

中文引用格式:张艺波,赵鹏翔,李树刚,等. 煤层开采卸压瓦斯高位抽采孔智能设计及应用[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5): 215–223.

英文引用格式:Zhang Yibo, Zhao Pengxiang, Li Shugang, et al. Intelligent design and application of high-level boreholes for pressure-relief gas drainage in coal seam mining[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5): 215–223.

煤层开采卸压瓦斯高位抽采孔智能设计及应用^{*}

张艺波¹, 赵鹏翔^{**1,2,3}教授, 李树刚^{1,2}教授, 林海飞^{1,2}教授, 孙红星⁴, 刘元嘉⁵

(1 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2 煤炭行业西部矿井瓦斯智能抽采工程研究中心, 陕西 西安 710054; 3 新疆工程学院 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830023; 4 兖矿新疆矿业有限公司 硫磺沟煤矿, 新疆 昌吉 831100; 5 新疆工程学院 安全科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0504

资助项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3009001); 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2025B03038-2); 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室开放课题项目(KLXGY-KA2404); 陕西省重点研发项目(2024GX-YBXM-490)。

【摘要】 为解决人工设计高位瓦斯抽采钻孔布置参数误差大、抽采效率低的问题, 以新疆某高瓦斯矿井为研究对象, 提出一种基于二维物理相似模拟与智能系统的卸压瓦斯高位抽采孔设计思路。通过二维物理相似模拟试验, 揭示覆岩横纵向裂隙联动演化特征, 精准划分瓦斯运移区(最大高度 36.7 m、最大宽度 22.7 m)与储集区(最大高度 26 m、最大宽度 17 m)的几何边界, 明确瓦斯赋存空间演化特征。基于 Python 语言开发高位瓦斯抽采钻孔智能系统, 融合 OpenGL 技术构建 3D 地质模型, 结合钻孔终点与开孔点平距、方位角及终孔高度等参数, 通过自主研发的参数计算系统自动生成钻孔布置参数(方位角、倾角、长度), 并利用可视化演示系统模拟钻孔轨迹。结果表明: 该系统设计的钻孔终孔位置精准位于垮落带上部、断裂带中下部, 2 号钻场瓦斯抽采体积分数达 6.52%~10.94%, 较传统方法提高 2.52%~5.19%。

【关键词】 煤层开采; 卸压瓦斯抽采; 高位钻孔; 智能设计; 覆岩裂隙

Intelligent design and application of high-level boreholes for pressure-relief gas drainage in coal seam mining

Zhang Yibo¹, Zhao Pengxiang^{1,2,3}, Li Shugang^{1,2}, Lin Haifei^{1,2}, Sun Hongxing⁴, Liu Yuanjia⁵

(1 Safety Science and Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 Western Engineering Research Center of Mine Gas Intelligent Drainage for Coal Industry, Xi'an Shaanxi 710054, China; 3 Key Laboratory of Green Mining of Coal Resources in Xinjiang Ministry of Education, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi Xinjiang 830023, China; 4 Sulphur Ditch Coal Mine, Yankuang Xinjiang Mining Co., Ltd., Changji Xinjiang 831100, China; 5 College of Safety Science and Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi Xinjiang 830023, China)

* 文章编号: 1003-3033(2026)05-0215-09; 收稿日期: 2026-01-14; 修稿日期: 2026-03-12

** 通信作者: 赵鹏翔(1987—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事煤层开采多场耦合合理与瓦斯防治技术方面的研究。E-mail: zhpsh@sina.com。

Abstract: To solve the problems of large error of layout parameters and low extraction efficiency of artificially designed high-level gas extraction boreholes, a high-gas mine in Xinjiang was taken as the research object. A design method for pressure-relief gas high-level extraction boreholes based on two-dimensional physical similarity simulation and an intelligent system was proposed. Through the two-dimensional physical similarity simulation test, the evolution characteristics of the horizontal and vertical fractures of the overlying rock were revealed. Additionally, the geometric boundary between the gas migration area (maximum height 36.7 m, maximum width 22.7 m) and the reservoir area (maximum height 26 m, maximum width 17 m) was accurately divided, and the spatial evolution characteristics of gas occurrence were clarified. Based on Python language, the intelligent system of high-level gas extraction borehole was developed, and the 3D geological model is constructed by integrating OpenGL technology. Combined with the parameters such as the horizontal distance between the borehole end point and the opening point, the azimuth angle and the final hole height, the borehole layout parameters (azimuth angle, inclination angle and length) were automatically generated by the self-developed parameter calculation system. Subsequently, the borehole trajectory was simulated by the visual demonstration system. It is shown by the application that the final hole position of the borehole designed by this system is accurately located in the upper part of the caving zone and the middle and lower part of the fracture zone. The gas extraction concentration of 2 # drilling field is recorded at 6.52%—10.94%, which is found to be 2.52%–5.19% higher than that achieved by the traditional method

Keywords: coal seam mining; pressure-relief gas extraction; high-level borehole; intelligent design; overburden rock fissures

0 引言

随着煤矿开采强度的提高,采空区瓦斯涌出量持续增加,瓦斯灾害频繁发生,是煤矿生产中亟需解决的安全难题^[1]。高位钻孔抽采作为治理卸压瓦斯的主要技术手段^[2-3],其布置参数的合理性直接关系到抽采效果与矿井安全,深入研究该问题具有重要的工程意义^[4]。

针对以上问题,许家林等^[5]以“O”形圈理论为基础,认为在“O”形圈断裂带内,覆岩裂隙发育较好,为气体运移提供了重要的通道。李树刚^[6]、林海飞^[7]等进一步分析了卸压瓦斯抽采机制,推动了定向钻孔等现场工艺的发展与应用。在参数优化与效果验证方面,众多学者通过数值模拟、物理相似模拟及现场试验等手段展开研究。刘建中等^[8]在上隅角采用高位瓦斯钻孔配合理管抽放的方式,极大地提高了瓦斯抽放率,上隅角瓦斯积聚问题得到有效解决。郭书明^[9]、杨勇良^[10]等通过模拟揭示了瓦斯分布特征并构建抽采方案优选系统。王勇^[11]、郭达^[12]等通过现场高位钻孔抽采试验,优化了钻孔布置参数,进一步提高了瓦斯抽采率。贾智慧^[13]、江泽帮^[14]、孟然^[15]等采用现场实时观测、数值模拟相结合的手段,研究了瓦斯涌出量与高位钻孔瓦斯抽

采特征之间的关系,进一步验证了高位钻孔布置参数的合理性。

近年来,随着智能化技术的发展,研究进一步向精准监控与设计延伸。肖鹏等^[16]提出一种基于布里渊光时域的分布式光纤系统,并将其应用于试验矿井,通过建模揭示了钻孔变形塌孔发育特征,并提出精确监控技术流程,有效推动瓦斯抽采钻孔智能化精准监控发展水平。龙杰^[17]、李泉新^[18]、郝天轩^[19]等分别在钻孔可视化建模、定向钻进装备及智能化设计方面取得了进展。郭世斌等^[20]采用神经网络预测抽采巷位置,提升了布置精度。然而现有研究仍存在一定局限:①对开采过程中瓦斯运移-富集区的动态演化特征尚未完全明晰;②钻孔布置设计多基于静态或阶段性分析,缺乏与煤层开采过程动态演化的充分耦合,导致参数适应性不足,抽采效率有待进一步提高。

鉴于此,笔者拟以新疆某高瓦斯矿井为工程背景,开展二维物理相似模拟试验,耦合覆岩裂隙演化特征的精准表征与智能化设计系统,突破传统高位钻孔布置参数误差大、抽采效率低的技术瓶颈,提升卸压瓦斯抽采过程的动态调控精度,以期高瓦斯矿井智能化瓦斯治理提供新的技术路径。

1 高位抽采钻孔布置原则及其影响因素

1.1 高位钻孔瓦斯抽采钻孔布置原则

要实现采空区瓦斯的定向抽采,必须明确采空区上覆岩层的垮落特征,掌握其裂隙发育特征,并提出各种抽采方法的合理配置层位^[20-22]。因此,准确把握煤层开采上覆岩层采动裂隙分布特征,是决定瓦斯抽采孔布置参数的重要依据。煤层采动过程中,在垂直方向和水平方向上分为竖三带、横三区。根据采动裂隙“O”形圈理论,随着开采的进行,采场离层裂隙的数量也在逐渐增多,而压实区的破裂也呈现出反复扩展过程,采空区两侧仍能保持较大的裂隙。

同时,以覆岩裂隙“三带”特征、采动裂隙椭抛带理论、瓦斯升浮-扩散运移理论等为基础,进一步划分煤层采动过程中覆岩裂隙区域,引入覆岩裂隙场分域准则,为优化钻孔布置参数提供参考^[23],依据采动覆岩裂隙的发育特征及气体运移难易程度,将上覆岩层自下而上分为 5 个区域,见表 1。

表 1 采动覆岩裂隙分区

Table 1 Division of overlying strata		
不同分区	区域特征	
不规则垮落区	该区域内瓦斯渗流通道是近似各向同性的多孔介质,岩层破坏变形程度以垮落为主,覆岩裂隙下沉量,贯通度发育显著	
规则垮落区	该区域内瓦斯渗流通道主要以裂缝为主,包括沿层面的断裂缝和层间的离层裂缝,该区域内岩层破坏变形程度以垮落为主,覆岩裂隙下沉量较大,贯通度发育显著	
裂隙区	破断裂隙密集区	该区域内瓦斯升浮优势通道发育完善,瓦斯升浮容易,破断裂隙较多,连通性好,透气性良好,贯通度较为显著
	离层裂隙密集区	该区域内瓦斯升浮优势通道发育较为完善,瓦斯升浮逐渐困难,破断裂隙较少,连通性、透气性一般,覆岩裂隙下沉量较小,贯通度发育微弱
微小裂隙区		该区域内瓦斯升浮优势通道发育差,瓦斯以水平扩散运移为主,裂隙发育特征多为小型离层裂隙,覆岩裂隙下沉量最小

从表 1 可以看出,从下至上瓦斯运移由渗流逐渐变为升浮,最终形成水平集聚,瓦斯向上运移逐渐困难。裂隙发育从下至上的下沉量和滑移量逐渐变小,贯通度发育也逐渐变小。越靠近煤层顶板的裂

隙发育特征多为破断裂隙,越远离煤层顶板的裂隙发育特征多为离层裂隙。垮落带岩体垮落更为明显,但此处岩体稳定性差,布置钻孔容易发生塌孔现象。而断裂带区域拥有裂隙发育完全、透气性高、稳定性好的优势,可实现瓦斯抽采效率与工程安全性的最大化,因此,钻孔布置应在断裂带内。

1.2 高位钻孔瓦斯抽采钻孔布置影响因素

上覆岩层的演化特征主要由工作面的地质条件及开采工艺等多因素决定,笔者团队大量研究以上多种影响因素,得出相对应的覆岩结构演化特征,并对许多矿井现场有指导意义^[24-25]。具体影响如下:

- 1) 采高。以采动裂隙椭抛带理论为基础,随着采高的增加,瓦斯运移区域高度、宽度发生明显增加,运移区域左、右边界出现显著的分层现象。
- 2) 倾向长度。工作面倾向长度越大,断裂带范围越大。
- 3) 覆岩结构。在不考虑其他影响因素时,上覆岩层岩性越硬,裂隙发育高度越低。
- 4) 回采率。随着回采率的增加,卸压瓦斯运移-储集区高度、宽度都随之增加。
- 5) 埋深。随着埋深的增加,上覆岩层所受地应力越大,裂隙发育越明显。
- 6) 煤层倾角。以 35°为临界点,当倾角小于 35°时,覆岩断裂带高度随着煤层倾角增大而增大;反之,当其大于 35°时,覆岩断裂带高度随倾角的增大而减小。
- 7) 推进速度。当推进速度增大时,裂隙区的高度、宽度都会随之减小,同时,其采动覆岩裂隙的离层量、贯通度也会随之减小。

2 卸压瓦斯运-储区区域演化特征

2.1 物理模拟试验

选取新疆某高瓦斯矿井工作面为试验原型,煤层及上覆岩层的部分物理参数如图 1 所示。物理模型遵循试验原型的地质条件和模拟试验条件,满足相似定理。

随着开采的进行,共发生 5 次周期来压,其中,垮落带高度为 12.3 m,断裂带高度 60.5 m,图 2 为二维物理相似模拟试验覆岩裂隙发育终态结果。周期来压时,覆岩裂隙呈阶段性发育,采动应力重新分布,促使覆岩裂隙进一步扩展、贯通,在第 5 次周期来压,覆岩裂隙发育成熟,形成完整的瓦斯运移区、储集区。

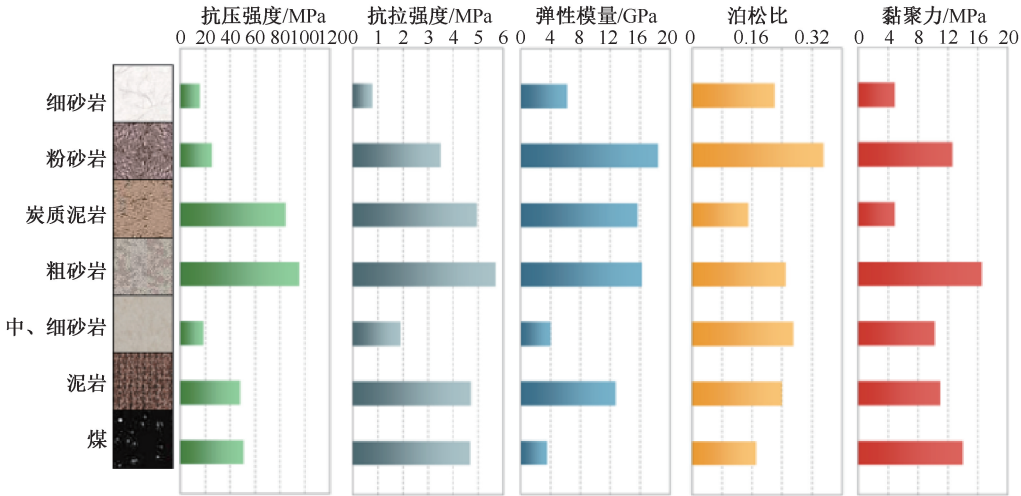


图1 煤岩层物理力学参数

Fig.1 Physical and mechanical parameters of coal and rock strata

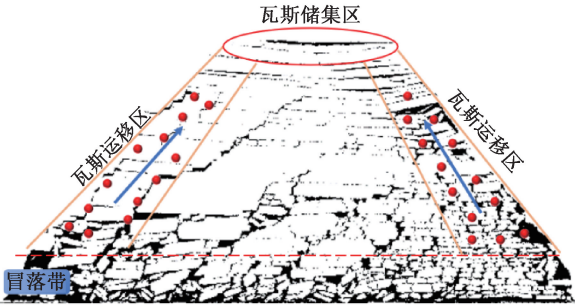


图2 物理相似模拟试验结果

Fig.2 Physical similarity simulation experiment results

2.2 采动覆岩裂隙“三带”横纵裂隙联动演化特征

通过分析上覆岩层下沉量、离层量、贯通度等因素,得到上覆岩层“三带”横纵裂隙在不同周期的演化特征,准确分析划分采空区覆岩裂隙发育区域。

图3为覆岩“三带”在不同周期性来压条件下裂隙的演变过程,其上覆岩层离层数量和破断数量沿采空区上方持续发育,形成采空区瓦斯运移和储集的良好通道,图中上覆岩层的横纵裂隙发育高差构建了瓦斯运储网络,裂隙随周期来压联动演化,通过融合、分离与再发育,动态控制着瓦斯运移区与储集区的分布与衔接。当工作面回采到30 m时,初次来压发生,此时采空区横向裂隙与纵向裂隙高度突然增大,形成最初的瓦斯富集区,随着采煤工作面推进距离的不断增大,在断裂带中不断出现横纵向裂隙,且距顶板的距离也在不断增大,为瓦斯运储所创造的空间也随之增大。

2.3 卸压瓦斯运移-储集区域几何特征

在初次来压发生后,随着开采距离的增大,上覆

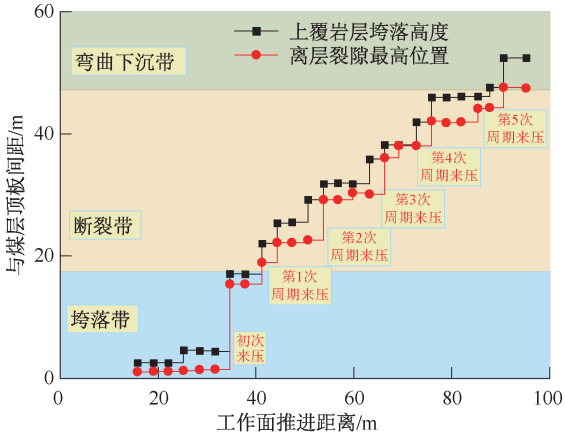


图3 上覆岩层“三带”横纵裂隙联动演化特征

Fig.3 Linkage evolution characteristics of horizontal and vertical cracks in ‘three zones’ of overlying strata

岩层裂隙逐渐发育成熟,出现完整的瓦斯运集、运移区;随着不断发生周期来压,采空区内的横纵向裂隙不断向上以及向靠近工作面一侧发育。通过对不同周期性来压时瓦斯运储区几何参数的统计分析,掌握瓦斯赋存空间的演变特征。

不同周期来压卸压瓦斯运储区高度和宽度变化如图4所示。图4a中瓦斯运移区高度在前3次周期来压前均与工作面推进距离同步增长,在第4次到第5周期来压的过程中,随采空区逐渐压实,断裂带垂向闭合,运移区高度持续衰减,宽度变化趋势在同步减小。这一过程中上覆岩层经历“悬臂梁-铰接结构-压实”演化,裂隙开度减小导致瓦斯在竖直方向上的运移能力减弱,瓦斯运移区几何特征最终高为36.7 m、宽为22.7 m。图4b中,第1次周期来压时,受煤层采动影响,上覆岩层断裂、裂隙发育处

于初始阶段,储集区高度、宽度基数小;随着第 2 次至第 5 次周期来压,采动影响持续叠加,上覆岩层“破断-运移-重新平衡”过程反复发生,岩层裂隙网络不断拓展连通,使储集区高度、宽度持续递增,且高度增长速率相对更显著,瓦斯储集区几何特征最终高为 26 m、宽为 17 m。

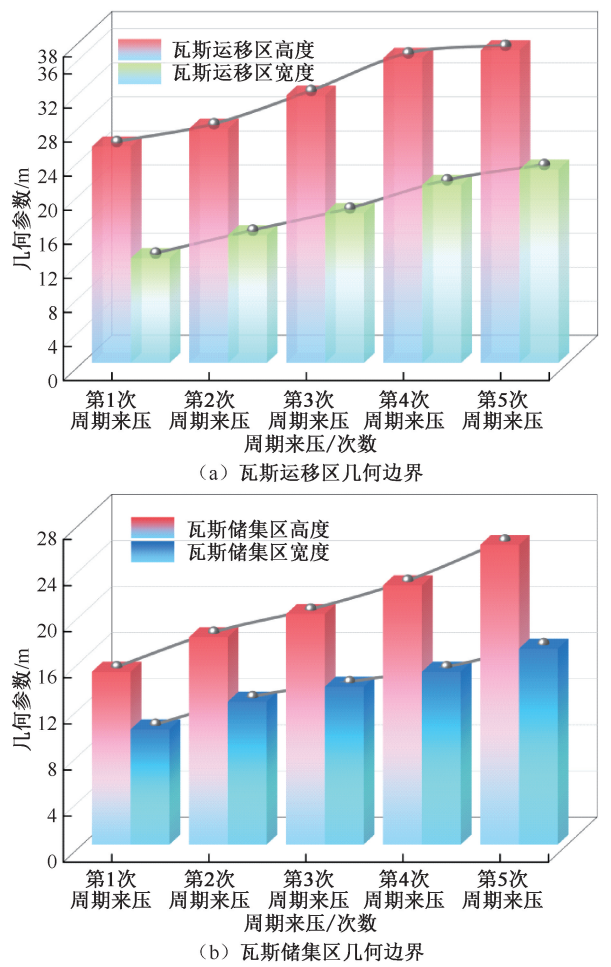


图 4 不同周期来压卸压瓦斯运储区高度和宽度变化特征
Fig. 4 Variation law of height and width of pressure relief gas reservoir area in different periodic weighting stages

当前煤层开采卸压瓦斯抽采方法是根据瓦斯涌出来源,划分为邻近层卸压瓦斯抽采、采空区抽采和围岩抽采。采动卸压瓦斯抽采方法可分为巷道抽采采动卸压瓦斯方法、管路抽采瓦斯方法、钻孔抽采瓦斯方法。其中,高位钻孔抽采采动断裂带方法的关键参数是钻场层位及其间距,钻孔直径、终孔点与煤层顶板垂距、终孔点与回风巷平距、钻孔数量以及压茬长度、抽采负压等。常规高位钻孔存在钻孔利用率较低、层位定位不准、抽采效果不稳定等问题,为改善此类问题,研究开发卸压瓦斯高位抽采钻孔智

能设计系统,提高钻孔布置参数精确度及瓦斯抽采效率。卸压瓦斯抽采技术如图 5 所示。

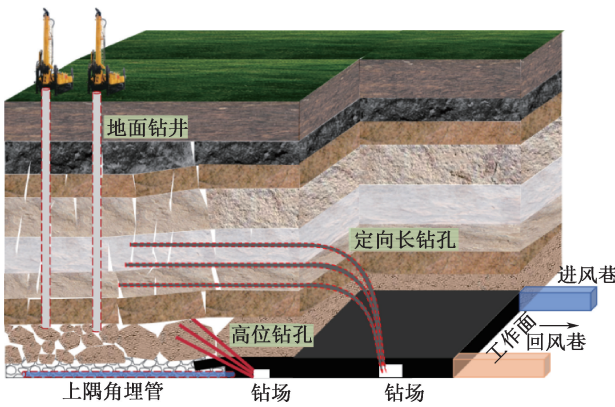


图 5 卸压瓦斯抽采技术
Fig. 5 Pressure relief gas extraction technology

3 煤层开采卸压瓦斯高位抽采钻孔智能设计及应用

3.1 高位抽采钻孔智能设计系统构建

图 6 为系统设计思路,该系统基于现场数据、实验室试验得出系统基本模拟参数,并利用矿井概况设置系统、钻孔参数计算系统及可视化演示系统 3 个子系统完成对卸压瓦斯高位钻孔的设计。

该软件运用 Python 语言分别开发出软件操作界面、矿井概况设置系统、钻孔参数计算系统以及可视化演示系统。可在后台管理界面编辑操作钻孔的参数中的倾角、方位角等布置参数,系统会根据预设的工况计算公式进行相关参数的自动计算,并展示在界面上。同时,该模块提供原理图查看和钻孔编号选择按钮,可查看每个钻孔的可视化模拟钻孔路径。

3.2 系统原理及操作过程

通过自主研发的高位瓦斯抽采钻孔智能设计系统,完成对矿井实际情况以及“三带”具体高度、宽度模拟的 3D 模型;利用高位钻孔参数计算程序得出方位角 γ 、钻孔倾角 β 和钻孔长度 L 等钻孔布置参数。

依据现场实际工况条件以及试验模型结果建立相应矿井模型,如图 7 所示,在操作界面设定图像质量等参数,依照参数设计标准,输入相对应的计算参数,利用钻孔参数计算系统,得到准确的钻孔布置参数,并利用可视化演示系统完成对钻孔布置过程中的模拟,得到高位钻孔瓦斯抽采布置参数的最终结果。

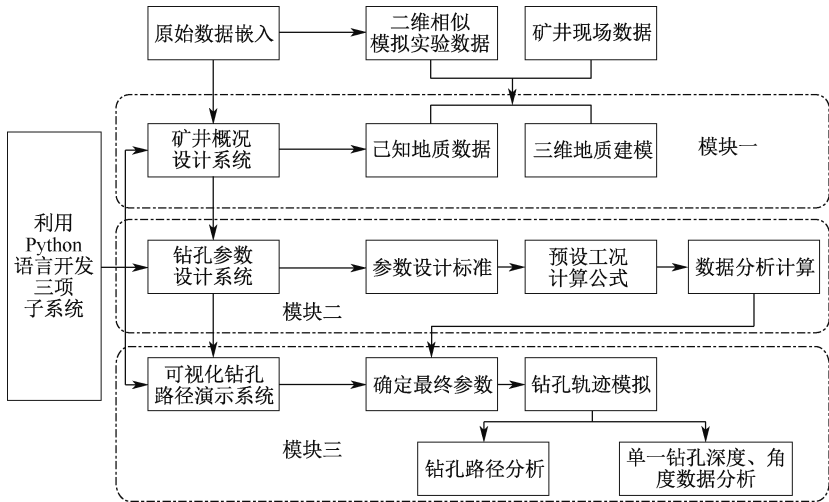


图 6 系统设计思维导图
Fig. 6 System design mind map

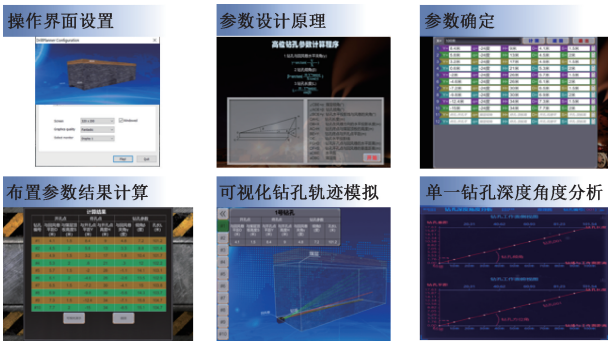


图 7 智能系统操作导图

Fig. 7 Intelligent system operation guide map

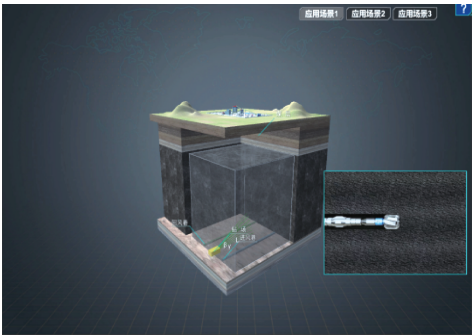


图 8 可视化模拟过程

Fig. 8 Visual simulation process diagram

该系统需利用已有装置完成煤矿地质条件的初步测定,再将相关参数,如煤层埋深、煤层厚度、煤层结构等具体数值输入设置模块,系统将利用数维分析、三维地质等并基于 OpenGL 技术进行模拟建模,生成与实际井下环境高度相似的 3D 井下模型,同时可利用物理相似模拟试验,根据“三带”几何发育边界,建立井下瓦斯运储区边界模型。设置完成后也可删除数据重新更改再次建模,系统较为敏捷,便于操作,能够有效降低工作量,保障可视化演示的准确性。

通过可视化模拟演示系统,依据矿井实际条件设置系统、物理相似模拟试验、计算系统所得结果利用可视化技术建立模拟运行模型,展开不同钻头的运行轨迹与整体钻孔的位置分布情况,如图 8 所示。

3.3 高位钻孔智能设计现场应用及抽采效果评价

1) 高位钻孔智能设计现场应用。结合采空区覆岩“三带”物理相似模拟试验及高位钻孔瓦斯抽采智能系统模拟得到,(4-5)06 工作面采场覆岩垮

落带高度为 12.3 m,由于高位钻孔布置于垮落带中会导致回采期间容易出现塌孔情况,从而影响到采空区卸压瓦斯抽采效果,因此,将钻孔终孔位置布置于垮落带上部,断裂带下部。多系统协同抽采布置如图 9 所示,针对巨厚煤层瓦斯含量大等问题,开展卸压瓦斯高位钻孔抽采,同时辅以上隅角埋管等措施,进行分源治理,以保证工作面正常回采。

针对(4-5)06 工作面,高位钻孔采用上下 2 排布置方式,开孔高度分别为 1.5 和 2.0 m,钻孔间距 0.8 m。设计孔径均为 133 mm,孔深约 100 m,通过调整仰角(1.6~4.0°)与水平偏角,控制终孔位于巷道顶板以上 3~15 m 的断裂带内,以实现卸压瓦斯的高效抽采。

2) 高位瓦斯抽采钻孔抽采效果评价。(4-5)06 工作面轨道巷的 2 个高位钻场分别采用传统设计方法与智能设计系统进行布孔。通过实时监测 2 钻场各孔的瓦斯抽采体积分数、钻场与工作面间距、钻孔终孔位置相对于煤层顶板及回风巷的水平

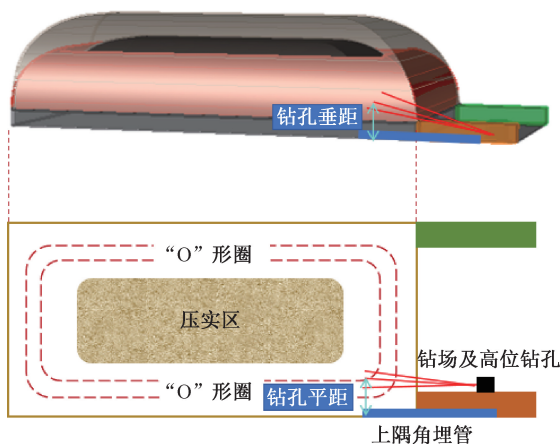


图 9 多系统协同抽采布置

Fig. 9 Multi-system collaborative extraction layout

距离随工作面推进的变化,分析得到瓦斯体积分数的动态演化特征,如图 10 所示。

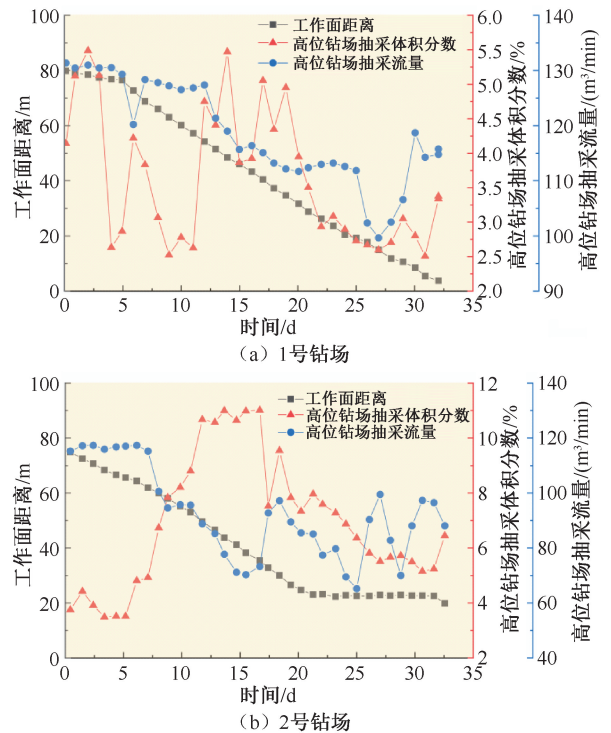


图 10 1 号、2 号钻场抽采效果与工作面推进距离变化关系

Fig. 10 Relationship between extraction effect of No. 1 and No. 2 drilling field and change of working face advancing distance

由图 10 可知:工作面上端头覆岩在回采初期即卸压充分、裂隙发育,因此,钻孔抽采体积分数保持较高,但因初期瓦斯涌出量整体较小,钻场抽采体积分数仍处于较低水平。随着工作面推进及初次来压作用,抽采效果显著提升,在钻场距工作面 35~55 m 范围内,瓦斯抽采体积分数在 4%~5.75%,抽采流量在 110~125 m³/min。

对比 1 号高位钻场,2 号高位钻场是利用高位抽采钻孔智能设计系统所得布置参数,在 2 号钻场抽采初期,钻孔抽采流量较高,而抽采体积分数较低,随着工作面的持续推进,在工作面距 2 号钻场 30~50 m 处时,瓦斯抽采体积分数较大,而钻场抽采流量偏小,在此范围内,2 号钻场抽采流量在 65~104 m³/min,钻场抽采体积分数 6.52%~10.94%,取得了良好的抽采效果。

4 结 论

1) 煤层开采卸压作用下,覆岩横向离层裂隙与纵向破断裂隙在周期来压控制下协同演化,进而形成“运移—储集”空间分布状态,据此获得卸压瓦斯运移区与储集区的几何边界定量表征。

2) 构建“物理相似模拟、钻孔参数生成、轨迹可视化”的一体化智能设计路径,使高位抽采孔布置由经验计算转为以运储区边界为核心的目标导向设计;通过钻孔方位、倾角、长度与终孔空间位置的协同优化,形成可推广的高位抽采孔精准设计范式。

3) 1 号钻场为矿井按照传统方法布置,在工作面前 55 m 范围内瓦斯抽采体积分数在 4%~5.75%;2 号钻场是利用高位抽采钻孔智能设计系统所得布置参数,瓦斯抽采体积分数较大,钻场抽采流量偏小,在距工作面 30~50 m 处时,2 号钻场抽采流量在 65~104 m³/min,钻场抽采体积分数 6.52%~10.94%。通过现场监测数据对比,2 号钻场取得了良好抽采效果,较传统方法瓦斯抽采体积分数提高 2.52%~5.19%。

参 考 文 献

[1] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
Yuan Liang. Research progress on deep mining response and disaster prevention and control[J]. Journal of China Coal

Society, 2021, 46(3): 716–725.

- [2] 程志恒, 卢云, 苏士龙, 等. 采空区顶板高位走向长钻孔高效抽采瓦斯机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 136–142.
Cheng Zhiheng, Lu Yun, Su Shilong, et al. Study on the mechanism of high-efficiency gas extraction from long boreholes in high-level strike of goaf roof [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (2): 136–142.
- [3] 毕慧杰, 邓志刚, 赵善坤, 等. 高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 134–140.
Bi Huijie, Deng Zhigang, Zhao Shankun, et al. Research on gas extraction technology of directional high-level boreholes in high-gas fully mechanized mining face [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 (4): 134–140.
- [4] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2 197–2 211.
Xie Heping, Ren Shihua, Xie Yachen, et al. Opportunities for the development of coal industry under the goal of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46 (7): 2 197–2 211.
- [5] 许家林, 钱鸣高. 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 78–81.
Xu Jialin, Qian Minggao. Experimental study on drainage of overlying long-distance pressure-relieved coalbed methane by surface drilling [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(1): 78–81.
- [6] 李树刚, 林海飞, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙椭圆带动态演化及煤与甲烷共采[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1 455–1 462.
Li Shugang, Lin Haifei, Zhao Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining-induced fractured elliptical paraboloid zone and co-mining of coal and methane [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (8): 1 455–1 462.
- [7] 林海飞, 李树刚, 赵鹏翔, 等. 我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 28–35.
Lin Haifei, Li Shugang, Zhao Pengxiang, et al. Research progress of pressure relief gas extraction technology in mining fractured zone of overlying strata in China [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46 (1): 28–35.
- [8] 刘建中, 赵保平, 孔祥义, 等. 高位钻孔配合合理管抽放治理采面上隅角瓦斯[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(2): 46–49.
Liu Jianzhong, Zhao Baoping, Kong Xiangyi, et al. High-level drilling with buried pipe drainage to control gas in the upper corner of the mining face [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38 (2): 46–49.
- [9] 郭书明, 钱志良. 高位钻孔抽采采空区瓦斯数值模拟研究[J]. 能源技术与管理, 2023, 48(5): 51–52, 197.
Guo Shuming, Qian Zhiliang. Numerical simulation of gas extraction in goaf by high-level borehole [J]. Energy Technology and Management, 2023, 48 (5): 51–52, 197.
- [10] 杨永良, 李增华, 侯世松, 等. 高位钻孔瓦斯抽采参数优化技术[J]. 煤矿安全, 2012, 43(11): 64–67.
Yang Yongliang, Li Zenghua, Hou Shisong, et al. High-level borehole gas extraction parameter optimization technology [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43 (11): 64–67.
- [11] 王勇, 常兴中. 高位钻孔瓦斯抽采参数优化技术[J]. 能源技术与管理, 2018, 43(1): 24–25, 111.
Wang Yong, Chang Xingzhong. High-level borehole gas extraction parameter optimization technology [J]. Energy Technology and Management, 2018, 43 (1): 24–25, 111.
- [12] 郭达. 瓦斯抽采高位钻孔参数优化研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(6): 60–62.
Guo Da. Optimization of high-level borehole parameters for gas extraction [J]. Coal Engineering, 2013, 45 (6): 60–62.
- [13] 贾智慧. 大直径高位钻孔代替高抽巷治理采空区瓦斯研究[J]. 自动化应用, 2023, 64(17): 202–205.
Jia Zhihui. Research on gas control in goaf by large diameter high-level borehole instead of high drainage roadway [J]. Automation Application, 2023, 64 (17): 202–205.
- [14] 江泽帮, 吴珏, 杜会宇, 等. 高位定向钻孔合理层位确定及抽采效果分析[J]. 煤炭技术, 2023, 42(2): 150–153.
Jiang Zebang, Wu Jue, Du Huiyu, et al. Reasonable horizon determination and extraction effect analysis of high-level directional drilling [J]. Coal Technology, 2023, 42 (2): 150–153.
- [15] 孟然, 唐洪, 韦钊, 等. 综采工作面高位钻孔瓦斯涌出规律研究[J]. 煤炭科技, 2023, 44(4): 89–94, 102.
Meng Ran, Tang Hong, Wei Zhao, et al. Study on the law of gas emission from high-level boreholes in fully mechanized mining face [J]. Coal Science, 2023, 44 (4): 89–94, 102.
- [16] 肖鹏, 黄晓昇, 刘潇潇, 等. 瓦斯抽采钻孔变形塌孔规律及精准监测技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024,

52(3):14-23.

Xiao Peng, Huang Xiaosheng, Liu Xiaoxiao, et al. Study on deformation and collapse law and precise monitoring technology of gas extraction borehole [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2024, 52 (3): 14-23.

- [17] 龙杰, 左金芳, 李辉勤, 等. 智能化钻孔设计与审查系统的研究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(6): 228-232.

Long Jie, Zuo Jinfang, Li Huiqin, et al. Research on intelligent borehole design and examination system [J]. Coal Technology, 2024, 43 (6): 228-232.

- [18] 李泉新, 姚克, 方俊, 等. 煤矿井下瓦斯高效精准抽采定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(增刊1): 65-72.

Li Quanxin, Yao Ke, Fang Jun, et al. Coal mine underground gas efficient and accurate extraction directional drilling technology and equipment [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51 (S1): 65-72.

- [19] 郝天轩, 范国阳, 赵立桢. 基于 AutoCAD 的钻孔智能设计系统[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(4): 71-77.

Hao Tianxuan, Fan Guoyang, Zhao Lizhen. An intelligent drilling design system based on AutoCAD [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19 (4): 71-77.

- [20] 郭世斌, 胡国忠, 朱家铎, 等. 顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52 (4): 203-213.

Guo Shibin, Hu Guozhong, Zhu Jiaxin, et al. Intelligent prediction method for layout position of roof gas drainage roadway [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52 (4): 203-213.

- [21] Zhu Hongqing, Fang Shuhao, Huo Yujia, et al. Study of the dynamic development law of overburden breakage on mining faces [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-15.

- [22] Wu Quansen, Jang Lishuai, Wu Quanlin, et al. A study on the law of overlying strata migration and separation space evolution under hard and thick strata in underground coal mining by similar simulation [J]. DYNA-Ingeniería e Industria, 2018, 94(2): 175-181.

- [23] 赵鹏翔, 常泽晨, 李树刚, 等. 厚煤层采空区定向孔分域抽采研究及应用[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 70-79.

Zhao Pengxiang, Chang Zechen, Li Shugang, et al. Research and application of directional drilling sub area extraction in thick coal seam goaf [J]. China Safety Science Journal, 2023, 32(1): 70-79.

- [24] 李树刚, 刘李东, 赵鹏翔, 等. 综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 95-104.

Li Shugang, Liu Lidong, Zhao Pengxiang et al. Analysis of influencing factors on dynamic evolution law of cracks in overburden rock compaction area of fully mechanized mining face [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50 (1): 95-104.

- [25] 赵鹏翔, 卓曰升, 李树刚, 等. 倾斜巨厚煤层开采卸压瓦斯运储区"类冷却塔"形成机理及分域抽采[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(5): 1 002-1 019.

Zhao Pengxiang, Zhuo Risheng, Li Shugang, et al. Distribution characteristics of "similar cooling tower" in gas migration and storage areas of inclined extremely thick coal seam and sub-domain extraction method [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2025, 54(5): 1 002-1 019.



作者简介: 张艺波 (1998—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要研究方向为瓦斯智能抽采。E-mail:zhang-yibo2024@163.com。