

疏降条件下宝塔山砂岩含水层突水风险性评价及排水系统能力校核

苏杰*, 吕玉广

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年4月3日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

新上海一号煤矿18煤底板宝塔山砂岩含水层厚度大、水压高, 对煤层安全回采构成严重威胁。为评价疏降条件下底板突水危险性并优选疏放水方案, 以18煤一分区及首采工作面为研究对象, 设计了四种疏放水方案, 采用数值模拟方法分析各方案下水位降深规律、突水系数演化特征, 并利用大井法预测涌水量, 同时结合矿井现有排水系统进行能力复核。结果表明: 原始条件下宝塔山砂岩含水层平均突水系数为0.08 MPa/m, 超过安全临界值0.06 MPa/m; 随着疏放钻孔数量增加, 水位降深逐步增大, 突水系数小于0.06 MPa/m的安全区域范围不断扩大; 四号方案效果最优, 但二号方案在保证安全的前提下疏放水量较小、对排水系统压力相对适中。涌水量预测显示, 二号方案下矿井正常涌水量增至765 m³/h, 最大涌水量859.64 m³/h; 现有排水系统中水仓容量及水泵正常排水能力不满足要求, 需进行改扩建。综合考虑安全性与经济性, 建议优先采用二号方案, 并配套实施水仓扩容改造。研究成果可为类似水文地质条件下的深部煤层底板水害防治提供技术参考。

关键词

宝塔山砂岩含水层, 底板突水, 疏水降压, 突水系数, 涌水量预测

Evaluation of Water Inrush Risk in Baotashan Sandstone Aquifer under Drainage Conditions and Check of Drainage System Capacity

Jie Su*, Yuguang Lyu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: April 3, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 29, 2026

*第一作者。

Abstract

The Baotashan Sandstone Aquifer underlying the No. 18 coal seam in the Xinshanghai No. 1 Coal Mine is characterized by large thickness and high water pressure, posing a serious threat to safe coal mining. To evaluate the risk of floor water inrush under depressurization conditions and to optimize the water drainage scheme, the first mining district of the No. 18 coal seam and its initial working face were taken as the research objects. Four drainage schemes were designed. Numerical simulation was adopted to analyze the drawdown patterns and evolution characteristics of the water inrush coefficient under each scheme, and the big well method was used to predict the water inflow. Meanwhile, the capacity of the existing mine drainage system was re-evaluated. The results show that under natural conditions, the average water inrush coefficient of the Baotashan Sandstone Aquifer is 0.08 MPa/m, exceeding the safety threshold of 0.06 MPa/m. With an increasing number of drainage boreholes, the drawdown gradually increases, and the safe area where the water inrush coefficient is below 0.06 MPa/m expands continuously. Scheme 4 achieves the best depressurization effect, but Scheme 2 has a relatively smaller drainage volume while ensuring safety, imposing moderate pressure on the drainage system. The water inflow prediction indicates that under Scheme 2, the normal mine water inflow increases to 765 m³/h, and the maximum water inflow reaches 859.64 m³/h. The existing drainage system does not meet the requirements in terms of sump capacity and normal pumping capacity, necessitating expansion and renovation. Considering both safety and economy, Scheme 2 is recommended as the priority, together with the implementation of sump capacity expansion. The research results can provide technical reference for the prevention and control of floor water hazards in deep coal seams under similar hydrogeological conditions.

Keywords

Baotashan Sandstone Aquifer, Floor Water Inrush, Depressurization by Drainage, Water Inrush Coefficient, Water Inflow Prediction.

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是世界第一产煤大国, 煤炭产量约占世界 50%, 2020 年煤炭占我国一次能源生产和消费的比重达到 56.8%, 作为我国的主体能源, 煤炭的地位短时间内难以改变[1]。但是中国煤炭资源的地理分布极不平衡, 北多南少, 西多东少。各地煤炭的埋藏深度不一, 适合露天开采的储量少。露天开采效率高、投资省、建设周期短, 但中国适合露天开采的煤炭储量少, 仅占总储量的 7%左右, 埋藏越深, 煤矿井下的水文地质等条件越复杂, 煤矿开采的危险性越高[2]。随着浅部煤炭资源的日益枯竭, 许多矿井已转入深部开采, 随之而来的矿井水害, 特别是煤层底板承压水突水问题, 日益成为威胁煤矿安全生产最严重的灾害之一。

针对底板突水危险性评价的研究, 我国学者做了大量的试验和研究, 提出了很多理论和方法, 如突水系数法[3]-[6]、脆弱性指数法[7]-[10]、尖点突变模型预测法[11]-[13]、突水概率指数法[14]、“突水系数-单位涌水量法”[15]、神经网络预测法[16]等。我国西部矿区侏罗系煤田可采煤层层数多、资源储量丰富。随着开采深度不断加大, 赋存于煤系地层延安组底部的宝塔山砂岩含水层, 因其厚度大、水压高、弹性释水能力强, 对深部煤层开采安全形成严重威胁。

新上海一号煤矿一分区 21 煤以宝塔山砂岩为直接底板, 位于 21 煤底板以下 0~29.55 m, 是延安组底

部重要标志层。宝塔山砂岩含水层为 8 煤、15 煤、16 煤、19 煤、20 煤和 21 煤的底板充水含水层。新上海一号煤矿 2015 年 11 月的宝塔山砂岩涌突水事故平均出水流量约 3600 m³/h, 最终造成淹井。18 煤为主要可采煤层, 全区连续分布、厚度稳定, 为 15 煤开采后的主采煤层。前期资料显示, 18 煤底板宝塔山砂岩水突水系数为 0.043~0.21 MPa/m, 宝塔山砂岩对 18 煤安全回采具有威胁, 所以有必要对宝塔山砂岩含水层疏降条件下的突水危险性开展进一步分析。本文以 18 煤一分区及首采工作面为研究对象, 针对宝塔山砂岩含水层开展多方案疏放水对比研究, 分析水位疏降规律、突水系数演化及涌水量特征, 最终提出最优疏水降压工程方案, 为矿井防治水决策提供科学依据。

2. 矿井地质

新上海一号煤矿位于内蒙古自治区鄂托克前旗境内, 东距内蒙古自治区鄂托克前旗约 74 km, 西距宁夏回族自治区银川市 48 km, 行政区划属鄂托克前旗上海庙镇管辖。井田呈南北条带状展布, 井田南北长约 12.5 km, 东西宽 2.0~3.5 km, 井田面积 26.6043 km²。本区位于毛乌素沙漠西北边缘, 地形北高南低、东高西低, 呈缓波状起伏, 井田内多为沙丘、低缓丘陵、草滩戈壁, 海拔高度 1298~1325 m, 相对高差约 27 m。井田原始地貌单元为宁夏陶灵盐台地缓坡丘陵区, 属构造剥蚀、侵蚀堆积地貌单元。井田内钻孔揭露地层主要有: 三叠系延长组(T3y); 侏罗系延安组(J2y)、侏罗系直罗组(J2z); 白垩系志丹群(K1zd); 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; 三叠系延长群为侏罗系含煤岩系的基底(详见图 1)。

3. 矿井排水系统及能力校验

对研究区地质条件及含煤地层特征的详细分析表明, 宝塔山砂岩含水层作为 18 煤直接底板, 其高水压、厚层位的特征对煤层安全开采构成显著威胁。因此, 在开展疏放水方案设计与突水危险性评价之前, 有必要对矿井现有排水系统进行系统梳理与能力校验, 以明确矿井排水能力的实际承载上限, 为后续疏放水方案的可行性分析及涌水量预测提供基础支撑。本章将从水仓、水泵、排水管路三个方面介绍矿井排水系统配置, 并依据《煤矿防治水细则》¹对排水能力进行校验。

3.1. 排水系统

1) 水仓

矿井主水仓容积 4588 m³, 由两部分组成, 其中水仓外环容积 2988 m³, 内环容积 1600 m³。井下生产水、涌水都汇流至内、外环水仓内, 根据此前矿井报告数据计算矿井正常涌水量为 182 m³/h, 满足矿井井下 8 h 的涌水量。中央泵房 2011 年 11 月 12 日投入运行, 并于 2019 年 5 月 10 日完成四台高效泵更换工作, 形成永久排水系统; 2019 年 9 月 25 日, 经过安全检查系统排水能力为 1670.8 m³/h。

2) 水泵

主排水泵设备选用 MDA500-85×6E 型耐磨矿用排水泵四台, MDA500-57×9 型耐磨矿用排水泵一台, 卧式结构, 流量 450~550 m³/h, 扬程 540~600 m, 效率 79%~80%。每台水泵配 YB710M1-1250kW/10kV 型隔爆电动机一台, 功率 1250 kW, 额定电压 10 kV, 转速 1500 r/min, 效率 96%。

另外, 中央外环水仓内选用安装 BQ500-520/6-1000/W-S 隔爆型潜水强排泵两台, 并沿主井井筒敷设两趟 MYPTJ3 × 95 mm³ 高压电缆, 水泵排水管已接入矿井强排管路内, 可以实现在地面启停。

3) 排水管路

中央主排水管路选用 Φ325 × 12 mm 无缝钢管两趟, 沿副井井筒敷设, 作为矿井的工作和备用排水管

¹https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5448431.htm

路; 另选用 $\Phi 325 \times 12$ mm 无缝钢管两趟, 沿主井井筒敷设, 作为矿井的两趟强排管路。

矿井地质及水文地质综合柱状图

1:500

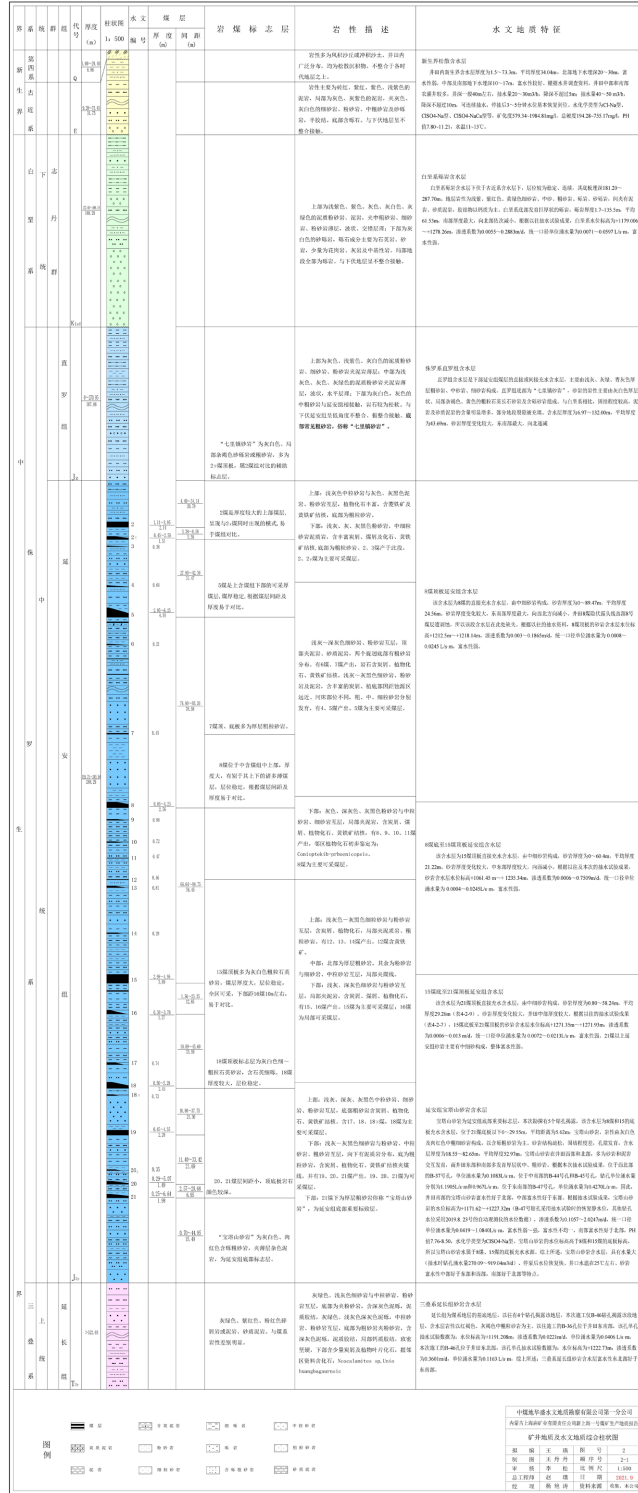


Figure 1. Comprehensive column chart of new shanghai No.1 coal mine minefield
图 1. 新上海一号煤矿井田综合柱状图

3.2. 排水能力

1) 水泵能力

矿井排水设备能力确定：矿井主排水泵房排水设施正常排水能力为 $500 \times 79\% \times 2 = 790 \text{ m}^3/\text{h}$ ，最大排水能力为 $500 \times 79\% \times 3 = 1185 \text{ m}^3/\text{h}$ 。据本次采用地下水动力学法预测矿井涌水量，矿井正常涌水量为 $182 \text{ m}^3/\text{h}$ ，最大矿井涌水量 $276.64 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

根据《煤矿防治水细则》第 106 条要求，“工作水泵的能力应当能在 20 h 内排出矿井 24 h 的正常涌水量。备用水泵的能力应当不小于工作水泵能力的 70%，工作和备用水泵的总能力应当能在 20 h 内排出矿井 24 h 的最大涌水量，检修泵的能力应当不小于工作水泵能力的 25%。”

① 正常涌水时，两台泵工作，20 小时排水量为： $790 \times 20 = 15,800 \text{ m}^3$ ，其大于正常涌水时，24 小时的涌水量： $182 \times 24 = 4368 \text{ m}^3$ 。

② 最大涌水时，三台泵工作，20 小时的排水量为： $1185 \times 20 = 23,700 \text{ m}^3$ ，其大于最大涌水时，24 小时的涌水量： $276.64 \times 24 = 6639.36 \text{ m}^3$ 。

因此，水泵 20 小时的正常和最大排水能力均超过 24 小时的正常和最大涌水量，符合规程要求。

2) 水仓容量检验

根据《煤矿防治水细则》108 条中“新建、改建矿井或者生产的新水平，正常涌水量在 $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下时，主要水仓的有效容量应当能容纳 8 h 的正常涌水量”的要求，水仓容量 $Q = 4588 \text{ m}^3 > 8 \text{ h}$ 的正常涌水量 $8 \times 182 = 1456 \text{ m}^3$ 。符合《煤矿防治水细则》的要求。

3) 排水管路校验

根据《煤矿防治水细则》中“工作水管的能力，应当能配合工作水泵在 20 h 内排出矿井 24 h 的正常涌水量。工作和备用水管的总能力，应当配合工作和备用水泵在 20 h 内排出矿井 24 h 的最大涌水量”的要求，对矿方排水管路能力进行校验。

工作管管径为 325 mm，计算主排水管内径截面积为 0.083 m^2 ，排水速度设计一般为 2 m/s ，经计算工作水管排水能力为 $0.083 \times 2 \times 3600 = 597.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。正常涌水量时两台水泵工作，20 h 的排水量 $Q = 597.6 \text{ m}^3/\text{h} \times 20 \text{ h} \times 2 = 23,904 \text{ m}^3 > 24 \text{ h}$ 正常涌水量 $182 \times 24 = 4368 \text{ m}^3$ 。满足要求。

工作水管和备用水管排水能力为 $597.6 \text{ m}^3/\text{h} \times 3 = 1792.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ，20 h 的排水量 $Q = 1792.8 \text{ m}^3/\text{h} \times 20 \text{ h} = 35,856 \text{ m}^3 > 24 \text{ h}$ 最大涌水量 $276.64 \times 24 = 6639.36 \text{ m}^3$ 。满足要求。

4. 疏降条件下宝塔山砂岩含水层突水危险性及其涌水量预计

4.1. 18 煤开采宝塔山砂岩含水层疏降条件下突水系数

针对宝塔山砂岩含水层疏放水工程，共设置了 4 种方案：1#钻场疏放水(简称“一号方案”)、1#+2#钻场疏放水(简称“二号方案”)、1#+2#+3#钻场疏放水(简称“三号方案”)、1#+2#+3#+4#钻场疏放水(简称“四号方案”)。

1) 1#钻场疏放水方案

在前期的煤田勘探及放水试验工作中，18 煤工作面群疏放水区域附近已有 4 个放水试验钻孔，把此区域作为 1#钻场，按照放水试验后期每个钻孔疏放水量的平均值($2000 \text{ m}^3/\text{d}$)进行放水，“一号方案”疏降宝塔山砂岩含水层水位分布见图 2。

从空间疏放水分布规律来讲，一分区西北部、西南部地下水位下降较快，而中部和东部区域则下降幅度有限(各钻孔点位的降深见表 1)，下降速率规律则为：西北部 > 西南部 > 中部 > 东部 > 东北部 > 东南部。“一号方案”疏降条件下，疏放时间约为 145d，整个渗流场就趋于稳定，水位不再下降。“一

号方案”疏降条件下的突水系数分布见图3。“一号方案”疏降条件下,突水系数小于0.06 MPa/m的范围大幅度增加,尤其是首采工作面(121,183面)绝大部分区域的突水系数均小于0.06 MPa/m。

Table 1. Statistical data on water level reduction depth of drilling boreholes in lower Baotashan sandstone aquifer under “Plan No.1” dewatering operation

表 1. “一号方案”疏降下宝塔山砂岩含水层钻孔水位降深统计

序号	钻孔	水位降深(m)	序号	钻孔	水位降深(m)
1	1302	78.4	13	1804	139.6
2	1402	92.2	14	1901	115.9
3	1403	90.1	15	1902	126.6
4	1502	100.0	16	1904	122.8
5	1504	100.8	17	B4	114.4
6	1602	106.6	18	B6	131.9
7	S1	109.2	19	B44	138.3
8	1604	112.4	20	B7	116.1
9	1702	118.6	21	B45	131.9
10	1704	123.8	22	B12	80.6
11	1803	116.0	23	B47	87.6
12	1801	119.7	降深平均值		111.89

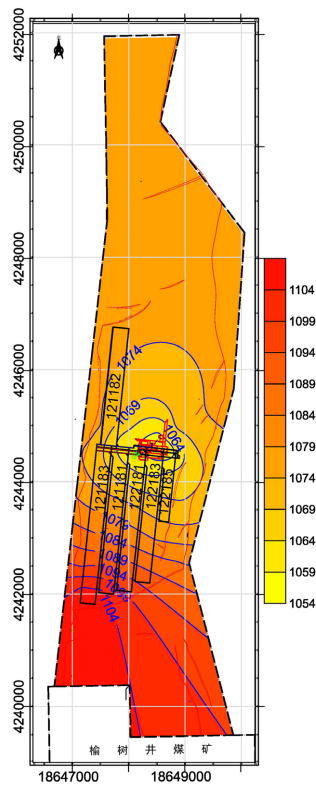


Figure 2. Water level distribution map of No.1 plan's Baotashan sandstone aquifer
图 2. “一号方案”宝塔山砂岩含水层水位分布图

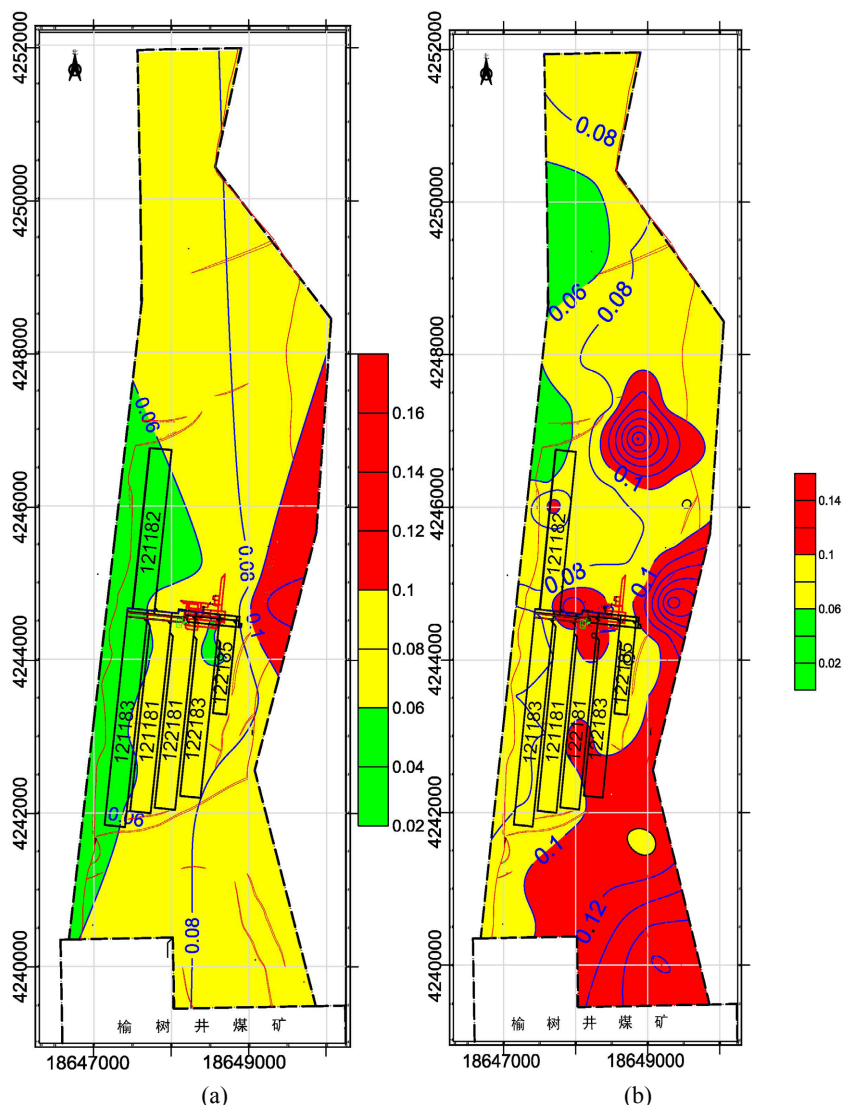


Figure 3. Water inrush coefficient of No.1 Plan 18 coal Baotashan sandstone aquifer; (a) Bursting coefficient of “Plan No.1”; (b) Natural state water inrush coefficient

图 3. “一号方案” 18 煤宝塔山砂岩含水层突水系数; (a) “一号方案” 突水系数; (b) 天然状态突水系数

2) 1#+2#钻场同时疏放水方案

“二号方案”是在“一号方案”的基础上，在 2#钻场增加 2 个疏放水钻孔，单孔疏放水量为 3000 m³/d，“二号方案”疏降宝塔山砂岩含水层水位分布见图 4。“二号方案”疏降条件下，疏放时间约为 176 d，整个渗流场将趋于稳定，水位不再下降，各钻孔点位的降深见表 2。“二号方案”疏降条件下的突水系数分布见图 5。“二号方案”疏降条件下，突水系数小于 0.06 MPa/m 的范围大幅度增加，前期规划布置的 121183、121181、121182、122181、122183、122185 这 6 个工作面绝大部分区域的突水系数均小于 0.06 MPa/m。

Table 2. Statistical data on water level reduction depth of drilling boreholes in lower Baotashan sandstone aquifer under “Plan No.2” dewatering scheme

表 2. “二号方案” 疏降下宝塔山砂岩含水层钻孔水位降深统计

序号	钻孔	水位降深(m)	序号	钻孔	水位降深(m)
1	1302	113.4	13	1804	144.6

续表

2	1402	132.2	14	1901	187.9
3	1403	132.1	15	1902	183.6
4	1502	146.0	16	1904	166.8
5	1504	143.8	17	B4	204.4
6	1602	154.6	18	B6	191.9
7	S1	157.2	19	B44	183.3
8	1604	157.4	20	B7	168.1
9	1702	171.6	21	B45	179.9
10	1704	170.8	22	B12	116.6
11	1803	209.0	23	B47	129.6
12	1801	219.7	降深平均值		163.67

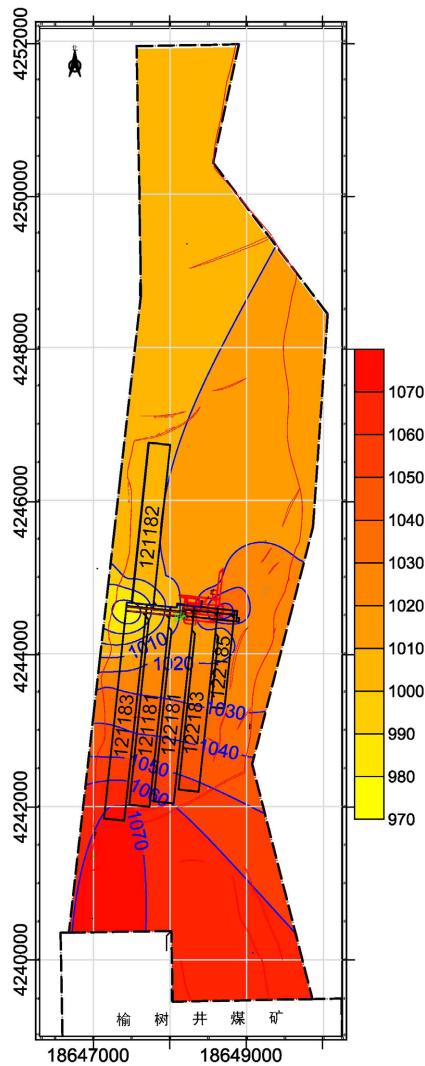


Figure 4. Water level distribution map of the No.2 plan's Baotashan sandstone aquifer
图 4. “二号方案”宝塔山砂岩含水层水位分布图

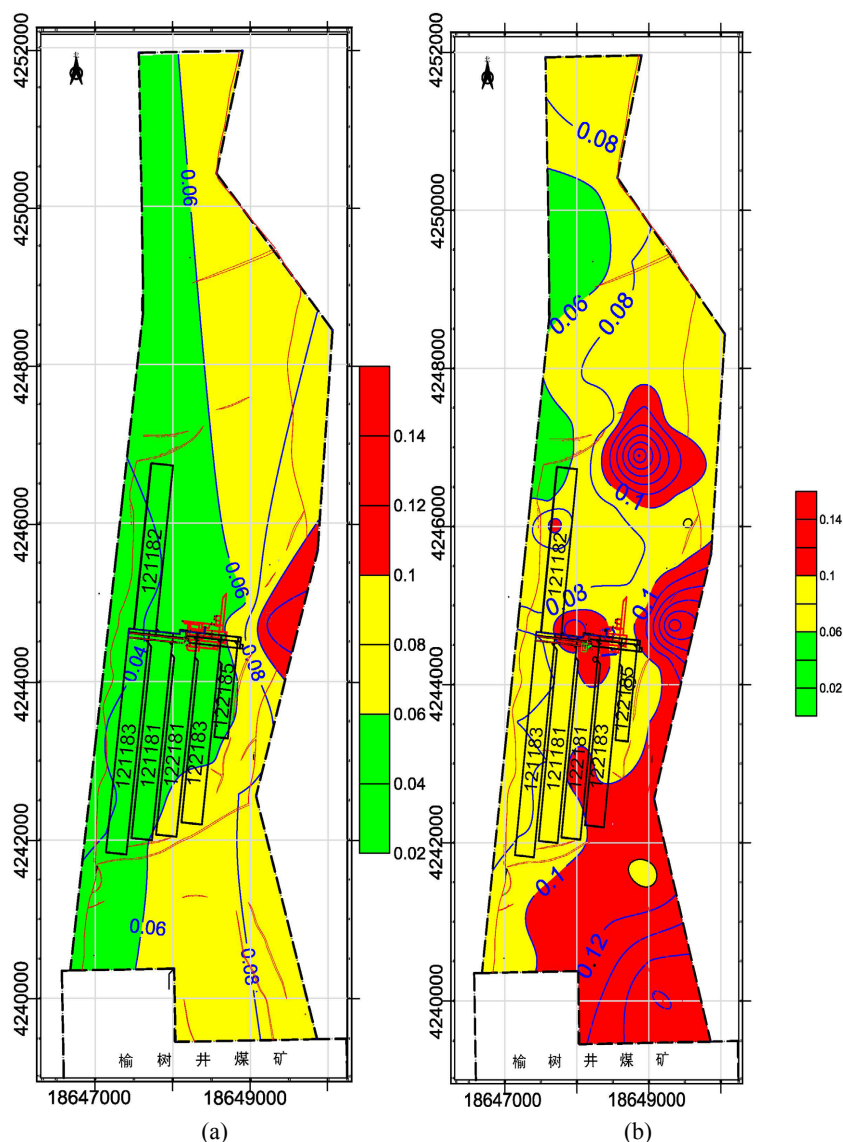


Figure 5. Water inrush coefficient of No.18 coal Baotashan sandstone aquifer under “Plan No.2”; (a) Bursting coefficient of “Plan No.2”; (b) Bursting coefficient in natural state

图 5. “二号方案” 18 煤宝塔山砂岩含水层突水系数; (a) “二号方案” 突水系数; (b) 天然状态突水系数

3) 1#+2#+3#钻场疏放水方案

“三号方案”是在“二号方案”的基础上,在3#钻场增加2个疏放水钻孔,单孔疏放水量为3000 m³/d。该钻场的开孔标高较低(+775 m),水量、水压均较大,如3个钻场采用同时放水时,该钻场的疏放水钻孔疏放水量很大,对矿井排水系统造成较大压力,故该方案设计为:首先1#和2#钻场进行疏放水,当宝塔山砂岩含水层水位下降到2#钻场的开孔标高后(+913 m),再进行3#钻场的疏放水。“三号方案”疏降宝塔山砂岩含水层水位分布见图6,各钻孔点位的降深见表3。

“三号方案”疏降条件下,疏放时间约为203d,整个渗流场将趋于稳定,水位不再下降。“三号方案”疏降条件下的突水系数分布见图7。“三号方案”疏降条件下,突水系数小于0.06 MPa/m的范围大幅度增加,前期规划布置的121183、121181、121182、122181、122183、122185这6个工作面突水系数均小于0.06 MPa/m。

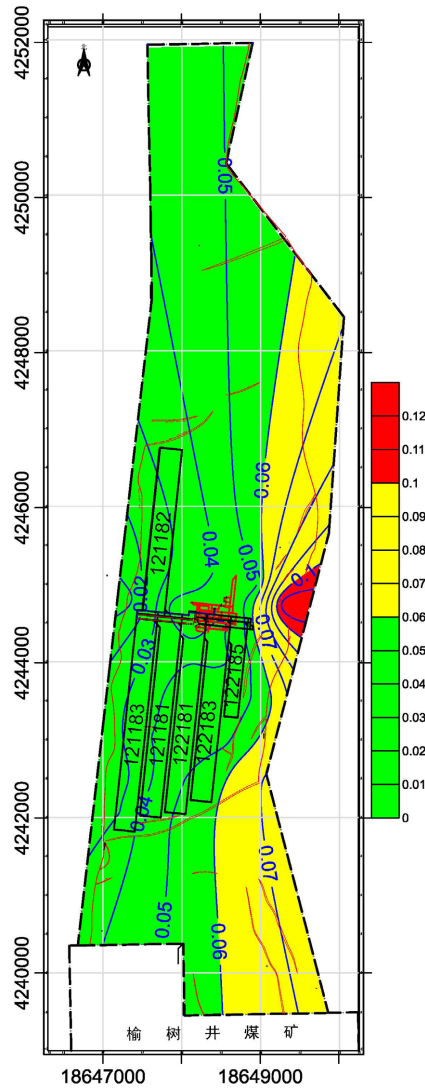


Figure 6. Water level distribution map of sandstone aquifer in Baotashan under “Plan No.3”
图 6. “三号方案” 宝塔山砂岩含水层水位分布图

Table 3. Statistical data on water level reduction depth of drilling boreholes in lower Baotashan sandstone aquifer under “Plan No.3” dewatering scheme

表 3. “三号方案” 疏降下宝塔山砂岩含水层钻孔水位降深统计

序号	钻孔	水位降深(m)	序号	钻孔	水位降深(m)
1	1302	163.4	13	1804	254.6
2	1402	187.2	14	1901	245.9
3	1403	190.1	15	1902	250.6
4	1502	207.0	16	1904	239.8
5	1504	210.8	17	B4	289.4
6	1602	217.6	18	B6	261.9
7	S1	223.2	19	B44	252.3
8	1604	225.4	20	B7	220.1

续表

9	1702	241.6	21	B45	250.9
10	1704	241.8	22	B12	165.6
11	1803	259.0	23	B47	191.6
12	1801	269.7	降深平均值		228.67

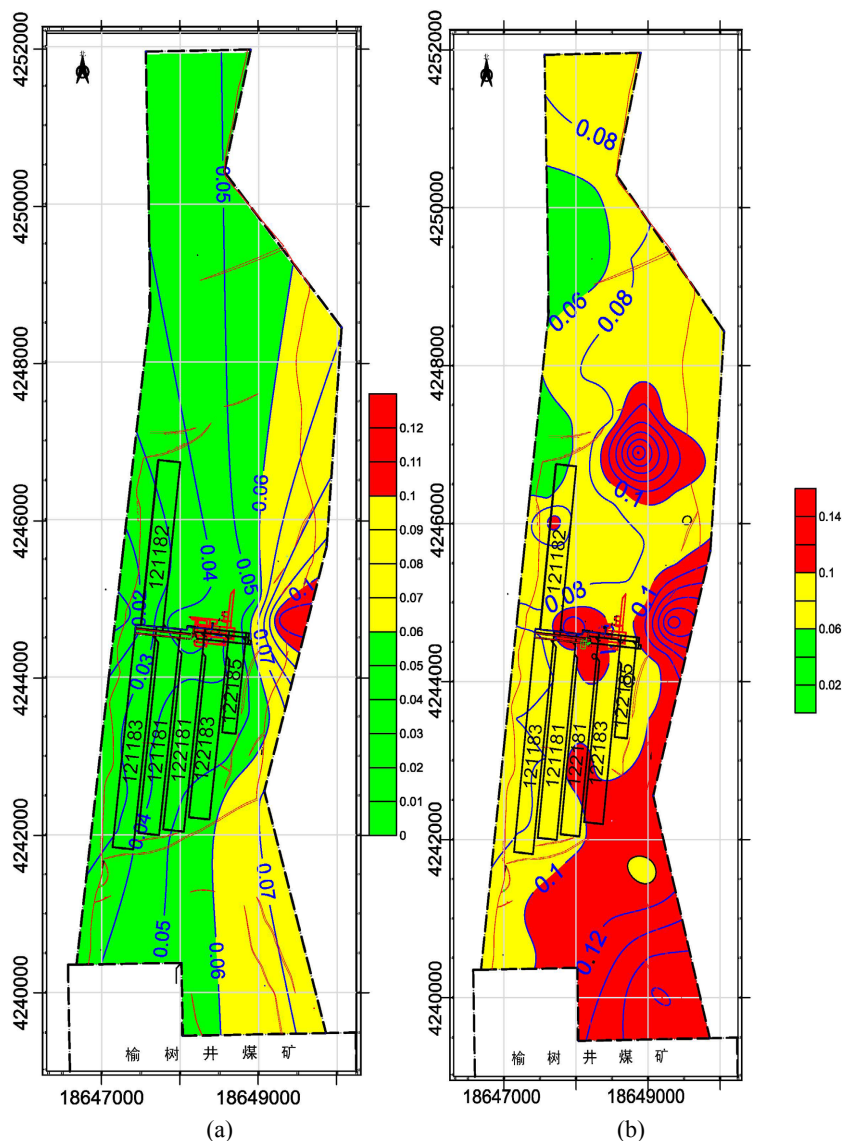


Figure 7. Water inrush coefficient of coal treasure Baotashan sandstone aquifer under “Plan No.3” 18; (a) Water inrush coefficient of “Plan No.3”; (b) Natural state water inrush coefficient

图 7. “三号方案” 18 煤宝塔山砂岩含水层突水系数; (a) “三号方案” 突水系数; (b) 天然状态突水系数

4) 1#+2#+3#+4#钻场疏放水方案

“四号方案”是在“三号方案”的基础上,继续在4#钻场增加2个疏放水钻孔,单孔疏放水量为3000 m³/d。同时仍采用先1#、2#钻场疏放水,降低宝塔山砂岩含水层水头压力后,3#、4#钻场再疏放水的步骤。“四号方案”疏降宝塔山砂岩含水层水位分布见图8,各钻孔点位的降深见表4。

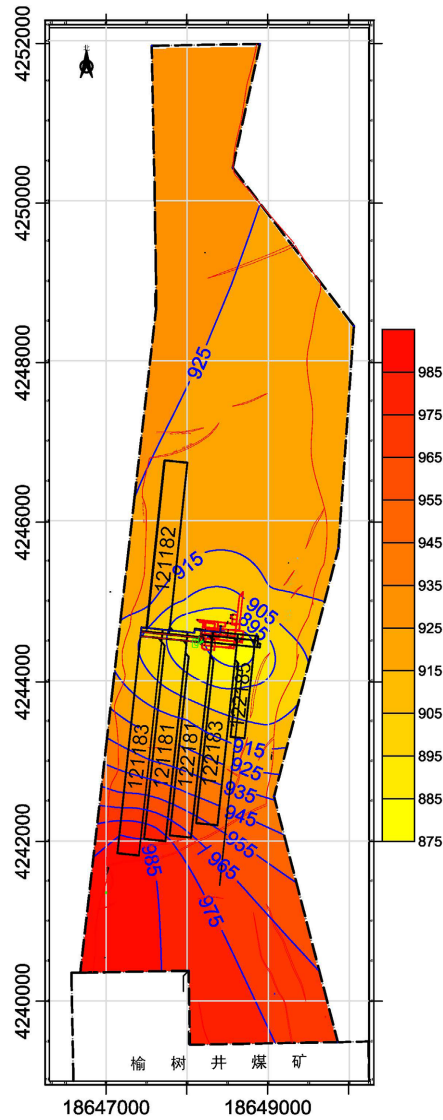


Figure 8. Water level distribution map of the No.4 plan in the sandstone aquifer of Baotashan
图 8. “四号方案” 宝塔山砂岩含水层水位分布图

“四号方案”疏降条件下，疏放时间约为 96 d+215 d，整个渗流场将趋于稳定，水位不再下降。“四号方案”疏降条件下的突水系数分布见图 9。“四号方案”疏降条件下，井田绝大部分区域突水系数均小于 0.06 MPa/m，疏放水效果显著。

Table 4. Statistical data on water level reduction depth of drilling boreholes in lower Baotashan sandstone aquifer under “Plan No.4” dewatering operation

表 4. “四号方案”疏降下宝塔山砂岩含水层钻孔水位降深统计

序号	钻孔	水位降深(m)	序号	钻孔	水位降深(m)
1	1302	163.4	13	1804	254.6
2	1402	187.2	14	1901	245.9
3	1403	190.1	15	1902	250.6
4	1502	207.0	16	1904	239.8

续表

5	1504	210.8	17	B4	289.4
6	1602	217.6	18	B6	261.9
7	S1	223.2	19	B44	252.3
8	1604	225.4	20	B7	220.1
9	1702	241.6	21	B45	250.9
10	1704	241.8	22	B12	165.6
11	1803	259.0	23	B47	191.6
12	1801	269.7	降深平均值		228.67

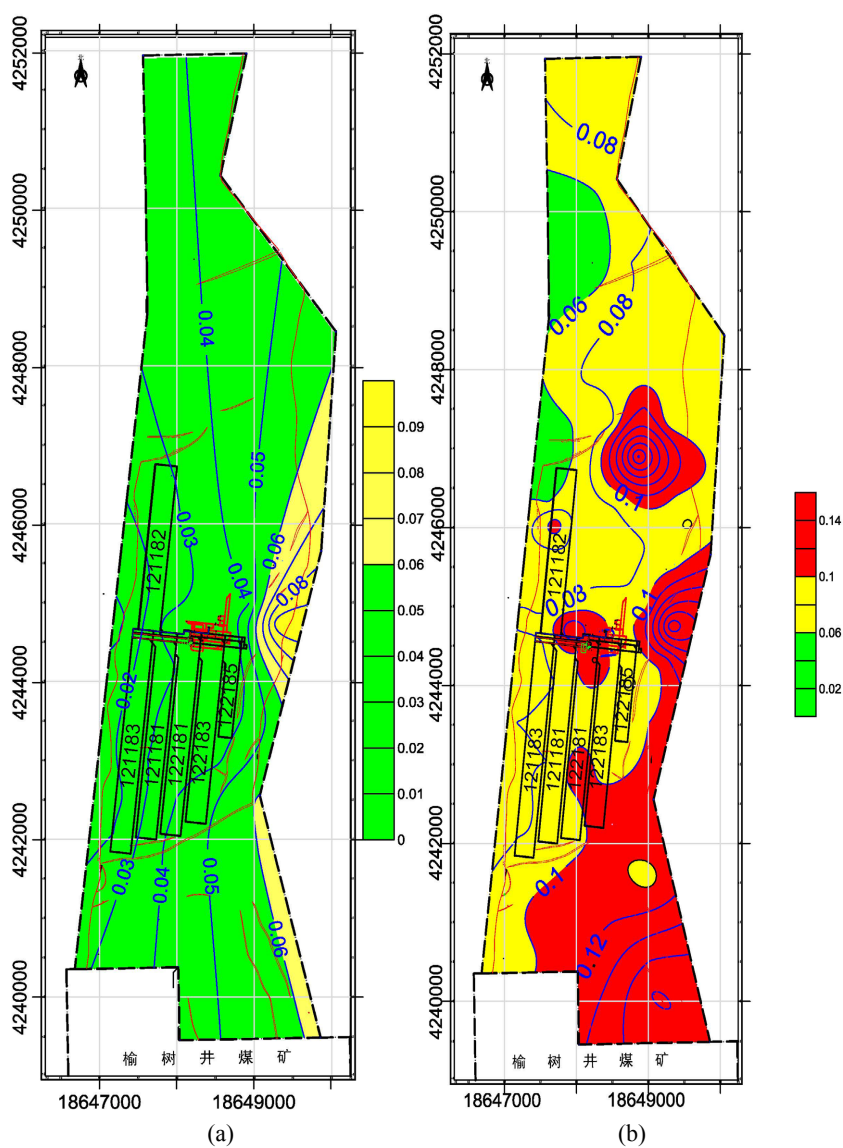


Figure 9. Water inrush coefficient of coal Baotashan sandstone aquifer under “Plan No.4” 18; (a) Water inrush coefficient of “Plan No.3”; (b) Natural state water inrush coefficient

图 9. “四号方案” 18 煤宝塔山砂岩含水层突水系数; (a) “三号方案” 突水系数; (b) 天然状态突水系数

4.2.18 煤开采宝塔山砂岩含水层涌水量预计

1) 天然状态下一分区 18 煤开采宝塔山砂岩含水层涌水量预计

矿井排水时, 在其采掘边界或一定范围内会逐渐形成统一的降落漏斗, 理论上可将分布不规则的巷道视为一个概化了的理想“大井”。此时, 整个矿井的涌水量就相当一个“大井”的出水量, 这样就可以借助涌水量计算公式直接求出矿井涌水量, 因此, 解析法采用“大井法”进行计算, 选用《煤矿防治水手册》中承压转无压完整井矿井涌水量计算公式, 公式如下:

$$Q = \frac{1.366K[(2H - M)M - h^2]}{l_g R_0 - l_g r_0} \quad (4.2-1)$$

式中: Q ——预计矿井涌水量, m^3/d ;

K ——含水层渗透系数, m/d ;

M ——承压含水层厚度, m ;

H ——含水层水柱高度, 为静止水位至含水层隔水底板的距离(m);

h ——为钻孔静水位至含水层底板(平均标高)的高度, 当水位降至含水层底板时为 0;

R_0 ——矿井排水的引用影响半径, $R_0 = R + r_0$, m ;

R ——为影响半径, 根据承压转无压水公式 $R = 10S\sqrt{K}$ 计算, S ——水位降深(m);

F ——根据设计部门井田开拓方案平面图丈量首采区为 11.95 km^2 ,

r_0 ——大井半径, $r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$, 一分为 1951 m 。

根据钻井水位监测, 宝塔山砂岩含水层区域水位标高为+1178.43 m , 水位数据如表 5 所示。

Table 5. Water level at Longguan hole in Baotashan sandstone formation

表 5. 宝塔山砂岩层长观孔水位

钻孔	ZH5	B12	B47	B6	B14	直排	平均值
宝塔山水位标高(m)	1121.34	1164.22	1176.82	1177.32	1177.52	1179.89	
钻孔	B45	B7	B4	B44	B2	B37	1178.43
宝塔山水位标高(m)	1180.72	1181.69	1182.23	1184.86	1189.05	1225.48	

宝塔山砂岩含水层厚度统计如表 6 所示, 矿井范围内其平均厚度为 52.97 m 。

Table 6. Statistical table of sandstone thickness in Baotashan

表 6. 宝塔山砂岩厚度统计表

孔号	B-12	B-11	B-10	B-47	B-14	B-8	B-6	B-45
宝塔山砂岩厚度(m)	56.85	35.66	66.35	42.18	18.55	55.55	50.85	61.4
孔号	B-7	B-44	B-4	B-2	B-1	B-38	B-37	平均值
宝塔山砂岩厚度(m)	53.5	82.65	57.55	62.1	69.88	25.16	56.35	52.97

根据区域范围内揭露宝塔山砂岩钻孔数据资料得出: 矿井范围内 18 煤底板平均标高为+801.57 m , 宝塔山砂岩顶板平均标高为+749.90 m , 18 煤距离宝塔山砂岩的平均间距为 51.67 m 。如表 7 所示。

Table 7. Overview of spacing between coal and Baotashan aquifer in 18 coal mines
表 7. 18 煤至宝塔山含水层间距一览表

孔号	18 煤底板 标高(m)	宝塔山含水层 顶板标高(m)	18 煤底至宝塔山含 水层顶板间距(m)	孔号	18 煤底板 标高(m)	宝塔山含水层顶 板标高(m)	18 煤底至宝塔山含水 层顶板间距(m)
1002	906.9	863.15	43.75	2604	810.344	757.144	53.2
1004	786.524	741.894	44.63	2802	939.852	856.052	83.8
1006	585.793	546.023	39.77	3002	895.567	843.767	51.8
1102	865.786	831.816	33.97	3202	907.251	868.961	38.29
1104	704.919	661.829	43.09	B1	747.467	724.997	22.47
1302	897.039	859.979	37.06	B10	804.017	761.587	42.43
1403	808.934	762.334	46.6	B11	731.298	681.798	49.5
1502	853.703	811.603	42.1	B12	945.059	904.939	40.12
1504	777.338	724.028	53.31	B14	579.28	541.58	37.7
1602	886.26	837.91	48.35	B2	883.586	850.556	33.03
1604	708.759	651.209	57.55	B37	1014.462	962.792	51.67
1702	806.425	754.435	51.99	B38	803.667	744.007	59.66
1704	750.454	687.454	63	B4-1	918.486	883.606	34.88
1801	853.47	798.069	55.401	B44	756.472	700.172	56.3
1804	743.697	681.637	62.06	B45	749.391	690.021	59.37
1901	892.8	830.45	62.35	B47	700.952	652.222	48.73
1902	807.569	751.889	55.68	B6	777.252	734.172	43.08
1904	743.945	679.795	64.15	B7	675.244	648.354	26.89
2002	908.392	848.322	60.07	B8	767.951	721.041	46.91
2004	735.963	681.813	54.15	S1	798.722	751.472	47.25
2102	836.84	776.84	60	S3	797.369	757.069	40.3
2202	942.367	867.667	74.7	S5	594.191	524.391	69.8
2204	788.514	732.024	56.49	S6	786.339	723.789	62.55
2205	742.774	686.144	56.63	X6	777.471	722.321	55.15
2302	867.508	802.738	64.77	Z1	753.52	711.07	42.45
2403	822.09	750.65	71.44	Z10	734.06	673.58	60.48
2404	763.416	704.066	59.35	Z11	670.02	621.14	48.88
2502	903.519	859.869	43.65	Z14	757.8	701.17	56.63
2603	947.102	902.732	44.37	Z15	704.05	650.62	53.43
Z4	831.31	766.59	64.72	Z16	763.36	695.25	68.11
Z7	864.88	819.51	45.37	Z3	856.34	794.22	62.12
ZK1802	763.286	715.626	47.66	平均值	801.57	749.90	51.67

该区域主要受 21 煤底板以下宝塔山承压含水层的影响, 根据《煤矿防治水规定》推荐的突水系数公式:

$$T_s = P/M \tag{4.2-2}$$

式中: T_s ——突水系数(MPa/m); P ——隔水层承压的水压(MPa); M ——底板隔水层厚度(m)。

在正常岩层地带, 煤层带压开采分区如下:

$T_s < 0.06$ 安全区

$T_s = 0.06$ 临界值

$T_s > 0.06$ 危险区

根据以上计算平均数据可得, 宝塔山砂岩承压水头平均高度为 $1178.43 \sim 749.90 = 428.53$ m, 隔水层所受水压平均为 4.28 MPa。结合矿井范围内 18 煤底板距离宝塔山砂岩顶板之间的平均距离(隔水层厚度) 51.67 m, 得出矿井范围内平均突水系数为 0.08。若需要达到突水系数的临界值 0.06, 水压值需要降至 3.10 MPa, 相应水头高度需要下降 118 m, 以此为正常底板突水量。若需要降至煤层底板以下, 水头高度需要下降 $1178.43 - 801.57 = 376.86$ m, 以此为最大底板突水量。渗透系数参考中煤科工集团西安研究院建立的宝塔山砂岩含水层地下水模型中的水文地质参数分区。由于一分区范围与水文地质参数分区中 III 分区重合度较高, 所以一分区宝塔山砂岩渗透系数选取 III 分区中的垂向渗透系数, 为 0.25 m/d。

计算结果如表 8 所示, 18 煤开采宝塔山砂岩含水层正常涌水量为 $1200.79 \text{ m}^3/\text{h}$, 最大涌水量为 $1860.84 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

Table 8. Calculation parameters for water yield of Baotashan sandstone aquifer in section 18 coal mining area
表 8. 一分区 18 煤开采宝塔山砂岩含水层涌水量计算参数表

计算范围		一分区(面积为 11.95 km^2)
参数依据		Z12、Z13、Z14、Z16、2403、1602
计算参数	K (m/d)	0.25
	M (m)	52.97
	r_0 (m)	1950.83
	S	118 (376.86)
	R (m)	590.00 (2540.83)
	R_0 (m)	1884.30 (3835.13)
	$H = S$ (m)	118 (376.86)
正常涌水量(m^3/h)	Q_1	1200.79
最大涌水量(m^3/h)	Q_2	1860.84

2) 天然状态下首采面 121183 工作面开采宝塔山砂岩含水层涌水量预计

结合矿井相关资料显示, 121183 工作面 18 煤底板标高约为 880 m, 宝塔山砂岩水位约为 1176 m, 宝塔山砂岩顶界面标高约为 830 m, 宝塔山砂岩厚度约为 55 m。宝塔山砂岩承压水头平均高度为 $1176 - 830 = 346$ m, 隔水层所受水压平均为 3.46 MPa。121183 工作面范围内 18 煤底板距离宝塔山砂岩顶板之间的平均距离(隔水层厚度)约为 50 m, 突水系数为 0.07 MPa/m。若需要达到突水系数的临界值 0.06 MPa/m, 水压值需要降至 3 MPa, 相应水头高度需要下降 46 m。若需要降至煤层底板以下, 水头高度需要下降 $1176 - 880 = 296$ m。涌水量计算结果如表 9 所示, 正常涌水量为 $97.03 \text{ m}^3/\text{h}$, 最大涌水量为 $349.18 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

Table 9. Calculation parameters for water inflow rate of Baotashan sandstone at working face 121183
表 9. 121183 工作面宝塔山砂岩涌水量计算参数表

计算范围	121183 工作面(面积 0.67 km ²)	
参数依据	B-12、1302、1402、1502、B-9、1602、1702、B-35、1801、1803 和 B-4	
计算参数	$K(\text{m/d})$	0.1
	$M(\text{m})$	55
	$r_0(\text{m})$	461.57
	S	46 (296)
	$R(\text{m})$	145.46 (936.03)
	$R_0(\text{m})$	607.03 (1397.60)
	$H = S(\text{m})$	46 (296)
正常涌水量(m ³ /h)	Q_1	97.03
最大涌水量(m ³ /h)	Q_2	349.18

5. 结论

5.1. 疏水降压

通过抽水试验和放水试验的降深分析, 宝塔山砂岩含水层具有可疏性。一分区 18 煤开采宝塔山砂岩含水层疏降方案中, “二号方案”是在“一号方案”的基础上, 在 2#钻场增加 2 个疏放水钻孔。“二号方案”疏降条件下, 疏放时间约为 176d, 整个渗流场将趋于稳定, 水位不再下降, 前期规划布置的 121183、121181、121182、122181、122183、122185 这 6 个工作面绝大部分区域的突水系数均小于 0.06 MPa/m。所以建议优先采用“二号方案”, 待“二号方案”疏降条件下宝塔山砂岩含水层水位降深和流场稳定, 首采工作面 122183 安全回采后, 再决定是否开展“三号方案”和“四号方案”。疏降水位过程中若涌水量较大, 可以考虑布置采区泄水巷进行排水。

5.2. 疏降条件下的排水系统

为了避免宝塔山砂岩含水层大流量涌突水的发生, 采前开展的疏放水工作会导致矿井涌水量大量增加。“二号方案”疏放水量为 14,000 m³/d (583 m³/h), 所以矿井正常涌水量会显著增加, 矿井正常涌水量为 182 + 583 = 765 m³/h, 矿井最大涌水量 276.64 + 583 = 859.64 m³/h。

基于目前的排水系统建设, 针对宝塔山砂岩含水层疏放水条件下的水泵排水能力: ① 正常涌水时, 两台泵工作, 20 小时排水量为: 790 × 20 = 15,800 m³, 其小于正常涌水时, 24 小时的涌水量: 765 × 24 = 18,360 m³。②最大涌水时, 三台泵工作, 20 小时的排水量为: 1185 × 20 = 23,700 m³, 其大于最大涌水时, 24 小时的涌水量: 859.64 × 24 = 20,631 m³。因此, 水泵 20 小时的正常排水能力小于 24 小时的正常涌水量, 不符合要求; 泵 20 小时的最大排水能力超过 24 小时的最大涌水量, 符合要求。

基于目前的排水系统建设, 针对宝塔山砂岩含水层疏放水条件下的水仓容量检验: 根据《煤矿防治水细则》108 条中“新建、改建矿井或者生产的新水平, 正常涌水量在 1000 m³/h 以下时, 主要水仓的有效容量应当能容纳 8 h 的正常涌水量”的要求, 水仓容量 $Q = 4588\text{m}^3 < 8\text{h}$ 的正常涌水量 $8 \times 765 = 6120\text{m}^3$ 。不符合要求。

基于目前的排水系统建设, 针对宝塔山砂岩含水层疏放水条件下的排水管路校验: 目前工作水管排水能力为 $0.083 \times 2 \times 3600 = 597.6\text{m}^3/\text{h}$ 。正常涌水量时两台水泵工作, 20 h 的排水量 $Q = 597.6\text{m}^3/\text{h} \times 20$

$h \times 2 = 23,904 \text{ m}^3 > 24 \text{ h}$ 正常涌水量 $765 \times 24 = 18,360 \text{ m}^3$ 。满足要求。工作水管和备用水管排水能力为 $597.6 \text{ m}^3/\text{h} \times 3 = 1792.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 20 h 的排水量 $Q = 1792.8 \text{ m}^3/\text{h} \times 20 \text{ h} = 35,856 \text{ m}^3 > 24 \text{ h}$ 最大涌水量 $859.64 \times 24 = 20,631 \text{ m}^3$ 。满足要求。

综上所述,目前新上海一号煤矿排水系统基本能够满足 18 煤采前疏降时的矿井涌水量要求,现有水仓容量不符合要求,应进行水仓容量的改扩建。

5.3. 疏放水经济性分析

在确保安全的前提下,疏放水方案的经济合理性是矿井水害治理工程的关键依据。本文所提四种疏降方案在钻孔工程量、疏放水总量及排水系统改造需求上存在显著差异,进而影响整体治理成本。

1) 钻孔工程量与初期投入

一号方案仅利用已有勘探钻孔进行疏放,无需新增勘探工作量,初期投入最低。二号方案需在 2# 钻场增加 2 个疏放水钻孔,三号、四号方案则分别在 3#、4# 钻场各增加 2 个钻孔。随着钻孔数量的增加,钻探施工、孔口装置及维护费用呈阶梯式上升。从工程经济角度出发,二号方案以较小的新增工程量实现了首采区及周边 5 个工作面的安全覆盖,边际效益最为显著。

2) 排水系统改造成本

二号方案实施后,矿井正常涌水量增至 $765 \text{ m}^3/\text{h}$,现有水仓有效容量不足,需进行扩容改造。若采用三号或四号方案,不仅水仓容量缺口更大,水泵正常排水能力亦无法满足要求,届时需同时扩建水仓并增配大功率水泵及配套管路,系统改造成本将成倍增加。因此,二号方案对现有排水系统的冲击相对可控,改扩建工程量与投资规模最小。

3) 综合经济性评价

综合对比,二号方案在保证首采区及近期接续工作面突水系数降至安全阈值的前提下,其新增钻探工程量、长期排水运行费用及排水系统改造成本均显著低于三号、四号方案,体现了最优的经济性价比。若后期开采向深部延伸,可根据实际疏降效果和水位动态,再行决策是否启动三号或四号钻场,实现治理工程的动态、分步投入。

参考文献

- [1] 吴金随, 张辞源, 尹尚先, 等. 近 20 a 我国煤矿水害事故统计及分析[J]. 煤炭技术, 2022, 41(6): 86-89.
- [2] 武强, 张志龙, 马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I——主控指标体系的建设[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 42-47.
- [3] 高延法, 章延平, 张慧敏, 等. 底板突水危险性评价专家系统及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 253-258.
- [4] 李忠建, 魏久传, 郭建斌, 等. 运用突水系数法和模糊聚类法综合评价煤层底板突水危险性[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(1): 24-26+90.
- [5] 刘钦, 孙亚军, 徐智敏. 改进型突水系数法在矿井底板突水评价中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(8): 107-109.
- [6] 王计堂, 王秀兰. 突水系数法分析预测煤层底板突水危险性的探讨[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(7): 106-111.
- [7] 武强, 解淑寒, 裴振江, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 III——基于 GIS 的 ANN 型脆弱性指数法应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1301-1306.
- [8] 武强, 李博, 刘守强, 等. 基于分区变权模型的煤层底板突水脆弱性评价——以开滦蔚州典型矿区为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1516-1521.
- [9] 武强, 王金华, 刘东海, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 IV: 基于 GIS 的 AHP 型脆弱性指数法应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 233-238.
- [10] 武强, 张志龙, 张生元, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 II——脆弱性指数法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11):

1121-1126.

- [11] 王连国, 宋扬. 煤层底板突水突变模型[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 160-163.
- [12] 王连国, 宋扬, 缪协兴. 基于尖点突变模型的煤层底板突水预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 573-577.
- [13] 韦韬, 李博, 王中美, 等. 基于尖点突变模型的煤层底板突水危险性评价[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 23-29.
- [14] 施龙青, 韩进, 宋扬, 等. 用突水概率指数法预测采场底板突水[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(5): 31-33+49.
- [15] 乔伟, 李文平, 赵成喜. 煤矿底板突水评价突水系数-单位涌水量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2466-2474.
- [16] 王连国, 宋扬. 煤层底板突水组合人工神经网络预测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 502-505.