

非完整大井法和水平廊道法计算矿坑涌水量

姜小妮¹, 张 未¹, 程东会^{1,3}, 杨银科^{1,3}, 刘 聪^{1,3}, 蔡伟胜², 乔晓英^{1,3}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国冶金地质总局西北局五队, 甘肃 酒泉 736301; 3. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 完整大井法和完整水平廊道法是目前矿坑涌水量预测中广泛使用的方法,但是受其概化条件限制,计算的涌水量往往偏大。通过某矿山实测矿坑涌水资料与不同方法计算结果的比较,系统论证了将非完整大井和非完整水平廊道分别概化为完整大井和完整水平廊道带来的矿坑涌水量预测误差,并研究了非完整方法中参数的敏感性。研究表明:非完整水平廊道法计算结果是实际排水的 105.24%,而非完整大井法计算结果则是实际排水量的 127.24%。采用完整水平廊道法计算的涌水量是实际排水量的 149.92%,而完整大井法则是实际排水量的 344.08%。因此非完整水平廊道法更适合本矿区及条件相似的其他矿山的矿坑涌水量的预算。另外非完整方法中参数的灵敏性分析表明,渗透系数对涌水量计算结果影响最大,是最为敏感的参数。

关键词: 矿坑涌水量; 完整大井法; 完整水平廊道法; 非完整大井法; 非完整水平廊道法

中图分类号:TD742

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0169-06

Estimation of mine water inflow using the partially penetrated virtual large-diameter well method and partially horizontal collector gallery method

JIANG Xiaoni¹, ZHANG Wei¹, CHENG Donghui^{1,3}, YANG Yinke^{1,3},
LIU Cong^{1,3}, CAI Weisheng², QIAO Xiaoying^{1,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Northwest Bureau NO. 5 of China Metallurgy Geological Bureau, Jiuquan 736301, China;

3. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid region,
Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The fully penetrating virtual large-diameter well method and the fully penetrating horizontal collector gallery method have been widely used to estimate the mine inflow. However, the water inflow was overestimated due to the limitation of application condition. The predicted errors of mine water inflow were systematically evaluated in the condition that the partially penetrated virtual large-diameter well and horizontal collector gallery were inappropriately generalized to the fully penetrating ones based on the measured mine water inflow in a mine. Furthermore, the sensitivity of the parameters in the partially penetrated models was analyzed. The results illustrated that the estimated mine water inflow using the partially penetrated horizontal collector gallery method accounts for 105.24% higher of the measured value, whereas that the partially penetrated virtual large-diameter well accounts for 127.24%. Moreover, the model based on the fully penetrating method, including the horizontal collector and the virtual large-diameter well, respectively account for 149.92% and 344.08%. It was concluded that the partially penetrated horizontal collector gallery method was more applicable to estimate the mine inflow in this mine or the mine with a similar geology condition. In addition, the sensitivity analysis for the parameters in the partially penetrated virtual large-diameter well method showed that the hydraulic conductivity had the greatest influence on the estimation of the water inflow.

收稿日期:2018-03-20; 修回日期:2018-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41472220);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102298203)

作者简介:姜小妮(1993-),女,陕西神木人,在读硕士研究生,主要从事地下水环境方面的研究。

通讯作者:程东会(1969-),男,陕西凤翔人,博士,教授,硕士生导师,主要从事地下水环境方面的教学和研究。

Key words: mine water inflow; fully penetrating virtual large-diameter well method; fully penetrating horizontal collector gallery method; partially penetrated virtual large-diameter well method; partially penetrated horizontal collector gallery method

1 研究背景

矿山涌水是矿山生产安全的重大隐患,可靠的涌水量预测是制定矿井安全防治措施的主要依据,因此,实用且准确的矿山涌水量预测方法一直是关注的热点^[1],形成了很多矿山涌水量预测的方法。数学模型法、水均衡法、水文地质比拟法和相关分析法是矿山涌水量预测的基本方法,其各有优缺点^[2]。水文地质比拟法使用的前提条件是预测区的水文地质条件与已知涌水量的矿山具有可比拟性,常应用于开采条件基本相同的开采区域或同一矿井^[3-4]。相关分析法需要用长时间序列观测数据建立矿井涌水量与其影响因素的回归方程^[5]。水均衡法适用于地下水运动为非渗流型且水均衡条件简单的充水矿床,且在确定均衡方程和均衡要素上存在明显的缺陷^[6]。

数学模型法是应用最多的一种传统方法。该方法通过构造适用于矿井的数学模型并求解来计算矿坑涌水量^[7]。其中的数值方法需要的数据较多,在实际实用中并不广泛,而解析法,如大井法^[8]和水平廊道法^[3],由于其简单、快速而得到广泛应用。

在实际应用中多采用完整大井法和完整水平廊道法,但经常出现涌水量的高估。矿坑非均质和各向异性是影响其不准确的因素^[9],另外由于矿山勘查程度较浅,含水层资料不充分,在预测时把非完整大井或非完整水平廊道简单概化成了完整大井或完整水平廊道^[10],这种简单概化也是导致预测结果不准确的原因之一,但是这种误差很少被系统地进行论证。

本文的研究目标是以甘肃省肃北县的某金矿为例,通过该矿实测矿坑涌水资料,系统论证了将非完整大井和非完整水平廊道分别概化为完整大井和完整水平廊道所引起的矿坑涌水量预测误差,并研究非完整方法中参数的敏感性。

2 研究矿区概况

研究区为甘肃省肃北县的某金矿,矿区位于甘肃省肃北蒙古族自治县马鬃山乡,南距玉门镇约 65 km。研究区为大陆干旱性戈壁荒漠气候,多年平均降水量为 60 ~ 80 mm,降水量主要集中在 6 ~ 8 月

份。矿区内无常年性地表径流。

2.1 矿区地质构造

矿坑位于阴山 - 天山纬向构造体系(北山部分)柳园 - 天仓褶皱带中段,杨家圈 - 西尖山 - 华窑山复向斜的南翼。沿北西西向压扭性断裂及断裂破碎带,形成金矿带。

金矿体的主要含矿围岩是前长城系西尖山群下亚群第四岩组($A_nChxja-4$),呈北西西向带状横贯区。地层倾向北东,倾角大于 70° 。岩性以二云片岩为主,局部地段为大理岩,其下部常被石英闪长岩和石英正长斑岩侵吞而出露不全。下部夹斜长角闪片岩、绢云石英片岩和大理岩,顶部断续出露钙质片岩。

研究区分布 F_2 、 F_3 和 F_{24} 3 条主要断层, F_3 断层贯穿于整个矿体,属于张扭性正断层,倾向为南西向,二盘岩性以二云片岩为主。石英细脉沿 F_3 断裂贯入碎裂蚀变岩,构成矿山的南矿带,形成区内主要的工业金矿带。 F_2 是和 F_3 大致平行的压性断裂。 F_{24} 断层位于矿区西北部,局部穿过矿区,属于扭性正断层,倾向为东,倾角 $65^\circ \sim 72^\circ$,断裂沿走向多呈弯曲延伸。

2.2 矿区水文地质条件

矿区地下水主要为基岩裂隙水,其中风化裂隙水含水层厚 30 ~ 80 m,地下水埋深 2.22 ~ 36.75 m,局部可达 100 m,单位涌水量 0.0015 ~ 1.645 L/(s · m)。构造裂隙水受近东西向的高倾角压性断裂破碎带控制,虽然构造岩结构紧密,但被近南北向及北东向的张扭性断裂多处错断,整个断裂破碎带实际上是透水的,同时也受北东向及近南北向的张扭性断裂破碎带控制。另外研究区地层有多层大理岩分布,大理岩中可见明显的沿节理的溶蚀现象,部分形成较小的溶蚀洞,因此区内局部岩溶发育。

矿区地下水总体流向与区域地下水流向一致,由北东流向南西。矿区无地下水天然露头,地下水以地下径流方式排出矿区。大气降水和地下水径流是矿坑充水的主要来源。在矿区的附近有一条季节性河流,流向与地层斜交,一般旱季干涸,雨季山洪暴发,可通过渗流来补给地下水。矿坑断裂带较多,裂隙和岩溶较发育。其中风化裂隙是降雨入渗的主要通道,溶洞和构造裂隙构成矿床充水的直接通道。矿区地质和水文地质条件如图 1。

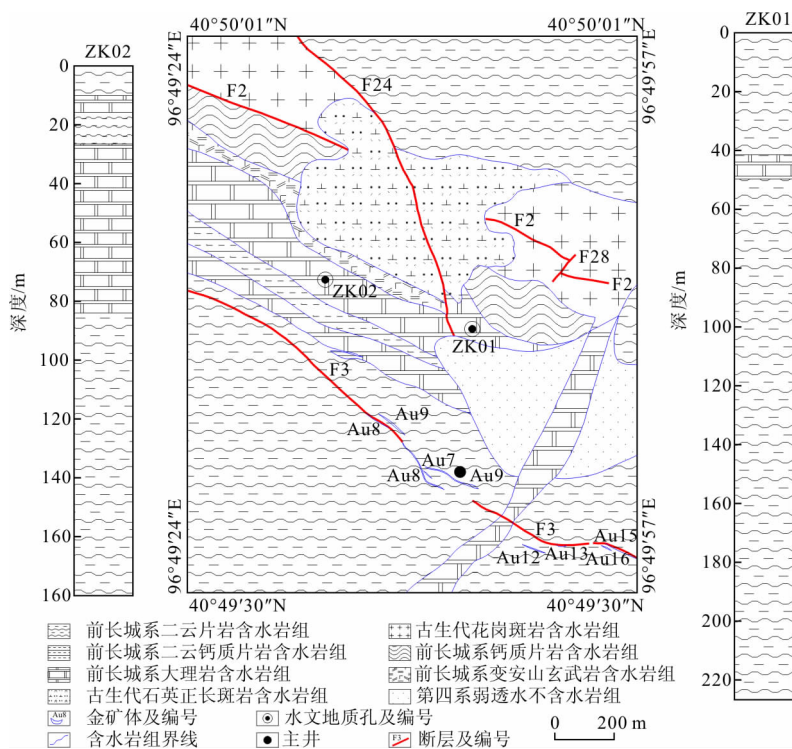


图1 研究矿区地质和水文地质综合图

3 矿坑涌水量预测方法

目前矿山采用地下开采、侧翼竖井开拓和浅孔溜矿法采矿。矿区6个中段是良好的导水通道(计划开采第7中段),各中段相距60 m左右,巷道断面 $2.0\text{ m} \times 2.3\text{ m}$ 。在沿脉中每隔25~50 m施工穿脉,控制矿体位移和厚度,穿脉巷道断面 $1.8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。其中第3、4和5中段分别向南穿脉30、40和50 m,第6中段向北穿脉20 m。各中段向西延伸约100~150 m,向东延伸20 m左右。另外,根据矿区地质勘查钻孔的资料,在深度小于550 m的地层中的裂隙较为发育,大于550 m后,岩芯完整。因此可以视为550 m左右为上部含水层的底板。

针对矿区水文地质条件、采矿方式和含水层特征,本文采用2种方法,即非完整大井法和非完整水平廊道法计算矿坑涌水量^[11]。

3.1 非完整大井法

(1)计算方法。非完整大井法的涌水量计算公式如式(1)。

$$Q = \frac{2\pi K(2H - S)S}{R_c} \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数, m/d ; Q 为钻孔涌水量, m^3/d ; H 为潜水含水层厚度, m ; S 为水位降深, m ; R_c 为水流的阻力,其表达式如式(2)。

$$R_c = 2 \ln \frac{R_0}{r_0} + \delta \quad (2)$$

式中: δ 为补充水流阻力; R_0 为井的引用影响半径, m , 用公式(3)计算; r_0 为井的引用半径, m , 用式(4)计算。

$$R_0 = R + r_0 \quad (3)$$

$$r_0 = \eta \frac{a + b}{4} \quad (4)$$

式中: R 为井的影响半径, m ; a 为矿坑等效长度, m ; b 为矿坑等效宽度, m ; η 值通过查《水文地质手册》获得; 当 $a/b \gg 10$ 时, $r_0 = 0.25a$ 。

(2)主要参数取值。计算方法中涉及的主要参数包括渗透系数、影响半径、引用半径、引用影响半径、降深和含水层厚度等。

渗透系数通过抽水试验获取。在本次计算中采用了水文孔 ZK01、ZK02 和废井抽水试验资料,3组抽水实验均为潜水非完整井稳定流抽水试验。ZK01和 ZK02 如图1。渗透系数 K 的计算如式(5)。

$$K = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{h_m - L}{L} \cdot \ln(1 + 0.2 \frac{h_m}{r}) \right] \quad (5)$$

式中: h 为含水层抽水时厚度, m ; r 为井的半径, m ; L 为滤水管有效长度, m ; $h_m = \frac{H + h}{2}$ (m)。

本研究区属潜水含水层,因此影响半径选用库

萨金(Кусакин)经验公式^[12]:

$$R = 2S \sqrt{HK} \quad (6)$$

引用影响半径(R_0)和引用半径(r_0)采用公式(3)和公式(4)。另外,选取5中段矿坑长度和宽度作为矿坑等效长度与宽度。5中段矿坑等效长度为166.50 m,宽度为5 m。根据《水文地质手册》确定求得 η 值为1.02。公式(2)中的补充水流阻力 δ 的值根据《水文地质手册》得到。

含水层厚度是本次研究的重点参数。研究区位于断层破裂带,孔隙裂隙发育,裂隙在研究区贯通,存在大量裂隙水,根据最深的地质勘查孔ZK1487(孔深600 m)资料,深度大于552.65 m后岩芯完整。因此将深度552.65 m作为含水层底板。

3.2 非完整水平廊道法

非完整廊道法涌水量的计算公式如式(7)。

$$Q = \frac{BK}{2} \left(\frac{h_1^2}{R_1} + \frac{h_2^2}{R_2} + \frac{2\pi S}{\ln \frac{2T}{\pi b} + \frac{\pi R_1 R_2}{T(R_1 + R_2)}} \right) \quad (7)$$

式中: B 为巷道长度,m; K 为渗透系数; T 为坑底至隔水底板距离,m; R_1 和 R_2 分别为坑道在补给方向上和排泄方向上的影响宽度,m; $h_1 = H_1 - T$, $h_2 = H_2 - T$,其中 H_1 和 H_2 为在 R_1 和 R_2 处的潜水位,m。

该计算方法中涉及的主要参数包括渗透系数、坑道在补给方向上和排泄方向上的影响宽度和坑底至隔水底板的距离。

渗透系数 K 与非完整大井法中的渗透系数相同。坑道在补给方向上和排泄方向上的影响宽度取值和井的影响半径相同,即 $R_1 = R_2 = R_0$ 。由于 $R_1 = R_2 = R$,因此取 $H_1 = H_2$ 。坑底至隔水底板的距离取第7中段的底部到隔水底板的距离。

3.3 模型验证

用主井的抽水过程验证模型的准确性。该矿井从2014年开始停产,之后主井中水位逐渐恢复。从2016年3月底开始以平均为301.7 m³/d对主井进行抽水排水,准备恢复生产,2016年7月份,之后抽水量增大到601.25 m³/d,之后抽水持续至2016年12月中旬,水位降至5中段,总降深达到118.3 m。该排水过程可视为一个抽水试验,可以利用该过程的数据进行模型的验证。

4 结果与讨论

4.1 预测结果

非完整大井法和非完整水平廊道法的计算的涌水量结果如表1。

表1 非完整方法计算结果与实际抽水结果对比

方法	m ³ /d	
	计算涌水量	实际排水量
非完整大井法	765.03	601.25
非完整水平廊道法	632.75	

预测结果表明,两种方法中,非完整水平廊道法是实际排水量的105.24%,而非完整大井法则是实际排水量的127.24%。因此非完整水平廊道法预测结果更准确。这显然与矿山开采方法有关,水平廊道法更符合矿山采矿条件,因此用水平廊道概化更准确。

4.2 与完整大井法和完整水平廊道法的比较

本文对完整方法(大井法和水平廊道法)和非完整方法(大井法和水平廊道法)进行了比较,以论证二者之间的误差。非完整大井法的计算如式(1),完整大井法的水流阻力值计算如式(8)。完整水平廊道法如式(9)。

$$R_c = 2\ln \frac{R_0}{r_0} \quad (8)$$

$$Q = BK \frac{(2H - S)S}{R} \quad (9)$$

两种方法计算结果如表2。结果表明,两种方法中,完整水平廊道法是实际排水量的149.92%,而完整大井法则是实际排水量的344.08%。

表2 完整法计算结果

方法	m ³ /d	
	计算涌水量	
完整大井法	2068.80	
完整水平廊道法	910.44	

另外,与非完整法的两种计算结果比较,无论是完整大井法或者是完整水平廊道法,对涌水量的高估要远大于非完整方法。这显然与含水层厚度参数的不准确有直接关系。在完整大井法中,含水层厚度的低估使计算的水流阻力值偏小,从而导致计算的涌水量偏大,而完整水平廊道法中,含水层厚度的低估则间接简化了在补给和排泄方向上的影响宽度,从而导致完整水平廊道法计算的涌水量偏大。

4.3 非完整方法中参数的灵敏度分析

受成矿条件等因素的影响,大多数矿区水文地质条件较为复杂,含水层空间变异性强,此外还受到勘察程度、认知水平等条件的限制,矿坑涌水量计算模型中的相关参数往往存在很大的不确定性,给参数的取值

造成了一定的困难,也严重影响了计算结果的可靠性^[13]。灵敏度是度量一种因子的变化对另一种因子的影响程度,某一模型因变量对模型参数的灵敏度可用因变量对该输入参数的偏导数来表示^[14]。

由于非完整水平廊道法中参数较多,参数非线性程度高,不易进行灵敏度的分析。本文仅以非完整大井法为例,进行参数的灵敏度分析。灵敏度的计算采用公式(10)^[15]:

$$S_{x_i}^f = \frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{y_i(a_k + \Delta a_k) - y_i(a_k)}{\Delta a_k} \quad (10)$$

式中: $S_{x_i}^f$ 为输入量 x_i 的灵敏度^[14]; f 为相应的模型; x_i 为相应模型的输入参数。

在灵敏度分析法中,只改变特定参数 k 的值,使其由 a_k 变化为 $a_k + \Delta a_k$,相应模型结果由 $y_i(a_k)$ 变化为 $y_i(a_k + \Delta a_k)$,便可获得参数 k 的灵敏系数 $S_{x_i}^f$ 的近似值,如公式(10)。

灵敏度分析法能够在线性模型中获得准确结果,而对于非线性模型,参数在基准值处变动过大时就不能提供有效分析结果。

在非完整大井法中,影响涌水量大小的有3个变量,分别为渗透系数、含水层厚度和降深(见公式(1))。其中渗透系数与含水层厚度都与涌水量呈线性关系,而降深与涌水量呈抛物线关系。分别对3个变量求灵敏系数,含水层厚度的灵敏系数计算如公式(11),渗透系数的灵敏系数的计算如公式(12),降深的灵敏系数的计算如公式(13)。由于降深的灵敏系数里还含有降深变量,所以在分析灵敏性的时候要固定两个变量,即降深和渗透系数或降深和含水层厚度。含水层厚度、渗透系数和降深的灵敏度计算结果分别如图2(a)、2(b)和2(c)。

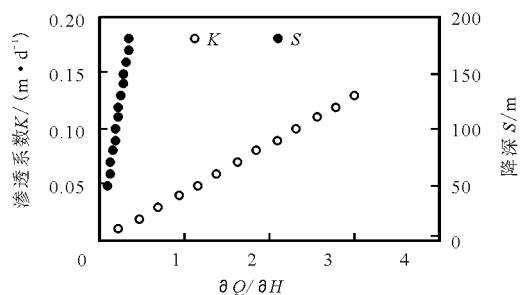
$$\frac{\partial Q}{\partial H} = \frac{4\pi KS}{R_c} \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial K} = \frac{2\pi(2H - S)S}{R_c} \quad (12)$$

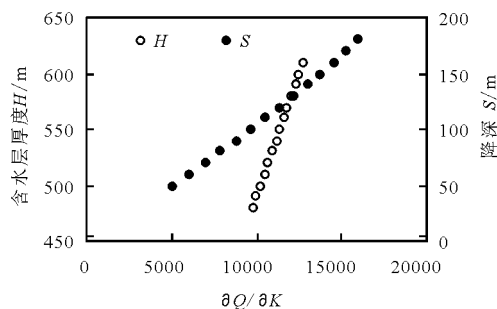
$$\frac{\partial Q}{\partial S} = \frac{4\pi K(H \cdot S)}{R_c} \quad (13)$$

图2(a)表明,当降深为固定值时,渗透系数变化会快速地引起含水层厚度灵敏系数的变化。当渗透系数为固定值时,随着降深的增加,含水层厚度的灵敏度在缓慢增加,增加幅度较前者小。所以渗透系数对计算结果更加灵敏;图2(b)表明,当含水层厚度为固定值时,降深变化会快速地引起渗透系数的灵敏度的变化。当降深为固定值时,随着含水层厚度的增加,渗透系数的灵敏度在缓慢增加,增加幅

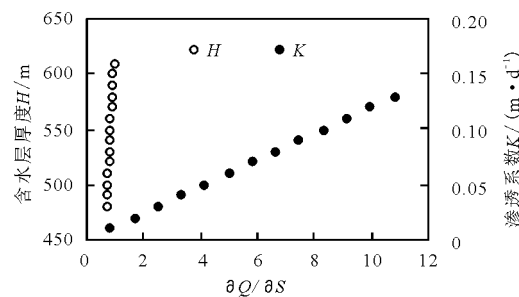
度较前者小。所以降深对计算结果更加灵敏;图2(c)表明,当固定两个变量时,其中一个变量的变化将会引起降深的灵敏系数的变化。显然,当降深和含水层厚度固定时,渗透系数的变化快速地引起降深的灵敏度的变化,而当渗透系数和降深为固定值时,含水层厚度的变化缓慢地引起降深的灵敏度的变化。进一步说明了渗透系数比含水层厚度灵敏。



(a) 含水层厚度的灵敏度



(b) 渗透系数的灵敏度



(c) 降深的灵敏度

图2 3个参数的灵敏度

综上所述,渗透系数对计算结果的灵敏性最高,含水层厚度的灵敏性最低。

5 结论

本文根据研究区的水文地质条件,建立非完整大井和非完整水平廊道模型,进行矿坑涌水量的计算,得出以下结论:

(1) 非完整水平廊道法计算结果是实际排水量的105.24%,而非完整大井法计算结果则是实际排水量的127.24%,因此非完整水平廊道方法更适用

于与此矿山条件相似的矿山。

(2) 采用完整水平廊道法计算的涌水量是实际排水量的 149.92%, 而如果采用完整大井法则是实际排水量的 344.08%。

(3) 由于完整大井法计算的水流阻力值偏小, 导致计算的涌水量结果偏大。非完整大井法受影响半径的影响更大, 所以计算结果误差大于非完整水平廊道法。

显然非完整水平廊道法更适合本矿区及条件相似的其他矿山的矿坑涌水量的预算。另外通过非完整方法中参数灵敏度的两两比较表明, 渗透系数对涌水量计算结果影响最大, 即渗透系数对涌水量的响应最为敏感。

参考文献:

- [1] 陈酩知, 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.
- [2] 戴岩柯, 崔世新, 张坤. 水均衡法和数值模拟法在矿坑深部涌水量预测中的比较——以西石门铁矿为例[J]. 地下水, 2010, 32(1): 24-26+48.
- [3] 傅大庆. 大井法及水文地质比拟法在某矿山矿坑涌水量预测中的应用对比[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(1): 139-141.
- [4] 李石桥, 孙彬, 朱斌, 等. 甘肃阳山金矿坑道涌水分析[J]. 矿产勘查, 2012, 3(1): 117-122.
- [5] 段俭君, 徐会军, 王子河. 相关分析法在矿井涌水量预测中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 114-116+76.
- [6] 张帅, 黄勇, 刘雪莹. 某抽水蓄能电站施工期地下洞室涌水量预测分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 142-146.
- [7] SINGH R N, ATKINS A S. Application of idealised analytical techniques for prediction of mine water inflow[J]. Mining Science & Technology, 1985, 2(2): 131-138.
- [8] 华解明. “大井法”预测矿井涌水量问题探讨[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(6): 45-47.
- [9] MARINELLI F, NICCOLI W L. Simple analytical equations for estimating ground water inflow to a Mine Pit[J]. Ground Water, 2010, 38(2): 311-314.
- [10] SINGH R N, ATKINS A S. Analytical techniques for the estimation of mine water inflow[J]. International Journal of Mining Engineering, 1985, 3(1): 65-77.
- [11] 河北省地质局水文地质四大队. 水文地质手册[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [12] 张子祥. 甘肃核桃峪煤矿矿井涌水量的计算与分析[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(2): 32-36+56.
- [13] SINGH R N, ATKINS A S. Application of analytical solutions to simulate some mine inflow problems in underground coal mining[J]. International Journal of Mine Water, 1984, 3(4): 1-27.
- [14] 李森, 陈家军, 叶慧海, 等. 地下水流数值模拟中随机因素的灵敏度分析[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 977-984.
- [15] 郝静, 张永祥, 薛潇, 等. 地下水流数值模型内部参数灵敏度分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(6): 83-86.