

某竖井施工涌水量预测分析

何智^{1*}, 万海缔¹, 胡凯光², 徐拓¹

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;
2. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 井筒涌水量具突发性和破坏性及突泥涌出等特点. 针对井筒涌水的特点, 以某矿山井筒施工为例, 根据地质钻孔资料, 分别采用 GMS 软件与“大井法”对井筒施工涌水进行预测计算. 首先, 对某竖井水文地质资料进行分析, 建立井筒涌水概念模型, 将竖井井筒概化为三层非均质各向同性的地下水流模型. 其次, 根据抽水实验确定井筒含水层参数, 其中, 第一层渗透性系数为 0.089 9 m/d, 第二层渗透性系数为 0.154 9 m/d, 第三层为隔水层. 在此基础上, 运用地下水数值模拟软件, 对竖井涌水量进行预测, 预测涌水量为 383 56 m³/d. 采用“大井法”对井筒涌水量进行预测, 其涌水量为 4 127.9 m³/d. 根据预测结果, 对井筒涌水量预测的影响因素进行分析, 提出软件对井筒涌水量进行预测精度的途径.

关键词: GMS; 数值模拟; 井筒涌水量预测

中图分类号: DT163

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2018)04-0031-05

Forecast and Analysis of Water Inflow in a Vertical Well

He Zhi¹, Wan Haidi¹, Hu Kaiguang², Xu Tuo¹

(1. The Eighth Sinohydro Bureau Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Wellbore gushing is characterized by suddenness, destructiveness and mud outburst. According to the characteristics of wellbore gushing, this paper, taking a mine wellbore as an example, uses the GMS software and “big well method” to predict and calculate wellbore construction gushing on the basis of the geological drilling data. Firstly, the hydrogeological data of a shaft are analyzed to establish a conceptual model of wellbore gushing, and the wellbore is generalized into a three-layered heterogeneous, isotropic groundwater flow model. Secondly, according to the pumping experiment to determine the wellbore aquifer parameters, the calculation value of the first layer permeability coefficient is 0.089 9 m/d, the calculation value of the second layer permeability coefficient is 0.154 9 m/d, and the third layer is aquifuge layer. On this basis, using the groundwater numerical simulation software, the vertical well water inflow is predicted and the inflow of water was predicted to be 38 356 m³/d. The “big well method” was used to predict wellbore water inflow, and the water inflow is 4 127.9 m³/d. According to the prediction results, the influencing factors of wellbore gushing prediction are analyzed, and the way to predict the precision of wellbore gushing by software is put forward.

Keywords: GMS; numerical simulation; prediction of well bore water inflow

竖井开拓是矿山开拓方式之一. 随着矿山向深部延伸, 竖井施工深度也向深度增加. 深部延伸井筒揭露的水文地质单元将变得极其复杂, 这将导致竖井施工涌水量预测及计算存在一定的不确定性. 如此将直接影响到整个井筒施工工艺、进度及质量. 同时, 也增加了井筒施工的风险. 因此, 通过有效手段对竖井施工涌水量进行预测是整个工程建设得到保障的必备措施之一.

针对竖井施工涌水预测问题,国内外学者进行大量实验与研究,形成了众多的预测方法,其中最主要的预测方法主要包括:水文地质类比法^[1]、水均衡法^[2]、解析法、数值法等^[3]。水均衡法是从含水层的补给量、排泄量与含水层储水量的转换等均衡关系,通过建立均衡方程来获取涌水量预测值,并未涉及其他影响涌水量因数之间的作用关系。因此,采用水均衡法只能对特定时间范围内的进入竖井区域的水量进行预测^[4]。解析法是通过地下水动力学原理和井流理论结合边界条件和初始条件下建立的定解方程^[5],通过对方程求解来预测矿井涌水量。随着计算机技术发展,通过建立地下水流动的数学模型,依赖计算机技术求解方程组,从而得到计算区域的地下水分布特征^[6]。根据矿山建设工程的发展趋势,目前已有大量学者对矿井涌水量进行了研究。其中,周如禄对矿井涌水量预测的理论和实践进行了研究^[7];李文平对综采导水断裂带多因素影响指标进行了研究计算^[8];刘树才对矿井涌水量预测方法的发展进行系统性的阐述^[9]。上述研究方法侧重于矿井建设后的涌水量研究,而针对实际建设过程中的涌水量尚未有明确研究方法。为了提高矿山竖井施工过程中的涌水量预测精度,本文采用GMS软件对竖井涌水量进行预测,结合地质钻孔的抽水试验对井筒施工涌水量预测结果进行对比分析,为下一步工作做出技术指导。

1 某矿井水文地质条件

1.1 矿区大地构造

某矿井在黔南北构造带上,东临新华夏构造体系,褶皱总体呈南北向展布,自东而西斜列的向斜、白岩-高坪背斜、平寨向斜构成区域构造骨架。白岩-高坪背斜是控制某矿井展布的主体褶皱,它由白岩背斜和高坪背斜2个次级褶皱构造组成。

1.2 地层

场地地层及岩性从新到老依次为:第四系残坡积粘土($Q^{el}+d^l$)、寒武系灯影组($Pt_3^{3b} \epsilon_1 dy$)、震旦系清水江组($Pt_3^{1d} q$)。

1.2.1 粘土层

粘土(Q^{el+el}):灰黄色粘土、亚粘土,呈硬塑状,上部见少量植物根系,岩芯松散湿润,含少量孔隙水,为弱透水层,局部残坡积物中等透水,崩积物强透水,均揭露该层土,层厚16.65 m。

1.2.2 基岩

寒武系灯影组($Pt_3^{3b} \epsilon_1 dy$)白云岩共分2个亚层:

a)-1 细晶白云岩:细晶结构,中厚层,节理裂隙发育,裂隙中见石英石细脉及黄色泥质,溶蚀小孔发育,通过地质勘探,取得岩芯完整性一般,呈中风化状态。主要岩芯位于16.65~23.92,58.76~94.41,101.90~171.57 m。

b)-2 泥晶白云岩:泥晶结构,中厚层,节理裂隙发育,溶孔发育,孔径1~5 mm,岩芯完整性差,呈强-中风化状态。主要岩芯位于23.92~58.76,94.41~101.90,249.37~266.06 m。

c) 震旦系陡山沱组($Pt_3^3 d$) 硅质岩:浅灰-灰黑色中厚层碎块、砾屑硅质岩,呈中风化状态,节理裂隙发育,裂隙面见黄色泥质水垢或黄褐色铁质侵染,岩芯易碎,局部见灰黑色磷质团块,为岩溶孔洞裂隙含水层。揭露于214.28~249.37 m。

d) 震旦系清水江组($Pt_3^{1d} q$) 板岩:灰绿色板岩,泥质结构,薄至中厚层,方解石细脉充填于网状细小裂隙中,岩芯主要呈长柱状、柱状,局部沿裂隙机械破碎成碎片状,节理顺层发育,含基岩裂隙水,为相对隔水层。揭露于266.06~381.89 m。

1.2.3 水文地质边界划分

某矿井所在水文地质单元以阻水断层及地下水分水岭共同圈定,根据井筒施工直径以及地勘数据,以井筒所在位置250 m为分水边界划分。地下水由井筒所在地的南东向北和向南方向径流。井筒所在区域为区域地下水的补给区,地表水对地下水存在补给作用,井筒地面有自然排水条件。

2 数值模拟竖井涌水量

2.1 水文地质概念模型

为了有效地预测井筒施工过程中的涌水量,根据某矿井所处的地质条件进行边界条件划分及模型建立.井筒位于背斜南段,总体岩性为单斜,井筒在施工过程中与地表之间存在水力联系,井筒穿越3层地质层4个组,其中地表为粘土层,基岩穿过3个地层,灯影组白云岩层裂隙发育,以细晶结构和泥晶结构为主;陡山沱组以硅质岩为主,硅质岩呈中风化状态,裂隙较发育;清水江组以板岩泥质结构,为相对隔水层.

根据某井筒所在地质条件,将井筒所在区域从上至下含水层概化为3层,表层为粘土层,中间为潜水含水层,第三层为隔水层.由于各含水层地质岩性之间的存在明显差异,因此将模型范围内的含水层概化为非均质各向同性的地下水流模型,并以此对井筒的涌水量进行预测.

在竖井施工模型建立过程中,以井筒涌水漏斗半径为边界建立模型.各含水层边界以计算井筒漏斗半径最大值为模拟边界.

井筒所在区域主要补给源为降雨量补给,补给量以降雨量与粘土的渗透性系数乘积取得.根据井筒所在区域,月平均降雨量为95.6 mm.在井筒施工涌水量预测过程中不考虑蒸发作用对源汇项的影响.

2.2 含水层参数的选取

为取得某井筒含水层参数,在井筒附近2个试段进行6个降程的抽水试验,第一试段在上覆灯影组($Pt_3^{3b} C_1 dy$)中进行,反映了灯影组($Pt_3^{3b} C_1 dy$)岩溶孔洞裂隙含水层的水文地质特性,第二试段在灯影组($Pt_3^{3b} C_1 dy$)+陡山沱组($Pt_3^3 d$)中进行,反映了含矿岩系及上覆含水层的水文地质特征,其具体试验如表1所示.

表1 钻孔抽水试验

工程编号	试段编号	降深值代号	降深值/m	涌水量/(L/s)	渗透系数/(m/d)	平均渗透系数/(m/d)
ZKCS1	I	S1	31.45	1.094	0.101 4	0.089 9
		S2	24.30	0.869	0.090 8	
		S3	12.27	0.483	0.077 5	
	II	S1	35.08	3.820	0.163 3	0.154 9
		S2	28.85	3.239	0.157 7	
		S3	18.83	2.172	0.143 7	

2.3 数学模型

根据渗流的连续性方程结合井筒施工过程的涌水原理及水文地质概念模型,建立与井筒涌水模型相对应的非稳定流三维数学模型.

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) + z_1 = S_s \frac{\partial H}{\partial t}; \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z); \\ H(x, y, z, t) |_{(x, y, z) \in B_2} = H_1(x, y, z, t); \\ k \frac{\partial H}{\partial t} |_{(x, y, z) \in B_2} = q(x, y, z, t). \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 分别为 x, y, z 方向的渗透系数; H 为含水层水头; z_1 为源汇项,1/d; t 为时间,d; S_s 为含水层储水率; H_0 为含水层初始水头; H_1 为井筒所在区域的地下水水头; B_2 为二类边界; k 为渗透性系数; q 为井筒模拟边界单位面积补给流量^[10].

运用GMS软件建立井筒三维模型,通过地下水水位识别校核模型,用有限差分法进行对井筒涌水量进行预测计算,并对误差进行分析.

2.4 数值模型

根据GMS特征,采用地质钻孔数据进行三维建模,采用等间距的有限差分法对模型进行网格划分,其

具体模型建立如图 1 所示.根据井筒所在区域的地质参数建立区域模型,对区域模型的边界进行处理,建立三维模型,其具体模型如图 2 所示.

根据竖井井筒施工过程,对模型进行分级计算,当井筒过穿第一含水层后,根据混凝土支护对井壁涌水量的影响,采取经验值,井壁支护后水头压力与支护深度呈线性相关^[11].将井筒支护段进行概化为定水头边界进行模拟,以此预测井筒施工用水量.

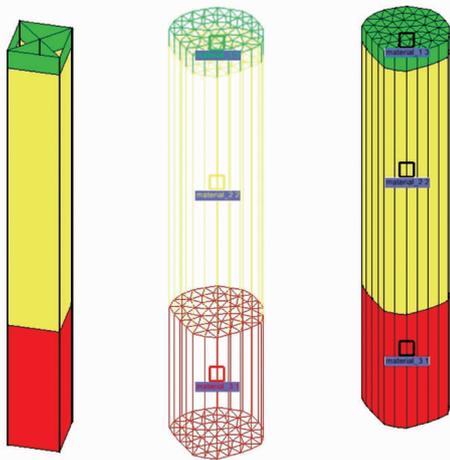


图 1 井筒地质三维模型

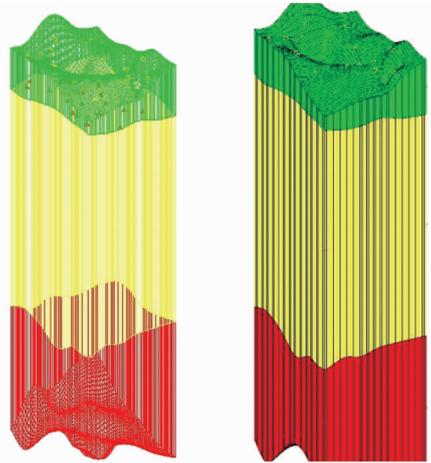


图 2 井筒所在区域三维模型

2.5 模型识别与校核

根据某井筒所在位置及地勘抽水试验,对井筒地下水模型进行识别与校核,通过调整地下水参数与模拟边界条件,对地下水水位进行拟合,确保模型的精确性.本次模拟只对井筒涌水量进行预测,因此采用地下水水位作为识别依据,通过运用 GMS 软件进行调参拟合,得出观测井水位与实测水位的拟合数据,其中抽水试验实测井筒静水位标高为 1 189.8 m,建立模型后导入参数,经过调参,得到井筒所在区域静水位标高为 1 191.5 m,具体情况如图 3 所示.

2.6 竖井涌水量预测

根据矿井井筒所在位置的地质钻孔所取得的围岩类型,将井筒施工抽水量概化为稳定流水井,把地面降雨对地下水的补给等影响因素以补给源输入模型中,以此对井筒施工的地下水水位进行预测,如此将得出井筒施工完成后的地下水水位图与地下水水流场.根据井筒施工进度,模拟 1 年后的地下水水位如图 4 所示.

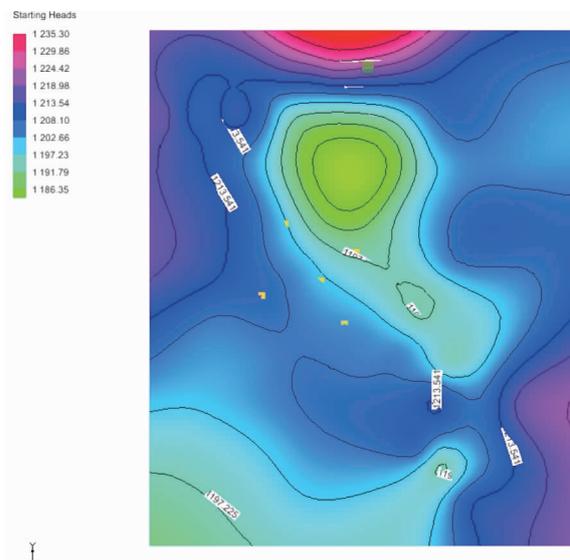


图 3 井筒区域初始水位

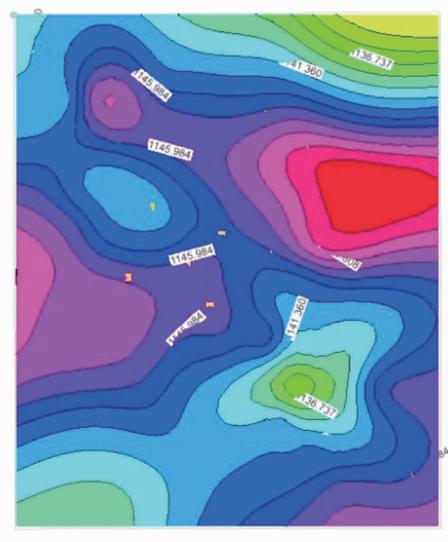


图 4 地下水水位

通过对比井筒施工前后的地下水水位变化,发现在井筒施工范围形成了降水漏斗,根据地下水等位线及GMS预测结果,在井筒施工过程中,总计抽排出水量为 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$.其影响面积已经超出了拟定250 m范围.

3 “大井法”预测涌水量

根据上述地质钻孔数据资料,某矿井地质钻孔揭露灯影组、陡山沱组为潜水含水层,地下水类型为潜水,根据抽水实验所取得的数据,采用选择裘布依公式法对某井筒涌水量进行预测,公式如下:

$$\begin{cases} Q = 1.366K_1 \frac{(2h - S_2)S_2}{\lg R - \lg r}; \\ S_2 = \sqrt{K_1 h}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q 为井筒涌水量, m^3/d ; K_1 为渗透系数, m/d ; h 为含水层厚度, m ; S_2 为疏干降深, m ; R 为影响半径, m ; r 为钻孔半径, m .根据钻孔资料及上述公式进行计算,某矿井井筒涌水量如表2所示.

表2 大井法预测结果

名称	含水层	含水层厚度/m	渗透性系数	影响半径	涌水量/ (m^3/d)
井筒	灯影组	249.1	0.089 9	104.911	4 127.9
	陡山沱组		0.154 9	222.874	

4 不同预测结果分析

通过采用GMS地下水软件,对某竖井井筒施工涌水量进行预测计算,在灯影组及陡山沱组的含水层条件下,井筒施工过程中的总涌水量其预测值为 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$,时间为365 d,故其涌水量为 $38\ 356 \text{ m}^3/\text{d}$,影响半径超出250 m.根据地质钻孔资料,以传统的大井法对井筒涌水量及影响半径进行计算,其涌水量为 $4\ 127.9 \text{ m}^3/\text{d}$,最大影响半径为222.874 m.

上述2种预测结果存在一定偏差的原因:(1)以GMS软件进行地下水预测,对源汇项进行定水流甚至定水头处理;(2)井筒施工后对地下水水位影响是一个动态过程,目前的方程在一定程度上无法满足计算要求;(3)井筒施工后对围岩进行了破坏,影响了渗透性系数.

5 结论

1)GMS软件和“大井法”得出的井筒施工涌水量存在偏差,GMS软件预测得出的涌水量为 $3\ 835.6 \text{ m}^3/\text{d}$,”大井法”得出的涌水量为 $4\ 127.9 \text{ m}^3/\text{d}$.

2)矿井地勘涌水预测计算过程中,采用数值模拟更能反映井筒涌水量.

参考文献:

- [1] 黄永刚,李龙.基于随机森林算法的矿井涌水量预测[J].煤炭技术,2017(1):220-221.
- [2] 丁凯,刘珺,冯莉,等.广西岩溶区某矿段矿坑涌水量预测[J].世界有色金属,2017(6):280-282.
- [3] Piechura J, Beszczynskamoller A. Inflow waters in the deep regions of the Southern Baltic Sea-transport and transformations [J]. Oceanologia,2003,45(4):655-677.
- [4] 吴振林,马永庆.矿山水害防治理论与方法[M].长春:吉林科学技术出版社,2010.
- [5] 尹吉亨,薛光强,易殿华.地下水动力学在矿井水防治中的应用[J].山东煤炭科技,2013(1):195-197.
- [6] Berkowitz B, Corapcioglu M Y. Modelling flow and contaminant transport in fractured media[C]// Advances in Porous Media, 1994:397-451.
- [7] 虎维岳,闫丽.对矿井涌水量预测问题的分析与思考[J].煤炭科学技术,2016,44(1):13-18.
- [8] 胡小娟,李文平,曹丁涛,等.综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J].煤炭学报,2012,37(4):613-620.
- [9] 陈韶知,刘树才,杨国勇.矿井涌水量预测方法的发展[J].工程地球物理学报,2009,6(1):68-72.
- [10] 连会青,张莹,王世东,等.开采过程中矿井涌水量动态预测研究[J].煤炭工程,2014,46(10):188-191.
- [11] 刘小满,赵万里,钱自卫.计算机模拟技术预测井筒涌水量的应用研究[J].计算机与数字工程,2016,44(6):997-1001.