

· 研究进展 ·

西部典型矿区采动地下水流场演变特征 与工作面涌水控制技术

黄艳利^{1, 2}

郭亚超^{1*}

齐文跃³

李俊孟¹

高华东¹

欧阳神央¹

吴来伟¹

阮泽宇¹

1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 徐州 221116

2. 新疆工程学院 矿业工程与地质学院, 乌鲁木齐 830023

3. 燕山大学 河北省重型装备与大型结构力学可靠性重点实验室, 秦皇岛 066004

[摘要] 西部矿区煤炭资源大规模开采过程中, 面临顶板水害威胁。本文以受直罗组巨厚砂岩含水层影响较大的枣泉煤矿为研究对象, 构建了矿区含水层富水性评价模型, 确定了矿区弱、较弱、中等、较强和强共5类富水性分区及矿区安全、预警、危险和非常危险共4类突水危险性分区; 探究了富水性分区和开采方式对地下水流场演化规律及工作面涌水量的影响, 提出了基于工作面涌水量控制的开采布局设计方法, 并在枣泉煤矿130203工作面进行工程应用, 验证了预测结果的准确性和工作面布局的合理性。研究结果为西部矿区井下防治水提供了理论指导, 对井田顶板水害防治和水资源保护提供了科学的决策依据。

[关键词] 砂岩含水层; 富水性分区; 突水危险性预测; 地下水流场; 工作面涌水

我国煤炭开采重心已转移至西部地区, 据统计, 西部新疆、内蒙古、宁夏三省(自治区)煤炭储量占全国总储量的50.2%, 而水资源仅占全国总量的4.6%, 煤水资源分布的不均衡矛盾极为突出^[1]。西部矿区多属水资源短缺的干旱—半干旱区域, 具有煤层埋深浅, 厚度大, 基岩薄的特点, 煤炭高强度开采易形成大规模导水裂隙, 为含水层富水涌入工作面提供了通道, 造成顶板突(涌)水事故与地下水资源流失^[2, 3]。因此, 如何正确认识典型矿区煤层开采对水资源的破坏是水资源保护的前提, 只有厘清采前含水层富水性分区和采后地下水流场演化规律, 才能对水资源破坏进行针对性预防和治理。目前, 矿井水防治的研究主要集中在风险评价与涌水量预测两方面^[4, 5], 其中武强院士^[6, 7]提出的“富水性指数法”及“三图双预测”法应用较广, 该方法综合考虑水文地质条件与工作面开采影响, 利用指标评价、GIS多信息融合系统等手段评价顶板突水风险,



黄艳利 中国矿业大学矿业工程学院教授、博士生导师, 现任新疆工程学院矿业与地质工程学院院长(中组部第十批援疆干部)。国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金获得者、江苏省杰出青年科学基金获得者、中国青年科技奖获得者, 长期从事充填开采与水资源保护方面的教学与科研工作。先后主持国家自然科学基金面上项目、国家重点研发计划子课题、中央引导地方发展基金等纵向课题6项; 发表SCI/EI论文50余篇; 获全国煤炭青年五四奖章、孙越崎青年科技奖等荣誉称号。



郭亚超 中国矿业大学博士生, 从事矿区生态环境遥感监测与评价方面的研究工作, 参与国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金项目、国家重点研发计划等课题4项, 发表学术论文4篇, 申请或授权国内外发明专利5件, 获中国煤炭工业协会二等奖1项、国家能源集团宁夏煤业有限责任公司特等奖1项等奖项。

实现矿井涌水量预测, 为煤矿防治水提供了设计依据。

收稿日期: 2021-05-28; 修回日期: 2021-08-29

* 通信作者, Email: yachaoguo2020@163.com

本文受到国家自然科学基金项目(52022107, 52174128及52104103)、河北省博士后基金(B2020003012)和江苏省自然科学基金项目(BK20210499)的资助。

枣泉煤矿位于宁夏灵武白芨滩自然保护区边缘,属于典型的西北干旱—沙漠化类矿区,且煤层开采工作面涌水量受直罗组巨厚砂岩含水层影响巨大,因此亟需开展覆岩富水分区及采动影响下地下水场时空演化规律的研究,从而实现煤炭资源安全高效开采与区域水资源保护。本文在系统调研枣泉煤矿地质勘探资料基础上,构建矿区含水层富水性评价模型,并给出矿区覆岩含水层突水危险性预测结果;揭示不同富水性、开采方式下工作面水流场时空演化规律,提出基于工作面涌水量控制的开采布局设计方法;结合枣泉煤矿 130203 工作面实测结果,验证了预测结果的准确性和工作面布局的合理性,研究结果对实现西部矿区煤炭安全开采与水资源保护具有重要意义。

1 研究区水文地质概况

1.1 工程地质概况

枣泉煤矿位于宁东煤田灵武矿区南部(106°30'E~106°35'E,37°52'N~38°02'N),属灵武白芨滩国家自然保护区西南一隅,是一座大型的现代综合机械化矿井。井田东西长约 4 km,南北长约 13 km,总面积约为 56 km²,如图 1 所示。区内地层由新至老发育有第四系(Q4)、侏罗系上统安定组(J2a)、侏罗系中统直罗组(J2z)、延安组(J2y)、侏罗系下统富县组(J1f)、三叠系上统延长组(T3Yn)。

1.2 水文地质概况

井田内有五个主要含水层:第四系洪积沟谷潜水(含水层 I)、中侏罗统延安组烧变岩裂隙孔隙层间承压水体(含水层 II)、直罗组裂隙孔隙层间承压水(含水层 III)、延安组煤层之间砂岩裂隙孔隙层间承压水(含水层 IV)以及 8~16 层煤之间砂岩裂隙孔隙层间承压水(含水层 V)。其中,直罗组底部巨厚砂岩是矿井主要涌水来源,钻孔单位涌水量为

0.030~0.042 L/s·m。区内隔水层主要以高密度的粉砂岩、泥岩为主,分布在第四系和直罗组地层之间的 I 隔水层、直罗组中部 II 隔水层及 1 煤、2 煤本身及顶底板砂泥岩互层形成的 III、IV 隔水层,井田内含(隔)水层分布如图 2 所示。根据枣泉煤矿钻孔数据资料,采用反距离插值法构建三维可视化地质结构模型(图 3),由图可知区内整体为褶曲构造,由北至南沿背斜轴逐渐降低,煤层在南部埋深较大,中部和北部埋深较浅,地层起伏变化主要集中在两侧。

2 覆岩含水层富水性分区与突水危险性预测

2.1 含水层富水性影响因素分析

基于以往砂岩含水层富水性评价经验,从砂岩含水层本身岩性结构特征和水力特征两大方面考虑,选定含水层厚度、脆塑性岩厚比、岩芯采取率、冲洗液消耗量、含水层水位分析、含水层富水性^[8-12],结合枣泉矿区 327 个地质钻孔实测数据,利用克里金插值法绘制等值线图,如图 4 所示。由图可知:直罗组含水层底部粗粒砂岩含水层在井田中部和北部中间厚度较小,由北至南、由中间向两侧厚度逐渐增大,井田南部含水层厚度最高可达 430 m;脆塑性岩厚比最小位置在井田中部和北部中心,由北向南、由中间向两侧逐渐增大,最大区域在井田中部东侧边界处;岩芯采取率最低在井田北部东侧边界处,整体由井田内向边界逐渐增大,井田南部西侧边界处岩芯采取率较大,最大可达 75%;冲洗液消耗量最小在井田中部和南部,向四周逐渐增加,最大在矿区北部,可达 0.53 m³/h;含

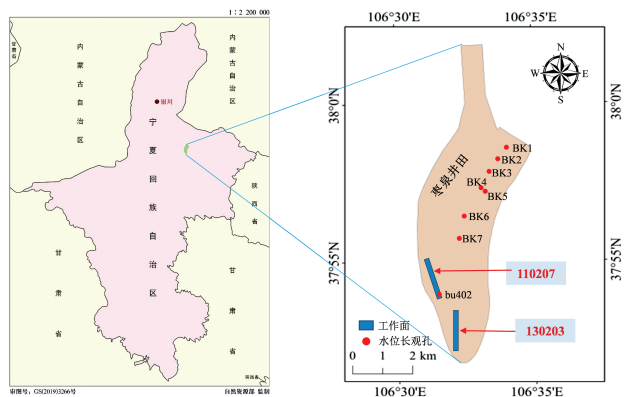


图 1 枣泉煤矿地理位置图

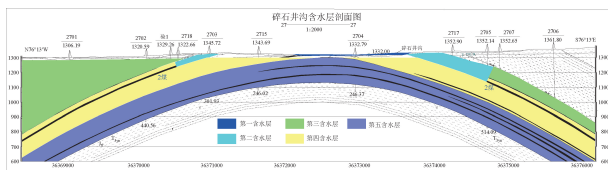


图 2 矿区含隔水层分布

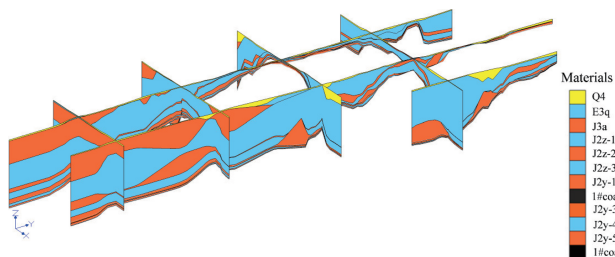


图 3 枣泉煤矿水文地质切割剖面图

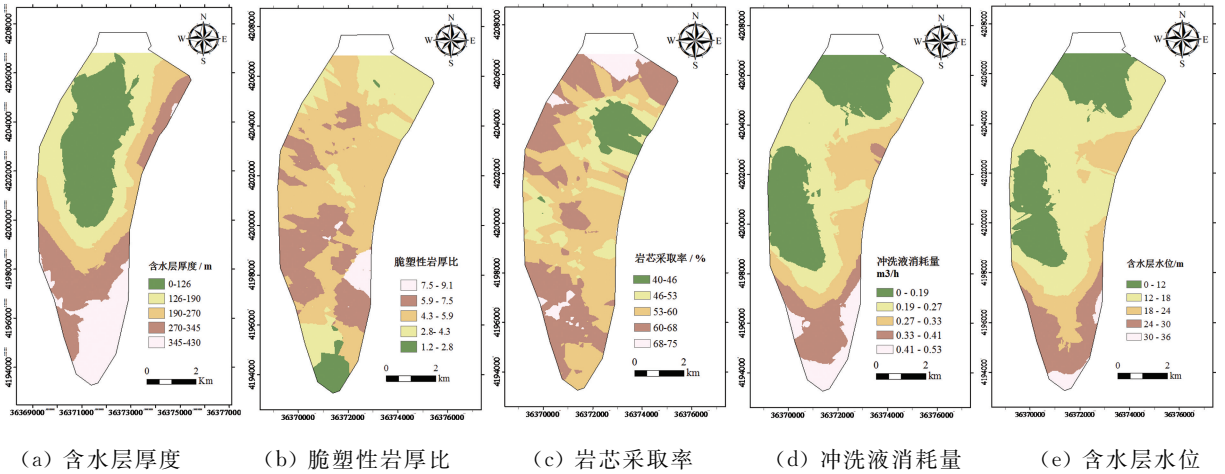


图4 含水层富水性影响因素分区图

水层水位最小为井田北部和中部西侧边界两处区域,呈现由北到南增大的趋势,在井田西南边界处达到最大,最高水位为 35 m。

2.2 覆岩含水层富水性分区评价

采用 AHP 法建立枣泉煤矿直罗组砂岩富水性层次分析模型,主要由目标层(A 层次)、准则层(B 层次)、决策层(C 层次)组成,如图 5 所示。

利用“征集专家评分”的方法构建判别矩阵,从而得到各主控因素主观权重;基于钻孔数据,对 5 个评价指标进行标准化处理,求得各指标的信息熵,并通过熵权法得到各主控因素的客观权重;由于主、客观权重的赋权依据不同,综合考虑主观因素和客观数据的优缺点,将主、客观权重有机结合^[13, 14],建立覆岩含水层富水性 AHP-熵权法耦合赋权模型^[15-18],得到各主控因素的综合权重 W_i (公式 1),得到含水层厚度、脆塑性岩厚比、岩芯采取率、冲洗液消耗量、含水层水位的主观权重、客观权重及综合权重见表 1。

$$W_z = \alpha W_a + (1 - \alpha) W_s \quad (1)$$

式中, W_z 为综合权重, W_a 为 AHP 法权重, W_s 为熵权法权重, α 为偏好系数, 本文取 0.5。

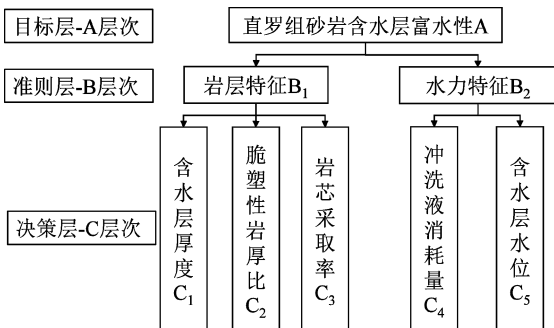


图5 直罗组砂岩富水性层次分析模型

表 1 各主控因素的综合权重

各主控因素	含水层厚度	脆塑性岩厚比	岩芯采取率	冲洗液消耗量	含水层水位
主观权重 X_i	0.0570	0.2403	0.2027	0.2500	0.2500
客观权重 Y_i	0.0908	0.3570	0.0423	0.3764	0.1335
综合权重 W_i	0.0739	0.2986	0.1225	0.3132	0.1918

按照各主控因素权重确立覆岩含水层富水性分区评价模型,见式(2)。

$$H = \sum_{i=1}^n W_{zi} \times f_i(x, y) \quad (2)$$

式中, i 为第 i 个主控因素, n 为主控因素的个数; W_{zi} 为第 i 个主控因素的权重值; $f_i(x, y)$ 为第 i 个主控因素的归一化值。

富水性值 H 综合反映了区域内某一点处的含水层富水程度,其值越大,该点处的富水性越强^[19-21]。因此,含水层富水性分区模型为

$$H = 0.0739f_1(x, y) + 0.2986f_2(x, y) + 0.1225f_3(x, y) + 0.3132f_4(x, y) + 0.1918f_5(x, y) \quad (3)$$

利用 GIS 绘制覆岩含水层富水性分区图,根据相等间隔确定阈值为 4.8、7.1、9.4、11.7、14,并将矿区富水性划分为弱区、较弱区、中等区、较强区、强区 5 个等级,如图 6 所示。富水性强区分布在井田东南部,约占 4.55%;富水性较强区分布在井田中部偏南和南部边界,约占 16.26%;富水性中等区分布在井田中部、南部中间,约占 32.40%;富水性较弱区分布在井田中部和北部,约占 28.54%;富水性弱区分布在井田中部、北部,约占 18.25%。

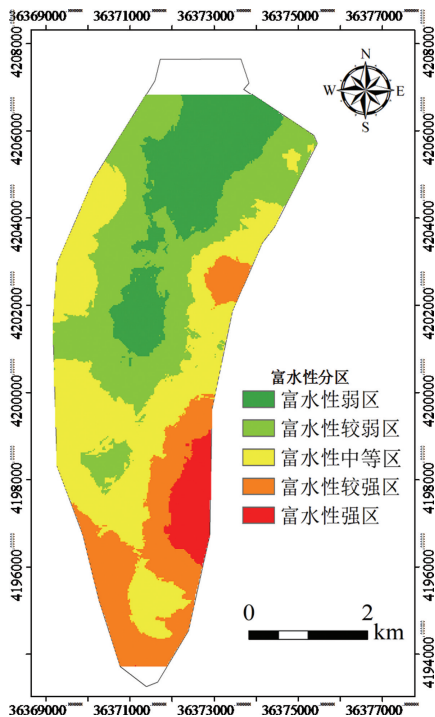


图 6 富水性分区图

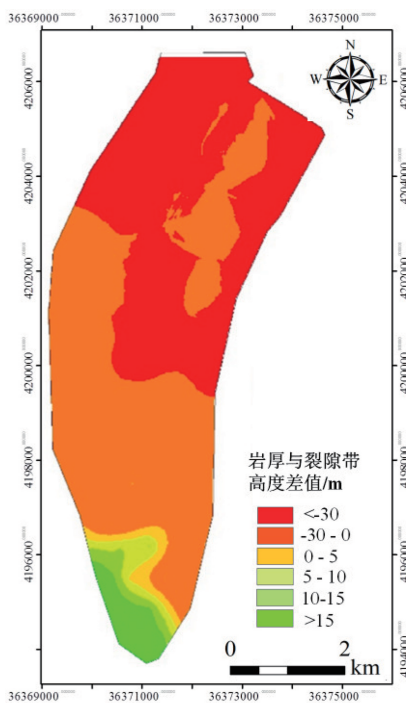


图 7 覆岩厚度与导水裂隙带高度差值

2.3 覆岩含水层突水危险性预测

按照“三下”压煤开采规范中的导水裂隙带高度经验公式计算得到枣泉井田 2 煤导水裂隙带最终发育高度介于 54.38~66.57 m 之间；结合矿区补 202 钻孔资料，确定矿区导水裂隙带平均高度为 62 m^[22]。基于钻孔数据整理得到 2 煤顶板距直罗组粗粒砂岩含水层底部之间的距离，如图 7 所示。其中岩厚与裂隙带高度差值共划分为 5 种，差值为负值时表示导水裂隙带发育高度大于隔水层厚度，差值为正值时表示导水裂隙带高度未发育至含水层底部。

并按照富水性强弱与高度差值大小，将 5 种富水性分区和 5 种覆岩厚度划分为安全、预警、危险和非常危险四种危险性等级，如图 8 所示。当差值大于 15 m 时，无论富水性强弱，均为安全区；当差值在 10~15 m 时，仅富水性强区为预警区，其余富水性下为安全区；当差值在 5~10 m 时，富水性强区下该区域为危险区，富水性较强区为预警区，其余富水性下为安全区；当差值在 0~5 m 时，富水性强区下为非常危险区，富水性较强区为危险区，富水性中等区为预警区；富水性较弱区和弱区为安全区；当差值小于 0 m 时，富水性弱区为安全区，富水性较弱区为预警区，富水性中等区为危险区，富水性较强区为非常危险区，富水性强区为非常危险区。由图可知，矿区安全区分布在矿区中部小部分区域、北部大部分区

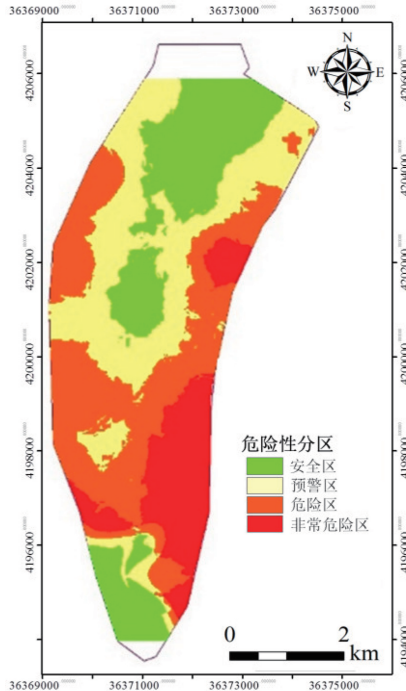


图 8 危险性分区

域和南部区域，约占 23.45%，矿区预警区分布在矿区中部和北部两侧，约占 30.39%，矿区危险区主要分布在矿区中南部区域，约占 31.42%，矿区非常危险区分布在矿区东南部，约占 14.74%。

3 采动影响地下水流场时空演化规律

3.1 三维水文地质数值模型

为模拟开采前后涌水量变化,建立矿区三维水文地质数值模型,模型尺寸为 7 000 m×15 000 m×1 100 m,共 160 000 个网格,将模型东边界和南边界设为定水头边界,西部和北部设为流量边界;由于直罗组裂隙孔隙层间承压水(含水层Ⅲ)是矿井主要涌水来源,根据井田内含(隔)水层分布,在垂向上将模型设为直罗组砂岩含水层、延安组隔水层、煤层和底板共 4 层,模型计算不考虑大气降水补给量与蒸发量,计算模型如图 9 所示。根据 2017 年矿区 BK1、BK2、BK4、BK6、BK7 长观孔以及 bu402 水位观测数据,对比得到观测孔水位值与模拟水位值(图 10),对模型进行校正,得到最优的计算值。

3.2 模拟方案设计

为保证模拟结果的可靠性,综合考虑井田工作面采掘接替情况以及水位长观孔位置,选取邻近 bu402 水位长观孔的 110207 工作面,研究不同富水性分区和不同开采方式下地下水流场的演化规律,以含水层水平渗透系数表示富水性^[23-25],以垂直渗透系数与水平渗透系数之比表示开采方式^[26-28],根据抽水试验及富水性分区,确定初始状态下富水性弱区、较弱区、中等区、较强区、强区渗透系数分别为 0.05 m/d、0.100 m/d、0.150 m/d、0.200 m/d 和 0.242 m/d;一次采全高、综放开采、分层开采、未开采时渗透系数之比为 10、8、5、0.25;研究方案见表 2。

3.2.1 不同富水性分区地下水流场演化规律

利用 GMS 进行地下水数值模拟,得到工作面开采后不同富水性分区下水位等值线(以一次采全高为例),如图 11 所示。

由图可知:

(1) 不同富水性工作面附近水位线均向南偏移,且富水性越弱,偏移距离越远,1312 水位线最远偏移点与开切眼的距离随富水性由弱到强分别为 139 m、336 m、534 m、732 m 和 980 m;

(2) 富水性强区最远偏移点未到达工作面。其因为富水性越强,流量越大,但工作面对水流场影响是在限定范围内,导致富水强区工作面处水流场偏移距越来越小,即距工作面开切眼距离越来越大。

(3) 涌水量与富水性强弱呈正相关关系,即富水性越强,涌水量越大,但不同富水性分区下涌水量差别较小,且增幅逐渐变小。如不同富水性下一次采全高工作面涌水量分别为 71.31 m³/h、79.56 m³/h、82.82 m³/h、84.56 m³/h 和 85.5 m³/h,差值最大仅为 14.19 m³/h。这是由于富水性分区是相对的,当矿区整体富水性较弱时,其相对分区的涌水量变化不大。

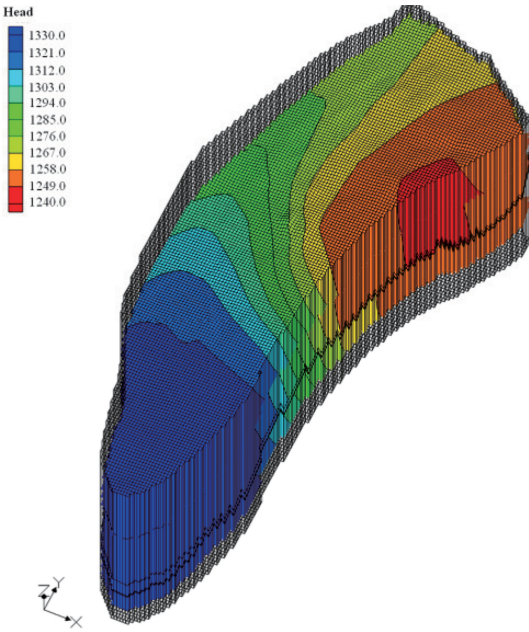


图 9 矿区水文地质三维数值模型

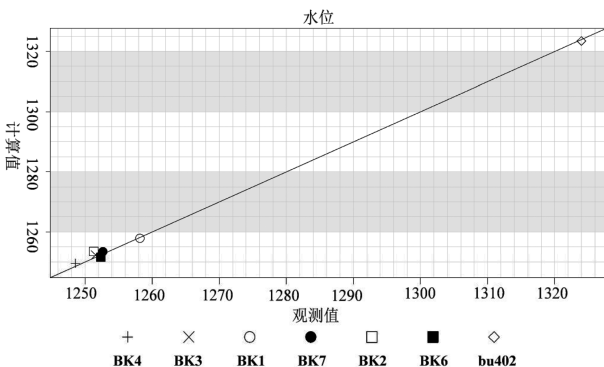


图 10 观测值与计算值水位匹配图

表 2 模拟方案设计

编号	富水分区	开采方法
1	弱区、较弱、中等、较强、 强区	一次采全高
2	中等	一次采全高、综放开采、 分层开采、未开采

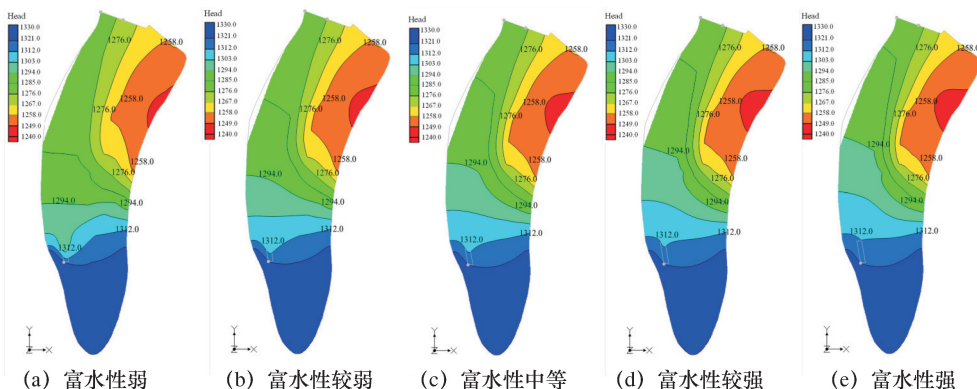


图 11 不同富水性下矿区水位等值线

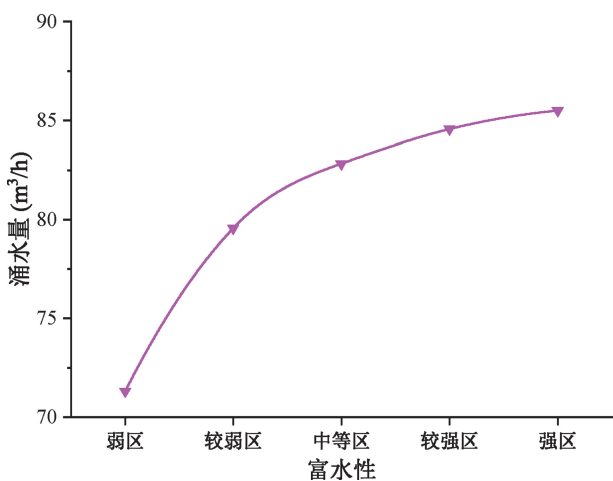


图 12 不同富水性分区下工作面涌水量

3.2.2 不同开采方法下地下水水流演化规律

以富水性中等区为例分析未开采、分层开采、综放开采、一次采全高开采的地下水位等值线如图 13 所示。

由图可知：

(1) 不同开采方式下矿区水流场分布变化不

大,仅工作面附近水流场变化较大,主要表现为水位线的偏移,不同开采方式下 1 312 m 水位线与工作面开切眼距离分别为 1 609 m、1 229 m、735 m、534 m。

(2) 当工作面开采后,地下水水流场呈漏斗状,开采后含水层赋水涌向采空区使得工作面上方水位下降,由于补给作用,工作面周围地下水位也随之下降,形成了区域性漏斗状凹面。不同开采方法下区域性漏斗范围不同,但相差不大;工作面开采面积为 0.1965 km²,采用分层开采时水流场影响面积最小约为 0.8554 km²,采用一次采全高时水流场影响面积最大为 0.8921 km²,一次采全高开采时水流场影响范围较分层开采仅扩大 4.3%(图 14)。

(3) 涌水量与渗透系数之比呈正相关,即渗透系数之比越大,涌水量越大,且不同开采方式下涌水量变化较大。在分层开采和综放开采下,富水性中等区的涌水量差值为 23.7 m³/h;在综放开采和采全高下,涌水量差值为 14.82 m³/h。对比可知,同一富水性下不同开采方式的涌水量变化明显。

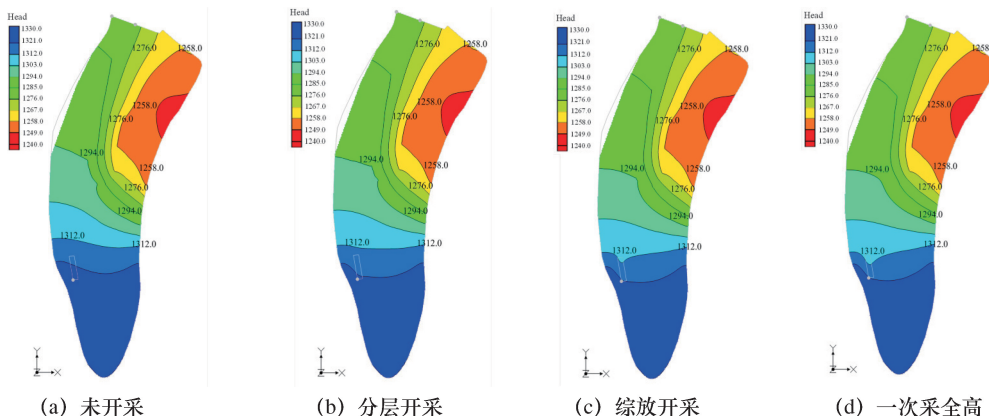


图 13 不同开采方式下矿区水位等值线

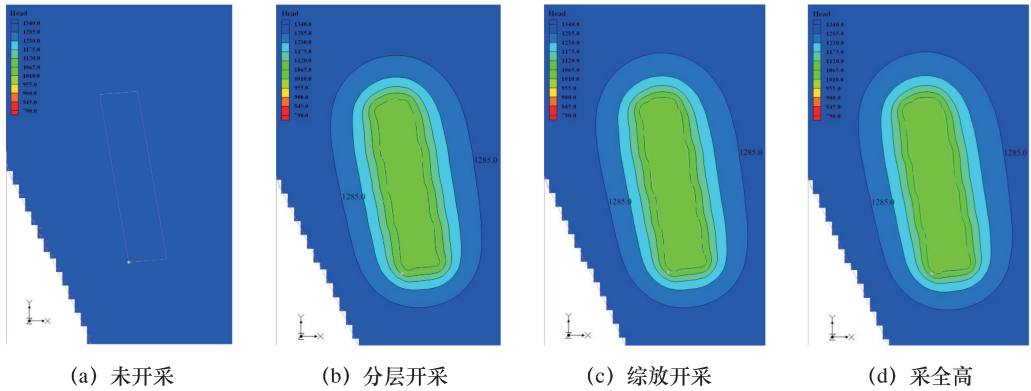


图 14 不同开采方法下工作面水位等值线(富水性中等区)

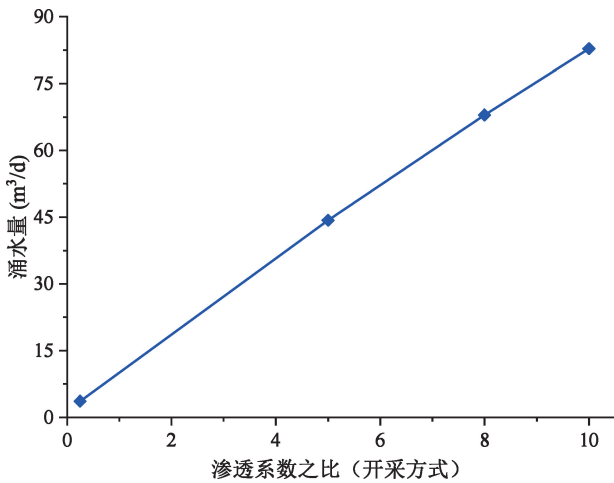


图 15 不同开采方法下开采工作面涌水量

3.3 基于工作面涌水量控制的设计方法

煤炭资源开采和水资源保护协调发展主要包括:地下水库储存利用法、含水层保护法、煤水协调开采 3 类^[29-31]。地下水库主要通过构筑挡水墙,利用采空区的空间进行储水,利用冒落岩石对水资源的净化作用,实现矿井水分级利用^[32];含水层保护法重在保护水资源,利用注浆改造含水层、帷幕注浆、充填开采或限制采高等方法,实现对含水层的保护,既降低了工作面涌水风险,又减少了采矿活动对水资源的破坏^[33, 34]。煤水协调开采兼顾对水资源的保护和利用^[35],基于现代煤矿开采工艺,结合矿区涌水探测、监视等手段,利用采前分区设计、采中重组调控、采后持续控制等技术,控制地下水场分布,构建新的地下水场系统,维持地下水循环平衡状态,实现煤炭安全高效开采和水资源保护的目的。

(1) 采前分区设计:即通过危险性分区对开采布局进行优化调整,主要包含先疏后采、随采随疏和直采不疏三种方案。先疏后采主要针对导水裂隙贯

穿含水层富水性强区或顶板涌水量较大区域,通过设计钻孔疏水方案,实现顶板水预疏放;随采随疏依据工作面涌水量大小,当涌水量较大时,布置疏水钻孔集中疏排,当涌水量较小时,利用排水沟自行疏排;当工作面涌水量较小或无涌水时,可直接进行回采。

(2) 采中重组调控:主要指在开采过程中调整开采方式开采或不开采,主要针对工作面危险区域或遇到特殊地质构造等情况,主要包含限高开采、充填开采、注浆、跳采、工作面参数调整等方法^[36-38]。

(3) 采后持续控制:即对工作面采后的采空区涌水持续进行抽放与利用等,以维持地下水场稳定,主要包含铺设采空区集水装置、设计泄水巷等方法。

根据危险性分区得到工作面各区域危险性状态,首先在采前分区设计中选择主要应对方案,然后在采中重组调控和采后持续控制中选择单一或多个方案组合,以达到煤水协调开采目的。开采布局优化方案如图 16 所示。

4 工程实践

4.1 130203 工作面富水分区

130203 工作面位于 1314 采区,开采煤层为 2 煤层,煤层厚度 8.3~9.3 m 之间,平均煤厚 8.5 m,煤层沿倾向的煤层倾角 12°~15°,平均倾角 14°;影响 130203 工作面开采的主要含水层为直罗组裂隙孔隙层间承压水(含水层 III),其渗透系数为 0.0242 m/d。根据矿区富水性分区可知,130203 工作面富水性由南至北从富水性较强区降低至富水性中等区,130203 工作面总体位于富水性较强区,距停采线约 100 m 范围内位于富水性中等区;根据危险性分区,130203 工作面由南至北从安全区向非常危险区转变,约 1840 m 处于安全区,约 160 m 处于

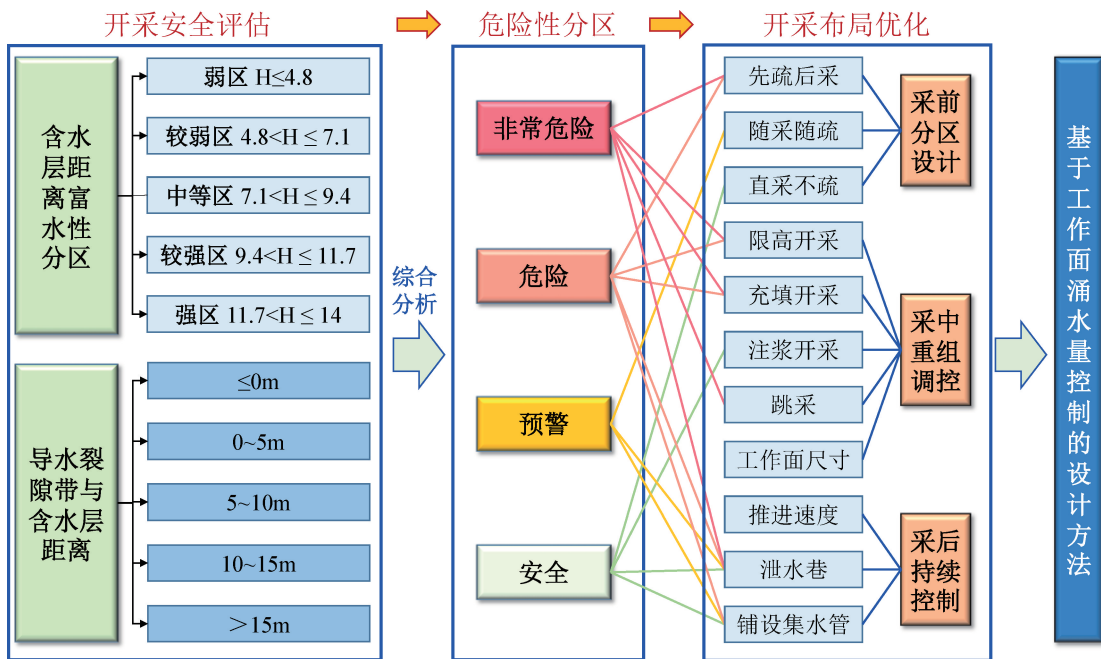


图 16 开采布局优化方案

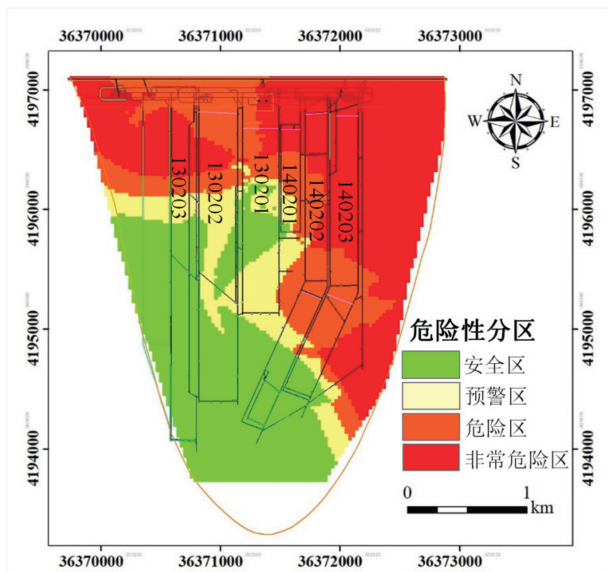


图 17 1314 采区工作面及危险性分区

预警区,约 150 m 处于危险区,约 450 m 处于非常危险区,如图 17 所示。130203 工作面整体评价为安全区,对危险区域处理可减少涌水量。

4.2 基于工作面涌水量控制的开采方案设计

根据 130203 工作面所处分区,采前布局设计选用随采随疏方法,即依据涌水量大小,当涌水量较大时,布置疏水钻孔集中疏排,当涌水量较小时,利用排水沟自行疏排;开采过程中在距工作面开切眼 2 150~2 600 m 的非常危险和危险区域采用限高开采限制导水裂隙带发育,在距工作面开切眼 2 000~2 150 m 范围内对顶板岩层进行注浆处理实现预警

区域安全回采;采后在 130203 皮带巷下方设计 130203 泄水巷,确保回采后采空区塌陷产生的顶板裂隙水能够自流至 130203 泄水巷,然后将其排出至水仓。

4.3 现场实测数据分析

采用 YCS360 矿用多通道瞬变电磁仪在工作面回风巷进行探测,探测起点 B12 距开切眼约 547 m,每隔 10 m 布置一个监测点,共布置 22 个监测点,布置方式如图 18 所示,探测结果如图 19 所示。根据枣泉井田 2020 年 6 月至 2020 年 11 月矿井涌量观

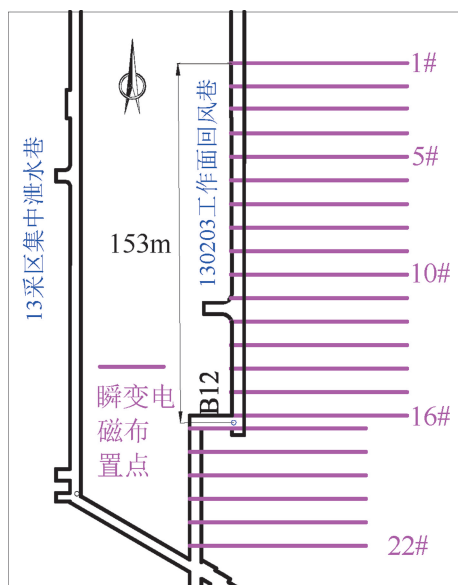


图 18 现场观测布置图

测台账,绘制13采区泄水巷涌水量和矿区总涌水量曲线如图20所示。

由图19可知,130203工作面回风巷本次探测存在两处相对低阻异常区DZ1、DZ2,其中DZ1分析为受顶板20 m、60 m粗砂岩层位砂岩裂隙水影响;DZ2分析为受顶板60 m粗砂岩层位砂岩裂隙水影响,130203工作面开采导水裂隙带并未发育至直罗组底部粗粒砂岩处,即130203工作面此区域为安全区域,与危险性分区中的安全区相对应;由图20可知,13采区泄水巷涌水量随开采时间变化较大,时而增大,时而减小,涌水量在 $60\sim 105\text{ m}^3/\text{h}$ 之间,平均在 $80\text{ m}^3/\text{h}$,这与理论计算的涌水量较为符合。由于13采区泄水巷不仅疏排130203工作面涌水,且对于130201和130202工作面采空区涌水也有疏排作用,可推测130203工作面正常涌水量应在 $60\sim 80\text{ m}^3/\text{h}$ 。由此可知,设计开采布局方案有利于工作面煤水协调开采,实现工作面涌水量控制的目的。

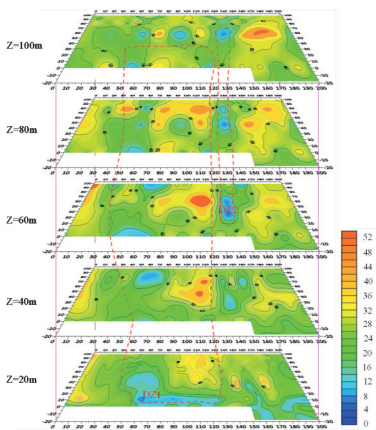


图19 视电阻率探测结果

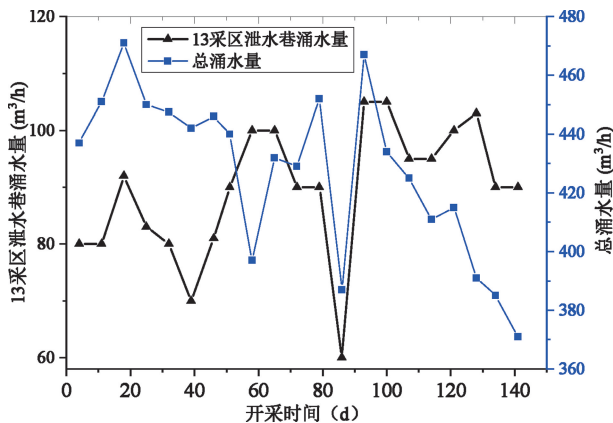


图20 泄水巷涌水量和矿区总涌水量

5 结论

本文以枣泉煤矿为研究对象,建立了矿区三维地质结构模型,探究了不同富水性分区和不同开采方式下地下水流场时空演化规律,提出了基于工作面涌水量控制的开采布局优化设计方法,并以130203工作面为例,预测了工作面开采时涌水量,通过现场实测验证了开采布局方案的合理性,主要结论如下:

(1) 确定含水层富水性主控因素为含水层厚度、脆塑性岩厚比、岩芯采取率、冲洗液消耗量、含水层水位,通过AHP-熵权法耦合赋权模型对覆岩含水层富水性进行分区评价,富水性强区、较强区、中等区、较弱区和弱区分别占4.55%、16.26%、32.40%、28.54%和18.25%,其中,富水性较强区域主要分布在矿区东南部、中部偏南和南部边界区域。

(2) 矿区安全区、预警区、危险区和非常危险区分别占23.45%、30.39%、31.42%和14.74%;预警区分布在矿区中部和北部两侧,矿区危险区分布在矿区中南部区域,矿区非常危险区分布在矿区东南部。

(3) 矿区初始地下水流场呈现由南到北运动趋势,富水性越强,工作面开采时涌水量和水流场影响范围越大;不同开采方式下涌水量和水流场影响范围变化较为明显,由大到小排序为采全高开采>综放开采>分层开采;主要原因是导水裂隙带发育高度越高,其破坏程度越大,含水层水涌入越多。

(4) 提出了采前分区设计、采中重组调控、采后持续控制的工作面涌水量控制设计方法,根据枣泉煤矿130203工作面富水分区及突水危险性预测,随采随疏的采前布局设计、危险区域限高开采的采中重组控制和设计泄水巷的采后持续控制方案,现场实测结果表明涌水来源主要为裂隙孔隙水,即导水裂隙带未发育至直罗组粗粒砂岩含水层中,实现了工作面安全高效回采。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 2019年中国水资源公报. (2020-08-03) [2021-03-01]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202008/t20200803_1430726.html.

- [2] 顾大钊,张勇,曹志国.我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展.煤炭科学技术,2016,44(1):1—7.
- [3] 耿耀强,王苏健,邓增社,等.神府矿区大型水库周边浅埋煤层开采水害防治技术.煤炭学报,2018,43(7):1999—2006.
- [4] 武强,张波,赵文德,等.煤层底板突水评价的新型实用方法V:基于GIS的ANN型、证据权型、Logistic回归型脆弱性指数法的比较.煤炭学报,2013,38(1):21—26.
- [5] Wu Q, Fan ZL, Zhang ZW, et al. Evaluation and zoning of groundwater hazards in Pingshuo No. 1 underground coal mine, Shanxi Province, China. Hydrogeology Journal, 2014, 22(7): 1693—1705.
- [6] 武强,许珂,张维.再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”.煤炭学报,2016,41(6):1341—1347.
- [7] 武强,李博.煤层底板突水变权评价中变权区间及调权参数确定方法.煤炭学报,2016,41(9):2143—2149.
- [8] 武强,李慎举,刘守强,等.AHP法确定煤层底板突水主控因素权重及系统研发.煤炭科学技术,2017,45(1):154—159.
- [9] 冯书顺,武强.基于AHP-变异系数法综合赋权的含水层富水性研究.煤炭工程,2016,48(S2):138—140.
- [10] 武强,樊振丽,刘守强,等.基于GIS的信息融合型含水层富水性评价方法——富水性指数法.煤炭学报,2011,36(7):1124—1128.
- [11] 曾一凡,武强,杜鑫,等.再论含水层富水性评价的“富水性指数法”.煤炭学报,2020,45(7):2423—2431.
- [12] 韩承豪,魏久传,谢道雷,等.基于集对分析-可变模糊集耦合的砂岩含水层富水性评价——以宁东矿区金家渠井田侏罗系直罗组含水层为例.煤炭学报,2020,45(7):2432—2443.
- [13] 毕尧山,吴基文,翟晓荣,等.基于AHP与独立性权系数综合确权的煤矿含水层富水性评价.水文,2020,40(4):40—45.
- [14] 李刚,李建平,孙晓蕾,等.主客观权重的组合方式及其合理性研究.管理评论,2017,29(12):17—26,61.
- [15] 武强,李慎举,刘守强,等.AHP法确定煤层底板突水主控因素权重及系统研发.煤炭科学技术,2017,45(1):154—159.
- [16] 刘守强,武强,曾一凡,等.基于GIS的突水系数法评价新技术及其应用.煤炭工程,2016,48(S2):43—46.
- [17] 武旭仁,魏久传,尹会永,等.基于模糊聚类的顶板砂岩富水性预测研究——以龙固井田为例.山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(2):14—18.
- [18] 彭涛,宣良瑞,张海潮,等.卧龙湖煤矿砂岩含水层富水性预测及评价.煤矿安全,2014,45(8):199—202.
- [19] 崔雪丽,李文平.综采顶板砂岩富水性多元信息预测评价.煤田地质与勘探,2015,43(1):43—47.
- [20] 邱梅,施龙青,滕超,等.基于灰色关联-FDAHP法与物探成果相结合的奥灰富水性评价.岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3203—3213.
- [21] 石守桥,魏久传,尹会永,等.济三煤矿煤层顶板砂岩含水层富水性预测.煤田地质与勘探,2017,45(5):100—104.
- [22] 李德晨.枣泉矿140202大采高工作面安全开采防治水研究.内蒙古煤炭经济,2017(9):99,129.
- [23] 马建军,王满,李达,等.洛河高河漫滩卵石潜水含水层水文地质参数研究.施工技术,2020,49(13):61—64.
- [24] 王新建,徐亚飞.浅析抽水试验参数计算及含水层富水性特征——以钱营孜煤矿东翼推覆体灰岩勘探工程为例.科技创新与应用,2014(15):117—118.
- [25] 张开弦.祁东煤矿四含富水性分区及其下开采覆岩变形破坏规律研究.合肥:合肥工业大学,2018.
- [26] 许珂.台格庙矿区顶板涌(突)水危险性评价与矿井涌水量预测.北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [27] 李超峰.采煤工作面顶板巨厚层状含水层涌水量预测研究.北京:煤炭科学研究总院,2019.
- [28] 梁涛,刘晓丽,王思敬.采动裂隙扩展规律及渗透特性分形研究.煤炭学报,2019,44(12):3729—3739.
- [29] 顾大钊,李庭,李井峰,等.我国煤矿矿井水处理技术现状与展望.煤炭科学技术,2021,49(1):11—18.
- [30] 王双明,申艳军,孙强,等.西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望.采矿与岩层控制工程学报,2020,2(4):1—15.
- [31] 范立民,孙魁,李成,等.西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法.煤炭学报,2020,45(1):317—329.
- [32] 陈苏社,黄庆享,薛刚,等.大柳塔煤矿地下水库建设与水资源利用技术.煤炭科学技术,2016,44(8):21—28.
- [33] 范立民,马雄德,蒋泽泉,等.保水采煤研究30年回顾与展望.煤炭科学技术,2019,47(7):1—30.
- [34] 郭小铭,董书宁.深埋煤层开采顶板基岩含水层渗流规律及保水技术.煤炭学报,2019,44(3):804—811.
- [35] 曹志国,张建民,王皓,等.西部矿区煤水协调开采物理与情景模拟实验研究.煤炭学报,2021,46(2):638—651.
- [36] 黄艳利,王文峰,卞正富.新疆煤基固体废物处置与资源化利用研究.煤炭科学技术,2021,49(1):319—330.
- [37] Li JM, Huang YL, Li W, et al. The 3D reconstruction of a digital model for irregular gangue blocks and its application in PFC numerical simulation. Engineering with Computers, 2021: 1—11.
- [38] 李俊孟,黄艳利,浦海,等.矸石块体三维形状参数自动获取方法与量化分析.中国矿业大学学报,2021,50(3):507—514.

Evolution Characteristics of Mining Groundwater Flow Field and Water Gushing Control Technology of Working Face in Typical Mining Areas in Western China

Yanli Huang^{1,2} Yachao Guo^{1*} Wenyue Qi³ Junmeng Li¹
Huadong Gao¹ Shenyang Ouyang¹ Laiwei Wu¹ Zeyu Ruan¹

1. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116

2. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023

3. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Equipment and Large Structure Mechanics Reliability, Yanshan University, Qinhuangdao 066004

Abstract During the process of large-scale mining of coal resources in western mining area, the roof water damage is threatened. Taking zaoquan coal mine as the research object in this study, which is greatly affected by the huge thick sandstone aquifer of Zhiluo Formation. An evaluation model of aquifer water abundance in the mining area was constructed. Five water-rich zones (weak, weak, medium, strong and strong) and four water-inflooding zones (safe, early warning, dangerous and very dangerous) were determined. The influence of water-rich zoning and mining mode on the evolution law of underground water flow field and the water inflow of working face was explored, and the mining layout design method based on the control of water inflow of working face was proposed, which was applied in 130203 working face of Zaoquan Coal Mine to verify the accuracy of prediction results and the rationality of working face layout. The research results provide theoretical guidance for underground water prevention and control in western mining areas, and provide scientific decision-making basis for roof water control and water resources protection in mining fields.

Keywords sandstone aquifer; water-rich zone; water inrush hazard prediction; groundwater flow field; inflow control

(责任编辑 刘敏 姜钧译)