



侏罗系宝塔山砂岩突水风险预测及限制边界疏降技术

乔伟 吕玉广 韩港 刘光尧 吕文斌 冯培超 陈维池 汪祯

引用本文:

乔伟, 吕玉广, 韩港, 等. 侏罗系宝塔山砂岩突水风险预测及限制边界疏降技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 194–208.
QIAO Wei, LYU Yuguang, HAN Gang. Prediction of water inrush risk in Jurassic Baotashan sandstone and technology of by limited boundary drainage[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 194–208.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1809>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部开采底板厚隔水层突水危险性评价方法研究

Study on risk assessment method of water inrush from thick floor aquifuge in deep mining

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6e0a0cc2-87ca-4608-8744-737ffc5c0d83>

巷道掘进顶板突水危险性预测研究

Study on prediction of water inrush hazard in roof of roadway driving

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 110–120 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/18d85e6d-28ed-4fec-9e8e-e693a3c54562>

洪水灾害诱发煤矿水害事故风险评估模型研究

Study on risk assessment model of coal mine water accident induced by flood disaster

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 395–402 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0051>

宁正矿区新庄煤矿首采区侏罗系延安组8号煤层顶板涌(突)水危险性评价

Risk assessment of roof water inrush in No. 8 coal seam of Jurassic system Yan'an Formation in the first mining area of Xinzhuang Coal Mine in Ningzheng Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 298–309 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0919>

大采深煤层弱胶结厚层砾岩突水溃砂灾害研究

Study on disaster of water and sand inrush of weakly cemented thick conglomerate on deep mining coal seam

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e88107e5-6348-4ce3-8310-95df06aa690c>

彬长矿区典型顶板水害矿井洛河组砂岩微观孔隙特征研究

Micro pore characteristics of Luohe aquifer sandstone in Binchang Mining Area typical roof water hazard mines

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 208–218 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1016>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

乔伟, 吕玉广, 韩港, 等. 侏罗系宝塔山砂岩突水风险预测及限制边界疏降技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 194–208.

QIAO Wei, LYU Yuguang, HAN Gang, *et al.* Prediction of water inrush risk in Jurassic Baotashan sandstone and technology of by limited boundary drainage[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 194–208.

侏罗系宝塔山砂岩突水风险预测及限制边界疏降技术

乔伟¹, 吕玉广², 韩港³, 刘光尧⁴, 吕文斌⁵, 冯培超¹, 陈维池⁶, 汪祯¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232000; 3. 山东能源新矿内蒙古能源有限责任公司鲁新煤矿, 内蒙古 锡林郭勒盟 027399; 4. 山东能源新矿内蒙古能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016299; 5. 内蒙古上海庙矿业有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016299; 6. 江苏建筑职业技术学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 内蒙古上海庙矿区新上海一号煤矿发生国内首次也是目前唯一的侏罗系煤层开采底板宝塔山砂岩突水淹井事故; 开展了侏罗系煤层开采底板富水宝塔山砂岩突水危险性评价方法和防控技术的研究工作。首先, 明确了“11·25”事故的突水水源为侏罗系延安组下部的宝塔山砂岩含水层, 且煤层与底板宝塔山砂岩之间隔水层具有强度低、软化系数小、胶结性差的特点, 属地质软岩。其次, 以“含水层厚度、含水层富水性、含水层渗透性、含水层水压力及18煤底板隔水层有效厚度”为主要指标建立突水评价体系, 将宝塔山砂岩含水层突水危险性分区被划分为安全区(32.21%)、威胁区(37.53%)及危险区(30.26%)三种类型, 并通过实例验证了评价模型的准确性。最后, 结合底板隔水层工程地质特性, 分析采用“断层注浆形成局部限制边界+群孔疏降”的方法防控宝塔山砂岩突水。设定“疏放水开始至1号钻场退出疏放水工作、2号、3号和4号钻场持续进行疏放水工作至3号钻场退出、2号和4号钻场持续进行疏放水工作至模型补排平衡”的疏降方案。依据规范得出注浆后最大帷幕渗透系数为 2×10^{-2} m/d, 当断层注浆后帷幕渗透系数为 $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-8}$ m/d时, 疏放水量为402万~347.8万 m^3 , 安全区占矿区的比例为43.34%~67.37%。结合注浆成本、疏放水量和安全性, 帷幕渗透系数为 2×10^{-4} m/d时即可有效保证矿井安全生产和技术经济效益。断层注浆局部限制边界+疏放水联合技可有效防控宝塔山砂岩水害, 研究工作对我国西部侏罗纪煤田开发底板水防治具有重要意义和工程实践价值。

关键词: 宝塔山砂岩; 弱胶结隔水层; 三维地下水模型; 危险性评价; 水害防治

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)02-0194-15

Prediction of water inrush risk in Jurassic Baotashan sandstone and technology of by limited boundary drainage

QIAO Wei¹, LYU Yuguang², HAN Gang³, LIU Guangyao⁴, LYU Wenbin⁵,
FENG Peichao¹, CHEN Weichi⁶, WANG Zhen¹

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 3. Shandong Energy Xinwen Mining Inner Mongolia Energy Group Co., Ltd. Luxin Coal Mine, Xilingol League 027399, China; 4. Shandong Energy Xinwen Mining Inner Mongolia Energy Group Co., Ltd., Ordos 016229, China; 5. Inner Mongolia Shanghai Temple Mining Co. Ltd, Ordos 016229, China; 6. Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The first and currently only Jurassic coal seam mining floor Baotashan sandstone water inrush and well flooding accident occurred in the New Shanghai No. 1 Coal Mine in Shanghai Miao Mining Area, Inner Mongolia. This paper researched the water inrush risk assessment method and prevention and control technology of the Baotashan sandstone in the Jurassic coal seam mining floor, which is highly water-rich. Firstly, it is clear that the water inrush source of the "11.25" accident is the Baotashan sandstone aquifer in the lower part

收稿日期: 2023-11-29

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1809

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772302)

作者简介: 乔伟(1984—), 男, 山东蒙阴人, 教授, 博士生导师。E-mail: qiaowei@cumt.edu.cn

通讯作者: 冯培超(1998—), 男, 安徽滁州人, 博士研究生。E-mail: TB23010007A41@cumt.edu.cn

of the Jurassic Yan'an formation, and the water barrier between the coal seam and the floor Baotashan sandstone has the characteristics of low strength, low softening coefficient and poor cementation, so it belongs to geological soft rock. Secondly, a water inrush evaluation system was established using "aquifer thickness, aquifer water richness, aquifer permeability, aquifer water pressure and the effective thickness of the 18 coal floor aquifer" as the main indicators, and the water inrush of the Baotashan sandstone aquifer was the dangerous zones are divided into three types: safety zone (32.21%), threat zone (37.53%) and dangerous zone (30.26%), and the accuracy of the evaluation model was verified through the "11.25" water inrush accident. Finally, combined with the engineering geological characteristics of the floor aquifer, the method of "fault grouting to form a local restricted boundary+group hole water release" was used to prevent and control Baotashan sandstone water inrush. It was set that "Water drainage begins until drilling site #1 exits work, the 2#, 3#, and 4# drilling fields continue the water drainage work until 3# exits work, and the 2# and 4# drilling sites continue to drain water until the model is replenished and balanced." According to the specification, the maximum curtain permeability coefficient after grouting is 2×10^{-2} m/d, When the curtain permeability coefficient after fault grouting is $2 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-8}$ m/d, the drainage volume is $4.02 \times 10^{-4} \text{ m}^3 - 3.478 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. The proportion of safe areas in the mining area is 43.34%–67.37% respectively. Combining the grouting cost, drained water volume and safe area, when the curtain permeability coefficient is not greater than 2×10^{-4} m/d, can effectively ensure the safety and technical and economic benefits of the mine. The combined technology of fault grouting local restriction boundary+water drainage can effectively prevent and control sandstone water damage in Baotashan. The research work in this paper is of great significance and engineering practice value for the prevention and control of floor water in the Jurassic Coalfield development in western China.

Key words: Baotashan sandstone; weakly cemented aquifer; three-dimensional groundwater model; risk assessment; water hazard prevention

0 引言

煤炭工业对我国社会经济发展发挥着支撑作用,以新疆和内蒙古为代表的西部地区是我国主要的煤炭开采区^[1]。煤炭采掘活动的进行伴随着相应的水害问题^[2-3]。2015年11月25日8时左右("11·25"底板突水事件),内蒙古上海庙矿区新上海一号矿井一分区输送带暗斜井下山巷道掘进至503m时,迎头的巷道底板先是明显底鼓,随后发生突水,初始量约为1500 m³/h,突水水量随时间逐渐增大,11月26日8时水量达到3600 m³/h,瞬时水量达到10000 m³/h,最终造成矿井淹井事故^[4],水量之大非常罕见。经详细调查后确定突水水源来自21煤底板宝塔山砂岩含水层。

我国煤炭开采报道的底板突水事故多为石炭二叠系煤层开采时底板的薄层灰岩水和奥灰水^[5-6]。但随着以石炭-二叠系煤层为开采主体的矿区煤炭资源逐步枯竭,煤炭资源逐步以侏罗系煤为主。宝塔山砂岩位于侏罗系延安组含煤地层底部,广泛分布于鄂尔多斯盆地。在以往认知中,干旱半干旱区煤系地层底板含水层普遍富水性较弱、渗透性较差,判定下组煤开采时不受含水层威胁。然而新上海一号矿井一分区巷道掘进时不仅发生底板突水事故,且发生国内首次也是目前唯一的侏罗系煤层开采底板宝塔山砂岩突水淹井事故,威胁矿井生产安全^[7-8]。因此,需要针对宝塔山砂岩底板突水事故进行详细探查和提出解决方针。

煤层底板突水是突水水源、导水通道和采矿扰

动共同作用的结果^[9]。导水通道的隐蔽性和采矿扰动的不确定性导致底板突水的难以预测^[10],尤其当巷道底部岩层岩性强度低,结构松散时,采掘活动更容易使底板裂隙生成并贯通,形成导水通道,造成突水事故发生^[11-12]。郭国强等^[13]根据奥灰含水层的水文地质条件设计疏降工程,使含水层水压小于隔水层力学强度;王新军等^[14]根据华北岩溶充水煤矿特点分析了不同水文地质条件下的疏放工程适宜性;赵春虎等^[15]通过井下疏水钻孔涌水的流态转化特征,研究钻孔涌水量动态衰减规律。东部煤矿的特点是进行整体注浆改造含水层为奥陶系灰岩含水层,其裂隙为岩溶裂隙,岩溶孔洞发育,且多为钙质胶结,注浆浆液在注浆压力作用下扩散效果好,浆液扩散半径大,利于形成整体注浆改造层。然而,宝塔山砂岩属于弱胶结隔水层,砂岩胶结性差,浸水后容易崩解,工程劣化性较强,在此弱胶结砂岩地层中全面注浆改造疏水量大且成本极高,不能保证煤炭开采经济效益。因此,对侏罗系煤层底板宝塔山砂岩进行突水风险预测,探究采用"断层注浆形成局部限制边界+群孔疏降"的方法防控宝塔山砂岩突水的可行性。

1 研究区概况

新上海一号煤矿位于内蒙古自治区鄂托克前旗境内,行政区划属鄂托克前旗上海庙镇管辖。井田内钻孔揭露地层主要有三叠系延长组(T_3y),侏罗系延安组(J_2y)、直罗组(J_2z),白垩系志丹群(K_1zd),古近系(E)及第四系(Q),其中含煤地层为侏罗系延安组,盖层为白垩系、古近系及第四系,三叠系延长组

为侏罗系含煤岩系的基底。

井田内含煤地层延安组的厚度根据完整揭露的钻孔统计,平均为 293.09 m。穿见煤层的钻孔 73 个,穿见煤层 2~29 层,煤层总厚度 1.45~38.40 m;含可采煤层或大部可采煤层 10 层,可采煤层总厚度平均 21.19 m。18 煤位于延安组下部,属下含煤组上部煤层,与 16 煤间距为 10.09~45.60 m,平均 33.59 m。煤层厚度 0.50~5.29 m,平均 2.45 m。煤层厚度总体上呈南厚北薄趋势,煤层结构较简单,局部含两层夹矸,夹矸厚度 0.17~0.92 m,平均 0.43 m。岩性为砂质泥岩或泥岩。为稳定煤层。煤层顶、底板岩性主要为粉砂岩、细砂岩或粗砂岩,局部为泥岩或砂炭质泥岩(图 1)。井田主体构造形态为一向东倾伏的单斜构造,北部在此基础上发育有宽缓的次级褶曲,区内岩层较为平缓,一般岩层倾角为 3°~13°,除断层附近,基本无突然倾斜变化,褶曲不发育但断层发育程度高。矿井采用一次采全高综合机械化开采,全部垮落法管理工作面顶板。

2 水文地质条件

2.1 含(隔)水层特征

根据含水介质、孔隙类型及含水特征等,新上海一号井田内主要含水层自上而下可分为新生界松散含水层、白垩系砾岩含水层、侏罗系直罗组含水层、21 煤顶板上延安组含水层、延安组宝塔山砂岩含水层、三叠系延长组砂岩含水层,隔水层主要有新生界与白垩系间的隔水层、白垩系与侏罗系直罗组间的隔水层、侏罗系直罗组与延安组间的隔水层和延安组内煤层间的隔水层。

宝塔山砂岩位于 21 煤底板以下 0~29.55 m,平均距离为 5.62 m;岩性由灰白色及肉红色中粗细砂岩构成,以含砾粗砂岩为主。砂岩结构疏松,固结程度差,孔隙发育。抗压强度为 12.6 MPa、抗拉强度为 0.4 MPa、抗折强度为 0.8 MPa,属弱胶结软岩,且随着岩石含水率增加,其抗压强度、抗拉强度、抗折强度等均显著降低,平均软化系数 0.4,岩石对水十分敏感^[15-16]。宝塔山砂岩含水层厚度为 18.55~82.65 m,平均厚度 52.97 m。宝塔山砂岩在井田西部和北部,多为砂岩和泥岩交互发育,而井田东部和南部多发育厚层状中、粗砂岩,其岩性特征为底板突水提供隐蔽通道。统一口径单位涌水量为 0.041 9~1.084 0 L/(s·m),富水性不均一,南部富水性好于北部。宝塔山砂岩含水层具有水量大,水位恢复快的特点,发生突水事故时会威胁矿井生产安全^[17-18]。

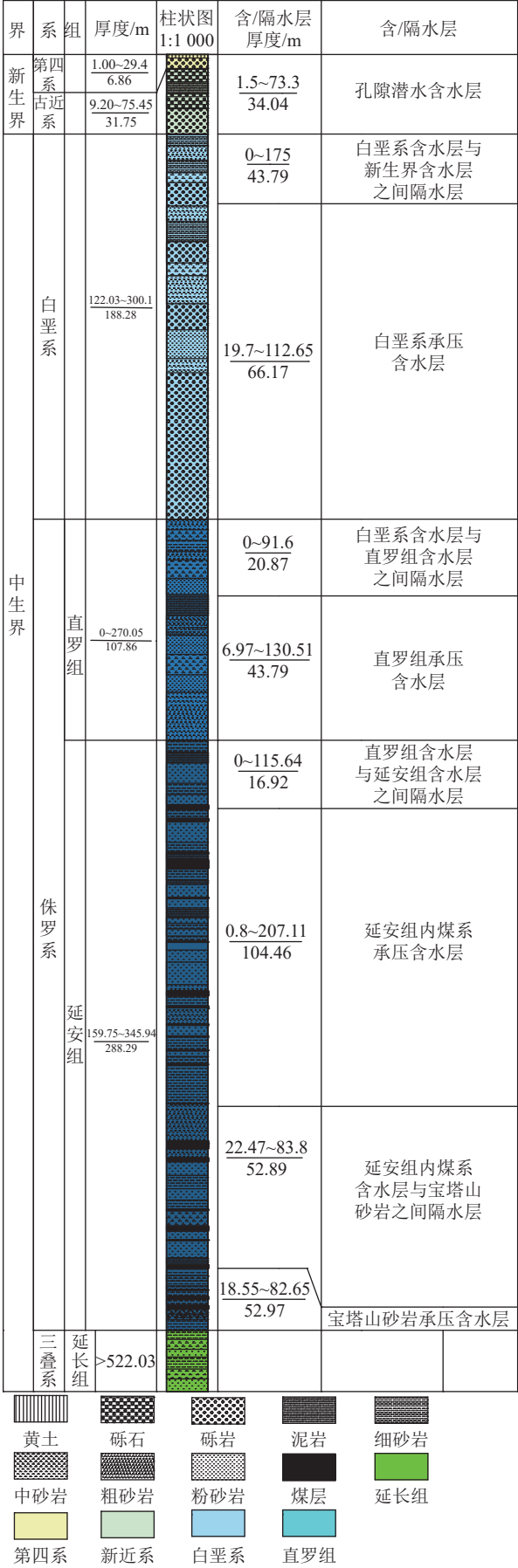


图 1 矿区柱状结构示意图

Fig.1 Schematic of the columnar structure of the mining area

2.2 地下水补径排特点

矿井主要含水层自下而上分别为基岩孔隙、裂隙承压水含水层、松散含水层, 含煤地层富水性普遍较弱, 补径排条件相对简单(表 1)。底部宝塔山砂岩含水层具有强富水特征, 井田北部是含水层的补给边界, 东部和西部大部分为隔水边界, 部分为补给边界, 天然状态下径流方向为东北向西南方向, 受煤矿开采影响将在开采区形成降落漏斗。

表 1 矿井内含水层补径排特征

Table 1 Characteristics of replenishment and drainage of aquifers in mines

含水层	补给方式	排泄方式
新生界含水层	大气降水入渗; 邻区潜水含水层中地下水侧向径流补给(东北向西南方向径流)	井田西南方向河流水洞沟排泄; 入渗补给下伏基岩风化带裂隙水; 地表蒸发、蒸腾及人工开采
白垩系砾岩含水层	上覆新生界含水层的入渗补给; 地下水的侧向径流补给	侧向径流(东北向西南流出区外); 补给下游邻区含水层
侏罗系各时代裂隙含水层	邻近裂隙水的侧向径流补给; 白垩系的入渗补给	顺层径流, 向下游排泄; 矿井排水

3 突水危险性评价

18 煤的开采对煤层底板隔水层产生进一步破坏, 削弱了 18 煤弱胶结底板隔水层有效厚度, 降低了隔水层对宝塔山砂岩含水层突水的抵抗能力。传统的底板突水评价方法考虑的是 C-P 煤层开采底板突水的评价方法, 不能有效考虑宝塔山砂岩含水层渗透性及 18 煤底板隔水层有效厚度两个因素

对底板突水的影响, 需要依据宝塔山砂岩水文地质特性考虑多重因素对底板突水影响。模糊德尔菲层次分析法是将模糊数学评价方法、层次分析法和德尔菲群体决策方法结合起来的一种模糊群体决策方法。在底板突水危险性评价过程中, 每个主控指标之间具有一定的差异性, 模糊德尔菲层次分析法中每个主控指标对计算结果的贡献是一样的, 难以体现每一个指标之间的差异。模糊 C 均值聚类在计算过程中引入了模糊控制参数 $m \in [1, \infty)$, 而 m 的大小直接影响聚类效果。模糊 C 均值聚类算法对隶属度进行改进, 每个数据点对各个簇类的隶属度 $u \in [0, 1]$, 隶属度之和为 1, 可以很好确定每一种因素在研究对象中的比重以及影响大小, 将两种方法结合在一起形成的模糊德尔菲层次分析法计算加权重, 结合加权模糊 C 均值聚类方法, 在聚类过程中引入各因素的权重, 考虑多种因素使结果更准确 [19-20]。因此, 通过分析 18 煤底板宝塔山砂岩含水层厚度、宝塔山砂岩含水层富水性、宝塔山砂岩含水层渗透性、宝塔山砂岩含水层水压力及 18 煤底板隔水层有效厚度, 进行 18 煤开采弱胶结底板突水危险性评价。

常用的指标类型分为效益型和成本型指标。效益型指标对目标为正相关(式 1), 成本型指标对目标是负相关(式 2)。含水层厚度、单位涌水量、渗透系数和含水层水压均为效益型指标, 即数值越大, 宝塔山砂岩含水层发生突水危险性越高; 有效隔水层厚度属成本型指标, 即数值越大, 突水危险性越小, 依据公式对各指标标准化后如图 2 所示。

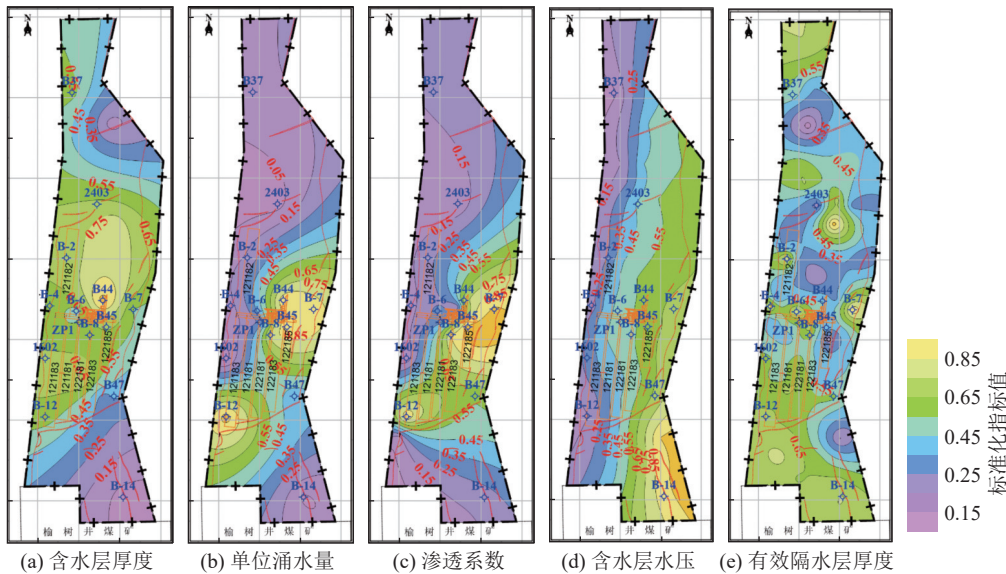


图 2 宝塔山砂岩含水层突水危险性评价主控指标标准化

Fig.2 Standardization of main control indicators for water inrush risk assessment of Baotashan sandstone aquifer

$$S_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_k(x_{ij})}{\max_k(x_{ij}) - \min_k(x_{ij})} \quad (1)$$

$$S_{ij} = \frac{\max_k(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_k(x_{ij}) - \min_k(x_{ij})} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为主控指标在栅格图层在第 i 行第 j 列的属性值, s_{ij} 为标准化主控指标在栅格图层在第 i 行第 j 列的属性值, $s_{ij} \in [0,1]$ 。 $\max(x_{ij})$ 和 $\min(x_{ij})$ 分别表示第 k 各指标下 x_{ij} 的最大值和最小值。

板受构造破坏块段突水系数一般不大于 0.06 MPa/m, 正常块段不大于 0.1 MPa/m, 则视为相对安全区, 因此, 将井田内 $T_s \leq 0.06$ MPa/m 范围划分为安全区, 0.06 MPa/m $< T_s \leq 0.1$ MPa/m 范围划分为威胁区, $T_s > 0.1$ MPa/m 范围划分为危险区。对新上海一号煤矿井田内宝塔山砂岩含水层突水危险性进行区划后(图 3), 发现新上海一号井煤矿矿区范围内, 底板突水危险区主要集中于井田的中东部区域, 占井田面积的 30.26%; 井田北部零星区域, 中西部与南部大部分区域处于威胁区, 占井田面积的 37.53%; 井田北部大部分区域及西部部分区域属于安全区, 占井田面积的 32.21%。“11·25”突水事故历史突水点位于危险区内。因此, 需要对宝塔山砂岩含水层进行疏水降压工程探索, 确保矿井生产安全。

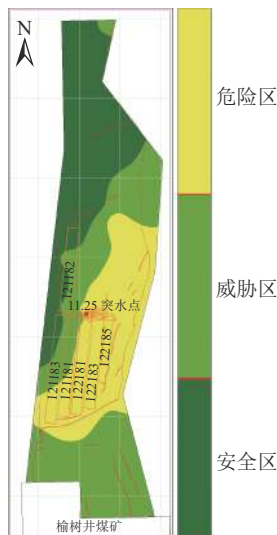


图 3 宝塔山砂岩含水层突水危险性评价分区

Fig.3 Water intrush risk assessment zoning of Baotashan sandstone aquifer

4 局部限制边界疏降技术

为详细探明宝塔山砂岩含水层水文地质特征, 并对 18 煤煤层进行安全开采提供疏水降压方案, 对宝塔山砂岩含水层进行了大规模群孔放水试验。根

据放水试验结果分析研究区水文地质条件和含水层之间水力联系, 并通过建模探索宝塔山砂岩含水层疏水降压工程实践的可能性, 为侏罗系煤层开采弱胶结隔水层突水提供水害防治方案。

4.1 群孔放水试验

4.1.1 井下疏放水工程设置

宝塔山砂岩含水层大规模放水试验采取井下钻孔放水, 地面钻孔观测的试验方案。在宝塔山砂岩含水层放水试验期间利用地表水文观测孔对白垩系、直罗组、延安组、宝塔山及三叠系含水层的水位进行观测, 放水孔与观测孔平面布置如图 4 所示。

4.1.2 宝塔山砂岩含水层水文地质特征

通过群孔放水试验得到井田范围内宝塔山砂岩含水层渗透系数为 0.1 ~ 2.0 m/d(图 5)。在井田中部

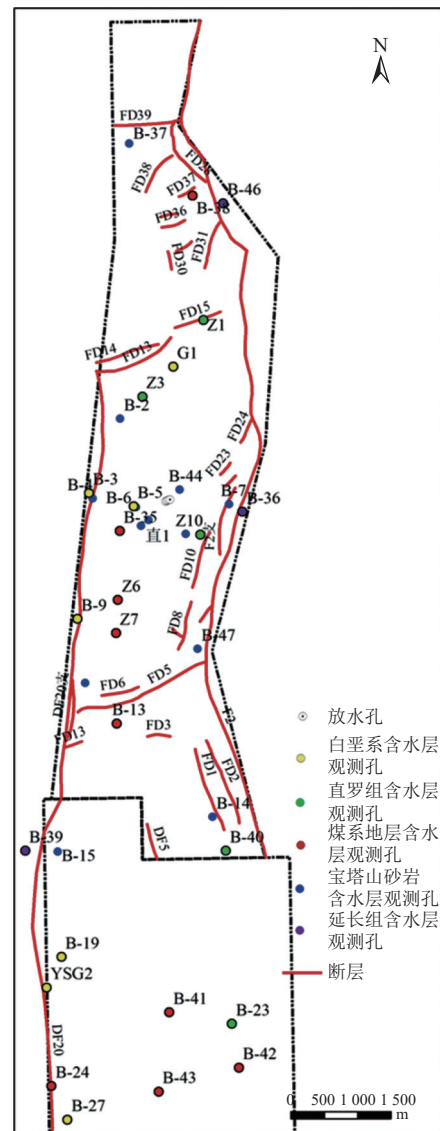


图 4 群孔放水试验观测孔位置

Fig.4 Location of observation holes for water release test in group holes

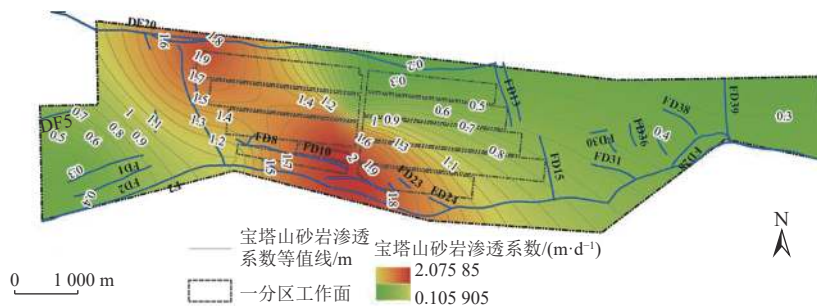


图5 基于抽水试验结果的宝塔山砂岩含水层渗透系数等值线

Fig.5 Contour map of permeability coefficient of Baotashan sandstone aquifer based on pumping test results

区域渗透系数大于南、北部, 主要因为该区域宝塔山砂岩厚度大, 且存在多条张性正断层。

通过放水试验对宝塔山砂岩含水层富水性特征进行了刻画, 井田范围内宝塔山砂岩含水层大部分

区域富水性为中等富水, 西部及南部局部区域为弱富水, 中部靠近 F_2 断层区域及西南小部分区域为强富水, 整体上西部富水性弱于东部, 北部富水性弱于南部, 井田中部富水性优于南、北部(图6)。

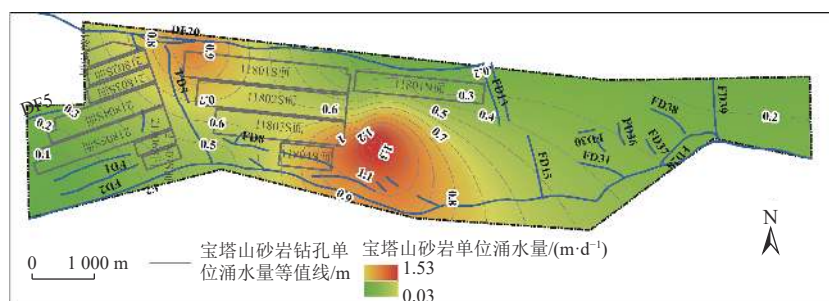


图6 宝塔山砂岩单位涌水量等值线

Fig.6 Contour map of unit water inflow of Baotashan sandstone aquifer

4.1.3 宝塔山砂岩含水层渗流场补给来源

探明矿井含水层间水力联系可以为制定相应的防治水措施提供科学合理的依据。基于群孔放水试验的各观测孔水位曲线(图7)得到宝塔山砂岩含水层渗流场补径排结果。

在进行放水试验后, 可以观测到各含水层水位下降情况。白垩系含水层4个观测孔水位历时变化如图7a-7d所示。第一次放水后, B9观测孔水位出现显著下降; 第二次放水后, B9观测孔水位再次下降, 停止后B9观测孔水位再次回升, 说明B9观测孔水位与放水孔放水呈现出较好的相关性, B9观测孔附近宝塔山砂岩含水层与白垩系含水层具有较好的水力联系, G1孔次之, 其他白垩系长观孔关联性不大。

直罗组含水层4个观测孔水位(图7e-7h)并没有表现出与宝塔山砂岩含水层放水试验明显的关联特性, 但在“11·25”底板突水事故中Z1、Z3、Z10皆出现明显的水位下降, 因此分析可能宝塔山砂岩含水层出现大规模水位下降时, 直罗组含水层补给宝塔山砂岩含水层水力通道才会触发。

煤系含水层各观测孔Z6及Z7孔观测煤系含水

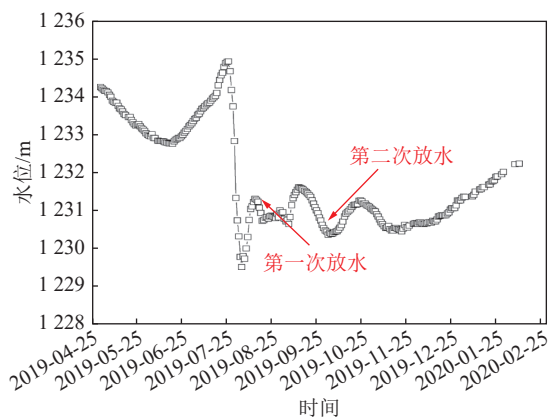
层水位与放水试验具有明显相关性。第一次放水后, Z6和Z7观测孔水位出现显著下降, 当第二次放水试验开始后, Z6和Z7观测孔水位再次下降, 说明Z6和Z7观测孔附近宝塔山砂岩含水层与煤系含水层具有较好的水力联系, 其余煤系含水层观测孔水位受放水试验影响而持续下降。

在放水试验中, 三叠系含水层B36和B39观测孔水位历时变化如图7o-7p所示, 第一次放水试验后, B36和B39观测孔水位出现显著下降, 第二次放水试验后, B36和B39观测孔水位再次下降, 停止放水后, B36和B39观测孔水位再次回升, 说明B36和B39观测孔水位与放水孔放水呈现出较好的相关性。各含水层均有通道补给宝塔山砂岩含水层。

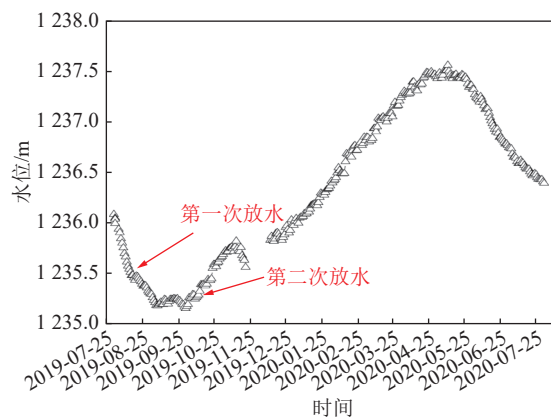
宝塔山砂岩含水层渗透性较好, 富水性较强, 在进行抽水试验时其他含水层对宝塔山砂岩含水层均有一定程度的补给, 且多通过导水断层相互连通。同时, 利用FEFLOW软件的水均衡分析模块对宝塔山砂岩疏放水模拟过程中水均衡进行统计, 对模型各边界补给情况进行计算, 得到主要导水断层的水量补给, 得知FD5断层补给量最大(表2),

FD5断层为矿区南部主要补给通道,需要对FD5

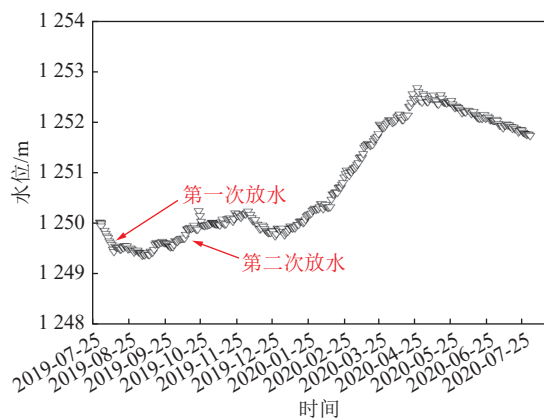
断层进行注浆改造。



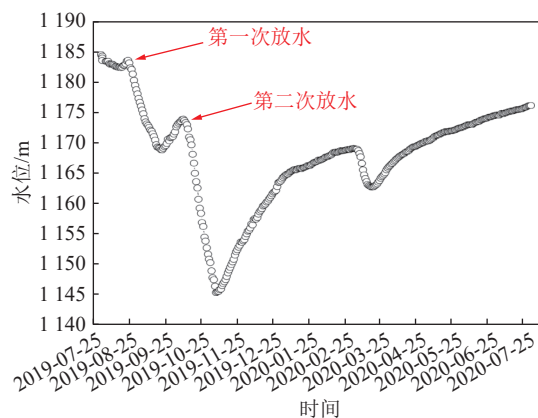
(a) G1 孔



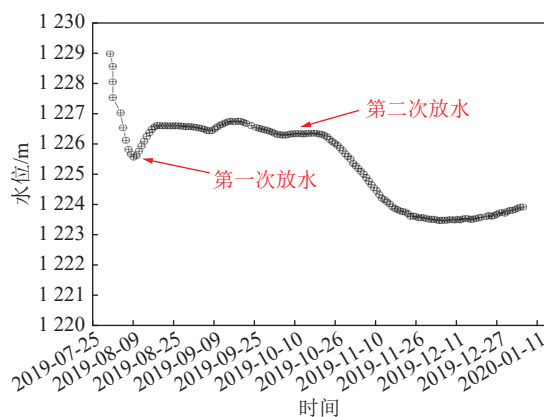
(b) B-3 孔



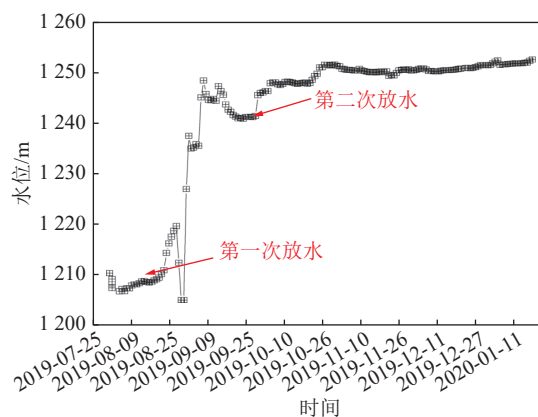
(c) B-5 孔



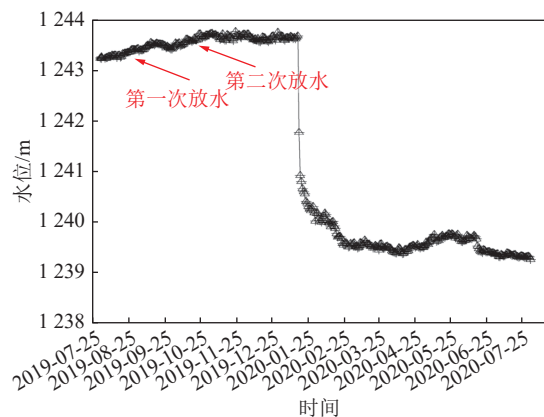
(d) B-9 孔



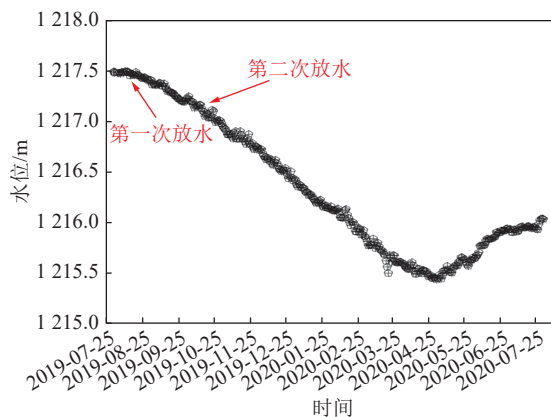
(e) Z1 孔



(f) Z3 孔



(g) Z10 孔



(h) B-40 孔

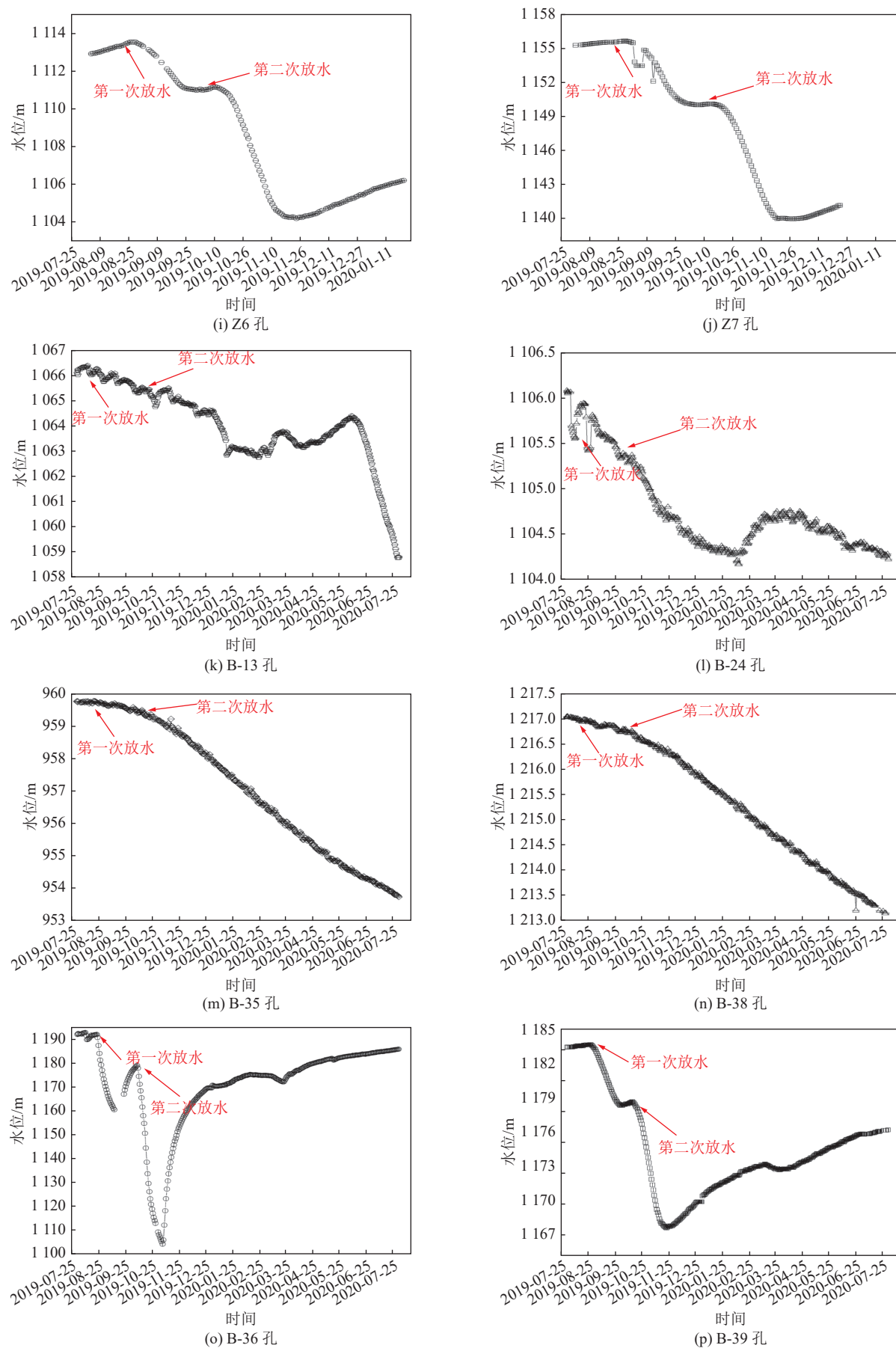


图 7 观测孔水位变化

Fig.7 Observation hole water level changes

表 2 宝塔山砂岩疏放水边界补给量补给统计
Table 2 Boundary water recharge statistics
of Baotashan sandstone drainage water m³/d

疏放水阶段	南部FD5边界	西部DF20边界	东部F2边界
阶段一	7 079	2 176	2 882
阶段二	5 222	1 599	2 397
阶段三	3 039	1 089	1 441

4.2 注浆方案设计

弱胶结软岩因其岩体强度低、胶结差,自承载能力低,对开挖扰动敏感,需要注浆加固^[21-23]。根据矿井规划确定布置 4 个钻场。依据《煤矿防治水细则》对突水系数的规定(突水系数小于 0.06 MPa/m)对宝塔山砂岩含水层进行疏水工作,间接依靠钻孔安全水位观测保证 18 煤安全开采(表 3)。根据放水试验在限制断层边界段选择对 FD5 断层进行注浆改造封堵井田南部宝塔山砂岩含水层的水力补给行为。

表 3 宝塔山砂岩含水层水文长观孔疏降水压及安全水位
Table 3 Hydrology of Baotashan sandstone aquifer long observation hole drainage water pressure and safe water level

序号	钻孔	放水前水位/m	顶板标高/m	水压/MPa	有效隔水层厚度/m	疏降水压 /MPa	安全水位/m
1	B-2	1 203.42	805.55	3.978 7	3.6	3.76	827.15
2	B-4	1 197.99	883.56	3.144 3	5.45	2.81	916.26
3	B-6	1 196.17	742.62	4.535 5	5.2	4.22	773.82
4	B-7	1 198.42	648.35	5.500 7	3.29	5.3	668.09
5	B-12	1 182.35	904.93	2.774 2	10.69	2.13	969.07
6	B-44	1 199.88	700.17	4.997 1	26.87	3.38	861.39
7	B-45	1 196.42	690.02	5.064	29.94	3.26	869.66
8	B-47	1 191.34	652.22	5.391 2	19.3	4.23	768.02
9	直1	1 196.89	732.24	4.646 5	19.97	3.44	852.06

依据 DL/T 0825—2015《矿山帷幕注浆规范》^[24]和 SL31—2003《水利水电工程钻孔压水试验规程》^[25]中透水率的介绍判定对 FD5 断层注浆改造后透水率最大应为 2×10^{-2} m/d。将 FD5 断层渗透系数设计为 2×10^{-2} 、 2×10^{-4} 、 2×10^{-6} 和 2×10^{-8} m/d,探究不同注浆性质对疏水效果的影响。

疏放水方案在对宝塔山砂岩进行疏放过程中分为 3 个阶段:疏放水开始至 1 号钻场退出疏放水工作(第一阶段)、疏放水继续至 3 号钻场退出疏放水工作(第二阶段)、2 号和 4 号钻场持续进行疏放水工作至模型补排平衡(第三阶段)。

4.3 数值模拟

4.3.1 模型建立

在统计矿区内含(隔)水层顶底板标高数据后通过 FEFLOW 建立地下水系统三维数值模型(图 8a)。

4.3.2 边界条件概化

垂向上,将研究区含(隔)水层系统概化为七层结构立体化的水文地质模型(图 8b),第一层白垩系承压含水层,第二层为直罗组上部隔水层,第三层为直罗组承压含水层,第四层为延安组上部隔水层,第五层为煤系含水层,第六层为延安组下部隔水层,第七层为宝塔山砂岩含水层。

水平上,依据抽水试验各区域渗透性和涌水量变化将侧向边界概化:南北两侧定义为导水边界;西部中间区域为弱透水边界,两侧区域主要为导水边界;东部中间区域为导水边界,两侧区域为弱透水边界(图 9)。

4.4 疏水效果

通过数据参数调整和反演得到正确的数值模型后,根据宝塔山含水层疏放条件进行疏放方案模拟。通过沿着断层加密网格以模拟断层注浆改造隔水效果,并对加密的断层赋以设计的注浆帷幕渗透系数,表现不同的注浆改造效果。

1)第一阶段:疏放水开始至 1 号钻场退出疏放

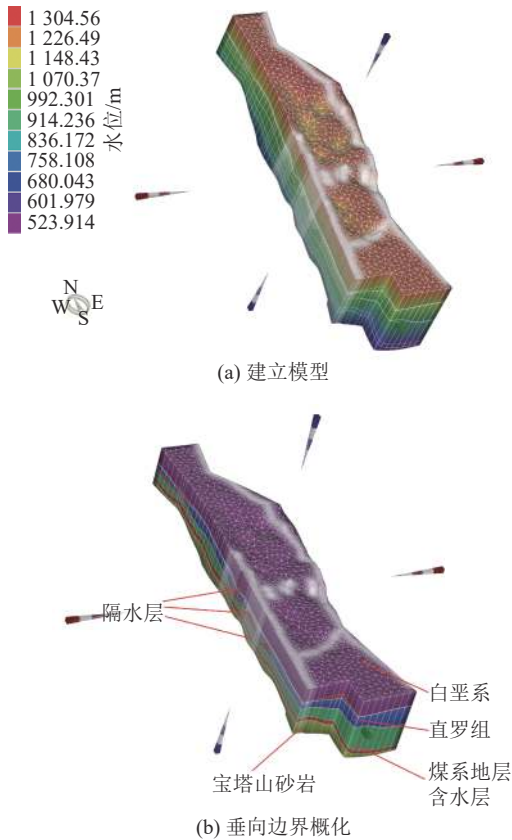


图 8 矿区三维数值模型

Fig.8 Three-dimensional numerical model of the mining area

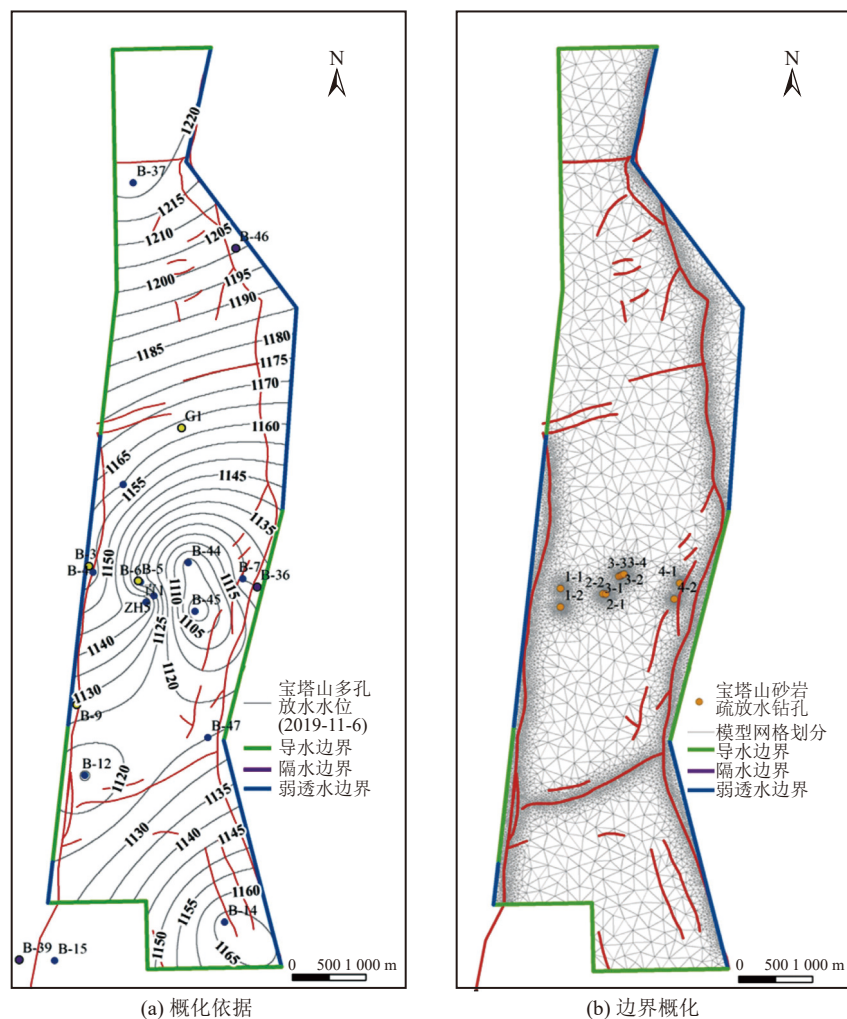


图9 数值模型边界条件概化

Fig.9 Generalization of numerical model boundary conditions

水工作。模型模拟获得了1号钻场退出疏放水工作前各注浆效果宝塔山砂岩含水层流场(图10)。当FD5注浆改造渗透性分别为 2×10^{-2} 、 2×10^{-4} 、 2×10^{-6} 、 2×10^{-8} m/d时,达到安全水位时,1号钻场退出疏放水工作时间分别为70、68、63、63 d,矿区内中心水位分别为950、930、920和920 m。随着注浆效果的逐渐增强,FD5断层南侧含水层水位逐渐增高,表明其补水行为被有效阻隔,且FD5断层两侧水位差持续增大。当FD5注浆改造由渗透性 2×10^{-6} m/d变为 2×10^{-8} m/d时,注浆断层外区域水位变化较小,此时渗透性变化对隔水效果的影响程度不再明显,渗透性为 2×10^{-6} m/d即可满足疏降设计要求。

2)第二阶段:2号、3号和4号钻场持续进行疏放水工作至3号钻场退出。模型模拟获得了3号钻场退出疏放水工作前各注浆效果宝塔山砂岩含水层流场(图11)。当FD5注浆改造渗透性分别为 2×10^{-2} 、 2×10^{-4} 、 2×10^{-6} 、 2×10^{-8} m/d时,第二阶段内达到安全水位时疏放水工作时间分别为44、41、35、

35 d,在第一阶段的基础上,第二阶段疏放水工作进一步使宝塔山砂岩含水层水位降低,矿区中心水位分别为910、910、900和890 m,较第一阶段水位降低20 m。由于此时含水层水位降低,漏斗扩散范围进一步增大,导致补给量增大,因此第二阶段FD5断层南侧含水层对矿区补给作用增强,水位降至约980 m。同第一阶段相类似,当FD5注浆改造渗透性为 2×10^{-6} m/d及 2×10^{-8} m/d时,注浆断层外区域水位变化较小,渗透性为 2×10^{-6} m/d即可达到疏水效果。

3)第三阶段:2号和4号钻场持续进行疏放水工作至模型补排平衡。模型模拟获得了模拟结束时刻各注浆效果宝塔山砂岩含水层流场(图12)。当FD5注浆改造渗透性分别为 2×10^{-2} 、 2×10^{-4} 、 2×10^{-6} 、 2×10^{-8} m/d时,模型补排平衡时间分别为110、106、97、95 d。随着注浆效果的逐渐增强,疏降水达到模型补排平衡时间逐渐减短。宝塔山砂岩含水层疏放中心水位则分别下降为870、850、820、810 m。井田南部区域由于注浆断层的阻隔,宝塔山含水层水位

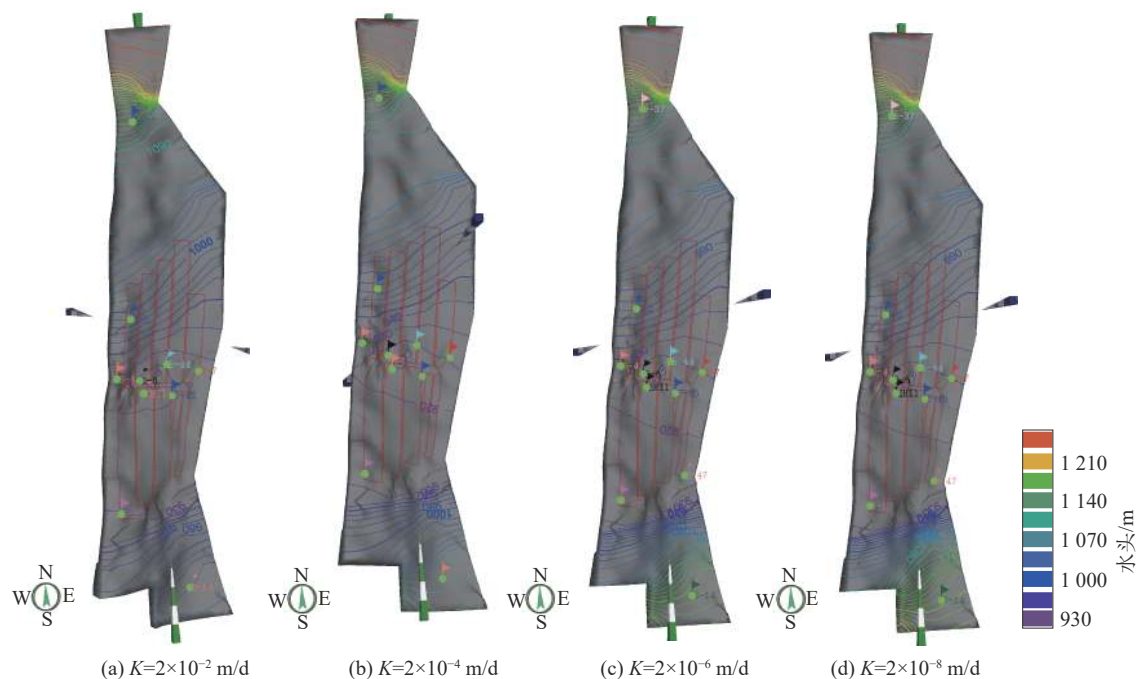


图 10 阶段一疏放水宝塔山含水层流场分布

Fig.10 Flow field distribution of Baotashan aquifer in stage 1 of water drainage

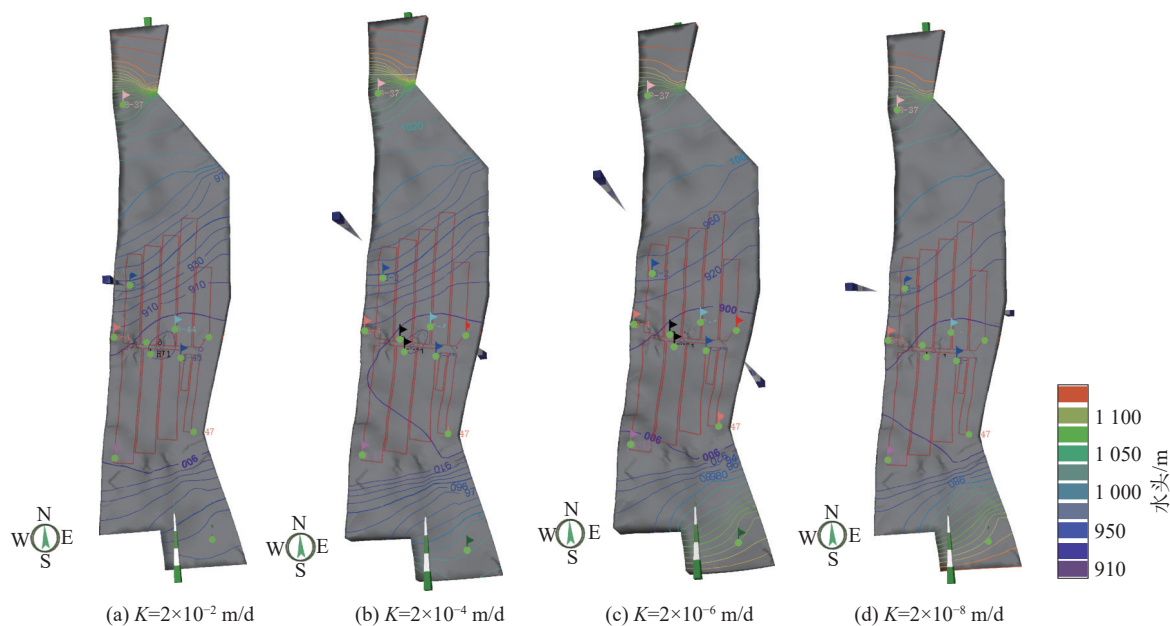


图 11 阶段二疏放水宝塔山含水层流场分布

Fig.11 Flow field distribution of Baotashan aquifer in stage 2 of water drainage

与断层内区域逐渐形成水位差,可有效阻隔 FD5 南部含水层的补给。但当渗透性为 2×10^{-6} m/d 和 2×10^{-8} m/d 时,FD5 南侧含水层水位相似(900 m),此时渗透率减小对矿区南翼含水层的阻隔效果影响较小。

结合矿区水位对模拟效果进行评价(表 4)。当 FD5 注浆改造渗透性为 2×10^{-2} m/d 时,仅有 B-4、B-12 观测孔疏降至安全水位;当 FD5 注浆改造渗透性

为 2×10^{-4} m/d 时,B-4、B-12、B-44、B-45、直 1 孔疏降至安全水位;当 FD5 注浆改造渗透性为 2×10^{-6} m/d 和 2×10^{-8} m/d 时,所有观测孔均降至安全水位,但疏降水位下降幅度较小。当注浆改造渗透性达到 2×10^{-6} m/d 及更小量级时,注浆取得较好效果,可有效阻隔南部区域对工作面的水力补给。

根据宝塔山含水层模拟水位及其距 18 煤有效隔水层厚度计算各注浆效果突水系数分布(图 13)。

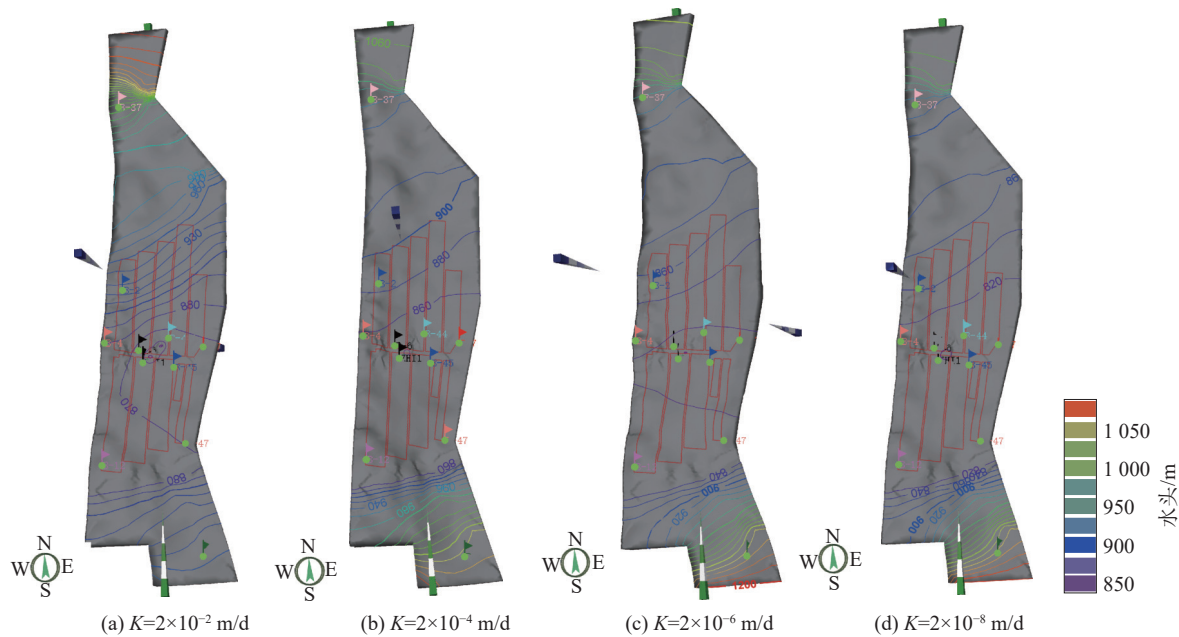


图 12 阶段三末期疏放水宝塔山含水层流场分布

Fig.12 Flow field distribution of Baotashan aquifer in stage 1 of water drainage

表 4 局部限制边界疏降技术模拟水位

Table 4 Simulated water level using local restricted boundary drainage technology

序号	钻孔	放水前水位/m	安全水位/m	模拟水位/m			
				$K=2\times10^{-2}$ m/d	$K=2\times10^{-4}$ m/d	$K=2\times10^{-6}$ m/d	$K=2\times10^{-8}$ m/d
1	B-2	1 203.42	827.15	924.33	885.08	852.73	840.88
2	B-4	1 197.99	916.26	880.21	858.87	823.06	813.56
3	B-6	1 196.17	773.82	866.31	850.4	815.61	805.72
4	B-7	1 198.42	668.09	866.73	849.96	817.02	806.4
5	B-12	1 182.35	969.07	873.69	855.88	825.07	814.38
6	B-44	1 199.88	861.39	865.17	851.89	818.56	808.07
7	B-45	1 196.42	869.66	863.66	849.66	815.99	805.63
8	B-47	1 191.34	768.02	869.02	853.02	820.97	810.67
9	直1	1 196.89	852.06	862.6	847.36	813.11	803.21

相较于未进行断层注浆时的宝塔山砂岩突水危险性分布(图 3),随着渗透性的降低,安全区占矿区的比例分别为 43.34%、52.54%、63.36% 和 67.37%,FD5 断层进行注浆改造后疏放取得较好效果。宝塔山砂岩含水层突水系数小于 0.06 的区域逐渐向东部区域扩展,最终延伸至整个工作区。

对不同注浆效果下疏放水效果进行统计(表 5),随着渗透性的降低,疏放总水量和 FD5 边界补给量逐渐减小,其中渗透性为 2×10^{-6} m/d 和 2×10^{-8} m/d 时疏放水量和边界补给量相差较小。而疏放水总费用需要考虑注浆成本和疏放水费用。其中注浆费用是固定的,制浆注浆费(含水费)、注浆占建设及管汇、压水试验等类别费用是依据现场实际费用所得出(5 055.194 万元),疏放水费用包括井下排水电费 C_1

(3.5 元/ m^3)、水处理费 C_2 (16 元/ m^3)和售水利润 C_3 (1 元/ m^3)。不进行注浆时需要疏水量 Q_1 为 680 m^3/h ,因为仅有 FD5 断层进行了注浆,设定边界的补给量只在 FD5 断层处减少,因此费用计算公式为 $\left(Q_1 - \frac{113.65 - Q_2}{24t}\right) \times 24 \times 365 \times (C_1 + C_2 - C_3) \times 5 + C_4$,其中 Q_2 为注浆边界补给量, t 为排水总时间, C_4 为注浆费用。最终得到计算费用(表 6),考虑到注浆成本和工艺难度,渗透性为 2×10^{-4} m/d 时满足一定的安全性,“断层注浆形成局部限制边界+群孔疏降”方法即可有效阻隔矿区外水量补给,满足矿区水害防控。

4.5 工程实例

在工程现场采用分段下行式、连续与间歇注浆相结合的注浆方式对 FD5 断层进行注浆,通过注

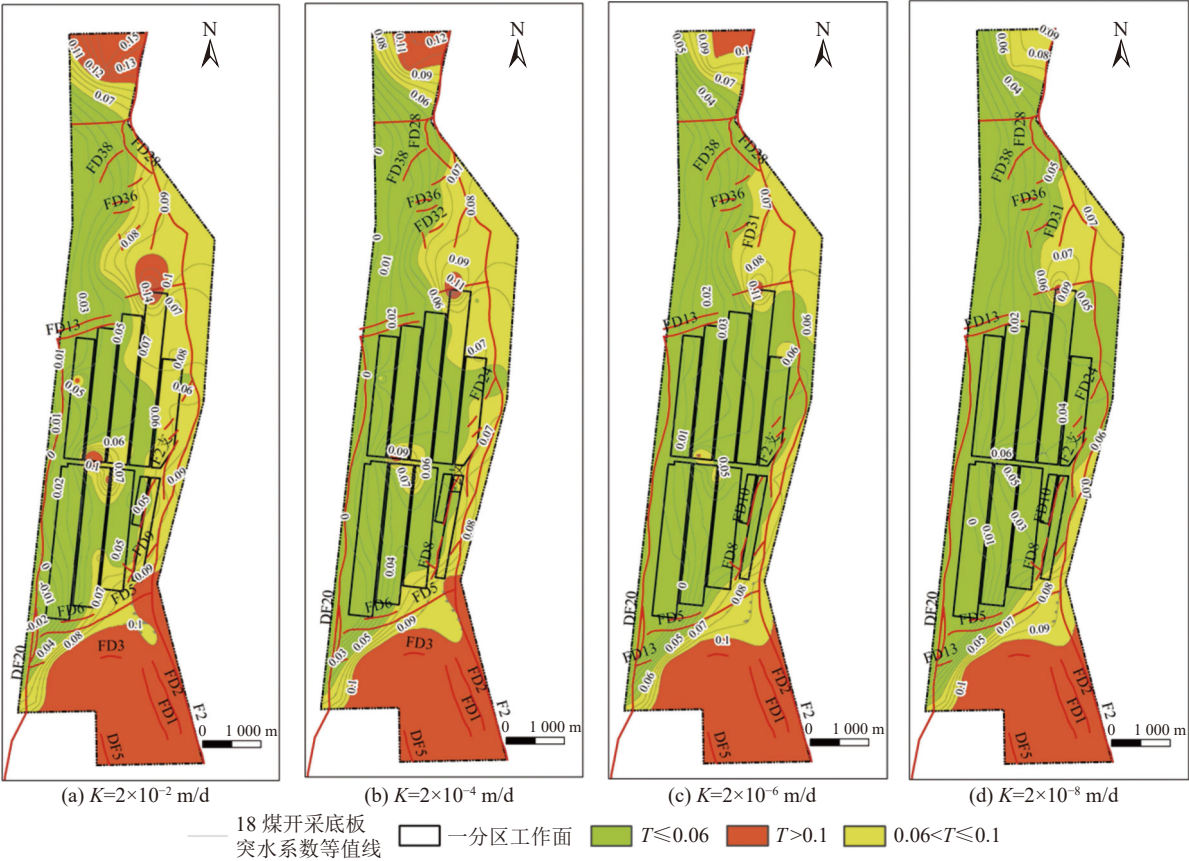


图 13 疏降效果
Fig.13 Drainage effect

表 5 宝塔山砂岩疏放水统计
Table 5 Statistics of drainage of Baotashan Sandstone

FD5注浆量/(m·d ⁻¹)	总疏放水量/10 ⁴ m ³	FD5边界补给量/10 ⁴ m ³
2×10 ⁻²	402	70.15
2×10 ⁻⁴	386	46.35
2×10 ⁻⁶	350.2	4.52
2×10 ⁻⁸	347.8	1.27
无注浆	431.4	113.65

表 6 不同渗透效果下费用计算
Table 6 Cost calculation under different infiltration effects

FD5注浆量/(m·d ⁻¹)	注浆费用/万元	5年疏放水费用/万元	总费用/万元
无	0	55 100.4	55 100.4
2×10 ⁻²	5 055.194	48 618	53 673.19
2×10 ⁻⁴	5 055.194	44 566.5	49 621.69
2×10 ⁻⁶	5 055.194	36 220.5	41 275.69
2×10 ⁻⁸	5 055.194	35 410.1	40 465.29

浆体取心观察注浆质量。观察岩心填充情况发现(图 14),在 FD5 断层中的破碎岩层段,观察到明显的

水泥浆充填,并且通过检查孔检验水泥胶结程度,胶结良好,强度较硬,达到 FD5 断层注浆阻水效果。

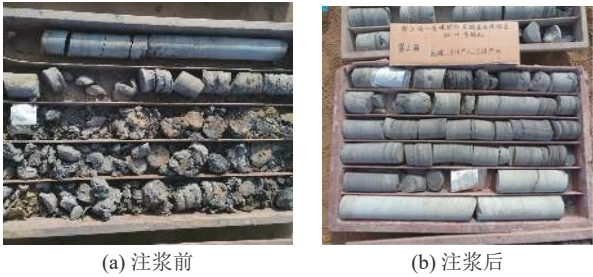


图 14 注浆后岩心情况
Fig.14 Core condition after grouting

5 结 论

1)针对 18 煤底板隔水层属于弱胶结地质软岩,而宝塔山砂岩含水层具有强富水,厚度大,水位恢复快的特点。通过加权模糊 C 均值聚类方法判定井田中东部区域位于突水危险区,易发生底板突水事故。

2)通过群孔放水试验判定其他含水层均对宝塔山砂岩含水层产生水力补给,且断层作为主要导水通道,依据补水特点和隔水层弱胶结属性进行断层

注浆, 限制局部边界水力补给。

3) 结合注浆工艺难度和经济成本, 渗透系数为 2×10^{-4} m/d 时满足一定的安全性。断层注浆形成局部限制边界+群孔疏降技术即可有效阻隔矿区外水量补给。矿区安全区范围随渗透性较低而增大, 最高可达 67.37%, 有效防控宝塔山砂岩水害。

参考文献(References):

- [1] 卞正富, 雷少刚. 新疆煤炭资源开发的环境效应与保护策略研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 43-51.
BIAN Zhengfu, LEI Shaogang. Green exploitation of coal resources and its environmental effects and protecting strategy in Xinjiang[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 43-51.
- [2] 李德彬. 侏罗系煤田宝塔山砂岩含水层疏放水可行性研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 92-96.
LI Debin. Study on the feasibility of water drainage for the baotashan sandstone aquifer in Jurassic coal field[J]. Coal Engineering, 2019, 51(2): 92-96.
- [3] 吕玉广, 肖庆华, 程久龙. 弱富水软岩水-沙混合型突水机制与防治技术: 以上海庙矿区为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3154-3163.
LYU Yuguang, XIAO Qinghua, CHENG Jiulong. Mechanism and prevention of water-sand inrush in soft rock with weakly abundant water: a case study in Shanghai temple mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 3154-3163.
- [4] 吕玉广, 刘宝开, 赵宝峰, 等. 侏罗系宝塔山砂岩水文地质特征与解危开采研究——以新上海一号煤矿为例[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 170-178.
LYU Yuguang, LIU Baokai, ZHAO Baofeng, et al. Hydrogeological characteristics and danger-solving mining of Jurassic Baotashan sandstone—a case study in new shanghai No. 1 coal mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2020, 48(6): 170-178.
- [5] 张党育, 蒋勤明, 高春芳, 等. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 31-36.
ZHANG Dangyu, JIANG Qinming, GAO Chunfang, et al. Study progress on key technologies for regional treatment of Karst water damage control in the floor of North China Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 31-36.
- [6] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 28-47.
LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, et al. Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 50(1): 28-47.
- [7] 孟强强. 宝塔山砂岩水文地质特征及突水危险性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
MENG Qiangqiang. Study on hydrogeological characteristics and water inrush risk of baotashan sandstone[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [8] 管彦太, 乔 伟. 宝塔山砂岩含水层水文地质特征及突水危险性研究[J]. 煤炭科技, 2021, 42(5): 63-69.
GUAN Yantai, QIAO Wei. Study on hydrogeological characteristics and water inrush risk of baotashan sandstone aquifer[J]. Coal Science and Technology magazine, 2021, 42(5): 63-69.
- [9] 董书宁, 姬亚东, 王 皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [10] 高振宇, 何 渊, 任建刚, 等. 布尔台矿 42201 工作面底板砂岩承压水防治技术[J]. 煤矿安全, 2017, 48(S1): 43-47.
GAO Zhenyu, HE Yuan, REN Jiangang, et al. Prevention and control technique for confined water of floor sandstone at 42201 workong of buertai coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(S1): 43-47.
- [11] 孙文斌, 杨 辉, 赵金海, 等. 断层突水灾变演化过程划分基础试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 118-128.
SUN Wenbin, YANG Hui, ZHAO Jinhai, et al. Basic experimental research on the delineation of the evolutionary process of fault water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 118-128.
- [12] 郭国强. 矿井带压开采疏水降压可行性模拟分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(5): 125-128.
GUO Guoqiang. Simulation analysis on feasibility of water pumping and water table dropping for pressurized water mining in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(5): 125-128.
- [13] 王新军, 潘国营, 翟加文. 井下疏水降压防治水措施的适宜性分析[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 108-111.
WANG Xinjun, PAN Guoying, ZHAI Jiawen. Analysis on suitability of water prevention and control measures with water pumping and pressure and pressure releasing in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 108-111.
- [14] 赵春虎, 董书宁, 王 皓, 等. 采煤工作面顶板含水层井下疏水钻孔涌水规律数值分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 405-414.
ZHAO Chunhu, DONG Shuning, WANG Hao, et al. Analysis of water inrush from boreholes for drainage of confined aquifer by upward boreholes in underground coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 405-414.
- [15] YANG K, HE X, DOU L, et al. Experimental investigation into stress-relief characteristics with upward large height and upward mining under hard thick roof[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2015, 2: 91-96.
- [16] SUN L, WU H, YANG B, et al. Support failure of a high-stress soft-rock roadway in deep coal mine and the equalized yielding support technology: a case study[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2015, 2: 279-286.
- [17] 熊欣标, 谢雄刚, 杨培君, 等. 基于 PCA-Logistic 回归模型的矿井底板突水危险性研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(10): 176-181.
XIONG Xinbiao, XIE Xiongqiang, YANG Peijun, et al. Research on water inrush risk of mine floor based on PCA-Logistic regression model[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(10): 176-181.
- [18] 许延春, 马子民, 李小二, 等. 基岩风化带性质对顶板突水溃砂

- 的影响研究:以赵固一矿为例[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 64-71.
- XU Yanchun, MA Zimin, LI Xiaoe, *et al.* Research on the influence of the nature of the weathered bedrock zone on the roof water bursting and sand bursting: taking Zhaogu No. 1 Mine as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 64-71.
- [19] 帅 勇, 宋太亮, 王建平, 等. 改进的模糊时间序列模型论域划分算法[J]. *计算机工程与设计*, 2017, 38(2): 379-383, 394.
- SHUAI Yong, SONG Tailiang, WANG Jianping, *et al.* Modified fuzzy time series model interval partitioning algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2017, 38(2): 379-383, 394.
- [20] 钱镇骧. 基于特征加权的FCM聚类与PSO算法结合的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- QIAN Zhenrang. Application of integrative algorithm of feature weighted FCM clustering and PSO algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [21] 刘书杰, 谢作栋, 张基伟, 等. 弱胶结砂砾层水平注浆细观模拟研究[J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(2): 46-51.
- LIU Shujie, XIE Zuodong, ZHANG Jiwei, *et al.* Mesoscopic simulation of horizontal grouting in weakly cemented sand gravel layer[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2023, 50(2): 46-51.
- [22] 庞建勇, 姚韦靖. 松散富水砂卵石层注浆模拟试验及其工程应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(4): 1156-1163.
- PANG Jianyong, YAO Weijing. Grouting simulation test in sandy gravels with loose and water-rich and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(4): 1156-1163.
- [23] 高岗荣. 煤矿注浆技术综述[J]. *建井技术*, 2020, 41(5): 1-9, 23.
- GAO gangrong. Review on grouting technology of coal mine[J]. *Mine Construction technology*, 2020, 41(5): 1-9, 23.
- [24] DZ/T 0285-2015, 矿山帷幕注浆规范[S].
- [25] SL 31-2003, 水利水电工程钻孔压水试验规程[S].