

深井供水管网中沙水水质数学模型的建立及应用

颜合想, 刘遂庆, 信昆仑

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对深井井群复合供水中直供井出水含沙量较高对水质造成突发性污染的问题,以泥沙的运动学理论为基础,建立了泥沙在管网水输送中的沙水水质数学模型。利用 EPANET-MSX 模块编码对模型进行求解,动态地模拟出泥沙在管网中的运动状况,并求出了出沙对水质的影响范围、持续污染时间以及具体用户的出沙量和出沙持续时间,为水质突发性污染的应急决策提供了科学依据。

关键词: 深井供水管网; 直供井; 沙水水质数学模型; 含沙量

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2010)01-0047-04

Establishment and Application of Silt Movement Model in Water Distribution System Supplied by Deep Wells

YAN He-xiang LIU Sui-qing XIN Kun-lun

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Aimed at the problem of drinking water polluted by silt from the deep wells in the multiple-well water distribution system, a dynamic model of silt in the system was established based on silt kinematics. EPANET-MSX was used to solve the model; the motion state of the silt in the system was simulated, and the influence range of silt on water quality, continuous pollution time as well as the silt content and duration time at users were obtained. All these provide a scientific basis for the emergency decision of sudden water pollution accidents.

Key words multiple-well water distribution system; direct supply well; mathematical model for silt water quality; silt content

我国北方的许多城市,由于年降雨量较少,主要依靠地下水作为饮用水水源,并通过深井井群汲水处理后向用户供水。由于深井施工质量、井管破裂、砾料下沉、过量抽水等原因,直供井出水的含沙量较高,污染了水质,影响了用户正常用水,目前针对该问题的研究还较少。笔者尝试对管网中直供井出沙所引起的水质污染问题进行研究,即以泥沙运动学为理论基础,通过建立沙水水质数学模型,对泥沙在管网中的运动状况进行模拟,进而掌握直供井出沙对管网水质的影响,目的是为供水企业的管理决策提供科学依据。

1 沙水水质数学模型的建立

1.1 泥沙在水流中的运动特性

根据泥沙在水流中的运动状态可将其分为推移质和悬移质两大类^[1]。在水流中以滚动(包括层移)、跳跃形式前进的颗粒统称推移质;在水流中以悬浮形式前进的颗粒统称悬移质。所有的泥沙都以一定的转移概率分别经历这两种运动形式,而处在各运动状态上的概率依其粒径大小和水流条件而定,且在不同的水流条件下可以互相转化^[2]。

1.2 临界不淤流速

在沙水两相流中,常用临界不淤流速描述淤积

的临界条件。当管道中的流速大于临界不淤流速时,泥沙以悬移质的形式输移扩散;当管道中流速小于临界不淤流速时,泥沙则出现沉降淤积。笔者采用克诺罗兹临界流速公式计算临界不淤流速^[3]。

1.3 有压输水管中的泥沙淤积量

有压管道中细颗粒、低含沙量泥沙的淤积,其泥沙形体及沉降过程与沉淀池中颗粒物的沉降有一定的相似性。鉴于管道的流速不高、泥沙的含沙量低,笔者采用沉淀池淤积的一般公式来计算淤积量^[4]。假设泥沙均匀地分布在管道断面上,截取一小段长为 L 的管段来分析,如图 1、2 所示。

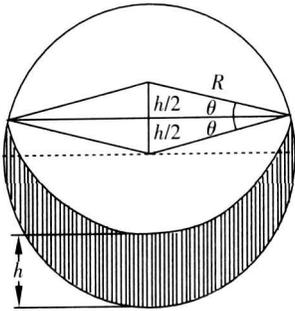


图 1 管道断面
Fig. 1 Section of pipe

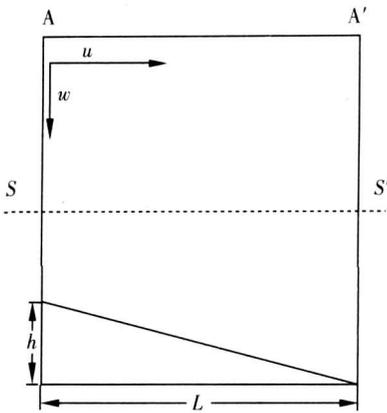


图 2 截取的分析片段
Fig. 2 Analysis fragment

流经断面 A 的泥沙的含沙量为 S , 运动了长度 L 后到达 A' 断面, 含沙量变为 S' 。根据浅池沉淀理论, 假设距离管底 h 以下的断面 (如图 1 阴影面积部分) 的泥沙沉降到了管底并淤积。设图 1 中阴影部分的面积为 S_1 , 令泥沙淤积率为 k 则有

$$\frac{h}{w} = \frac{L}{u} \quad (1)$$

$$\sin\theta = \frac{h}{2R} \quad (2)$$

$$k = \frac{S_1}{\pi R^2} = \frac{2\theta + \sin 2\theta}{\pi} \quad (3)$$

$$S' = (1 - k)S \quad (4)$$

式中 h ——泥沙下降高度, m

w ——泥沙沉速, m/s

u ——管道平均流速, m/s

R ——管道半径, m

S ——断面 A 的含沙量, mg/L

S' ——断面 A' 的含沙量, mg/L

其中, 天然泥沙沉速及低含沙量下泥沙沉速的计算均采用文献 [5] 中的泥沙沉速公式。

1.4 一维沙水水质数学模型

城市供水管网的管径远小于其管长, 故供水管网的沙水运动可以简化为一维流动。文中模型的建立基于以下假设:

- ① 泥沙颗粒粒径较均匀;
- ② 泥沙垂向分布均匀;
- ③ 泥沙沉降后, 做淤积或推移运动, 不再返回主体水中。

根据扩散理论, 悬移质在垂线分布的均匀程度取决于参数 Z (Z 的计算见文献 [6])。当 $Z < 0.25$ 时, 悬移质在断面上接近均匀分布, 经估算试验满足这一条件。其中对于细颗粒的泥沙可认为其一旦沉降便淤积或做推移运动。

1.4.1 含沙量管段方程

沙水水质数学模型见式 (5)。

$$\begin{cases} \frac{dS_w}{dt} = -u \frac{\partial S_w}{\partial x} + kS_w \\ \sin\theta = \frac{Lw}{2Ru} \quad (L < 2Ru/w) \\ w = \frac{\sqrt{(13.95 \frac{v}{d})^2 + 1.09gd(\frac{r_s - r}{r})}}{1 + 1.24\eta S_w^{\frac{1}{3}}} - \frac{13.95 \frac{v}{d}}{1 + 1.24\eta S_w^{\frac{1}{3}}} \\ k = \begin{cases} -\frac{2\theta + \sin 2\theta}{\pi} & (u < u_c) \\ 0 & (u > u_c) \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中 S_w ——含沙量, mg/L

u_c ——临界流速, m/s

v ——清水动力粘滞系数

d ——泥沙粒径, m

η ——常数, 值为 0.7~2.2 文中取 1.16

r_s ——泥沙密度, mg/L

r ——清水密度, mg/L

其中, L 的取值既不能太大也不能太小, 因为取值太大会使精度降低, 取值太小则会导致在求解时难以收敛。

1.4.2 节点混合方程

假定流体流入节点, 混合是完全、瞬间完成的, 即不考虑混合时间等因素, 那么管网中的某一个节点均满足节点混合方程。

$$S_{i \mid x=0} = \frac{\sum_{j \in J_k} Q_j S_j \mid_{x=L_j} + Q_s S_s}{\sum_{k \in I_k} Q_i + Q_k} \quad (7)$$

- 式中 $S_{i \mid x=0}$ ——管段 i 起始点的含沙量, mg/L
- $S_j \mid_{x=L_j}$ ——管段 j 结束点的含沙量, mg/L
- x ——管段的长度, m
- J_k ——流入节点 k 的管段组
- I_k ——流出节点 k 的管段组
- S_s ——进入节点 k 的外部水源含沙量, mg/L
- Q_s ——进入节点 k 的外部水源流量, L/s
- Q_k ——流出节点 k 的流量, L/s
- Q_i ——管段 i 的流量, L/s

2 沙水水质数学模型的求解

在完成水力计算的基础上, 采用拉格朗日时间驱动法求解沙水水质数学模型, 该法可追踪每个管段中水质计算片段的物质浓度变化。在每个水质计算片段内, 可根据所建模型计算泥沙浓度及沉降量, 随着时间的推进, 从而完成整个模拟过程的计算。

笔者采用 EPANET 及其水质扩展模块 EPANET-MSX 作为辅助工具求解模型。EPANET-MSX 对 EPANET 2.0 的水质模拟功能进行了补充扩展, 可进行多组分的水质模拟。在 Visual C++ 6.0 的平台上, 利用 EPANET 2.0 及 EPANET-MSX 的开源 tool kit 进行调用编码, 完成模型的求解。

3 模型应用

3.1 管网模型

图 3 为西北某城市供水管网, 该管网系统由 1 个水厂和 9 个直供井作为供水水源, 直供井根据管网需要直接向管网供水。整个管网共 122 根管道, 管径为 150~800 mm, 供水管线总长约 71 km, 供水规模约 30 000 m³/d。

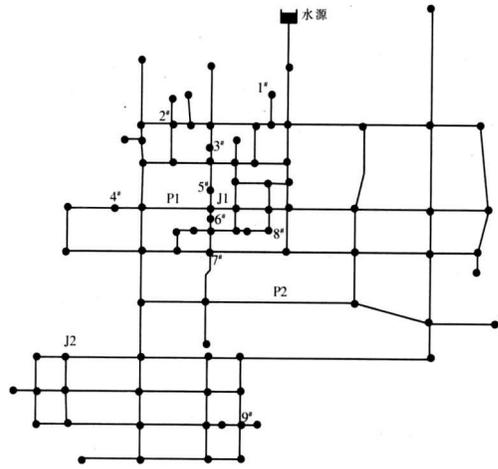


图 3 供水管网模型

Fig. 3 Model of water distribution system

3.2 模型计算

根据实际资料, 所建模型的各项参数设定如下: 悬移质为较均匀的细沙, 粒径 $d=0.05$ mm, 密度 $r_s=2.650$ kg/m³; 清水粘滞系数 ν 取 10^{-6} (忽略因温度变化而带来的影响); 污染点的连续出沙浓度为 1 000 mg/L。

基于以上设定参数, 分别对 8# 井在不同情形下进行了长达 48 h 的延时模拟 (模拟情形见表 1), 得到各时段节点及管段的水质数据 (文中未列出)。

表 1 模拟情形

Tab 1 Simulation condition

项目	出沙时间	沉降淤积
情形 1	0:00—4:00	发生沉降
情形 2	6:00—10:00	发生沉降
情形 3	6:00—10:00	不发生沉降

注: 情形 1 为用水低峰时段, 情形 2、3 为用水高峰时段, 由于用水高峰时管道中的流速较大, 发生沉降的几率较小。

3.3 结果分析

3.3.1 出沙影响范围

3 种情形下的模拟结果见表 2。

表 2 泥沙污染范围

Tab 2 Range of water polluted by silt

项目	情形 1		情形 2		情形 3	
	节点	管段	节点	管段	节点	管段
总数	88	122	88	122	88	122
被污染数	27	46	24	36	30	41
百分比 /%	30.68	37.70	27.27	29.51	34.09	33.61

由表 2 可知, 8# 井出沙发生在用水低峰时 (情形 1) 对管网的影响范围要比发生在用水高峰时 (情形

2)的大,前者对用户节点和管段水质污染的比例分别较后者高了 3 41% 和 8 19%。究其原因是用水低峰时管网中的流速较小,扩散速度慢,持续时间长;从扩散速度上分析,出沙发生在用水高峰时的输移扩散比发生在用水低峰时的快(见图 4),因为用水高峰时管网流速大,泥沙整体推移速度比用水低峰时快;从持续时间上分析,由开始出沙至管网中所有节点不再出沙的这段时间里,用水低峰时出沙持续了 43 h 用水高峰时出沙持续了 36 h(对于用水高峰时,不考虑泥沙沉降的输移扩散比考虑泥沙沉降的污染范围更大、持续时间更长)。

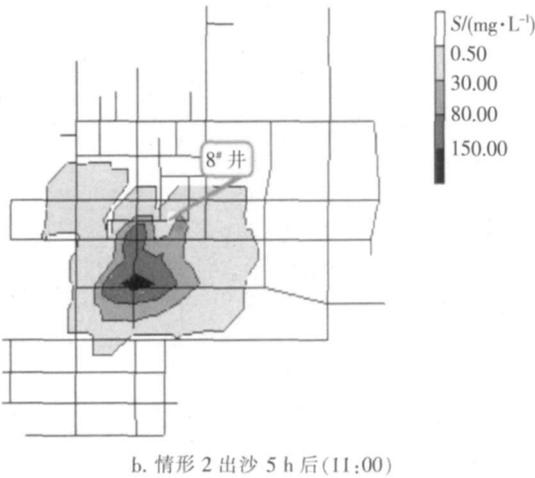
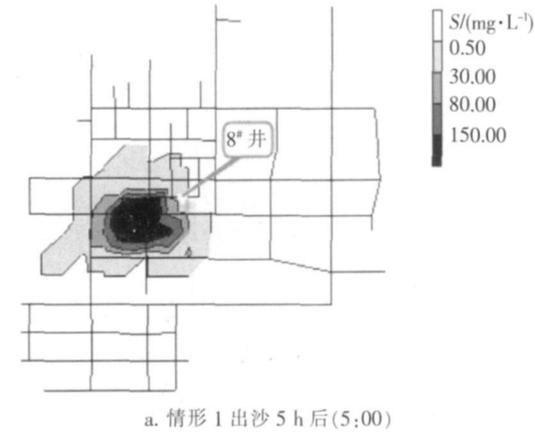


图 4 不同情况下出沙 5 h 后的含沙量分布

Fig 4 Concentration of silt under different conditions

3.3.2 用户出沙量

表 3 为三种情形下用户节点 J1、J2 的总出沙量及出沙时间。

在用水低峰时出沙,管网中的流速相对较小,泥沙输移扩散慢,用户节点 J1 由于靠近出沙深井(8#

井),出沙量明显较大;而在用水高峰时出沙,管网中流速相对较大,泥沙输移扩散较快,节点的出沙量也明显减少。用户节点 J2 距离出沙深井较远,出沙量则相对较少。不考虑泥沙沉降淤积时计算的出沙量比考虑沉降淤积时的大。

表 3 用户出沙量及出沙时间

Tab 3 Silt content and duration time at users

项 目	节点 J1		节点 J2	
	出沙量 /g	持续时间 /h	出沙量 /g	持续时间 /h
情形 1	2 259	2	324	2
情形 2	756	2	9	17
情形 3	870	2	28	17

注: 图中节点实际是集中出流点,并不代表某个具体用户。

4 结论

基于所建沙水水质数学模型对供水管网不同的出沙情形进行模拟,通过模拟结果可了解到泥沙对管网水质的影响范围、泥沙持续污染时间、具体用户的持续出沙时间及出沙量,对以直供井为供水水源的城市水务管理预防和应急突发出沙事件采取有效措施提供了依据。在模型建立过程中,对某些因素(如泥沙级配、泥沙浓度垂向变化、淤积泥沙的起悬等)作了简化,更加精确的模型需做进一步研究。

参考文献:

- [1] 张瑞瑾,谢鉴衡,陈文彪. 河流动力学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2007.
- [2] 邵学军,王兴奎. 河流动力学概论[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [3] 魏先勋. 环境工程设计手册[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 2002.
- [4] 严煦世,范瑾初. 给水工程(第 4 版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] 宋志尧,王小平,孔俊,等. 统一的泥沙沉降阻力系数及沉速公式[A]. 第六届全国泥沙基本理论学术讨论会论文集(1)[C]. 郑州:黄河水利出版社, 2005.
- [6] 钱宁,谢鉴衡,朱鹏程,等. 泥沙手册[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.

电话: (021) 65985869

E-mail yanhexiang@ gm ail.com

收稿日期: 2009- 07- 23