

# 采动条件下井壁变形对井筒涌水量的影响

连会青<sup>1,2</sup>, 夏向学<sup>1</sup>, 王世东<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 华北科技学院安全工程学院, 河北 三河 065201;  
3. 中国煤炭科工集团西安研究院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**大口径深立井开挖过程中,较准确预测井筒涌水量一直是工程实践中需要解决的难题.以山东龙固矿主井为例,采用理论分析、实验测试和数学计算探讨井筒开挖阶段涌水量的合理预测方法.首先,开展了实验测试分析应力应变-渗透性的关系,提出了覆岩的渗透性与岩石性能有关,且渗透性在岩石破坏前后其值达到最大.其次,采用岩石力学理论和Flac<sup>3D</sup>数值模拟对井筒破坏带范围进行计算,得出风化基岩段产生2.5 m左右的破坏带,二叠系砂岩中产生5 m左右破坏带,在石炭系岩层中产生3 m左右的破坏带.最后,分别对是否考虑岩层破坏带影响的2种情况,使用解析法、数值模拟法、达西渗流断面法计算了井筒涌水量.得出结论:忽视井筒破坏带对涌水量的影响导致预测值偏小;达西渗流理论公式应用在上覆第四系松散层中应用效果较好,在深部基岩裂隙岩体中数值法效果更好.

**关键词:**采动条件;井壁变形;井筒涌水量;破坏带;数值模拟

**中图分类号:**TD741;P641.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-9102(2015)01-0047-10

## Impact of wellbore deformation on inflow under boring conditions

Lian Huiqing<sup>1,2</sup>, Xia Xiangxue<sup>1</sup>, Wang Shidong<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;  
2. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Sanhe 065201, China;  
3. Xi'an Research Institute of China Coal Technology&Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To accurately forecast the inflow of water from shaft is always a problem needed to be solved in engineering practice, in the excavation process of deep and large diameter shaft. The reasonable prediction method was explored which of water inflow during the shaft excavation by theoretical analysis, experimental test and mathematical calculation, Longgu Coal Mine in Shandong was taken as an example. Firstly, the experimental test was carried out to analyze the relationship between stress - strain and permeability. The rock permeability was related to rock properties and it reached to the maximum before and after the rock damage by analyzing the result of experimental test. Secondly, the range of shaft damage zone was calculated by using the theory of rock mechanics and numerical simulation with Flac<sup>3D</sup>. The conclusions could be got from the calculation: the damage zone of weathered bedrock section was about 2.5 m, it was about 5 m in Permian sandstone and about 3 m in the Carboniferous strata. Finally, the analytical method, numerical simulation method and the Darcy seepage section method were used to calculate the water inflows from shaft, considering whether there was the influence of rock damage zone, respectively. So, the final conclusions were gotten, ignoring the shaft damage zone's influence on water inflow will lead to the prediction value to become smaller. Applying the formula of Darcy percolation theory in the Quaternary overlying loose layer has better application effect, and the numerical method has much better effects in the deep bedrocks.

**Keywords:** mining conditions; borehole deformation; wellbore inflow; deformation belt; numerical simulation

收稿日期:2013-11-11

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2013508123);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0838);“十二五”国家科技支撑计划实施方案(2012BAK04B04);国家自然科学基金资助项目(41072188);

通信作者:连会青(1976-),女,山西忻州人,中国矿业大学(北京)在站博士后,副教授,主要从事矿井水文地质研究. E-mail: lhuiq345@163.com

随着现有大型煤田浅部资源开采殆尽,煤层由浅部向深部开采已是必然趋势.随着井深加大,地层构造变得更加复杂,含水层水量增大、水压增高,井筒涌水成了制约深井施工安全的重要因素.目前,井筒涌水量预测的理论基础仍是地下水动力学原理,预测井筒掘进至含水层时涌水量的方法主要有3类,即井流公式法<sup>[1-2]</sup>、数值解法<sup>[3]</sup>和经验比拟法<sup>[4]</sup>.在井流公式法中,多采用地下水动力学中的“大井法”或“井组干扰法”预算井筒的涌水量<sup>[5]</sup>.目前,有学者对预测计算方法提出了各种有益的改进尝试<sup>[6-7]</sup>,如地下水加坡理论计算公式<sup>[8]</sup>、分段涌水量预计方法等<sup>[9]</sup>.现有研究主要特点:1)研究时段主要在矿井采掘系统已完成.2)研究角度多集中在松散层的固结变形和井筒的变形破坏,并没有说明在深立井开挖对渗流场的扰动机理;3)涌水量预测的理论基础仍然基于传统地下水动力学原理,忽视了具体动态条件的复杂性.所以,有必要探讨适应于深立井开挖过程中涌水量预测的理论和方法.

为此,本文将结合山东龙固矿井主井井筒开挖过程中渗流场扰动机理为切入点,以井筒围岩破坏带对井筒涌水量的影响为重点,探讨井筒变形破坏条件下涌水量预测方法,也为复杂动态条件下井筒涌水量预测提供新的研究思路和方法体系.

## 1 龙固矿基本概况

龙固矿井位于山东省菏泽地区巨野县城西约13~28 km,其范围:东起田桥断层,西至煤系地层底界露头,南起邢庄断层及刘庄断层,北至陈庙断层及第一勘探线,南北长约12 km,东西宽约15 km,面积约180 km<sup>2</sup>.地理坐标:东经115°50'00"~115°59'00",北纬35°13'30"~35°23'00".区内主采煤层3煤层厚度大、煤质好、储量丰富;构造复杂程度中等.

龙固矿井筒涌水量已大大超过勘探报告提供的涌水量,是原勘探报告提供水量的5.3倍,严重影响了新井建设.生产实践急需从理论上探讨,如何能够更好地预测井筒涌水量.

## 2 采动过程井筒渗流场破坏演化机理

一般情况下,含水岩层和煤系地层之间存在隔水层,两者之间不会发生水力联系.但是,当井筒开挖至含水层时,井壁围岩岩层发生破坏会使隔水层隔水性能大大减弱,这些断裂裂隙成为含水层地下水快速渗漏的有效通道,也使地下储水空间失去储水作用而转变为以井筒为中心的地下水降落漏斗,大量地下水涌入井筒,从而破坏了地下水天然渗流场.

### 2.1 围岩破坏诱发渗透性演化

近20年来,随着先进的试验设备和方法的不断研制开发,能够测定出特定条件下岩石变形、渐进破裂过程中孔隙结构变化引起渗透性演化规律及其对宏观力学行为的响应.

许多学者进行了大量关于岩石应力应变渗透率方面的试验研究工作<sup>[10-11]</sup>,最初的研究是通过三轴压缩试验研究岩石峰值前后的渗透率变化规律,正如 Paterson 代表性的总结.

目前的室内实验研究比较系统,初步建立了损伤、体积膨胀、孔隙率等参数和渗透性的关系<sup>[12-13]</sup>,Brace 在一次回顾中也着重强调,随着变形的增加,岩性和孔隙、微裂隙结构等因素对应力—渗透性关系影响的比较复杂.Ott schulze 基于盐岩,Oda 基于花岗岩,韩宝平基于碳酸岩,Wang 基于沉积岩,zhu 和 wong 基于不同孔隙度砂岩的研究结论,应该说比较全面地揭示了不同岩性应力、损伤和渗透率的关系.

关于沉积岩中损伤产生发展,最重要的争论是体应变对孔隙度和渗透率的决定性影响.对沉积岩这种多孔岩石损伤中应变局部化、压实带、体应变、脆—延破坏过渡等应变局部化都是矿井突水的关键问题.

煤矿突水也是在峰后或破碎的采动围岩中才会发生.试验和现场实测表明,峰后或破碎岩体的渗透特性与原始的完整岩体(峰前岩体)相比发生了质的变化,峰后岩体的渗透率与峰前相比增加数个量级,最大可差5~6个量级,不能再用线性 Darcy 方程进行简单的描述.因此,峰后或破碎岩体非 Darcy 渗流系统的渗流运动失稳即为突水灾害发生的机理.

### 2.2 岩石变形与渗透性变化相关性

基于以上理论,对现场2类主要岩样的力学参数和渗透性参数进行统计分析,结果见下表1,其中y-1和y-2为砂岩岩样,w-1和w-2为砂质泥岩。

表1 不同岩性不同试验点力学参数和渗透性参数统计表

编号试验点	w-1				w-2				y-1				y-2			
	应力值	应变值	渗透率	渗透系数	应力值	应变值	渗透率	渗透系数	应力值	应变值	渗透率	渗透系数	应力值	应变值	渗透率	渗透系数
1	20.00	0.87	0.89	8.57	15.00	1.04	0.85	8.18	20.00	0.44	0.35	3.38	20.00	0.53	1.58	15.14
2	31.49	0.99	0.66	6.33	21.30	1.23	0.91	8.72	33.95	0.55	0.30	2.89	40.00	0.69	1.68	16.16
3	38.85	1.11	0.61	5.82	28.84	1.35	0.71	6.82	47.27	0.67	0.35	3.36	62.78	0.86	1.76	16.91
4	43.93	1.24	0.64	6.15	34.97	1.60	0.65	6.23	62.00	0.79	0.56	5.38	65.69	0.95	2.36	22.73
5	53.89	1.49	0.95	9.16	41.24	1.97	1.05	10.05	76.33	0.91	4.15	39.89	68.04	1.06	3.13	30.04
6	56.52	1.73	1.21	11.6	41.08	2.21	1.17	11.29	80.11	1.03	3.55	34.13	72.20	1.25	4.23	40.69
7	58.91	2.23	0.94	9.02	38.65	2.58	1.34	12.87	89.24	1.15	5.16	49.60	58.16	1.58	3.11	29.91
8	43.77	2.72	0.7	6.73	36.26	3.01	1.17	11.29	98.58	1.46	13.56	130.35	41.96	1.85	2.91	27.99
9	38.44	3.22	0.63	6.04	29.35	3.32	0.37	3.56	38.19	1.70	14.78	142.08	40.45	2.24	2.00	19.22
10	37.23	3.71	0.6	5.76	29.17	3.39	0.71	6.85	38.00	2.06	16.33	156.98	38.97	2.64	1.67	16.08

针对表1的数据,分析了大变形或岩石破坏情况下应力应变-渗透性能的关系(见图1)。

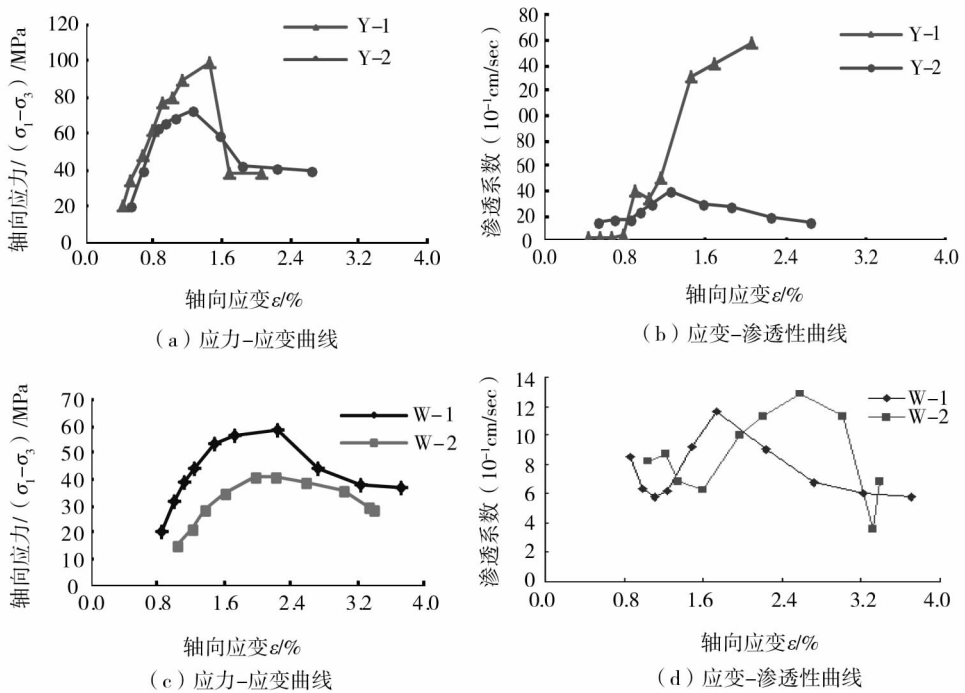


图1 砂岩(砂质泥岩)岩样全应力-应变及渗透性曲线

由图示,在未达到破坏强度前,随着轴向应力的增加,轴向应变也相应的增加.岩石破坏前后其渗透性达到最大,如y-1为98.58 MPa,w-1为58.91 MPa.渗透率变化与岩石性质有关,其中砂岩与砂质泥岩渗透性能随应力应变的变化曲线是不一样的,砂岩服从指数函数关系  $k^s = k_0^s e^{ae}$ , 泥质砂岩、砂质泥岩或泥岩服从抛物线型函数关系  $k^s = k_0^s [ - (\varepsilon - a)^2 + b ]$ , 其中,k为渗透率,a为轴向应力,ε为轴向应变。

### 2.3 井筒破坏带理论计算

井筒开挖过程中,势必在井筒周边产生破坏带,按照文献[14]中的松动圈理论,由井筒壁向外可分为

破碎区和塑性变形区,在塑性区与破碎区的交界处应有条件  $r = R = tR$  时,  $\bar{\sigma}_c = \sigma_c^*$ , 根据井筒岩石力学本构关系,可推导:

$$t = \sqrt{\frac{\beta B_0}{\sigma_c - \sigma_c^* + \beta B_0}} \quad (1)$$

式中:  $t$  为分数.  $t = \frac{R_t}{R}$ ,  $R_t$  为井筒破碎区半径,  $R$  为井筒塑性区外圈半径.

令井筒塑性区半径为  $R_c$ , 边界条件  $r = a$  时,  $\sigma_c = \sigma_c^*$ ,  $\sigma_r = P_i$ , 可得:

$$R_c = a \left[ \frac{\frac{2}{K_p + 1} (P_0 + \frac{\sigma_c + \beta B_0}{K_p - 1})}{P_i + \frac{2(\sigma_c + \beta B_0)}{K_p^2 - 1} + \frac{\sigma_c^*}{K_p + 1}} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}} \quad (2)$$

式中:  $a$  为井筒半径;  $P_i$  为支护抗力;  $R_c$  为塑性区半径. 则,整体破坏带范围  $R = R_t + R_c$ , 据此,可对井筒破坏带范围进行计算.

### 3 研究实例井筒破坏带范围计算

#### 3.1 龙固矿井筒开挖情况

龙固矿井位于巨野煤田中南部,矿井开拓方式为立井开拓,采用2个水平开发,2个主井、风井采用钻井法施工,副井采用冻结法施工;井筒冻结深度为650 m. 该矿井为全隐蔽的华北型石炭、二叠系煤田,煤系以中、下奥陶统为基底,沉积了石炭系中统本溪组、上统太原组,二叠系下统山西组和下石盒子组及上统上石盒子组,其上被新近系和第四系所覆盖.

主井井筒通过的含水层自上至下依次是第四系和新近系孔隙含水层、二叠系上、下石盒子组砂岩裂隙含水层、二叠系山西组3煤层顶、底板砂岩含水层、石炭系太原组岩溶裂隙含水层及奥陶系岩溶裂隙含水层. 其中二叠系山西组3煤层顶、底板砂岩含水层和太原组三灰岩溶裂隙含水层是开采上组煤的直接充水含水层;十下灰岩溶裂隙含水层及奥陶系岩溶裂隙含水层为开采下组煤的直接充水含水层.

为此将井筒从上至下穿过的含水层概化为3层:风化基岩、二叠系含水岩组、石炭系含水岩组,厚度分别为100 m, 200 m, 50 m, 参考勘探报告各层岩组岩石力学参数取值见表2.

表2 井筒穿过的岩层参数表

岩石名称	单向抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	视密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 /10 <sup>3</sup> MPa	泊松比 $\mu$	凝聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)
基岩	52.20	3.14	2 514	17.20	0.24	3.50	51
二叠系	5.00	0.31	1 296	0.53	0.18	0.52	48
石炭系	8.80	3.20	2 516	4.70	0.23	3.50	51

#### 3.2 井筒破坏带范围计算结果

本次计算分别采用前述理论公式(2)和数值计算的方法.

##### 1) 理论计算结果

井筒直径取5 m, 计算可知,将会在井筒周围风化基岩段产生2.51 cm的的破坏带,二叠系砂岩中产生5.34 m破坏带,在石炭系岩层中产生3.42 m的破坏带.

##### 2) 数值计算

将龙固矿井井筒概化为3层岩层结构的矩形. 模拟范围为主井井筒附近区域. 井筒围岩地层模型的长和宽分别为300 m, 200 m, 深度350 m. 岩性参数如表2所示.

地层三维模型共划分有21 000个三维单元, 23 436个节点见图2.

计算结果显示(图 3~图 4),井筒开挖后,围岩应力平衡状态被打破,竖向应力分布变化程度沿井筒垂向逐渐变小.随着井筒开挖深度加大,井壁所承受的侧应力越来越大,开挖影响的围岩应力场范围越来越大.数值模拟对井筒围岩破坏范围的计算结果为:风化基岩段的破坏范围是 3.03 m,二叠系岩组的破坏范围是 4.86 m,石炭系岩组的破坏范围是 3.86 m.

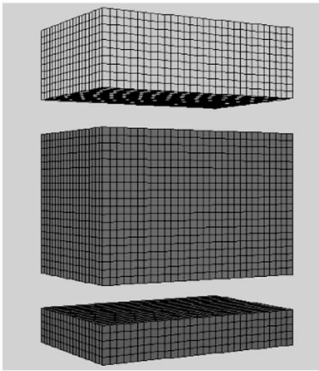


图 2 岩层三维模型网格图与分层图

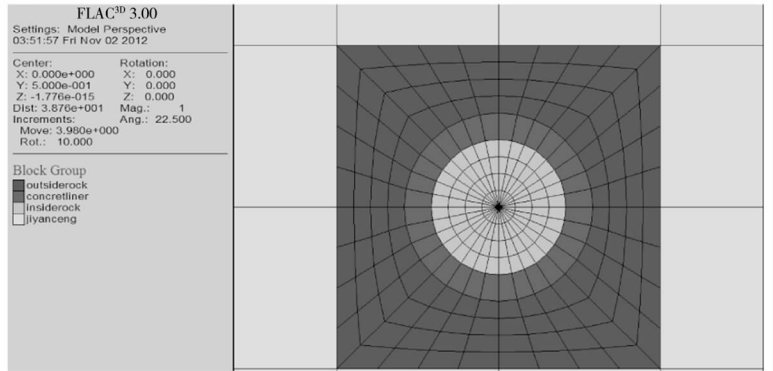


图 3 井筒及其影响区域

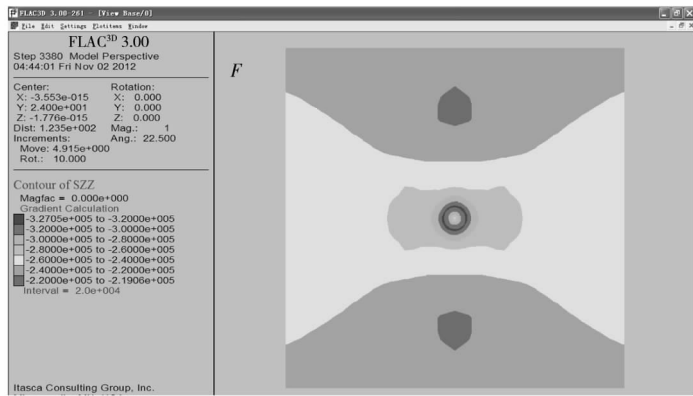


图 4 基岩段顶部井筒横切面应力影响区域

2 种方法的计算结果比较接近,均显示破坏带范围的最大值将出现在二叠系砂岩地层中,而且破坏带范围数值较大,其影响将不能被忽视.

#### 4 井筒破坏扰动时涌水量预测

前述分析可知,井筒开挖时,对围岩的破坏会产生不同范围的破坏带,将导致围岩渗透性能的大幅变化.那么,在井筒开挖扰动条件下,井筒涌水量如何预测才好.为此,针对本次研究实例,采用了 3 种方法来分别计算,并对计算结果与实际涌水量进行对比,以提出一个较好的方案.

第一种方法是常用的“大井法”,第二种方法是“数值法”,第三种方法是“达西渗流断面法”.

##### 1) “大井法”计算结果

井筒垂向上含水层水力性质为承压水,在井筒抽水条件下,随着井筒疏干排水、地下水位降低,地下水由承压水转为潜水.故井筒涌水量计算采用承压水转潜水含水层公式.计算公式如下:

$$Q = \frac{1.366K(2H_0M - M^2 - h_0^2)}{\lg \frac{R}{r_0}}; K = \frac{0.366Q}{MS_0} \lg \frac{R}{r_0}; R = 10S_0 \sqrt{K}.$$

式中: $H_0$  为水位高程, $Q$  为钻孔涌水量, $M$  为含水层厚度, $S_0$  为抽水孔水位降深, $K$  为渗透系数, $R$  为影响半径, $r_0$  为井半径.根据上述理论,龙固矿井主井井筒涌水量的计算结果见表 3.

表3 井筒涌水量大井法预测结果

井筒	含水层	含水层厚度/m	降深/m	渗透系数/(m/d)	影响半径/m	预计井筒涌水量/(m <sup>3</sup> /h)
主井	风化基岩	10.20	50.19	0.044 5	1 160.23	11.1
	二叠系石盒子裂隙含水层	19.00	50.19	0.040 0	1 000.00	13.0
	二叠系山西组3砂含水层	24.45	76.90	0.014 5	817.03	11.3
	石炭系三灰十下灰岩溶裂隙含水层	13.95	76.90	0.014 5	756.96	5.2

## 2) “数值法”计算结果

利用 Visual MODFLOW 对井筒涌水量进行了数值计算.

### ①水文地质概念模型

本次模拟范围为龙固矿井所在的水文地质单元,具体边界:北部边界为陈庙断层,东部边界为天桥断层;西部边界为宋庄断层;南部边界刘庄断层和邢庄断层,总面积约为 180 km<sup>2</sup>.

本次模拟进一步将研究区内的含水层概化为 5 层:第一潜水含水层(第四系松散层孔隙含水层),第二承压含水层(新近系松散层孔隙含水层),第三承压含水层(二叠系上、下石盒子组砂岩裂隙含水层),第四承压含水层(山西组 3(3 上、3 下)煤层顶底板砂岩含水层). 第五承压含水层(太原组石灰岩岩溶裂隙含水层),由于各含水层的储、导水性在区内各地有较明显的差异,因此,将各层含水层介质特征概化为非均质各向同性、三维非稳定流.

模拟区顶部边界为潜水面边界;由于石炭系煤系地层底部以不透水的泥岩、粉砂岩为主,隔水性能良好,因此底部视为隔水边界. 水文地质概念模型见图 5.

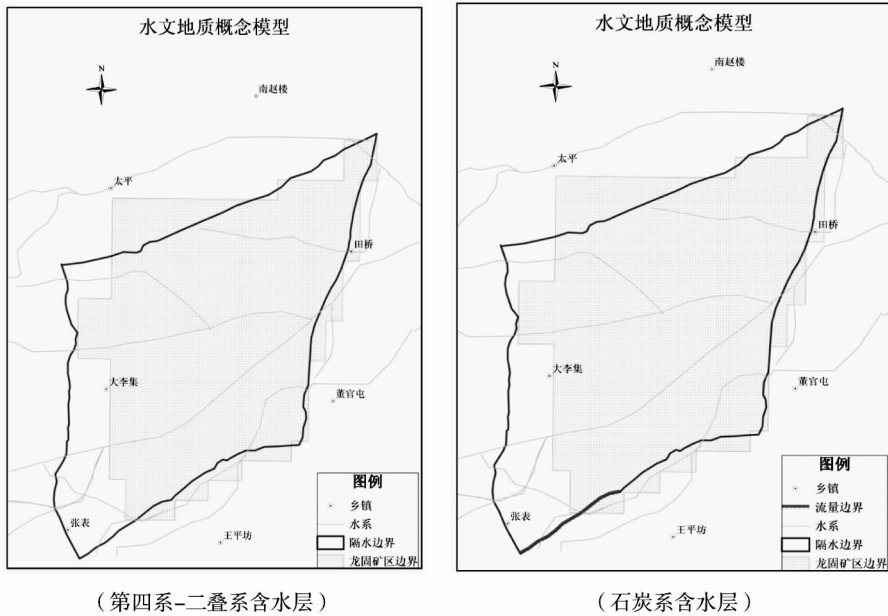


图5 水文地质概念模型图

### ②地下水流数值模型建立及求解

研究区地下水流数学模型用如下偏微分方程的定解问题来描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_1 (H_1 - B) \frac{\partial H_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_1 (H_1 - B) \frac{\partial H_1}{\partial y} \right) - B_{12} (H_1 - H_2) + \varepsilon_{11} (x, y, t) - \varepsilon_{12} (x, y, t) = \mu \frac{\partial H_1}{\partial t}; \\ H_1(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_{10}(x, y, t) \quad (x, y) \in D_1; \\ H_1(x, y, t) \Big|_{\Gamma_1} = H_{11}(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_1, t \geq 0; \\ K_1 (H_1 - B) \frac{\partial H_1}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0 \quad (x, y) \in \Gamma_2, t \geq 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(T_2 \frac{\partial H_2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T_2 \frac{\partial H_2}{\partial y}\right) + B_{12}(H_1 - H_2) + \varepsilon_{21}(x, y, t) - \varepsilon_{22}(x, y, t) = \mu_2^* \frac{\partial H_2}{\partial t}; \\ H_2(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_{20}(x, y, t) \quad (x, y) \in D_2; \\ T_2 \frac{\partial H_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_2(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_2, t \geq 0. \end{cases}$$

式中:  $K_1$  为浅层含水层渗透系数,  $m/d$ ;  $T_2$  为深层含水层导水系数,  $m^2/d$ ;

$\mu$  为浅层含水层储水系数(给水度);  $\mu_2^*$  为深层含水层弹性释水系数;

$H_1, H_2$  为浅层含水层水头、深层含水层水头高程,  $m$ ;  $B$  为浅层含水层底板标高,  $m$ ;

$B_{12}$  为浅层含水层与深层含水层间弱透水层的越流系数,  $1/d$ ;

$\varepsilon_{11}$  为浅层含水层入渗补给强度(包括降水入渗补给、灌溉回渗补给和黄河侧渗补给),  $m/d$ ;

$\varepsilon_{12}$  为浅层含水层排泄强度(包括潜水蒸发、开采和淮河侧向排泄),  $m/d$ ;

$\varepsilon_{21}$  为深层含水层补给强度,  $m/d$ ;  $\varepsilon_{22}$  为深层含水层排泄强度,  $m/d$ ;

$H_{10}, H_{20}$  为浅层含水层初始水位、深层含水层初始水位,  $m$ ;  $n$  为  $\Gamma_2$  的外法线方向;

$D_1, D_2$  为浅层、深层含水层的计算区范围;  $H_{11}$  为浅层含水层一类边界点的水位,  $m$ ;

$q_2$  为深层含水层二类边界单宽流量,  $m^3/d/m$ ;  $\Gamma_1, \Gamma_2$  为含水层一类边界及二类边界;

计算区采用矩形网格剖分,垂向剖分为7层,平面剖分90行、92列,平面上井点周围加密剖分

### ③水文地质参数分区

本次模拟的参数分区(图6)主要以地层岩性及其透水性为依据,结合抽水试验资料而确定初值(表4)。

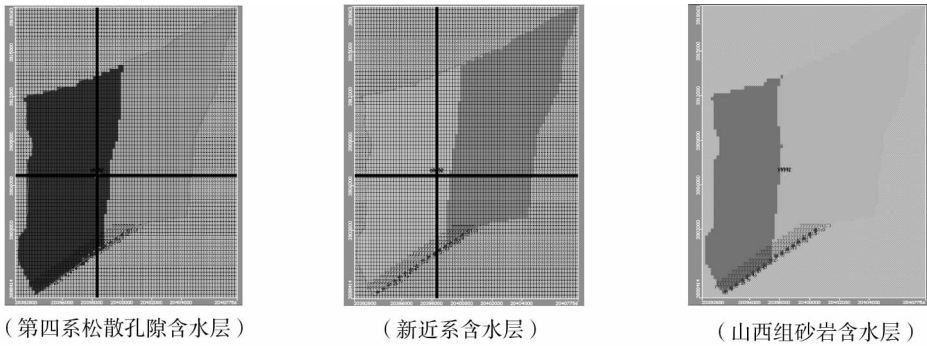


图6 水文地质参数分区图

表4 各含水层水文地质分区及初值

含水层名称	第四系松散孔隙含水层		新近系含水层		二叠系石盒子含水层		山西组砂岩含水层		石炭系含水层	
参数分区	$Kx = Ky = Kz$ /( $m/d$ )	$\mu$	$Kx = Ky = Kz$ /( $m/d$ )	$\mu^*$	$Kx = Ky = Kz$ /( $m/d$ )	$\mu^*$	$Kx = Ky = Kz$ /( $m/d$ )	$\mu^*$	$Kx = Ky = Kz$ /( $m/d$ )	$\mu^*$
1	0.198 47	0.02	0.170	0.02	0.01	0.000 01	0.009 93	0.000 08	4.272	0.000 09
2	0.015 81	0.02	0.013	0.02	-	-	0.033 15	0.000 08	-	-

### ④源汇项

矿区内地下水主要接受大气降水入渗补给、地下水侧向径流及垂向越流量补给,主要排泄项为大气蒸发和人工开采。

#### a) 大气降水入渗补给量

大气降水入渗补给是浅层地下水的主要补给来源之一,其入渗量与降水量、包气带岩性和厚度有关。降水入渗量计算公式为  $Q_j = \alpha \cdot F \cdot X$ 。

式中:  $Q_j$  为大气降水入渗补给量,  $m^3/d$ ;  $\alpha$  为大气降水入渗系数(无量纲);  $F$  为计算区面积,  $m^2$ ;  $X$  为计算

时段大气降水量,  $m$ .

计算公式中,大气降水入渗系数的确定是大气降水入渗补给量计算的关键数据,此区采用0.12.

b) 地下水侧向径流量

根据地下水流场特征,采用达西公式计算:  $Q_l = K \cdot I \cdot B \cdot M \cdot \Delta T$ .

式中:  $Q_l$  为地下水侧向径流量,  $m^3/d$ ;  $K$  为断面附近含水层的渗透系数,  $m/d$ ;  $I$  为垂直于断面的水力坡度;  $B$  为断面宽度,  $m$ ;  $M$  为含水层厚度,  $m$ ;  $\Delta T$  为计算时段,  $d$ .

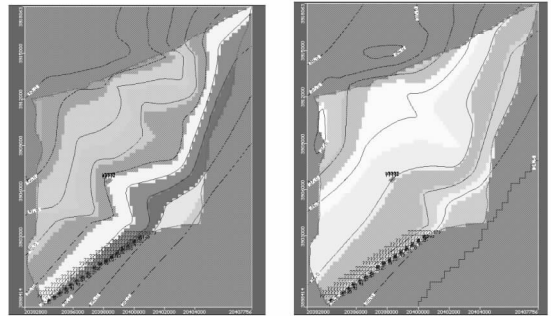
c) 潜水蒸发量

矿区内河谷区地下水位埋藏较浅,地下水蒸发较为强烈,是浅层地下水的主要排泄途径之一. 潜水蒸发量主要与包气带岩性、厚度、地表植被和气候等因素有关. 潜水蒸发量采用如下公式计算:  $Q_e = \sum_{i=1}^n \varepsilon_0 (1 - \frac{\Delta_i}{\Delta_0})^m F_i$ .

式中:  $Q_e$  为地下水蒸发排泄量,  $m^3/d$ ;  $\varepsilon_0$  为水面蒸发强度,  $m/d$ ;  $\Delta_0$  为地下水极限蒸发深度,  $m$ , 本区为3.5 m;  $\Delta_i$  为地下水位埋深,  $m$ ;  $F_i$  为地下水位埋深小于极限蒸发深度的区域面积,  $m^2$ ;  $m$  为与岩性有关的指数.

⑤ 初始流场

第四系系含水层及新近系承压含水层的初始水位根据区域流场形态结合矿区内地下水位观测资料确定(图7).



(第四系含水层)

(新近系含水层)

图7 含水层初始流场图

矿井地处平原区,基岩产状平缓,其它深部含水层在井筒开挖前人工扰动很少,认为其初始流场近似水平,每层赋一个值即可.

结合已有水文地质观测孔资料,二叠系石盒子组裂隙含水层、二叠系山西组3砂含水层、石炭系三灰十下灰岩溶裂隙含水层的初始水位分别赋值:35.12 m,38.28 m,37.47 m.

数值计算结果见下表5.

表5 龙固矿主井井筒涌水量数值计算结果

含水层	抽水时间/d	数值模拟涌水量/( $m^3/d$ )
第四系孔隙含水层	50	29
新近系孔隙含水层	80	6
二叠系石盒子裂隙含水层	150	266
二叠系山西组3砂含水层	200	1 510
石炭系三灰十下灰岩溶裂隙含水层	300	2 501

3) “达西渗流断面法”计算结果

根据达西渗流理论,在不考虑井筒开挖对井壁破坏的情况下,单一含水层向井中涌水的断面面积为  $2\pi rh$ , 用断面流量可计算立井涌水量,即  $2\pi rhkI$ , 如果有多个含水层向井筒充水,那么立井涌水量为  $Q_1 = \sum_{i=1}^n 2\pi rh_i k_i I_i$ .

井壁破坏后,岩层对水流基本没有阻力,实际上相当于自由水流,井壁破坏带外的正常岩层是含水层向井筒充水的断面,因此,考虑井筒破坏带影响的井筒涌水量为  $Q_2 = \sum_{i=1}^n 2\pi(r+R)h_i k_i I_i$ , 考虑井壁破坏与否,其流量增加为  $Q_2 - Q_1 = \sum_{i=1}^n 2\pi R h_i k_i I_i$ .

以龙固矿开挖直径5 m的立井井筒为例(见表2),考虑井筒围岩变性破坏后,各岩层段涌水量预测结果与常规计算相比均有大幅增加:基岩段增加50.2%,二叠系山西组增加106.8%,石炭系灰岩裂隙含水层增



加 68.4%。由此可见,考虑破坏带与否,将导致涌水量预测误差在 50% 以上,甚至超过 1 倍以上。

表 6 “达西渗流断面法”涌水量计算结果

井筒	含水层	含水层厚度/m	渗透系数/(m/d)	影响半径/m	$Q_1$ 井筒涌水量/( $m^3/h$ )	$Q_2$ 井筒涌水量/( $m^3/h$ )	$Q_1 - Q_2$ /( $m^3/h$ )	增加率/%
主井	风化基岩	10.20	0.045	1160.0	1.10	1.65	0.55	50.0
	二叠系山西组	24.45	0.014	817.0	1.40	2.90	1.50	106.8
	石炭系灰裂隙	13.95	0.014	756.9	0.81	1.36	0.55	68.0

## 5 不同计算结果比较

对以上 3 种方法的计算结果进行比较,可以看出井壁破坏对井筒涌水量预测结果影响较大。为进一步探讨,将几种计算结果与井筒开挖过程中的实际涌水量进行对比,结果见下表:

表 7 各种计算方法预测涌水量与实际数据对比

$m^3/d$

井筒	含水层	不考虑破坏带		考虑破坏带	
		数值模拟法	大井法	大井法	达西渗流断面法
主井	第四系孔隙含水层	29			
	新近系孔隙含水层	6	5.20	10.80	39.60
	二叠系石盒子裂隙含水层	266	116.64	241.20	
	二叠系山西组 3 砂含水层	1 510	22.30	46.10	69.60
	石炭系三灰十下灰岩溶裂隙含水层	2 501	7.02	14.51	32.64
	各种方法井筒涌水量计算结果	4 312	151.16	312.61	141.84
井筒实际涌水量数据		3 984.4			

可以看出:常规不考虑破坏带影响的大井法预测数值最小,误差最大;考虑破坏带影响后,预测值增大,接近实际值,其中达西渗流断面法效果更好一些;大井法和达西渗流断面法在孔隙介质含水层组中的预测结果更接近实际,这也符合 2 种方法应用的理论基础;全局看来,数值法适用于孔隙和裂隙多种介质含水组中涌水量预测,预测误差也最小,下面对预测值与实际值之间误差较大的原因进行分析。

解析法预测结果误差分析:1)水文地质参数与实际情况不符;2)井筒开挖对含水层造成的扰动:井筒掘砌过程中,随着掘进深度的增大,尤其在浅部松散堆积层,对围岩破坏范围较大,掘进断面面积远超过钻孔断面面积,同时由于放炮和动力设备引起的震动致使井筒附近含水层中的导水裂隙扩张,延伸,甚至造成某些裂隙连通,使得涌水量增大;3)实际地下水流不符合解析法动力学模型。

数值法预测结果误差分析:1)水文地质勘探程度不够;2)水文地质概念模型不能完全拟合现实条件;3)复杂的水文地质条件和人为开挖井筒对地下水系统的扰动,使数学方程一定程度上不满足要求。同时,如考虑由于破坏带来井筒断面增大,进而边界处水力坡度增大,影响范围增大带来汇水面积增大,其预测的涌水量应进一步加大;考虑破坏带后井筒断面增大,与检查孔相比,还带来尺度效应的进一步放大,这也是产生误差的重要因素。

因此,在满足要求和水文地质资料详实的情况下可利用数值法进行井筒涌水量预测。对于研究区资料不够丰富时,可采用数值法进行模拟进行井筒涌水量预测,同时利用解析法进行对比。达西渗流理论公式应用在上覆第四系松散层中应用效果较好,在深部基岩裂隙岩体中数值法效果更好;实际应用中,结合资料情况,尽可能采用综合方案。无论哪种方法都需要考虑井壁破坏带的影响。

## 6 结论

本文通过分析井筒开挖过程中围岩破坏机理与演化,提出在预测井筒涌水量时应考虑破坏带影响的总体思路。依此思路,以山东龙固矿主井为研究实例,分别采取数值法、大井法、达西渗流断面法对井筒涌水量进行了计算与对比,可以得出以下结论:

1) 大口径井筒开挖过程中,井筒破坏范围对涌水的影响不可忽视;破坏范围最大值通常出现在脆性砂岩组中;忽略井筒破坏带影响导致预测结果偏小.

2) 考虑破坏带影响进行涌水量预计,结果更接近实际数据,但仍存在较大误差,尤其是在基岩裂隙带中应用达西渗流理论计算误差较大.

3) 总体上数值法效果最好,但对于地勘单位来说,受资料限制,很难在新开挖井筒阶段广泛应用.

#### 参考文献:

- [1] 毛德强,万力,张美静. 裂隙含水层中抽水井不均匀出水条件下的井流公式[J]. 工程勘察,2008(1):35-38,46.
- [2] 王明章. 裘布依地下水井流计算公式有关问题讨论[J]. 贵州地质,2011(2):118-121.
- [3] 李云峰,温廷中. 郭屯矿井井筒涌水量预测及分析研究[J]. 安徽地质,2007(4):275-277,280.
- [4] 咎雅玲,吴慧琦. 用水文地质比拟法预算矿井涌水量[J]. 华北国土资源,2011(1):52-54.
- [5] 许广军,贾连超,窦雨刚. 榆46-9a井组干扰试井分析[J]. 石油化工应用,2011(5):56-60.
- [6] 陈酪知,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):68-73.
- [7] 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.
- [8] 武克俭,李文彬. 地下水加坡理论在井筒涌水量预算中的应用[J]. 中国煤炭地质,2008(11):24-25.
- [9] 许月霞,海玮. 矿山井筒涌水量分段预计初探[J]. 神华科技,2011(1):40-42.
- [10] Wu Q, Chen M Y, Tian K M, et al. The research of a para three dimensional numerical model for forecasting water inflow in mine in the coalfield of North China[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 1992,17(1):87-94.
- [11] 杨天鸿,唐春安,梁正召. 脆性岩石破裂过程损伤与渗流耦合数值模型研究[J]. 力学学报,2003,39(5):533-541.
- [12] Xue Y Q, Wu J C, Xie C H, et al. Numerical simulation of ground water drainage for Yuanbaoshan opencast coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 1996,21(3):255-260.
- [13] 王文学,隋旺华. 某矿第四系底部含水层降水井群优化布置[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(2):30-33.
- [14] 初明祥,颜景光. 回采巷道松动圈厚度的确定与控制[J]. 煤炭科学技术,2003(9):53-55.