

张国川,张海庆,寇建新,等.深部回采区段极近距离煤层的卸压消突响应范围[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):641-650.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250082

ZHANG Guochuan,ZHANG Haiqing,KOU Jianxin,et al.Response range of pressure relief and outburst elimination in extremely close distance coal seams of deep mining sections[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(6):641-650. DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250082

深部回采区段极近距离煤层的卸压消突响应范围

张国川¹, 张海庆¹, 寇建新¹, 唐 治^{2*}, 吕进国²

(1. 平顶山天安煤业股份有限公司, 河南 平顶山 467000; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为研究深部极近距离上覆煤层开采对下伏煤层卸压消突范围, 确定掘巷位置, 以平煤股份六矿为研究对象, 采用压力拱与极限平衡分析方法, 分析了卸压带与消突带分布及两者之间的关系。采用物理相似模拟试验, 研究回采区段下方的极近距离煤层应力与变形系数的变化规律, 确定极近距离煤层的卸压范围。采用数值模拟分析方法, 考虑瓦斯抽采的影响, 研究了回采区段下方极近距离煤层瓦斯压力的变化规律与消突范围。采用现场实测方法, 测定了回采区段下方极近距离煤层的瓦斯含量(单位为 m^3/t)、瓦斯压力随回采距离的变化规律, 综合确定了极近距离煤层的消突范围。研究表明: 考虑井下抽采影响, 戊₉₋₁₀煤层距戊₈-32030机巷13.95 m范围内为卸压带, 30 m范围内为消突带。消突带一般位于卸压区与塑性变形区内, 可超过卸压范围但不超出极限平衡范围。

关键词: 极近距离煤层; 卸压; 消突; 瓦斯; 变形系数

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0641-10

Response range of pressure relief and outburst elimination in extremely close distance coal seams of deep mining sections

ZHANG Guochuan¹, ZHANG Haiqing¹, KOU Jianxin¹, TANG Zhi^{2*}, LYU Jinguo²

(1. Pingdingshan Tian'an Coal Industry Company Limited, Pingdingshan 467000, China;

2. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the range of pressure relief and outburst elimination of the underlying coal seam by the mining of the overlying coal seam with very close distance in the deep part, and to determine the location of the roadway, the No.6 Coal Mine of Pingdingshan Coal Industry Company Limited was taken as the research object. Based on the pressure arch theory and limit equilibrium analysis, the distribution patterns of the pressure-relief and outburst-prevention zones and their interrelationship were theoretically analyzed. Physical similarity simulation tests were conducted to examine the variations in stress and deformation coefficients of the extremely close underlying seam beneath the mined panel, thereby determining the pressure-relief range. Numerical simulations, considering the effect of gas drainage, were performed to study the variation of gas pressure and to delineate the outburst-prevention range. Field measurements of gas content(unit: m^3/t) and gas pressure with increasing distance from the mined panel were carried out to comprehensively determine the actual outburst-prevention range. The results indicate that, under the influence of underground gas drainage, the Wu 9-10 seam within 13.95 m of the Wu 8-32030 roadway constitutes the pressure-relief zone, while the area within 30 m constitutes the outburst-prevention zone. The outburst-prevention zone generally lies within the pressure-relief and plastic deformation zones, may extend beyond the pressure-relief range, but does not exceed the limit equilibrium range.

Keywords: extremely close coal seam; pressure relief; outburst elimination; gas; deformation coefficient

收稿日期: 2025-03-04 修回日期: 2025-04-27 接受日期: 2025-05-23 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374205)

作者简介: 张国川(1977-), 男, 内蒙古赤峰人, 高级工程师, 主要从事煤矿安全技术方面的研究。E-mail: 03753591701@163.com

通信作者: 唐 治(1983-), 男, 云南曲靖人, 博士, 教授, 主要从事煤岩动力灾害基础理论与防治方面的研究。E-mail: tangzhi0127@163.com

0 引言

煤炭是中国的主要能源,其安全、高效开采是矿业工程领域的重点研究方向^[1-3]。随着浅部煤炭资源逐渐枯竭,越来越多的矿井转向深部开采,煤岩瓦斯复合动力灾害风险增加^[4-5]。在极近距离煤层开采过程中,由于煤层间距较小,层间应力集中与变形破坏问题尤为突出;若其中一层为突出煤层,则更容易诱发煤与瓦斯突出灾害,严重影响开采安全与效率^[6-8]。

学者对极近距离煤层开采的卸压和消突效果开展诸多研究。郭明功等^[9]研究表明,巷道正上方区域卸压效果最佳。针对近距离煤层开采下部煤层回采巷道布置难题,孔德中等^[10]研究了残留煤柱在底板的应力分布特征及巷道在非均布载荷下的破坏机理,发现煤柱两侧边缘形成应力降低区而正下方出现应力增高区,导致底板应力分布呈现显著非均匀性。侯建军等^[11]研究煤层群叠加开采对上覆岩层采动裂隙的演化特征,发现卸压区域外会形成较大应力集中,而卸压保护范围内的应力集中现象不明显,其应力峰值甚至低于煤层原始应力。赵灿等^[12]运用室内试验、数值模拟和现场试验,分析近距离煤层群下行开采的底板应力分布特征、卸压范围及钻孔瓦斯抽采布置方案。刘建高等^[13]阐明了薄煤层保护层开采的卸压机理,确定了薄煤层保护层开采对下邻近煤层的卸压保护范围及解放煤量。许鸣皋等^[14]采用 UDEC 软件建立近距离煤层群下向卸压开采模型,研究近距离煤层群上部煤层开采时对下部煤岩层产生的应力分布影响。李海涛等^[15]对保护层开采时底板卸压效果进行分析,研究结果表明,在2号煤层作为保护层开采的情况下,底板卸压深度可达20~36 m,大于“3号+4号”煤层与3号煤层之间的最大垂直距离。

目前,针对深部极近距离上覆煤层开采对下伏煤层卸压消突作用的研究较少,尤其是当两煤层间距小于5 m时,卸压与消突范围的合理确定问题更为突出^[16-18]。本文以平煤股份六矿为工程依托,采用理论分析、物理相似模拟试验与井下现场实测相结合的方法,研究深部回采区域下方的极近距离煤层的应力、变形系数、瓦斯含量与瓦斯压力的变化规律,分析卸压范围与消突范围的关系,确定消突范围,明确极近距离煤层开采的卸压消突作用机制。

1 近距离煤层开采卸压理论分析

随着工作面不断推进,采空区上覆岩层发生

移动破坏,依次形成冒落带、裂隙带与弯曲下沉带。冒落带与裂隙带内岩体因破坏发生应力释放,形成低应力区。裂隙带外侧边缘区域的岩体完整性较好、承载能力较强,形成高应力区。在高低应力区的协同作用下,覆岩中形成类似拱形的承载结构(即压力拱),该结构承担上覆岩层载荷并将其传递至采空区两侧实体煤,对维持采场稳定性具有关键作用。随着采空区范围扩大,上覆岩层断裂范围扩展,应力向两侧转移集中,新的小型压力拱在更高层位形成,最终演化为统一的拱结构。结构示意图见图1。

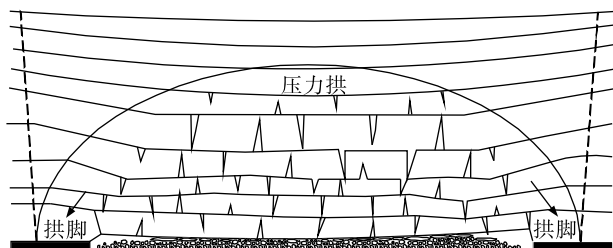


图1 压力拱结构示意图

Fig.1 schematic of pressure arch structure

采空区覆岩运动稳定后,压力拱形态趋于稳定。在此过程中,采空区两侧实体煤所受的侧向支承压力及其影响范围随压力拱结构的发展而增大。拱顶因低应力状态可能发生离层或断裂。拱腰区域介于拱顶和拱脚之间,应力梯度变化显著。拱脚区域为高应力集中区,主要集中于采空区两侧的实体煤处,该区域的高应力易导致煤体或围岩发生塑性破坏,进而在其附近形成一定范围的卸压区。

设顶板岩层容重为 γ ,开采深度为 H ,比例常数为 K ,则侧向支承压力峰值可表示为 $K\gamma H$ 。当侧向支承压力峰值大于煤体的抗压强度 σ 时,煤壁发生塑性破坏,导致压力峰值向煤体深部转移。待采空区上覆岩层运动稳定后,支承压力峰值及其影响范围方能保持不变。一般而言,工作面侧向支承压力的大小受多种因素影响,如开采深度、煤岩体及顶板岩层的物理力学性质、采空区几何尺寸等。具体表现为:开采深度增加时,上覆岩层重量增大,侧向支承压力的影响范围随之扩大;顶板岩层硬度增大时,侧向支承压力的分布范围增大;采空区几何尺寸增大时,顶板岩层运动破坏程度加剧,进而导致侧向支承压力影响范围扩大。

上覆煤层开采后,在下位极近距离煤层侧向支承压力作用下,煤体垂直应力 σ_y 随距离 x 增大呈负指数衰减,见图2。基于煤层破裂特征与应力分

布规律, 可将实体煤划分为 4 个区域: I 区为破裂区 (应力释放区/卸压区)、II 区为塑性区、III 区为应力升高的弹性区、IV 区为原始应力区。其中, I 区与 II 区通常合称为极限平衡区, 该区域是实施防突措施的潜在有效范围。

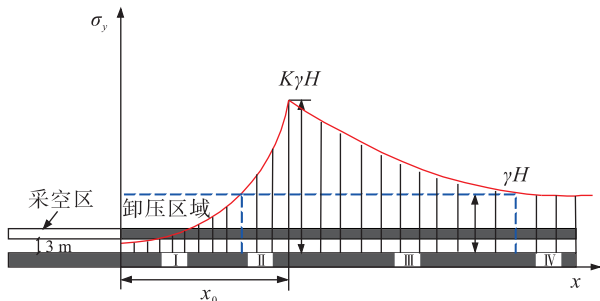


图 2 采空区侧向支承压力分布特征

Fig.2 distribution characteristics of lateral abutment pressure in goaf

根据岩体极限平衡理论^[19], 结合图 2 得到极限平衡区宽度为

$$x_0 = \frac{m}{2\xi f} \ln \left[\frac{K_d \gamma_r H_e + C \cot \varphi}{\xi (P_1 + C \cot \varphi)} \right], \quad (1)$$

式中: K_d 为应力集中系数; H_e 为煤层埋深, m; γ_r 为煤层上覆岩层平均体积力, kN/m³; P_1 为支护阻力, MPa; m 为煤层开采厚度, m; C 为煤体的黏聚力, MPa; φ 为煤体的内摩擦角, °; f 为煤层与顶底板接触面的摩擦因数; ξ 为三轴应力系数, $\xi = (1 + \sin \varphi)(1 - \sin \varphi)^{-1}$ 。

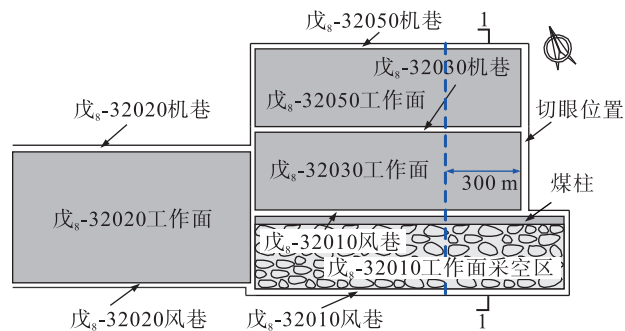
当 $K_d=1$ 时, 由式 (1) 计算得出的 x_0 为卸压区宽度。

煤层的卸压消突范围受多种因素影响。现有理论模型未充分考虑时间因素 (特别是煤岩体的蠕变效应), 导致难以通过理论计算精确确定该范围。因此, 工程实践中一般需结合现场地质与开采条件, 采用物理模拟试验与现场监测相结合的方法来确定卸压消突范围。

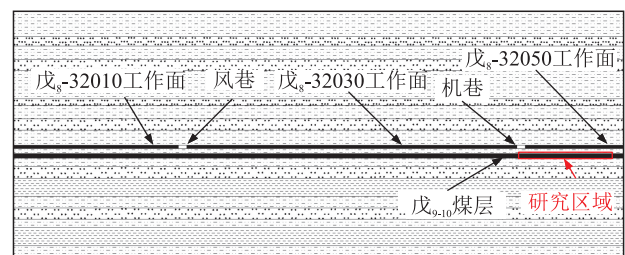
2 研究区域工程地质及瓦斯概况

戊₈-32030 工作面主采戊₈煤层的煤层厚度为 0.2~3.0 m (平均 2.0 m), 倾角为 0°~8° (平均 3°), 工作面切眼向外 1 500 m 范围内煤层含一层不稳定夹矸, 厚度为 0.1~1.2 m; 其中外段 400 m 范围煤层无夹矸。局部受构造影响, 煤层厚度变化显著。工作面走向长为 2 050 m, 倾斜长度为 220 m, 对应地表标高为 150~210 m (地势东高西低), 平均埋深为 899 m。工作面井下位置位于三水平戊二采区东翼。其有效回采范围: 东起三水平戊二采区上山保护煤柱, 西至 38 号勘探线以西 250 m; 南

邻戊₈-32010 采空区, 北接未采区; 上覆戊₉₋₁₀煤层与下伏丁₅₋₆煤层均未采动, 见图 3。煤层直接顶为 8.0 m 厚砂质泥岩, 基本顶为 11.5 m 厚中粒砂岩; 直接底为砂质泥岩, 厚度为 1.0~13.0 m (平均 7 m), 岩性分布见图 4。



(a) 回采工作面平面



(b) 1-1 剖面

图 3 工作面与极近距离煤层关系

Fig.3 relationship between working face and very close distance coal seam

岩性	柱状图	岩性描述
砂质泥岩 10		灰色, 厚层状, 含植物化石, 中央条带细砂岩薄层
细粒砂岩 2		灰白色, 条带状, 中央薄层砂岩, 含云母片
砂质泥岩 9		灰色, 厚层状, 含植物化石, 中央条带细砂岩薄层
中粒砂岩 4		灰白色, 条带状, 斜层理发育, 含白云母片
砂质泥岩 8		灰色, 厚层状, 含植物化石, 中央条带细砂岩薄层
细粒砂岩 1		灰白色, 条带状, 中央薄层砂岩, 含云母片
砂质泥岩 7		灰色, 块状, 含植物化石, 中央薄层砂岩条带
中粒砂岩 3		灰白色, 条带状, 斜层理发育, 含白云母片
砂质泥岩 6		灰色, 块状, 中央薄层条带细砂岩
戊 ₈ 煤		黑色, 戊 ₈
砂质泥岩 5		灰色, 块状, 含较多植物化石
戊 ₉₋₁₀ 煤		黑色, 戊 ₉₋₁₀
砂质泥岩 4		灰色, 块状, 含较多植物根部化石
中粒砂岩 2		灰白色, 条带状, 斜层理发育, 含炭层面
泥岩 2		灰色, 块状, 含植物化石
砂质泥岩 3		灰色, 块状, 含较多植物根部化石
中粒砂岩 1		灰白色, 条带状, 斜层理发育, 含炭层面
砂质泥岩 2		灰色, 块状, 含较多植物根部化石
泥岩 1		灰色, 块状, 含植物化石
砂质泥岩 1		灰色, 块状, 含较多植物根部化石

图 4 岩性分布

Fig.4 lithologic distribution

戊₈-32030 工作面测得戊₈煤层原始瓦斯压力最大为 0.56 MPa, 原始瓦斯含量最大为 5.68 m³/t, 煤体最高破坏类型为Ⅲ类, 最小坚固性系数为 0.67, 最大瓦斯放散初速度为 8.4 mL/s, 综合判定戊₈煤层为非突出煤层。其下伏戊₉₋₁₀煤层原始瓦斯压力最大为 1.33 MPa, 原始瓦斯含量最大为 4.47 m³/t, 综合判定为突出煤层。

戊₈-32030 工作面切眼向里 300 m 范围内, 戊₈煤层与戊₉₋₁₀煤层的法向距离均小于 5 m, 属于极近距离煤层。在此法向间距小于 5 m 的特殊地质条件下, 于煤与瓦斯突出煤层(戊₉₋₁₀煤层)中进行采掘作业时, 煤岩瓦斯动力灾害危险性增加。根据《防治煤与瓦斯突出细则》规定, 在距突出危险区(戊₉₋₁₀煤层)法向距离小于 5 m 的邻近煤层(戊₈煤层)或岩层内进行采掘作业前, 必须对突出煤层(戊₉₋₁₀煤层)相应区域采取区域防突措施。

若两煤层法向间距足够小, 可视为单一煤层时, 上煤层(戊₉₋₁₀煤层)某一区段开采后, 其采空区上覆岩层运动将对邻近下煤层(戊₈煤层)一定范围产生卸压消突作用。在此卸压消突区域内

进行采掘作业时, 可减少甚至免于采取防突措施。

3 物理相似模拟试验研究

3.1 物理相似模型建立

基于戊₈-32030 工作面及其下伏极近距离戊₉₋₁₀煤层的地质赋存条件和煤岩层物理力学性质, 建立物理相似模拟试验模型。模型两侧边界约束水平方向位移, 底部为固定端, 限制水平和垂直方向位移。模型尺寸为 285 cm×30 cm×150 cm, 几何相似比为 1:100, 容重相似比为 1:1.5, 应力相似比为 1:150, 泊松比、应变相似常数为 1。

模型骨料选用细砂, 胶结料选用石灰和石膏。将骨料、胶结料与适量含柠檬酸钠缓凝剂的蒸馏水溶液搅拌均匀, 按设计尺寸分层装填模型, 并在岩层分界面处铺设云母片进行模拟。煤岩相似材料的配比依据其原型单向抗压强度确定, 材料损耗系数取 1.05, 配比见表 1。模型制备完成后, 需进行标准养护。待养护至设计强度后, 在模型顶部施加 0.119 MPa 的均布载荷, 用以模拟上覆岩层的自重应力。

表 1 煤岩层拌料配比
Tab.1 mixing ratio of coal and rock layers

编号	岩性	密度/(g·cm ⁻³)	厚度/m	相似厚度/ cm	视密度/ (g·cm ⁻³)	每层细砂 质量/kg	每层石灰 质量/kg	每层石膏 质量/kg	每层水 质量/kg
1	砂质泥岩	2 540	16	16	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
2	细粒砂岩	2 950	6	6	1.5	20.20	2.02	4.68	2.99
3	砂质泥岩	2 540	8	8	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
4	中粒砂岩	2 670	7	7	1.5	21.52	1.61	3.77	2.99
5	砂质泥岩	2 540	17	17	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
6	细粒砂岩	2 950	4	4	1.5	20.20	2.02	4.68	2.99
7	砂质泥岩	2 540	8	8	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
8	中粒砂岩	2 670	7	7	1.5	21.52	1.61	3.77	2.99
9	砂质泥岩	2 540	9	9	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
10	戊 ₈ 煤	1 430	2	2	1.5	23.06	2.69	1.15	2.99
11	砂质泥岩	2 540	3	3	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
12	戊 ₉₋₁₀ 煤	1 430	3	3	1.5	23.06	2.69	1.15	2.99
13	砂质泥岩	2 540	5	5	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
14	中粒砂岩	2 670	7	7	1.5	21.52	1.61	3.77	2.99
15	泥岩	2 630	11	11	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
16	砂质泥岩	2 540	7	7	1.5	22.42	3.14	1.35	2.99
17	中粒砂岩	2 670	7	7	1.5	21.52	1.61	3.77	2.99
18	砂质泥岩	2 540	5	5	1.5	22.44	3.14	1.35	2.99
19	泥岩	2 630	11	11	1.5	22.44	3.14	1.35	2.99
20	砂质泥岩	2 540	7	7	1.5	22.44	3.14	1.35	2.99

3.2 开采及监测方案

采用应力监测与数字散斑测量技术相结合的方法, 分析戊₈-32030 工作面回采过程中, 其下伏

极近距离戊₉₋₁₀煤层的应力分布与围岩变形演化规律。监测布置方案见图 5。

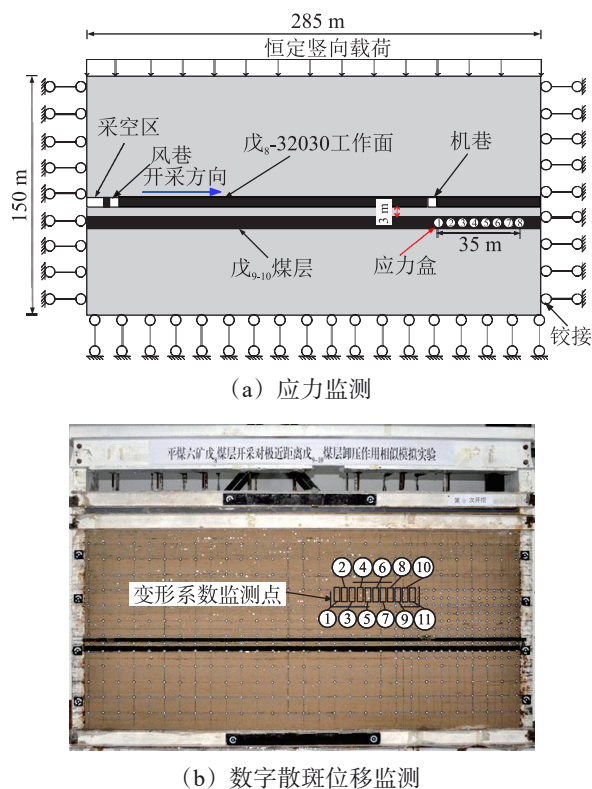


图5 相似模拟开采过程中应力与位移监测布置方案
Fig.5 layout plan for stress and displacement monitoring during similar simulation mining process

在戊₈-32030工作面机巷巷帮正下方的戊₉₋₁₀煤层中布置监测点1,随后间隔5 m依次布置测点2至测点8,如图5(a)。各测点安装LY-350型微型压力盒,监测范围覆盖机巷巷帮右侧35 m区域。模拟开采按时间节点进行,每30 min推进3 cm。同步记录各测点应力数据,持续至试验结束。

设置11组变形系数监测点,如图5(b)所示。模型架上下两端布设两根定位标尺,并在模型四周布置编码点。采用内径为10 mm、外径为20 mm的非编码点粘贴在模型上。相邻非编码点上下间隔为5 cm,加密区水平间隔为5 cm,非加密区水平间隔为10 cm。在距离右侧边界60 cm处向左5 cm开挖机巷,在距离右侧巷道向左200 cm处再开挖5 cm的风巷,在巷道左侧预留5 cm的煤柱,再向左开挖一个约10 cm的采空区直至左侧边界。

3.3 采动影响下围岩裂隙扩展特征

回采过程中围岩裂隙的扩展特征见图6。可见,当戊₈-32030工作面回采60 m时,采空区顶板发生大规模垮落并呈现逐渐压实趋势。垮落带呈梯形发育,高度约5 m。垮落带上方岩层裂隙带扩展显著,范围持续增大。由图6(b)可见,当戊₈-32030工作面回采90 m时,采空区顶板垮落范围持

续增大,层状裂隙开始出现贯通,并向上覆岩层及回采方向继续扩展,裂隙带发育较为显著。由图6(c)可见,回采150 m时,模型受到强烈采动的影响,整体有向前倾的失稳垮塌趋势,因此可在模型上方增加槽钢护板,以保持模型整体稳定。由图6(d)可见,回采200 m时,煤层已经全部开采完毕,为防止模型前倾失稳,在模型中部增设了第二道槽钢支护。当采空区覆岩稳定后,采空区右侧的煤岩出现裂隙,并与采空区上方裂隙贯通连接,下方的戊₉₋₁₀煤层也出现较小裂隙,这是应力释放的前兆。

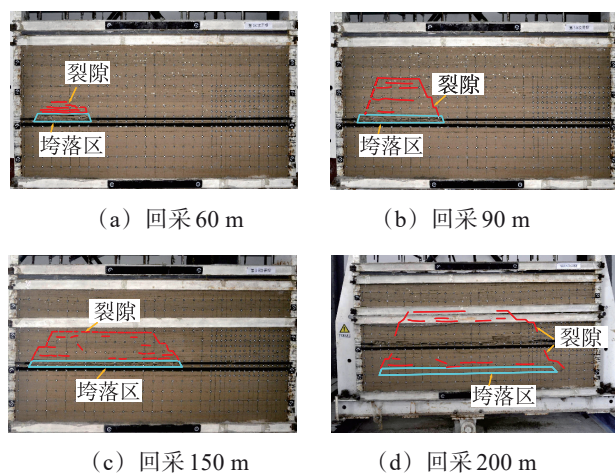


图6 回采过程中围岩裂隙扩展特征
Fig.6 characteristics of surrounding rock fracture propagation during mining

3.4 回采后极近距离煤层应力变化规律

相似模拟试验中,戊₉₋₁₀煤层在未受采动影响时的初始垂直应力为21.07 MPa。随着戊₈-32030工作面的推进,戊₉₋₁₀煤层各应力监测点的垂直应力发生显著变化情况见图7。

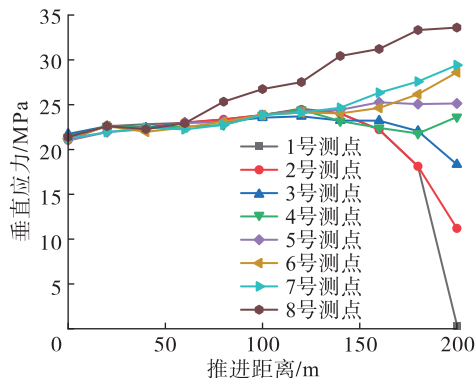


图7 戊₉₋₁₀煤层应力监测点垂直应力变化
Fig.7 stress variation of stress monitoring points in Wu 9-10 coal seam

测点1~测点3的应力随工作面推进先增大后减小。其中,测点1(位于戊₈-32030工作面机巷正下方)在回采完成后应力降幅最大,最终降至0.44 MPa。表明靠近戊₈-32030工作面的戊₉₋₁₀煤层测点先受到采动影响使应力增大,当煤体发生破坏后,应力向深部转移。最终测点1~测点3的应力分别为0.44 MPa、11.20 MPa和18.33 MPa,均低于回采前应力,处于卸压区范围内。

测点4和测点5应力变化与测点1~测点4的趋势相似,同样呈现“先增大后减小”的特征,但最终的垂直应力大于回采前的原始应力,说明测点4和测点5不在卸压范围内。距戊₈-32030工作面更远处的戊₉₋₁₀煤层测点6~测点8,垂直应力随戊₈-32030工作面的回采而缓慢增大,表明以上测点受戊₈-32030工作面的采动影响产生应力升高,而煤体并未发生破坏,仍然具有较高的强度,最终的应力分别为28.60 MPa、29.41 MPa、33.60 MPa,均高于回采前应力,属于极限平衡的塑性区范围。

戊₉₋₁₀煤层应力随距巷帮距离的变化见图8,可知在距戊₈-32030工作面机巷巷帮0~12.8 m内的垂直应力小于原始应力,说明距戊₈-32030工作面机巷巷帮12.8 m以内为卸压区域;而距戊₈-32030工作面机巷巷帮12.8~35.0 m内的垂直应力高于原始应力,为应力升高区,且在35.0 m处未见应力下降。根据矿压理论基础,可判断距戊₈-32030工作面机巷巷帮12.8~35.0 m内属于极限平衡塑性区。

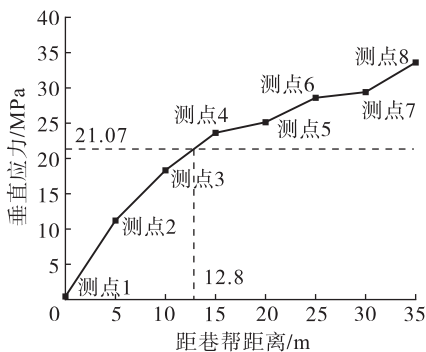


图8 戊₉₋₁₀煤层应力随距巷帮距离的变化

Fig.8 stress variation of Wu 9-10 coal with the distance from the roadway side

3.5 回采后极近距离煤层变形系数变化规律

在卸压过程中,煤层因应力释放会产生弹塑性变形,进而引发煤体及其围岩的形态改变与位移。通常以3‰的变形系数作为煤层卸压变形量的判定标准,旨在确保煤层变形控制在合理范围内。基于此,采用3‰的煤层变形系数作为界定“卸压解吸带”范围的依据。

卸压前煤体主要以垂向受压变形为主,卸压后煤体也主要在垂向发生膨胀,因此煤层变形系

数可近似为垂向变形系数,表示为

$$k \approx k_c = \frac{h'_{n-n+1}}{h_{n-n+1}} - 1, \quad (2)$$

式中: k_c 为煤体垂向的变形系数; h'_{n-n+1} 卸压后两相邻点的距离, m; h_{n-n+1} 为卸压前两相邻点的距离, m。

距戊₈-32030工作面机巷右侧52.5 m范围内的11组散斑测点变形系数的变化规律见图9。1组~3组监测点最终的变形系数分别为0.004 7、0.003 7、0.003 2,均大于3‰。4组~11组监测点最终的垂直变形系数分别为0.002 9、0.002 7、0.002 3、0.002 1、0.001 7、0.000 7、0.000 3、0,均小于3‰。可见,戊₉₋₁₀煤层变形系数随与戊₈-32030工作面距离的增大而逐步减小。

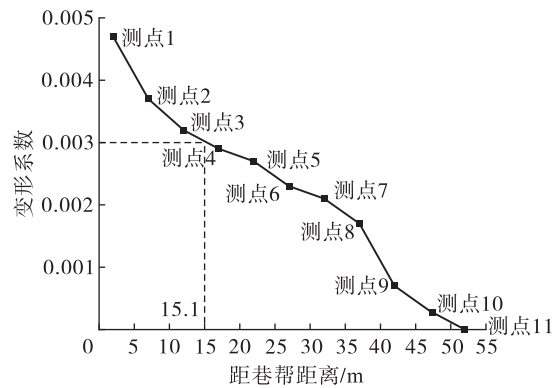


图9 变形系数变化规律

Fig.9 variation law of deformation coefficient

当戊₉₋₁₀煤层的变形系数取3‰时,该点与戊₈-32030工作面机巷巷帮的距离为15.1 m,表明距戊₈-32030工作面机巷巷帮15.1 m以内为卸压带。在此试验条件下散斑监测的卸压范围比应力监测大,其原因为:①散斑点在模型表面,易首先发生变形破坏,应比实际偏大;②压力盒布置没有散斑点密集,导致局部位置无法得到有效监测,只能通过有限的传感器进行估算。因此,卸压带范围可取卸压距离与消突范围的平均值,即13.95 m。

4 极近距离煤层消突带模拟分析

4.1 三维模型

根据现场的抽采方案,采用COMSOL数值模拟软件,建立煤层开采瓦斯渗流数值模型,根据岩性进行赋值,并设置边界条件,模型与材料属性见图10和表2。模型尺寸为500 m×400 m×150 m,共分16层。模型下表面设置为固定约束,四周设置法向位移约束,上表面设置为自由表面并施加20 MPa的均布载荷。

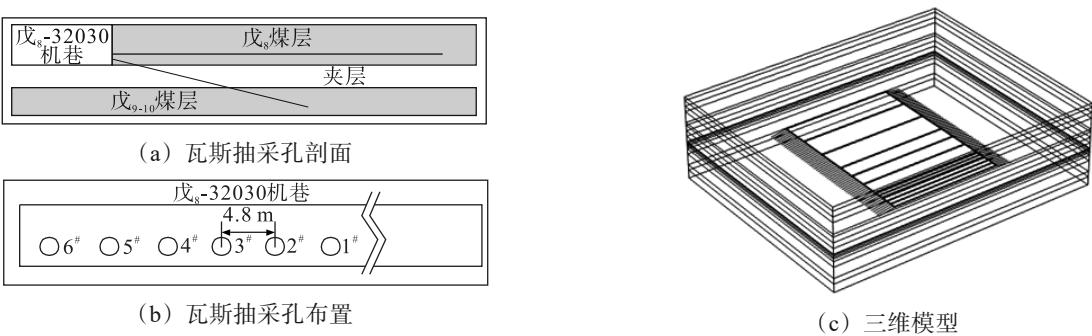


图 10 现场钻孔布置与三维模型
Fig.10 field borehole layout and 3D model

表 2 模型各层力学参数
Tab.2 mechanical parameters of each layer in the model

岩性	厚度/m	抗拉强度 /MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量 /GPa	黏聚力/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	孔隙度/%	渗透率/m ²
细粒砂岩	7	1.00	35.00	4.01	2.00	2 950	1.28	1.04×10 ⁻¹¹
砂质泥岩	10	4.39	39.51	4.16	8.24	2 540	1.44	1.48×10 ⁻¹¹
中粒砂岩	10	1.20	37.00	5.99	4.00	2 670	3.86	2.85×10 ⁻¹⁰
砂质泥岩	20	4.39	39.51	4.16	8.24	2 540	1.44	1.48×10 ⁻¹¹
细粒砂岩	5	1.00	35.00	4.01	2.00	2 950	1.28	1.04×10 ⁻¹¹
砂质泥岩	10	4.39	39.51	4.16	8.24	2 540	1.44	1.48×10 ⁻¹¹
中粒砂岩	10	1.20	37.00	5.99	4.00	2 670	3.86	2.85×10 ⁻¹⁰
砂质泥岩	10	4.39	39.51	4.16	8.24	2 540	1.44	1.48×10 ⁻¹¹
戊 ₈ 煤层	2	0.74	30.20	0.90	6.62	1 430	6.61	1.43×10 ⁻⁹
砂质泥岩	3	4.39	39.51	4.16	8.24	2 540	1.44	1.48×10 ⁻¹¹
戊 ₉₋₁₀ 煤层	3	0.80	35.76	1.01	5.00	1 460	6.61	1.43×10 ⁻⁹
砂质泥岩	5	4.39	39.51	4.16	8.24	2 540	1.44	1.48×10 ⁻¹¹
中粒砂岩	10	1.20	37.00	5.99	4.00	2 670	3.86	2.85×10 ⁻¹⁰
泥岩	20	0.61	30.00	8.75	1.20	2 630	1.03	5.41×10 ⁻¹²
砂质泥岩	10	4.39	39.51	4.16	8.24	2 540	1.44	1.48×10 ⁻¹¹
中粒砂岩	15	1.20	37.00	5.99	4.00	2 670	3.86	2.85×10 ⁻¹⁰

戊₈煤层工作面长度设为 200 m, 在戊₈-32030 工作面不断回采的过程中, 针对下方极近距离戊₉₋₁₀煤层的瓦斯压力变化监测方案见图 11。

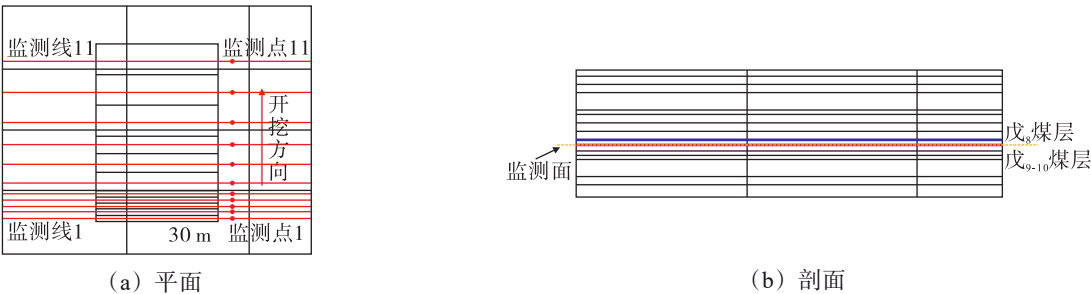


图 11 瓦斯压力监测方案
Fig.11 gas pressure monitoring scheme

4.2 回采区段极近距离煤层瓦斯压力变化特征

随着戊₈-32030 工作面不断回采, 戊₉₋₁₀煤层瓦斯压力发生变化, 因此可通过戊₉₋₁₀煤层瓦斯压力

变化得到其瓦斯消突范围, 小于 0.74 MPa 的区域为消突带。未抽采条件下瓦斯压力变化特征见图 12。

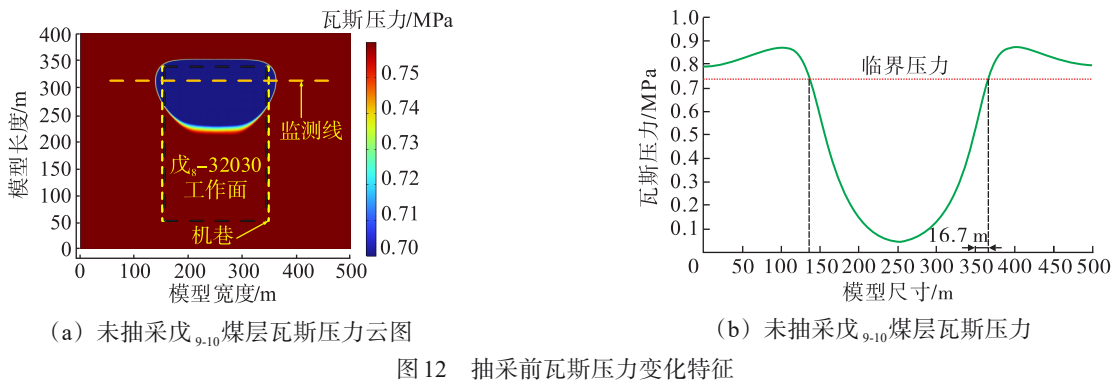


图 12 抽采前瓦斯压力变化特征

Fig.12 characteristics of the variation of gas pressure under the condition without gas drainage

由图 12 可知, 未进行瓦斯抽采时, 当戊₈-32030 工作面回采 290 m 后, 戊_{9,10} 煤层瓦斯消突范围最大值为 16.7 m, 高于物理模拟试验的卸压范围, 与理论分析一致。但戊_{9,10} 煤层瓦斯消突范围受瓦斯压强差影响程度较大, 高瓦斯压力区内瓦斯向低瓦斯压力区转移, 导致回采过后的区域瓦

斯压力回升, 且逐渐趋近原始瓦斯压力。

抽采条件下瓦斯压力变化特征见图 13, 可知, 当戊₈-32030 工作面推进至 290 m 时, 戊_{9,10} 煤层瓦斯压力趋于稳定, 此时测得的瓦斯消突范围最大值为 37.2 m (以机巷巷帮为基准)。该范围内瓦斯压力均低于临界值, 此结果与实测数据吻合。

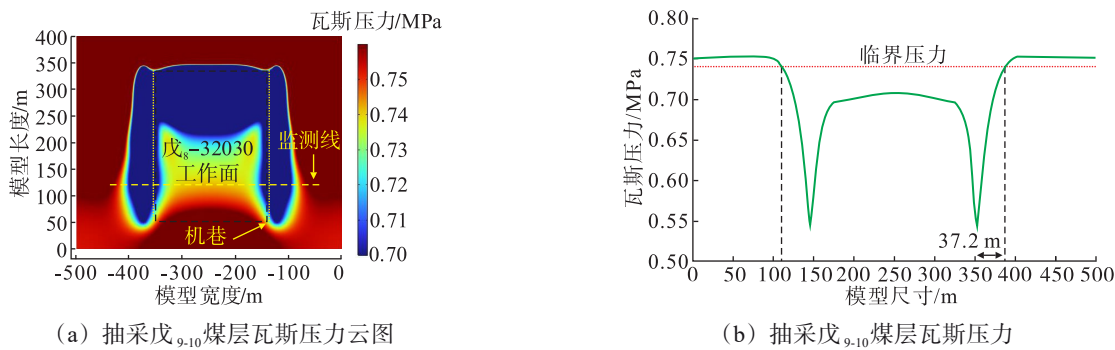


图 13 抽采条件下瓦斯压力变化特征

Fig.13 characteristics of the variation of gas pressure under the condition with gas drainage

5 回采区段戊_{9,10}煤层消突带现场测定

5.1 现场测试方案

在戊₈-32030 工作面高位巷布置 3 个测点, 各

测点同时进行瓦斯压力与瓦斯含量测定。测点 1 距切眼 365 m, 测点 2 距切眼 235 m, 测点 3 距切眼 85 m。每个测点布置 3 个测孔。钻孔布置情况见图 14, 各测点钻孔参数见表 3。

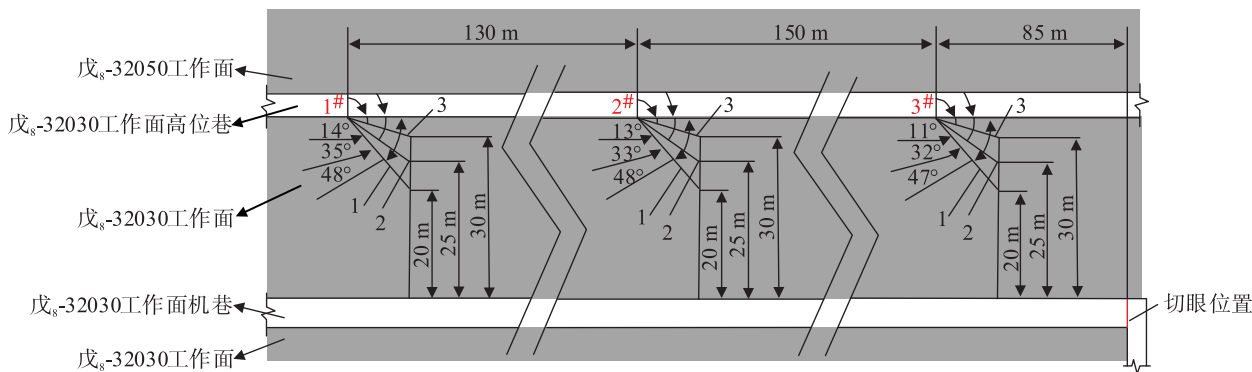


图 14 瓦斯含量与瓦斯压力钻孔布置

Fig.14 borehole layout for gas content and gas pressure measurement

表3 各测点钻孔参数
Tab.3 borehole parameters of each measuring point

测点	孔号	水平 角度/(°)	终孔与机巷 巷帮间距/m	竖直 倾角/(°)	孔深/m
1	1-1	48	20	72	39.3
	1-2	35	25	72	38.0
	1-3	14	30	72	37.3
2	2-1	48	20	71	37.0
	2-2	33	25	71	35.7
	2-3	13	30	71	35.0
3	3-1	47	20	71	37.1
	3-2	32	25	71	35.8
	3-3	11	30	71	35.1

5.2 回采区段戊₉₋₁₀煤层瓦斯含量变化特征

回采后各测点的瓦斯含量见图15。由图15可见,戊₈-32030工作面回采后极近距离戊₉₋₁₀煤层的测点1、测点2和测点3的瓦斯含量随与巷帮距离的增加而增大,且小于原始瓦斯含量,增加幅度有明显差异。如测点1在25 m以前瓦斯含量加速增长,25~30 m内增长速率变缓;测点2的瓦斯含量与巷帮距离呈线性增加关系;测点3在25 m以前瓦斯含量缓慢增加,25~30 m范围内增长速率加快。以上说明,从瓦斯含量角度来看,极近距离戊₉₋₁₀煤层距戊₈-32030机巷巷帮水平距离30 m范围内属于消突带,与数值模拟结果一致。

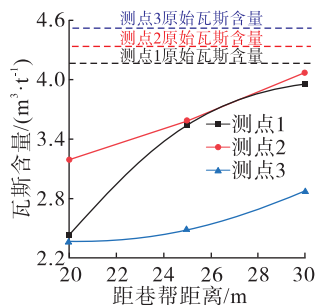


图15 回采后戊₉₋₁₀煤层各测点的瓦斯含量

Fig.15 gas content of each measuring point in Wu 9-10 coal seam after mining

5.3 回采区段戊₉₋₁₀煤层瓦斯压力变化特征

回采后戊₉₋₁₀煤层各测点的瓦斯压力见图16,在戊₈-32030工作面回采前,戊₉₋₁₀煤层测点1、测点2和测点3的瓦斯压力分别为0.76 MPa、0.32 MPa和0.6 MPa。回采后,在极近距离煤层条件下,各测点的瓦斯压力随与巷帮距离的增加而上升,且均低于原始瓦斯压力,这一变化特征与瓦斯含量的整体变化规律一致。其中,测点1和测点2在20~25 m内瓦斯压力缓慢增加,25~30 m内瓦斯压力增长速率加快;测点3的瓦斯压力变化规律与前两个测点相反。

通过对回采前后瓦斯压力变化特征的对比分析可知,受戊₈-32030工作面采动影响,极近距离戊₉₋₁₀煤层在距戊₈-32030机巷巷帮30 m范围内的瓦斯压力显著降低。基于瓦斯压力变化特征分析,可将极近距离戊₉₋₁₀煤层距戊₈-32030机巷巷帮水平30 m范围界定为消突带。由于戊₈煤层开采期间,戊₉₋₁₀煤层持续处于瓦斯抽采状态,该消突带范围过大。数值模拟结果进一步验证了现场实测数据的准确性。

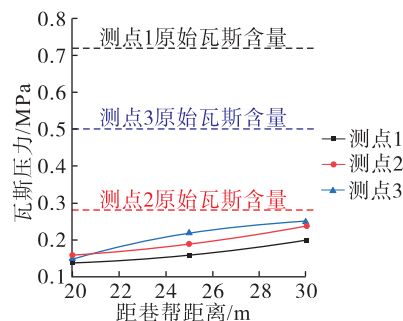


图16 回采后戊₉₋₁₀煤层各测点的瓦斯压力

Fig.16 gas pressure of each measuring point in Wu 9-10 coal seam after mining

6 结论

(1) 由理论分析可知,当上覆煤层回采后,在与下方间距小于5 m的极近距离煤层之间,形成一定范围的卸压带与消突带。其中,消突带通常分布于卸压区与塑性变形区的重叠范围内,即卸压带必然属于消突带的组成部分,而消突带的实际分布范围可能超出卸压带区域,且该区域处于煤层的极限平衡状态范围内。

(2) 通过物理相似模拟试验对回采区段下方极近距离煤层的应力与变形系数进行监测,结果分析表明:应力监测数据相对保守,而散斑监测获得的变形系数略高。取两种监测方法结果的平均值作为判定依据,确定回采区段下方极近距离戊₉₋₁₀煤层在距戊₈-32030机巷13.95 m范围内为卸压带。

(3) 现场测试与数值模拟分析结果表明,煤层瓦斯抽采对瓦斯压力具有显著影响。在极近距离戊₉₋₁₀煤层中,距戊₈-32030机巷巷帮30 m范围内属于有效消突带。

参考文献(References):

- [1] 田坤云,孙文标,魏二剑. 上保护层开采保护范围确定及数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 7-13.
TIAN Kunyun, SUN Wenbiao, WEI Erjian. Determination of protection range for mining upper protective layers and its numerical simulation[J]. Journal of Liaoning Technical University

- (Natural Science), 2013, 32(1): 7-13.
- [2] 赵洪宝, 刘一洪, 李金雨, 等. 孤岛煤柱下底板岩体损伤过程与分区破坏特征分析[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 963-974.
ZHAO Hongbao, LIU Yihong, LI Jinyu, et al. Analysis of damage process and zonal failure characteristics of rock mass under floor of isolated coal pillar[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 963-974.
- [3] 冯国瑞, 郝晨良, 王朋飞, 等. 近距采空区下回采巷道非对称变形机理及控制对策[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(4): 617-631.
FENG Guorui, HAO Chenliang, WANG Pengfei, et al. Asymmetric deformation mechanism and control measures for mining roadway under gob in close proximity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(4): 617-631.
- [4] 周超, 宋大钊, 李振雷, 等. 基于上覆巷道保护的下伏煤层安全回采[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 504-515.
ZHOU Chao, SONG Dazhao, LI Zhenlei, et al. Mining safely under a coal seam while protecting an overlying roadway[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 504-515.
- [5] 邱黎明, 李忠辉, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出远程智能监测预警系统研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(1): 17-21.
QIU Liming, LI Zhonghui, WANG Enyuan, et al. Research on remote intelligent monitoring and early warning system for coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(1): 17-21.
- [6] 高海滨, 侯可, 王兆其, 等. 极近距离煤层采空区下沿空留巷技术研究[J]. 中国煤炭, 2024(4): 68-78.
GAO Haibin, HOU Keke, WANG Zhaoqi, et al. Research on technology of gob-side entry retaining under goaf in extremely close distance coal seam[J]. China Coal, 2024(4): 68-78.
- [7] 桂兵, 曲延伦, 郭现伟, 等. 近距离煤层采动对相邻巷道围岩应力及变形影响研究[J]. 中国煤炭, 2019, 45(1): 72-77, 82.
GUI Bing, QU Yanlun, GUO Xianwei, et al. Study on the influence of mining in close distance coal seam on surrounding rock stress and deformation of adjacent roadway[J]. China Coal, 2019, 45(1): 72-77, 82.
- [8] 刘亚明, 谷天峰, 杨恒宇, 等. 煤柱失稳条件下浅埋房柱式采空区上覆地层变形特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(4): 494-500, 508.
LIU Yaming, GU Tianfeng, YANG Xuanyu, et al. Deformation characteristics of overlying strata in shallow-buried room-and-pillar mined-out area under instability of coal pillars[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2024, 60(4): 494-500, 508.
- [9] 郭明功, 李延河, 宋大钊, 等. 深部极近距离煤层群开采底抽巷层位布置研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(3): 155-165.
GUO Minggong, LI Yanhe, SONG Dazhao, et al. Layout study of bottom drainage roadway in deep mining of very close adjacent coal seam group[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(3): 155-165.
- [10] 孔德中, 王兆会, 任志成. 近距离煤层综放回采巷道合理位置确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 270-276.
KONG Dezhong, WANG Zhaohui, REN Zhicheng. Determining the optimum position of roadways of full-mechanized caving face in the close distance seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 270-276.
- [11] 侯建军, 程志恒, 赵哲辰, 等. 煤层群叠加开采覆岩裂隙演化及卸压瓦斯抽采研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(9): 78-85.
HOU Jianjun, CHENG Zhiheng, ZHAO Zhechen, et al. Overburden fracture evolution and pressure relief gas extraction in superimposed coal seam group mining[J]. Coal Engineering, 2024, 56(9): 78-85.
- [12] 赵灿, 程志恒, 孔德中, 等. 近距离煤层群下行开采底板应力分布与瓦斯抽采技术研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(7): 109-113.
ZHAO Can, CHENG Zhiheng, KONG Dezhong, et al. Study on stress distribution of floor and gas drainage technology in downward mining of close distance coal seam group[J]. Coal Engineering, 2019, 51(7): 109-113.
- [13] 刘建高, 谢小平, 刘宗柱. 高瓦斯煤层群薄煤层保护层开采卸压效果分析[J]. 煤矿安全, 2013, 44(10): 192-195.
LIU Jianguo, XIE Xiaoping, LIU Zongzhu. Effect analysis on pressure relief for protective seam mining of thin coal seam in high-gas coal seam group[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(10): 192-195.
- [14] 许鸣皋, 杨科, 闫书缘. 近距离煤层群卸压采动应力演化数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(9): 1159-1164.
XU Minggao, YANG Ke, YAN Shuyuan. Numerical simulations of evolution stress from pressure relief mining of close coal seam group[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(9): 1159-1164.
- [15] 李海涛, 闫大鹤, 浦仕江, 等. 近距离煤层群保护层开采底板卸压瓦斯抽采技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(7): 78-82.
LI Haitao, YAN Dahe, PU Shijiang, et al. Gas extraction with floor stress relieving of protective layer mining in contiguous coal seams[J]. Coal Engineering, 2020, 52(7): 78-82.
- [16] 丁熊. 双重应力扰动下突出煤层动压区瓦斯二次抽采技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023: 81-82.
- [17] 王雄伟. 四台矿极近距离煤层采空区下开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(12): 23-26.
WANG Xiongwei. Coal mining technology for seam under above goaf with very short distance in Sitai Mine[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(12): 23-26.
- [18] 李延河, 翟成, 丁熊. 高瓦斯突出煤层底抽巷穿层钻孔动压瓦斯二次抽采技术及应用[J]. 煤矿安全, 2022, 53(10): 191-196.
LI Yanhe, ZHAI Cheng, DING Xiong. Technology and application of dynamic pressure gas secondary drainage through borehole in bottom drainage roadway of high gas outburst coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(10): 191-196.
- [19] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 222-223.