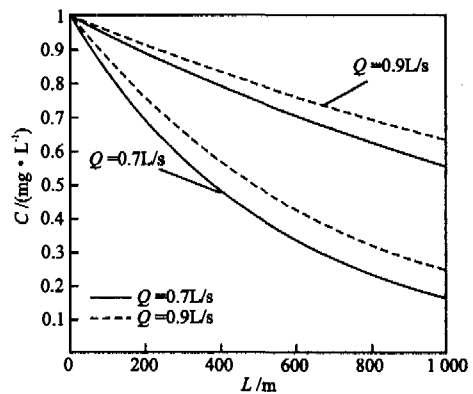


图3 低速条件下2种模型模拟结果比较

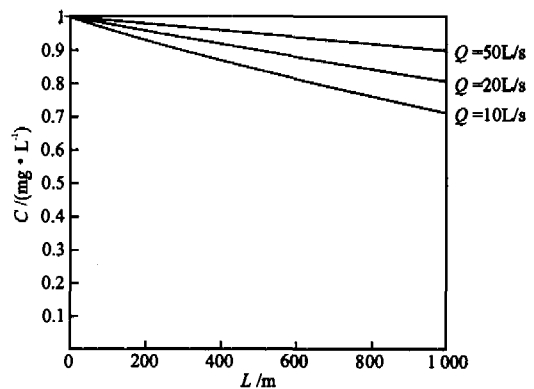


图4 高雷诺数紊流条件下模拟结果

3 结论

当给水管网中流速较大(如流量为 10 L/s、20 L/s 及 50 L/s) 时, 即水流处于高雷诺数紊流状态, 这时扩散作用相对较小, 随流迁移在传输过程中占主导作用. 因此, 可以忽略扩散项, 采用一维水质传输模型数值模拟管网中的余氯变化规律. 而给水管线水流在低速条件下(如流量为 0.7 L/s 及 0.9 L/s) 时, 忽略扩散项将引起较大误差. 为了提高模拟结果准确性, 就应同时考虑组分随流迁移及扩散的作用, 这时须采用一维水质移流扩散模型数值模拟管线中的余氯衰减规律.

参考文献:

- [1] Boulos P, Altman T, Jarrige P, et al. Discrete Simulation Approach for Network Water Quality Models [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1995, 121(1): 49-60.
- [2] Rossman L A. Epanet2 Users Manual. Water Supply and Water Resources Division. National Risk Man-

- agement Research Laboratory. U. S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio, 2000.
- [3] Rossman L A, Boulos P F. Numerical Methods for Modeling Water Quality in Distribution Systems: a Comparison[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1996, 122(2): 137 - 146.
- [4] Cristovao V, Fernandes S. Water Quality Modeling in Pipeline Including the Impact of Hydraulic Transients [D]. Toronto: University of Toronto, 2002.
- [5] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [6] 傅德薰, 马延文. 计算流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [7] 刘顺隆, 郑群. 计算流体力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [8] 康华. 水力瞬态工况对给水管线水质影响研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2005.
- [9] 阎立华, 张莉莉, 王玉宇. 供水水量不足情况下给水管网的水力计算方法[J]. *沈阳建筑大学学报:自然科学版*, 2005, 21(2): 134 - 137.
- [10] 赵玉华, 张振义, 金峤, 等. 饮用水蓄贮过程中二次污染的原因及控制条件[J]. *沈阳建筑工程学院学报:自然科学版*, 2001, 17(3): 216 - 219.

Numerical Simulation of Residual Chlorine Decay in Water Supply Pipelines under Low Velocity

KANG Hua¹, WU Yue-bin¹, JIANG Bai-yi²

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090; 2. School of Municipal & Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Residual chlorine decay reflects the water quality in water distribution systems, so numerical simulation of residual chlorine decay makes significance. When the velocity of water in pipelines is large enough, the advection of chlorine is dominant in the componential transport process. In the circumstances, the one-dimensional water quality transport model without the dispersion term is usually used to simulate residual chlorine decay in pipelines. However, the velocity in pipelines at tail end or at night could be smaller. The paper demonstrates that the water quality transport model that omits the dispersion term can result in a big error. Therefore, numerical simulation of residual chlorine decay needs to make use of the water quality advection-dispersion model including the dispersion item under the circumstances. Finally the paper presents the detailed approach to solving the model by the method of finite difference.

Key Words: water supply pipeline; low velocity; numerical simulation; residual chlorine decay