

矿井防尘供水管网水力水质模拟实现方法与应用

彭亚, 蒋仲安

(北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要: 水力水质模型构建及模拟是研究供水管网性能的重要手段。为了实现在 MATLAB 环境中调用 EPANET 水力水质计算引擎, 研究矿井防尘供水管网水力水质特征, 实现并对比分析了两种有效的 EPANET-MATLAB 对接方法, 并基于其中面向对象的数据结构调用方式混合编程, 构建了矿山井下防尘供水管网水力水质模型; 结合防尘管网日用水需求, 对水力工况和水龄分布分别进行了 24 h 和 48 h 动态模拟。研究表明: 使用 EPANET-MATLAB Toolkit 的混合编程更加灵活、高效, 是进行水力水质模拟与分析的有效途径; 防尘供水管网用水具有周期性, 呈现明显的高峰和低谷时段; 用水节点的水压变化范围约为 1.5 ~ 5.5 MPa, 其变化规律与用水量变化呈负相关; 水龄变化也具有日周期性的特点, 不同用水节点的水龄呈现不同的波动特征; 用水节点距离水源越远, 其水龄相对较大, 所有用水节点的水龄都在 15 h 以内。

关 键 词: 矿井防尘; 矿井供水管网; 水力模拟; 水质模拟; EPANET

中图分类号: TD 218; TD 714

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)06-0888-08

Simulation Method on Hydraulics and Water Quality of Mine Water Supply Network for Dust Control and Its Application

PENG Ya, JIANG Zhong-an

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: JIANG Zhong-an, E-mail: jza1963@263.net)

Abstract: Hydraulic and water quality simulation is an important method to study the performance of water supply network. In order to call the EPANET calculation engine of hydraulics and water quality analysis in MATLAB environment, so as to study the characteristics of mine water supply network for dust control, two types of effective EPANET-MATLAB hybrid programming methods were realized and compared. Based on the one adopting the object-oriented data structure, EPANET was called to establish hydraulic and water quality models of mine water supply network for dust control. According to the daily water demand of the network, dynamic simulations of hydraulic operating condition and water age distribution were carried out for a duration of 24 h and 48 h respectively. Research results show that the hybrid programming using EPANET-MATLAB Toolkit is more flexible and efficient to simulate and analyze the hydraulic behaviors and water quality. Water consumption of the network shows a periodic feature with obvious peaks and troughs. The variation range of the water pressure at demand nodes is between 1.5 ~ 5.5 MPa, and the variation rule is negatively correlated to water consumption. The change of water age also shows a diurnal periodicity. Generally, the longer the distance between the demand node and the water source is, the bigger the water age is. The water age of all demand nodes is lower than 15 h.

Key words: mine dust control; mine water supply network; hydraulic simulation; water quality simulation; EPANET

矿井防尘供水管网是保障矿山安全生产的重要基础设施之一,其供水不仅用于满足井下消防除尘的需求,同时也用来提供矿井降温、液压支护、充填、设备冷却、巷道冲洗、混凝土施工等方面的用水,尤其是其中的防尘用水对矿井生产环境的改善和矿井工人健康安全的保障具有重要作用.因此,建立一个完善有效的矿井防尘供水管网,研究其连续运行过程中的水力水质变化规律,及时发现故障、维护并优化管网性能,具有十分重要的意义^[1-2].

供水管网的运行状态受供需关系以及管网机械性能的影响,一般具有时变性、随机性以及不确定性.通过构建供水管网水力水质模型,在采集管网数据基础上进行模拟仿真是研究供水管网性能的有效途径,能够帮助了解供水管网系统中水流流动及水中物质成分演变规律,并为管网的优化调度和科学管理提供决策支持.目前 EPANET、WaterGEMS、InfoWorks WS 等管网系统分析软件是进行供水管网模拟仿真的主要工具^[3].由美国环境保护署 1994 年使用 C 语言开发的 EPANET 作为经典的供水管网水力和水质动力学模拟的开源软件^[4],在工业界和学术界得到了广泛推广和应用,尤其是在供水管网设计及运行优化^[5]、水力水质模拟与校核^[6]、可靠性与风险分析^[7]、监测点布置^[8]、故障检测^[9]等方面;其核心的水力水质计算模块可以被多种语言调用,因而该软件多用来二次开发实现特定的功能和用途.比如 Ho 等^[10]开发了支持节点水质不完全混合的大对流模拟扩展程序 EPANET – BAM;Siew 等^[11]开发了基于压力驱动的水力模拟扩展程序 EPANET – PDX;Seyoum 等^[12]开发了基于压力驱动的水力模拟和多组分水质模拟扩展程序 EPANET – PMX 等,但这些扩展程序没有集成到 EPANET 图形用户界面或者其函数库中,且由于其版本、运行环境或者其具体功能的局限性,并没有得到普及.

目前,国内外研究人员常用的方式是在不同的编程平台上使用 MATLAB、Python^[13]或者 R 语言^[3]调用 EPANET,编写自定义融合计算及后处理程序,来实现水力水质的扩展研究.其中在 MATLAB 环境中调用 EPANET 计算引擎传统的方式是使用基于过程的程序设计的 EPANET Programmer’s Toolkit 函数库^[14].该方式需要用户熟知该函数库中各函数的调用格式及其包含的各参数,掌握各函数在模拟循环中的调用顺序;并且在不同的功能模块和应用程序之间共享数据时没

有一个通用的 EPANET 数据结构.因此,研究人员在初步接触使用时,难以快速掌握.塞浦路斯大学 KIOS 智能系统和网络研究中心于 2016 年推出的 EPANET – MATLAB Toolkit^[15]采用面向对象的数据结构设计,能克服上述困难,让研究人员更快速、方便地掌握函数调用方式,实现灵活地提取与修改供水管网基本参数与水力水质计算数据,但该开源工具箱在国内尚未推广使用.

综上所述,现有文献对 EPANET – MATLAB 混合编程的具体实现方法少有阐述,尤其对 EPANET – MATLAB Toolkit 了解不足,并且国内外对供水管网的研究主要是针对有压市政供水管网,而对重力输送为主的矿井供水管网的研究非常少^[16].本文首先对水力水质模型构建与求解进行了理论分析,然后对两种基于 EPANET – MATLAB 混合编程的水力水质模拟方法进行了编程实现及对比,并进一步应用于矿井防尘供水管网上,构建动态水力水质模型,借助 MATLAB 强大的数据分析与处理能力,融合 EPANET 计算引擎,研究分析防尘管网的水力工况和水龄的变化规律,以期对矿井防尘供水管网的科学管理以及防尘管网的深入研究提供参考.

1 水力水质模型构建与求解理论

1.1 水力模型构建与求解

矿井防尘供水管网水力模型的构建基于质量守恒定律和能量守恒定律,是从物理管网基本组成元件的水力行为出发,在已知的供水管网拓扑结构关系、管径、管长、管段水头损失系数、节点用水量及边界条件等参数下,通过式(1)节点质量连续性方程、式(2)管段压降方程、式(3)环能量方程构建线性与非线性混合方程组,求解方程得出节点压力、管道流量等管网状态量.管网水力模型可以分为稳态流模型、拟稳态流模型、非稳态不可压缩流模型和非稳定可压缩流模型,使用 EPANET 建立的一般是稳态流模型和拟稳态流模型.本文采用全局梯度法迭代求解水力模型.

$$\sum_{i \in I_j} (\pm q_i) + Q_j = 0, j = 1, 2, 3, \cdots, N; \quad (1)$$
$$H_{Fi} - H_{Ti} = h_i = S_i q_i^n, i = 1, 2, 3, \cdots, M; \quad (2)$$
$$\sum_{i \in k} h_i - \Delta H_k = \sum_{i \in k} h_i - \sum_{i \in k} (H_{Fi} - H_{Ti}) = 0. \quad (3)$$

式中: q_i 为管段的流量, m^3/s ,管段流量流出节点时为正,流入节点时为负; Q_j 为节点 j 的流量; I_j 为节点 j 的管段关联集; N 为管网中的节点总数; H_{Fi}, H_{Ti} 分别为管段 i 的终止和起始节点的水头,

$m; h_i$ 是管段的压降, m ; S_i 为管段阻力系数, 为管段上管道、管件、阀门、泵站所有设施阻力之和; n 是流量指数; M 为管网中的管段总数; k 为管网中环的编号; ΔH_k 为管网中环的闭合水头差, m .

1.2 水质模型构建与求解

水质模型是建立在水力模型的基础上, 模拟水质参数如水龄、微生物、消毒剂、消毒副产物等随时间在管网中的变化情况. 针对矿井防尘供水管网, 管网中物质的传输主要由 3 个基本过程组成: 管道内对流迁移过程、物质动态反应过程、物质浓度在节点的混合过程. 基于质量守恒原理和反应动力学理论, 可以建立各过程的控制方程如下:

1) 管道内对流迁移过程.

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + r[C_i(x,t)] \quad (4)$$

式中: $C_i(x,t)$ 是在 t 时刻管段 i 的纵向 x 处的反应物浓度; u_i 为管段 i 的平均流速, m/s ; $r[C_i(x,t)]$ 表示管段中反应物质的反应变化速率, 对于不同的反应物质可选用不同的反应模型.

2) 无容节点处的混合过程.

$$C_i(0,t) = \frac{\sum_{j \in J} Q_j C_j(x_j,t) + Q_{k_{in}} C_{k_{in}}}{\sum_{j \in J} Q_j + Q_{k_{in}}} \quad (5)$$

式中: i 表示流出节点的 k 管段; J 为流入节点 k 的管段的集合; $C_i(0,t)$ 为在 t 时刻节点 k 的下游管段 i 起点处的反应物浓度; Q_j 为管段 j 的流量, m^3/s ; $C_j(x_j,t)$ 为在 t 时刻, 管段 j 末端与节点 k 相连处的反应物浓度; $Q_{k_{in}}$ 为外部水源流入节点 k 的流量, m^3/s ; $C_{k_{in}}$ 为外部水源流入节点 k 的反应物浓度.

3) 有容节点如蓄水设施处的混合.

$$\frac{\partial [VC_R(t)]}{\partial t} = \sum_{i \in I_{in}} Q_i C_i(x,t) - \sum_{j \in J_{out}} Q_j C_R(t) + r[C_R(t)] \quad (6)$$

式中: V 为在 t 时刻储水构筑物的容积, m^3 ; $C_R(t)$ 是在 t 时刻储水构筑物中的反应物浓度; I_{in}, J_{out} 分别为流入和流出储水构筑物的管段的集合; Q_i, Q_j 分别为流入和流出对应管段中的流量, m^3/s ; $r[C(t)]$ 是在 t 时刻储水构筑物中的反应物质的反应变化速率.

由于各控制方程是一系列的偏微分方程, 其解析解难以求得, 本文使用拉格朗日时间驱动算法进行求解, 通过迭代计算跟踪离散水体在管道中移动和在节点处固定时间步长下的混合情况, 从而求解管道中溶解物质的瞬时浓度.

2 MATLAB – EPANET 对接实现方法

EPANET 可以实现对供水管网的水力和水质的有效模拟, 但其编辑能力、信息处理和后处理特性明显不足. 对于科研人员, 往往会在水力水质模拟的基础上进一步扩展特定的需求, 借助 MATLAB 数据处理与分析的高级编程环境, 可以实现与 EPANET 数据的对接, 开展供水管网更深入的研究.

2.1 基于 EPANET Programmer’s Toolkit 的混合编程

EPANET Programmer’s Toolkit 是美国环境保护署针对 EPANET 推出的动态链接库 (DLL) 文件, 库中共有 55 个函数和 104 个变量. 在 MATLAB 编程环境下可通过调用该 DLL 来启用水力水质模拟, 从而将计算过程中输入、输出的相关数据以及迭代约束条件, 同能够实现特定需求的扩展计算、分析程序进行对接, 其主要步骤及代码如图 1 所示.

由图 1 可知, 使用 EPANET Programmer’s Toolkit 加载和调用 EPANET 共享函数库, 需要用到 MATLAB 中的 loadlibrary 和 calllib 函数. 对水力水质计算过程中数据的提取或者修改, 需要使用 DLL 中内置的 EPANET 函数, 比如修改节点和管段信息时, 分别使用 ENsetnodevalue, ENsetlinkvalue 函数. 该方式中, 大多数 DLL 内置函数在使用时, 要定义参数对应的具体代码. 比如 ENsetnodevalue 函数的使用格式为 ENsetnodevalue (int index, int paramcode, float value), 需要在括号里输入节点索引、参数代码及参数值三类信息. 其可选的参数代码多达十几种, 难以直观辨别功能. 若进行复杂扩展运算与分析, MATLAB 自定义程序与 EPANET 之间要进行大量、反复的数据交换, 该方式下程序的编写和修改非常不便. 此外, 该工具箱由于运行环境的限制, 在 64 位系统上调用时, 会与 Microsoft Visual C++ 2010 以上的版本冲突, 导致调用失败.

2.2 基于 EPANET – MATLAB Toolkit 的混合编程

与面向过程的 EPANET Programmer’s Toolkit 相比, EPANET – MATLAB Toolkit 使用了基于面向对象的程序设计方法来编排 EPANET 的各函数及变量, 供 EPANET 与 MATLAB 进行对接, 支持用户直观提取、修改管网信息和执行运算, 并且支持绘制管网拓扑结构图.

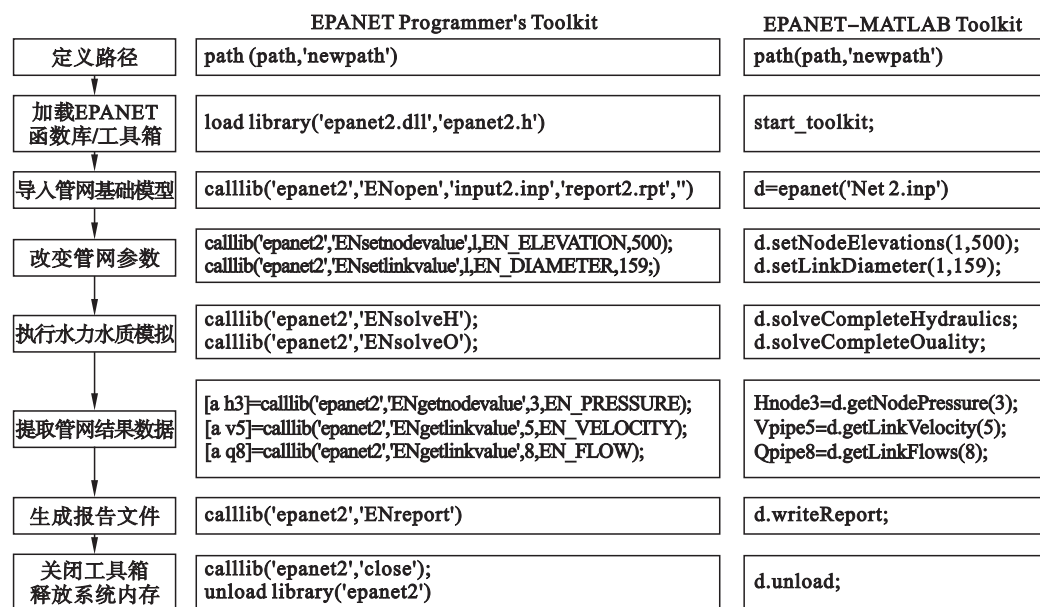


图 1 两种 EPANET – MATLAB 混合编程方法的水力水质模拟实现步骤及核心代码
Fig. 1 Procedure and key codes of implementing hydraulic and water quality simulation based on EPANET-MATLAB hybrid programming

使用 EPANET – MATLAB Toolkit 进行防尘供水管网的水力水质模拟步骤和代码如图 1 所示,可以看出基于 EPANET – MATLAB Toolkit 的混合编程,代码更为简洁、明了. 比如对管段信息的修改是使用 d. setLinkDiameter, d. setLinkLength, d. setLinkRoughnessCoeff 等基于“类名.方法名”结构来修改管段信息,方法名与所设置参数对应,数据的结构性非常直观. 此外,该工具箱在 32 位和 64 位系统上兼容性较好. 因此,基于 EPANET – MATLAB Toolkit 的混合编程比 EPANET Programmer’s Toolkit 更加灵活、便捷,有助于提高对供水管网水力水质扩展分析研究的混合编程效率.

3 工程实例应用

应用 EPANET – MATLAB Toolkit 在 MATLAB 环境下调用 EPANET 构建矿井防尘供水管网水力水质模型,结合防尘管网日用水量需求变化,分别进行了 24 h 动态水力模拟和 48 h 动态水质模拟,以考察该防尘管网的水力工况和水龄分布特征.

3.1 管网概况

图 2 所示为开滦集团某矿的井下防尘供水管网现场布置简化图. 该防尘管网为多水源重力输送供水管网,共有 3 个地面静压水池,水源主要来

自地下水 and 大气降水. 该矿总共有综采、炮采、综掘、炮掘及开拓共 17 个工作面用水点. 目前的开采深度在 - 700 ~ - 1 100 m 之间,今后还将进一步加大. 通过对主要采掘工作面防尘时用水量 and 矿井总防尘时用水量进行一周的连续观测,得到日防尘时用水量的平均变化趋势如图 3 所示. 平均每日最大防尘时用水量为 148. 87 m³/h,日总防尘用水量为 2 036. 45 m³.

3.2 模型参数设置

采用 EPANET 绘制管网水力模型及基本信息如图 4 所示. 该模型总共有 3 个水源节点,17 个无容节点,20 根管段. 水力模拟设置总历时 24 h,水力时间步长为 1 h,各工作面用水点根据日用水需求设置用水时间模式. 由于该矿井下大部分管道为钢管或者铸铁材质,且使用年限大于 10 年,管段内表面粗糙度变大,取管段海曾 – 威廉粗糙系数 100. 水质模拟总历时 48 h,水质时间步长为 0. 05 h,模式时间步长为 1 h,模式起始时间为 0. 在计算时水龄被处理为一种反应成分,初始水龄设为 0,其增长遵从具有速率常数为 1 的零级反应动力学,主流反应系数为 1,无管壁反应. 实现混合编程水力水质模拟使用的软件包括 EPANET(2. 0)和 MATLAB(R2018b). 通过迭代水力模拟并提取每个时间步下的水力数据,防尘供水管网的水龄分布特征在水力模拟的基础上进行时间步水质模拟来获得.

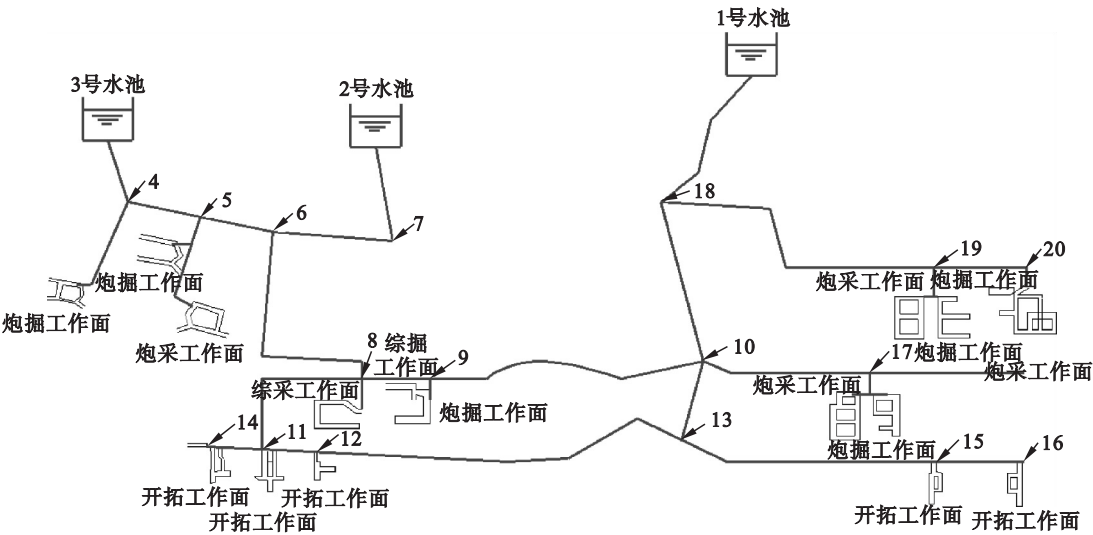


图 2 井下防尘供水管网的现场布置简化图
Fig. 2 Simplified layout of underground mine water supply network for dust control

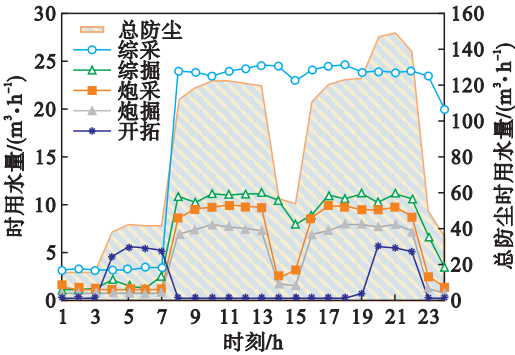


图 3 日防尘时用水量变化图
Fig. 3 Daily water consumption for dust control

3.3 水力模拟结果及分析

根据图 3 中该矿防尘供水管网日用水量需求变化,可知日时用水量呈现出一定的规律性,具有明显的用水高峰时段和低峰时段.将用水实况与作业安排进行比较发现,其用水量特征与作业排班制度间具有一定的相关性.该矿井每日采用三班制作业模式,井下作业分为早班(7:00~15:00)、中班(15:00~23:00)、夜班(23:00~7:00).夜间一般为检修班,井下工作面产尘量较小,因而防尘用水量也相对减少;早班和中班生产活动较为频繁,为用水高峰时段,在换班时间(如 14:00~15:00)用水量会存在短时段的下降.

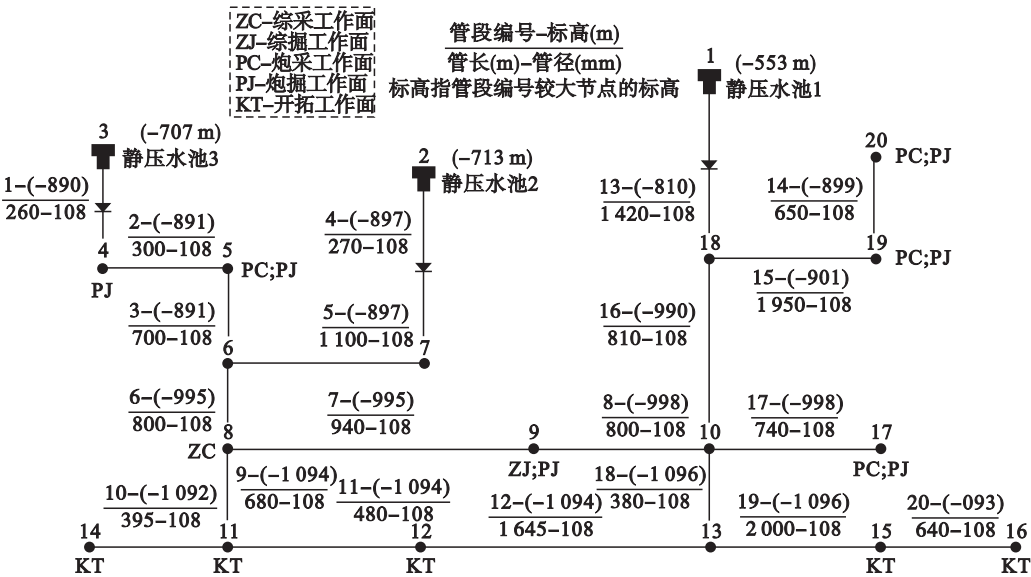


图 4 矿井防尘供水管网水力模型及基本信息
Fig. 4 Hydraulic model and basic information of mine water supply network for dust control

结合防尘管网基础数据和井下日用水量需求进行动态水质模拟,可以得到 24 h 内各管段流量和节点水压分布.图 5 为与水池相连管段的流量和供水系统总流量变化曲线,可知在水源水量充足

的前提下,各水池的供水量随着井下用水需求发生变化.与日时用水需求规律相对应,各个水池的日时供水量也都呈现明显的高峰和低谷时段,夜班和换班时间的供水量减少.此外,1号水池承担井下大部分用水需求,尤其是在用水低谷时段,防尘管网供水基本来自1号水池,而2号、3号水池作为补充水源.

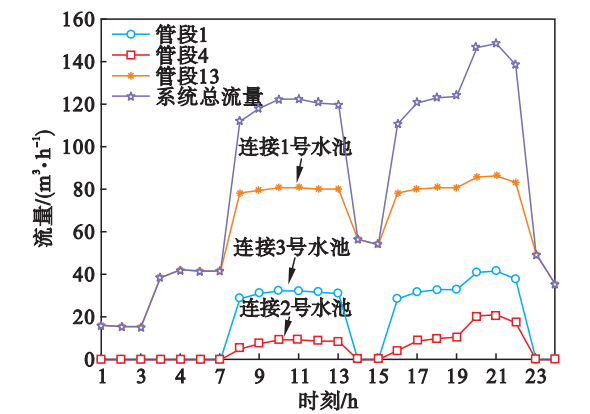


图5 水池相连管段流量和系统总流量随时间变化图
Fig. 5 Flow curves of pipes linked to tank and total system over time

图6为该矿防尘管网各用水节点水压24 h内变化趋势图,可知,各用水节点一天中的水压变

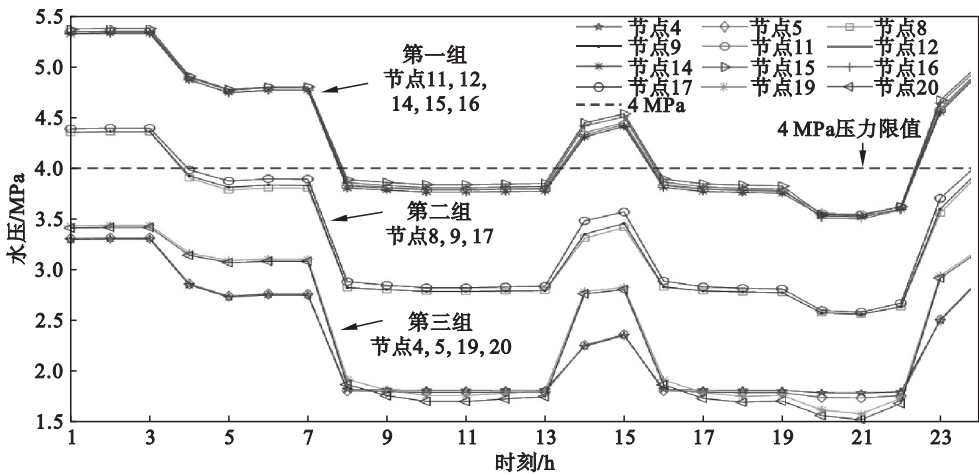


图6 用水节点水压随时间变化图
Fig. 6 Water pressure changes at demand nodes with time

| 表1 用水节点水压和水龄分组情况对比 Table 1 Classification of demand nodes according to water pressure head or water age | | | |
|--|--------------------|--------------|------------------|
| 参数 | 第一组 | 第二组 | 第三组 |
| 水压 | 节点 11,12, 14,15,16 | 节点 8,9,17 | 节点 4,5,19,20 |
| 水龄 | 节点 14,15,16 | 节点 8,9,11,12 | 节点 4,5,17, 19,20 |

化也呈现出明显的高峰时段和低谷时段,且变化趋势与日时用水需求的趋势相反.比如夜班1点~7点为用水低谷时段,防尘时用水量由低变高,但用水节点的水压处于高峰时段,且呈现由高变低的趋势,这说明用水量与节点水压之间负相关.在用水高峰时段,管网系统要输送更多的水量,产生的水力损失更大,因而剩余的动水压相对减小.

根据图6中各用水节点水压变化范围,可以将用水节点分为三组(见表1).第一组中用水节点的压力有一半的时段在4 MPa以上,尤其是在夜班用水低谷时段,最高水压将近5.5 MPa.根据《煤矿井下消防、洒水设计规范》(GB 50383—2016),井下静水压力不宜超过4.0 MPa,确实需要超过4.0 MPa时,应在管材、接头、配件和支护的强度,以及管理、检修的条件上采取与水压相适应的安全措施.因此,为了提高该防尘供水管网的可靠性,减少水力故障、延长管网部件寿命,有必要采取设置减压阀、建立井下减压池等相适应的安全措施来降低管网的压力.第二组和第三组的节点平均水压依次递减,且最低节点压力都在1.5 MPa以上,根据用水点实际压力需求,可以采用局部加压或减压装置来获得最终接入防尘设施的工作水压.

3.4 水质模拟结果及分析

由于防尘供水管网的水动力特性,输送水流中的少量有机物、无机物和病原微生物在管道内壁发生物理、化学、电化学和生物反应,使水质发生变化,也增加管网部件腐蚀、堵塞、破裂的风险,对井下供水系统安全造成很大影响.节点水龄作为防尘管网中水力停留时间的度量,可以反映水质随时间的变化规律,从而为防尘供水管网的水质研究提供依据.

图 7 为根据水质模拟结果得到的 48 h 内各用水节点水龄随时间分布曲线. 由图可知,所有节点的初始水龄为 0,模拟开始后,水流流经不同路径到达各节点,水龄曲线初期呈线性递增,直线段斜率为 1,说明在开始一定时段内节点水龄和模拟时间相等. 这是因为从水源节点计时开始的供水水流到各节点都需要一定的时间,而在这个时间点之前节点水龄会随着模拟时间同步增加. 在直线递增段之后,即所有连通该节点路径水流都到达了该节点,不同的节点水龄呈现不同的波动特征,这与管网中各节点不同用水模式有关. 整体上来说,由于井下各工作面每日用水量变化的规律性,整个供水管网水龄的变化也具有日周期性

特点.

根据各用水节点水龄变化范围,可以将用水节点分为三组(见表 1). 所有用水节点的最大水龄在 15 h 以内,说明该防尘管网的水龄条件良好,水质更新较快. 水龄模拟开始后,水流首先到达较近的用水节点如第三组节点 4,5,17,19,20,同时该部分节点各时段的平均水龄都较短. 第二组用水节点的水龄在 48 h 内相对其他组更平稳,没有较大的波动. 第一组用水节点的波动性很大,说明其受用水需求变化的影响相对更大;且该组节点位于更深水平采区,距离地面水源很远,且处于管网末端,因而其用水水龄也比较大.

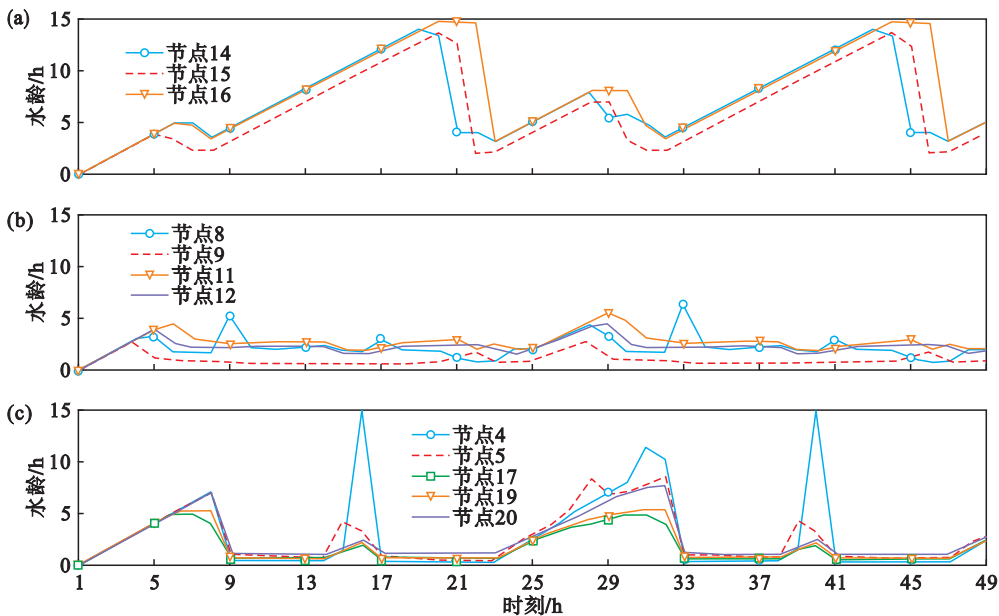


图 7 用水节点水龄随时间变化图
Fig. 7 Water age changes at demand nodes with time
(a)—第一组; (b)—第二组; (c)—第三组.

对比表 1 中分别根据水压和水龄对用水节点的分组情况可知,水压第一组中的节点 11,12 的水龄变化与该组其他节点有较大差异,但与第二组中节点 8,9 的变化趋势相似,都比较平稳,48 h 内没有剧烈的波动. 结合节点 8,9,11,12 处的用水需求以及其相连管段的流量变化发现:这 4 处用水节点与另外两处非用水节点 10,13 共同形成一个环状网络,且该环不处于管网末端位置,水流流经这些节点继续输送到下游其他用水点,流速较大,水在这些节点处的停留时间变短,因而水龄较小. 此外,用水节点 17 的水压变化虽然与用水节点 8 和 9 相似,但其水龄变化呈现差异,经分析发现,节点 17 的标高为 -998 m,节点 8 和节点 9 的标高分别为 -995 m 和 -998 m,可认为在同一

水平上,但节点 17 并不属于管网中封闭环的节点,因此其水龄变化并不如封闭环上的节点 8 和 9 平稳,说明环状供水网络能在一定程度上维持管段内水质的稳定性,减缓受到用水量影响产生的大幅波动.

4 结 论

- 1) 使用 EPANET - MATLAB Toolkit 调用 EPANET 有助于提高水力水质扩展分析编程效率.
- 2) 防尘供水管网用水量受井下生产活动循环安排的影响,呈现一定的周期性;各用水节点的水压与用水量分别随时间变化规律呈负相关;部

分用水节点水压超过 4 MPa,建议采取相应的减压措施,以延长管网部件寿命,提高管网可靠性.

3) 各用水节点水龄呈现不同的波动特征,整体上也呈日周期性;用水节点水龄都在 15 h 以内,说明该防尘管网水龄条件良好,水质更新较快;用水节点距离水源近的其水龄相对较小.

4) 在防尘供水管网的日常运行中,可根据各用水节点的水力水质特征进行分类管理与维护.此外,管网中的环状网络有利于提高环上管段和节点水质的稳定性,减缓因用水量不断变化而产生的波动性.

参考文献：

[1] 蒋仲安,王佩,施蕾蕾,等. 基于低偏差序列的矿井供水管网可靠性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(5): 1686 – 1691.
(Jiang Zhong-an, Wang Pei, Shi Lei-lei, et al. Mine water supply network reliability based on low deviation sequence [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(5): 1686 – 1691.)

[2] 邓权龙,蒋仲安,韩硕,等. 基于 Sobol 序列的防尘供水管网系统可靠性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(9):919 – 926.
(Deng Quan-long, Jiang Zhong-an, Han Shuo, et al. Reliability analysis of dust-proof water supply network system based on Sobol [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2018, 51(9): 919 – 926.)

[3] Arandia E, Eck B J. An R package for EPANET simulations [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 107: 59 – 63.

[4] Rossman L A. EPANET 2.0 users manual[M]. Cincinnati: Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, 2000.

[5] Caballero J A, Ravagnani M A S S. Water distribution networks optimization considering unknown flow directions and pipe diameters [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2019, 127: 41 – 48.

[6] Abokifa A A, Yang Y J, Lo C S, et al. Water quality

modeling in the dead end sections of drinking water distribution networks [J]. *Water Research*, 2016, 89: 107 – 117.

[7] Tanyimboh T T. Informational entropy: a failure tolerance and reliability surrogate for water distribution networks [J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(10): 3189 – 3204.

[8] Winter C D, Palleti V R, Worm D, et al. Optimal placement of imperfect water quality sensors in water distribution networks [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2019, 121: 200 – 211.

[9] Housh M, Ohar Z. Integrating physically based simulators with event detection systems: multi-site detection approach [J]. *Water Research*, 2017, 110: 180 – 191.

[10] Ho C K, Khalsa S S. EPANET-BAM: water quality modeling with incomplete mixing in pipe junctions [C]//Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference. Kruger National Park, South Africa, 2008: 981 – 991.

[11] Siew C, Tanyimboh T T. Pressure-dependent EPANET extension [J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(6): 1477 – 1498.

[12] Seyoum A G, Tanyimboh T T. Integration of hydraulic and water quality modelling in distribution networks: EPANET-PMX [J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(14): 4485 – 4503.

[13] Steffellbauer D, Fuchs-Hanusch D. OOPNET: An object-oriented EPANET in Python [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 119: 710 – 718.

[14] Sivakumar P, Prasad R K, Chandramouli S. Uncertainty analysis of looped water distribution networks using linked EPANET-GA method [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(1): 331 – 358.

[15] Eliades D G, Kyriakou M, Vrachimis S. EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB [C]//Proceedings of the 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI). Amsterdam, 2016: 1 – 8.

[16] 彭亚,蒋仲安. 矿井防尘供水管网相似试验模型构建与测点优化[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 182 – 188.
(Peng Ya, Jiang Zhong-an. Construction of similar test model for mine dust-proof water supply network and optimization of pressure monitoring layout [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 182 – 188.)