



工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究

杨欢 郑凯歌 李彬刚 李延军 杨森 王泽阳 王豪杰 戴楠

引用本文:

杨欢, 郑凯歌, 李彬刚, 等. 工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 46–54.

YANG Huan, ZHENG Kaige, LI Bingang. Disaster mechanism during passing of working face under overlying remnant coal pillar and advanced regional prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 46–54.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1373>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

集中煤柱诱发下伏近距离煤层异常矿压及机理研究

Study on abnormal mine pressure and mechanism of near-distance coal seam induced by concentrated coal pillar
煤炭科学技术. 2019(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b94af186-219b-4a78-9ed1-a0011c6bf50c>

浅埋近距离煤层群工作面上隅角贫氧致因及综防技术

Causes of oxygen deficiency in upper corners of working face in shallow-buried and short-distance coal seams and comprehensive prevention technology
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 102–108 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.013>

浅埋极近距离采空区下工作面矿压显现规律研究

Study on law of strata behavior in shallow-buried working face under contiguous gobs
煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/32723844-d343-408d-8a00-4da55ee8be1d>

上覆遗留区段煤柱对下伏煤层开采的扰动影响研究

Study on disturbing influence of overlying remaining coal pillars on underlying coal seam mining
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9a1740d2-5a23-4e99-a696-41d5dfc59e5c>

浅埋近距离房式采空区下应力场分析及动压机理研究

Stress field analysis and study on dynamic pressure mechanism under goaf of shallow depth and closed distance room and pillar mining
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f9c06eda-46b4-41c8-a35a-ab990749a0c7>

区段大煤柱水力压裂切顶护巷技术研究

Research on hydraulic fracturing roof cutting and roadway protection technology with wide sublevel coal pillar
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2c7b28bb-ba7b-4da3-9520-2a41b361ff16>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨欢, 郑凯歌, 李彬刚, 等. 工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 46–54.

YANG Huan, ZHENG Kaige, LI Bingang, *et al.* Disaster mechanism during passing of working face under overlying remnant coal pillar and advanced regional prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 46–54.

工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究

杨欢¹, 郑凯歌^{1,2}, 李彬刚¹, 李延军¹, 杨森¹, 王泽阳¹, 王豪杰¹, 戴楠¹

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西西安 710077; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 浅埋近距离煤层下伏工作面开采通过上覆遗留煤柱时, 易发生强矿压动力灾害, 造成人员设备损伤, 严重威胁矿井安全生产。采用特征归纳、数值模拟计算、力学模型分析等研究方法, 明确浅埋近距离煤层上覆遗留煤柱灾害发生规律, 揭示强矿压致灾机理。研究表明: 上覆遗留煤柱强矿压致灾机理为工作面出煤柱时, 煤柱及上覆承载体受扰动突然失稳, 能量瞬间传递至采场, 以动能形式释放, 造成强矿压动力灾害。基于“垮落充填体支撑+关键岩层弱化+应力传递路径转移”防治理念, 提出通过改造煤柱及承载体运移空间、弱化关键岩层、均布集中应力及转移应力传递路径的分段水力压裂超前区域弱化防治技术, 并在典型工作面开展工程试验。工程试验结果表明: 水力压裂实施过程中, 泵注压力峰值达 23.4 MPa, 压力变化总体呈“锯齿状”波动且伴有压力突降, 突降达 60 余次, 岩体内部人造主裂缝与微裂缝持续交替发育, 有效破坏了岩体的完整性; 治理后, 来压峰值及来压平均值分别降低 15.41%, 8.29%, 动载系数峰值及平均动载系数分别降低 17.39%, 11.88%, 立柱最大下沉量降幅达 50.00% 且小于 0.4 m, 工作面巷道顶板最大下沉量降幅 33.33%。工作面安全通过上覆遗留煤柱影响区域, 分段水力压裂超前区域弱化技术可实现浅埋近距离煤层上覆遗留煤柱强矿压灾害的有效防治。

关键词: 浅埋; 近距离煤层; 遗留煤柱; 矿压; 水力压裂; 超前弱化

中图分类号: TD327.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)09-0046-09

Disaster mechanism during passing of working face under overlying remnant coal pillar and advanced regional prevention technology

YANG Huan¹, ZHENG Kaige^{1,2}, LI Bingang¹, LI Yanjun¹, YANG Sen¹, WANG Zeyang¹, WANG Haojie¹, DAI Nan¹

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: When the mining of the underlying working face of shallow and close seam passes under the overlying remnant coal pillar, it is easy to have an intensive mine pressure-induced dynamic disaster, resulting in personnel and equipment damage, which seriously threatens the safety of mine production. The characteristics induction, numerical simulation calculation, mechanical model analysis and other research methods are used to clarify the occurrence of the hazards of the overlying remnant coal pillars in the shallow and close seams, and reveal the disaster mechanism caused by intensive mining pressure. The research shows that the disaster mechanism of the intensive ground pressure caused by the overlying remnant coal pillar is that when the working face passes under the coal pillar, the coal pillar and the overlying bearing body are disturbed and suddenly lose stability, and the energy is transferred to the stope instantly, which is released in the form of kinetic energy, resulting in the intensive ground pressure-induced dynamic disaster. Based on the prevention and control idea of “collapsed rock support+weakening of key rock stratum+transfer of stress transmission path”, the prevention and control technology of weakening for front area using subsectional-hydraulic fracturing was proposed by modifying the coal pillar and bearing body migration space, weakening key rock stratum, uniformly distributing concentrated stress and transferring stress transmission path, and engineering

收稿日期: 2022-08-28

责任编辑: 常琛

DOI: 10.12438/cst.2022-1373

作者简介: 杨欢(1993—), 男, 甘肃定西人, 助理研究员, 硕士。E-mail: yanghuan@cctegxian.com

通讯作者: 郑凯歌(1988—), 男, 河南周口人, 副研究员, 博士。E-mail: 13655617009@163.com

tests are carried out at typical working faces. The engineering test results show that during the implementation of hydraulic fracturing, the peak value of pumping pressure reaches 23.4 MPa, the pressure changes generally in a “zigzag” shape, accompanied by a sudden drop of pressure for more than 60 times, and the artificial main fractures and micro fractures in the rock mass continue to develop alternately, effectively destroying the integrity of the rock mass; After treatment, the peak value and average value of periodic pressure decreased by 15.41% and 8.29% respectively, and the peak value and average dynamic load coefficient decreased by 17.39% and 11.88%, respectively. The maximum contraction of the shield cylinder was 50.00% and less than 0.4 m, and the maximum contraction of the gate road roof was 33.33%. The working face safely passed through the affected area of the overlying remnant coal pillar, and the advanced area weakening technology of subsectional- hydraulic fracturing can effectively prevent and control the intensive ground pressure disaster of the overlying remnant coal pillar in shallow and close seams.

Key words: shallow buried; short distance; residual coal pillar; ground pressure; hydraulic fracturing; leading weakening

0 引 言

近距离煤层,即相邻煤层开采过程相互影响、煤层间距较小的煤层。浅埋近距离煤层是指埋深一般不超过 150 m,基载比较大的近距离煤层。浅埋近距离煤层群开采过程中,上层可采煤层开采完成后,覆岩结构经历垮落、裂隙发育及弯曲下沉到趋于稳定的过程;当下伏煤层开采时,覆岩结构 2 次运移,应力场重新分布,上覆结构出现下沉、垮落及回转等运动,能量释放规律异常^[1-2]。

现有的上覆遗留煤柱强矿压灾害防治方法及手段主要为爆破与常规短钻压裂 2 种,治理机理为削弱或者转移应力集中,从而达到治理强矿压的目的。但爆破法受工程量大、火工品管控严格、成本较高且治理过程中易产生有毒有害气体等因素限制;常规短钻水力压裂治理精度低,覆盖范围小,超长工作面中部难以治理。

针对上述问题,国内外学者开展了大量科学研究:郑凯歌等^[1,5]结合“压裂垮落体+煤柱+承重岩层”协同支撑理念,提出了坚硬顶板分段压裂超前弱化解危技术;杨俊哲等^[6-7]依托“垮落充填体+上覆遗留煤柱”治理理念,结合定向长钻孔水力压裂技术,提出上覆遗留煤柱超前弱化治理机理;杜君武等^[8]通过物理相似模拟及数值模拟方法,系统的研究了近距离煤层开采过程中覆岩结构演化规律,分析了煤柱稳定性;吴文达等^[9]基于压力拱理论,提出了房采区煤柱的应力计算方法,并通过物理模拟研究了房柱式煤柱联动失稳机理;张威等^[10]针对遗留煤柱下孤岛工作面冲击矿压防治进行了深入研究;李春元等^[11]通过现场实测、理论分析等方法,研究了上覆遗留区段煤柱对下伏工作面开采扰动规律;黄庆亭等^[12-13]通过对采场应力、位移及裂隙等演化规律的深入研究,建立了其与不同煤柱结构的关系,揭示了回采过程中裂隙发育规律;姜鹏飞等^[14-15]深入分析

了不同形态煤柱对应力传导规律的影响。开采实践及相关研究表明,浅埋近距离煤层开采过程中,覆岩结构复杂,应力环境特殊,应力集中明显,能量释放规律异常,易引发动力灾害^[16-17]。

学者们深入研究了浅埋近距离煤层上覆岩层结构运移规律,丰富了上覆遗留煤柱强矿压致灾治理原理及机理,形成了相对成熟的技术应用体系^[18-20]。但对于浅埋近距离煤层开采过上覆遗留煤柱时,强矿压致灾机理及超前区域防治技术研究亟需深入研究。陕、蒙、晋煤炭富集区多数矿井随着开采强度增加、开采技术革新、设备实施智能化提升,多层煤层同时开采,下伏工作面通过上覆遗留煤柱过程中,矿压显现异常,多次发生巷道过度变形、工作面压架等事故,严重影响现代化矿井的安全高效开采^[3-4]。以神东石圪台煤矿为例,归纳实际生产中上覆遗留煤柱强矿压灾害发生特征,结合数值模拟计算,研究强矿压灾害发生规律及致灾机理,基于“垮落充填体支撑+承载体弱化+应力传递途径阻断”理念,提出上覆遗留煤柱强矿压灾害超前区域弱化防治技术,在典型工作面开展工程试验,防治效果显著,为矿井安全生产提供技术保障。

1 浅埋煤层近距离上覆遗留煤柱致灾机理

1.1 上覆遗留煤柱强矿压灾害发生规律

1) 实际案例分析。神东石圪台煤矿 2⁻² 煤层厚度为 1.1 ~ 2.9 m,煤层平均厚度 2.1 m,埋深 82 ~ 97 m,平均 87 m,与上层 2⁻² 煤层间距 10 ~ 17 m,平均 14.2 m,上覆 2⁻² 煤层有综采采空区,存在上覆遗留煤柱,宽度 12 m。层间发育有硬度较大的粉砂岩层,厚度 12.1 m,抗压强度 30.41 MPa,钻孔柱状如图 1 所示。由于下层煤层厚度变化及煤层分叉原因,下层煤层开采过程中,工作面布置方式及回采方向与上层煤不同,工作面回采经历“采空区→遗留煤柱→采空区”过程。



图 1 工作面岩性柱状

Fig.1 Working face lithology columnar

工作面回采出遗留煤柱 3.3 m 位置时,工作面支架突然来压,下沉量较大,导致采煤设备无法正常运行。图 2 为工作面过遗留煤柱压架位置及实拍。

2) 过上覆煤柱过程中强矿压发生规律数值模拟

以开采工作面为背景,依据实际煤岩层物理力学参数,建立模型进行上覆遗留煤柱强矿压发生规律数值模拟分析。图 3 为数值模型模型。大小宽 300 m、长 400 m、高 80 m,煤层间距 15 m。本次数值模拟模型为摩尔-库仑弹塑性本构模型,采用位移边界条件,模型上表面为自由面,其余 5 个面限制模型表面的法向位移,模拟过程中首先开采上层煤层,形成遗留煤柱后计算至设置的平衡条件,再进行下层煤层开采,模拟下伏工作面过上覆遗留煤柱的过程,对比分析应力分布规律及塑性区变化特征,参照

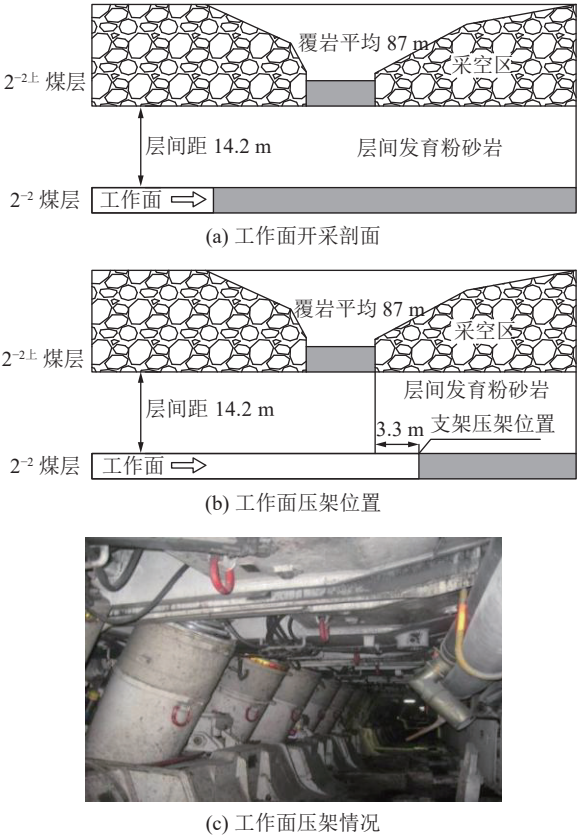


图 2 工作面过遗留煤柱压架位置及实拍

Fig.2 Position and live shot of the pressing frame of the remaining coal pillar passing the working face

的物理力学参数见表 1。

模拟过程中留设 20 m 遗留煤柱。工作面回采过程中,工作面顶板垂直应力变化规律如图 4 所示。由图可知,遗留煤柱布设在 50 ~ 70 m 位置,随着工作面回采经历“采空区→遗留煤柱→采空区”过程,工作面顶板垂直应力呈现先增长后降低规律:①回采至 30 ~ 50 m 时,工作面处于即将进入遗留煤柱区域,顶板垂直应力呈现增长趋势;②回采至 50 ~ 70 m 时,工作面进入并持续在上覆遗留煤柱区域,顶板垂直应力突增,当工作面回采至 70 m 时,垂直应力达到峰值;③回采至 70 ~ 80 m,即工作面推出煤柱时,垂直应力降低。

顶板塑性变化特征如图 5—图 7 所示。由图 5 可知,当工作面距离遗留煤柱 20 m 时,工作面顶板

表 1 物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters

岩层	视密度/(g·cm ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
细粒砂岩	2.38	2.87	0.55	5.01	5.04	35	0.28
砂质泥岩	2.35	0.81	0.29	3.51	0.84	34	0.27
粉砂岩	2.36	1.91	1.96	5.62	4.26	35	0.25
煤层	1.50	0.98	0.71	2.80	0.53	29	0.24

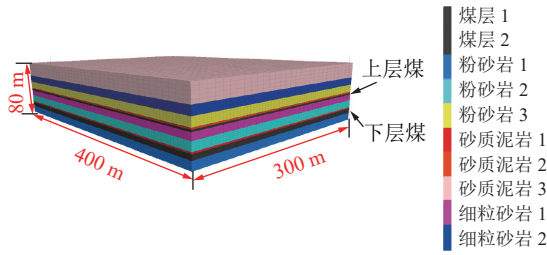


图 3 数值模拟模型建立

Fig.3 Establishment of numerical simulation model

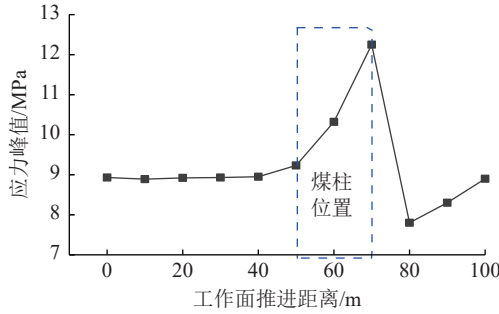


图 4 垂直应力变化规律

Fig.4 Variation law of vertical stress

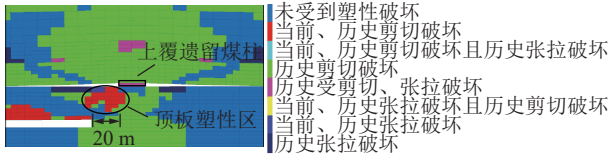


图 5 工作面距离煤柱区 20 m 时塑性区分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of plastic zone when the working face is 20 m away from the coal pillar area



图 6 工作面进入遗留煤柱区时塑性区分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of plastic zone when the working face enters the isolated island coal pillar area

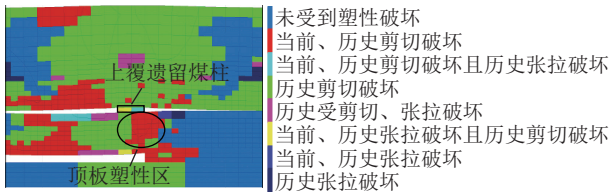


图 7 工作面出遗留煤柱区时塑性区分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of plastic zone when working face comes out of isolated island coal pillar area

岩层塑性区发育,且发育范围在工作面前方 0~20 m 范围,抗剪区域影响至煤柱边界,煤柱本身未受到影响。

当工作面进入煤柱下方时,顶板抗剪塑性区完全影响至遗留煤柱,煤柱受抗剪及抗拉破坏。工作面顶板塑性区发育范围主要集中在工作面前方 0~25 m。

当工作面回采出煤柱时,工作面顶板抗剪塑性区发育,煤柱受抗剪抗拉破坏。顶板塑性区基本集中在工作面上方及超前 0~10 m 范围内。

结合应力变化规律及塑性区分布特征分析,总结工作面过上覆遗留煤柱特征,可分为 3 个阶段:①工作面回采至煤柱边界。该阶段工作面顶板塑性区超前发育,逐步影响至煤柱范围,但煤柱及上覆结构基本稳定,顶板应力有上升趋势,但增加幅度不大。②工作面在煤柱正下方回采。该阶段工作面顶板塑性区超前发育,煤柱受采动影响,逐渐出现塑性区,工作面顶板垂直应力逐渐开始上升。③工作面出煤柱过程。该阶段顶板塑性区超前发育,与前两阶段相比,塑性区范围覆盖工作面与上覆煤柱连接区域,煤柱受采动影响发生变形。工作面出煤柱时应力突然增加达到峰值,随着工作面继续推进,垂直应力急剧下降。

综上分析,工作面在出煤柱时,煤柱及承载体受采动影响易发生突然失稳,造成应力变化规律异常等现象。

1.2 上覆遗留煤柱致灾机理

工作面过煤柱过程中,顶板结构失稳后各块体间相互铰接,工作面出煤柱边界后,形成一定的铰接结构。根据覆岩结构特征,建立力学模型(图 8),分析工作面出煤柱强矿压发生机理^[10]。

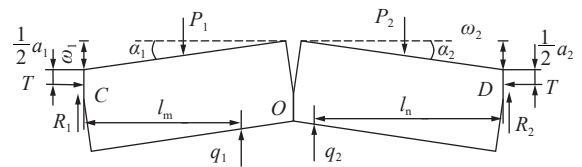


图 8 关键块体三铰式结构力学模型

Fig.8 Mechanical model of key block three hinge structure

模型中,两端为位移约束边界。结构体中部铰接点低于两侧铰接点,需通过下部支撑保持平衡。

已有研究结果得出^[6],力学结构下部支撑力表达式为

$$k_1 q_1 \frac{i_1 - \sin \alpha_2}{i_1 - \sin \alpha_1} - k_2 q_2 = \frac{i_1 - \sin \alpha_2}{2(i_1 - \sin \alpha_1)} P_1 - \frac{1}{2} P_2 + \frac{2i_1 - \sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}{i_1 - \sin \alpha_1} R_0 \quad (1)$$

式中: P_1 、 P_2 为两个关键块体承受的荷载, MPa; α_1 、 α_2 为两个关键块的回转角度, ($^\circ$); i_1 为关键块体的断裂度, $i_1 = h_1/l_1$; h_1 为关键块体厚度, m; l_1 为关键块体长

度, m ; R_0 为中心节点 O 处的剪切力。 k_1, k_2 为系数, $k_1=l_m/l, k_2=l_n/l(l_m, l_n$ 分别为力 q_1, q_2 对应于两侧铰接点的力矩, $N \cdot m$), $k_1 < 1, k_2 < 1$ 。

覆岩结构稳定的条件的上覆载荷极限值 P_j 为

$$P_j = \frac{\sigma_c}{30} \left(\tan \phi + \frac{3}{4} \sin \theta_2 \right)^2 \quad (2)$$

式中: σ_c 为关键岩层 2 的抗压强度, MPa; θ_2 为关键岩层 2 破断块体回转角, ($^\circ$); $\tan \phi$ 为关键岩层 2 破断岩块间的摩擦因数。

研究区域岩石力学参数 $\sigma_c=88$ MPa, $\theta_2=10^\circ$, 通过上述公式计算可得, 关键块体三角式铰接结构不失稳的载荷极限值为 0.53 MPa, 通过覆岩岩性及力学参数推算出研究区域覆岩不失稳的临界条件是关键岩层及其覆岩厚度不超过 21.2 m。本次研究区域煤层覆岩厚度超过 40 m, 均超过所述铰接结构失稳的覆岩厚度临界值, 层间关键块体必然失稳, 极易引发强矿动力灾害。

下伏工作面开采通过上覆遗留煤柱过程中, 当工作面出煤柱时, 煤层顶板裂缝超前工作面发育, 基本顶破断形成块体 C、D, 并造成回转 (图 9、图 10), 致使煤柱及上覆岩体倾倒, 关键岩层 1 形成的块体 A、B 之间铰接结构失稳, 上层煤层开采形成的稳定结构 2 次运移, 瞬间释放大量能量, 造成强矿压动力灾害。

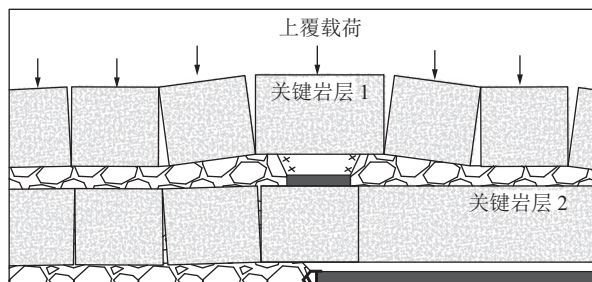


图 9 工作面过上覆遗留煤柱裂缝超前发育

Fig.9 Cracks in the overlying coal pillar of the working face are developed in advance

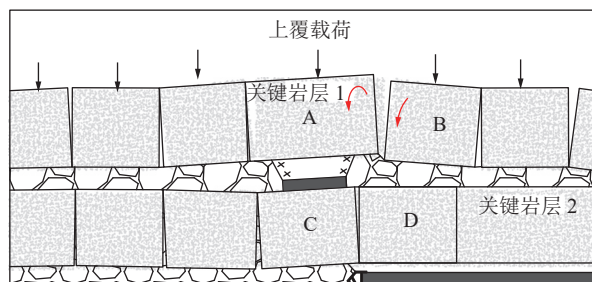


图 10 工作面出遗留煤柱造成覆岩 2 次运移

Fig.10 Secondary migration of coal out of overburden caused by coal pillar concentration

2 上覆遗留煤柱强矿压水力压裂超前区域弱化防治思路

以上覆遗留煤柱强矿压灾害发生规律及致灾机理研究结果为基础, 基于“垮落充填体支撑+关键岩层弱化+应力传递路径转移”防治理念, 提出上覆遗留煤柱强矿压灾害水力压裂超前区域弱化防治思路, 将层间关键岩层划分“进煤柱区域、煤柱下方区域、出煤柱区域”3 个部分 (图 11), 对其进行分区超前弱化改造 (图 12), 改变煤柱及承载体运移空间, 均布集中应力, 转移应力传递路径, 达到强矿压动力灾害超前防治的目的。

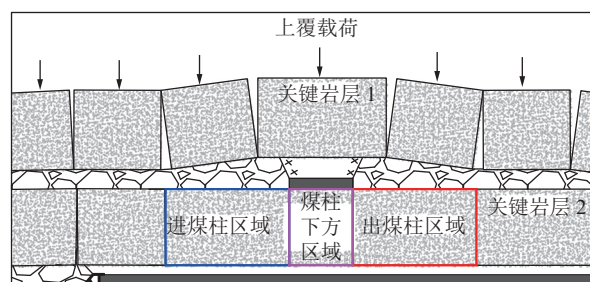


图 11 关键岩层分区示意

Fig.11 Schematic diagram of key rock stratum zoning

2.1 改造承载体运移空间

关键岩层“进煤柱区域”通过改造后, 破坏其完整性, 降低强度, 顶板能随采随垮, 诱导上覆煤柱及承载体超前运移且垮落后与煤柱及承载体形成联合支撑作用, 规避煤柱瞬间回转失稳风险。关键岩层“出煤柱区域”改造后, 降低关键岩层相对回转强度, 改变工作面出煤柱时悬顶结构, 形成的人造垮落充填体可减小上覆采空区运移空间, 降低煤柱失稳带动采空区结构体运动所造成的能量释放。

2.2 均布集中应力及转移应力传递路径

工作面回采过程中形成的超前应力集中随着关键岩层的弱化转移和削弱, 由于层间关键岩层被超前弱化改造, 原有应力场受到扰动, 应力均布化, 且超前弱化过程中, 煤岩体聚集能量被消散。再者高压压裂液扩散本身对岩体有浸润作用, 有助于应力集中区的应力分散。

层间关键岩层是应力传导的主要路径, 对其超前弱化使得应力传递路径转移, 出煤柱过程中集中应力不会瞬间传递至采场周围, 有效防止动力灾害发生。

3 强矿压超前区域防治技术工程试验

基于浅埋煤层近距离上覆遗留煤柱致灾机理研

究及上覆遗留煤柱强矿压超前区域防治思路,提出上覆遗留煤柱强矿压定向长钻孔分段水力压裂超前区域弱化治理技术,并在研究区域开展工程应用。

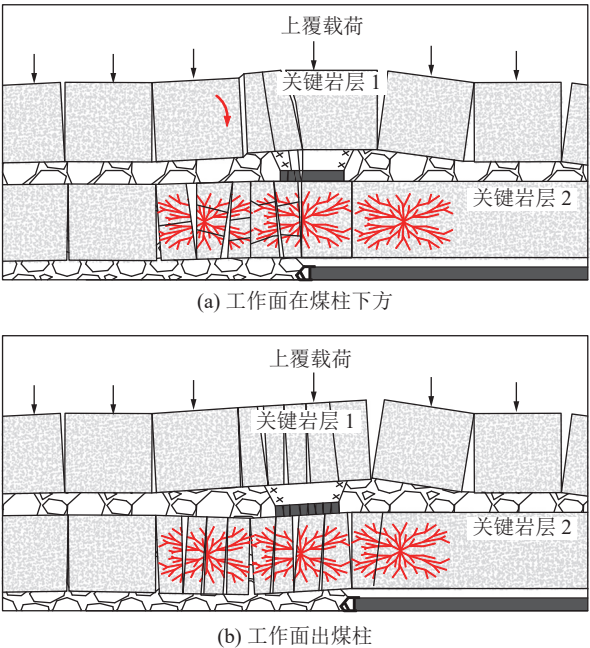


图 12 改造后覆岩运移示意

Fig.12 Schematic diagram of overburden migration after reconstruction

3.1 分段水力压裂超前区域弱化技术

分段水力压裂工艺示意如图 13 所示。

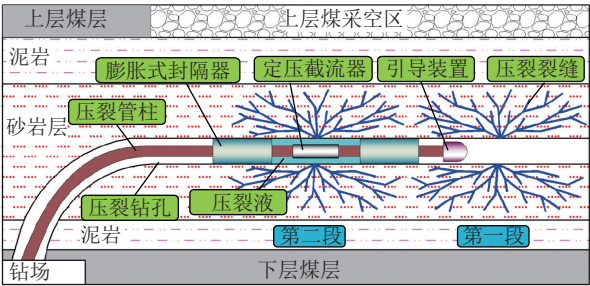


图 13 分段水力压裂示意

Fig.13 Schematic diagram of staged hydraulic fracturing

通过定向钻进在设计治理范围及位置形成钻孔,压裂装备通过专用连接管柱连接,推送至指定位置。利用可控排量高压泵组进行注水压裂,过程中自动监测系统将压裂相关参数直观的呈现在操作系统,并实时记录。达到本段设计压裂要求后,排水卸压,将孔内压裂装备移动至下一设计位置,循环压裂施工。单段压裂形成椭球体裂缝网络,多孔多段压裂完成后,岩层内形成三维立体网络体系,有效破坏岩体完整性,降低整体强度。

3.2 工程试验

1) 工程背景。神东石圪台煤矿 2⁻²_上 102 工作面

长度 237 m,走向长度 837 m。煤层厚度 1.8 ~ 2.2 m,平均 1.9 m,煤层整体相对稳定,倾角为 1° ~ 3°。2⁻²_上 煤层基本顶发育细粒砂岩,致密坚硬,厚度 5.25 ~ 14.22 m。2⁻²_上 煤层距上层 1⁻² 煤层间距为 11.2 ~ 16.8 m,工作面回采过程中存在上覆综采空区遗留煤柱,宽度 10 m,属浅埋近距离煤层开采。工作面情况如图 14 所示,工作面岩性柱状 (K39) 如图 15 所示。

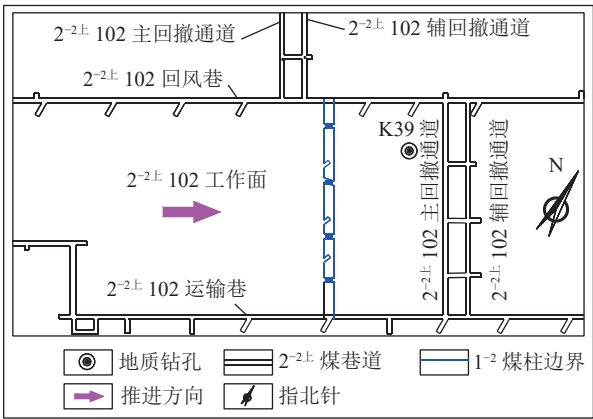


图 14 工作面概况

Fig.14 Overview of working face

厚度/m	岩层	岩性
12.06	粉砂岩	.....
1.4	泥岩	——
7.34	粉砂岩	.....
0.3	1 ⁻¹ 煤层	.....
1.23	粉砂岩	.....
2.85	细粒砂岩	.....
5.54	中粒砂岩	.....
1.59	粉砂岩	.....
2.96	1 ⁻² 煤层	.....
12.23	细粒砂岩	.....
2	中粒砂岩	.....
2	粉砂岩	.....
1.9	2 ⁻² _上 煤层	.....
7.55	粉砂岩	.....

图 15 岩性柱状

Fig.15 Overburden of working face

2) 水力压裂实施。基于前述防治理念,针对本组煤柱,设计并实施 3 组压裂钻孔,钻孔单孔长度

288 ~ 388 m。每个钻孔均压裂 8 段。1 号孔位于“进煤柱区域”，布置在煤柱前 35 m 位置，2 号孔位于“煤柱下方区域”，布置在煤柱正下方，3 号孔位于“出煤柱区域”，布置在出煤柱 35 m 位置。水力压裂钻孔布置如图 16 所示。

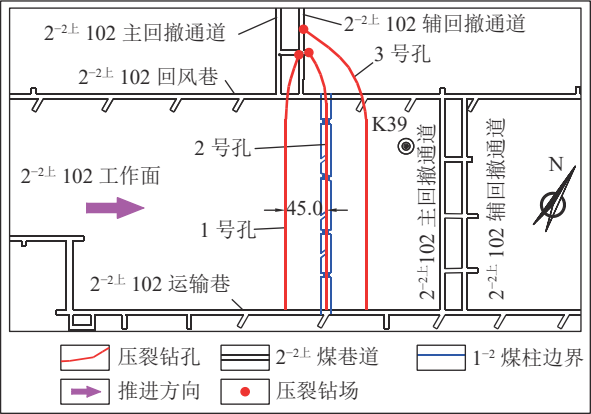


图 16 水力压裂钻孔布置
Fig.16 Hydraulic fracturing borehole layout

水力压裂过程中，共注水 977 m³，总计压裂时间 1 338 min。最高压力 23.40 MPa，压力突降降幅最大达 3.5 MPa，压力突降 60 余次。实际压裂压力-时间曲线如图 17 所示。

由图 17 可知，随着注水量的增加，封隔器膨胀，压力突增至 23.4 MPa，压裂液继续注入，泵注压力呈现“锯齿状”变化特征，岩层内微裂缝持续发育。随

着压裂液注入，压力由 20.8 MPa 突降至 17.3 MPa，岩层发生明显破裂，之后压力恢复。随着持续压裂的进行，压力发生再次突降，由 20.6 MPa 降低至 18.0 MPa，岩体再次发生破裂。

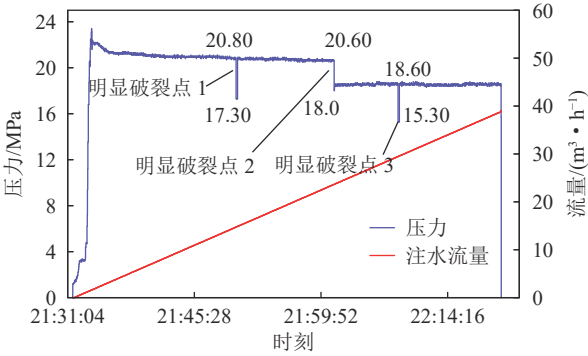


图 17 水力压裂实际压力-时间曲线
Fig.17 Hydraulic fracturing borehole layout typical pressure time curve of hydraulic fracturing

水力压裂过程中，泵注压力变化规律为整体呈现“锯齿状”波动，局部伴有差值大于 3 MPa 的压力突降，表明水力压裂在岩体内主裂缝与微裂缝持续交替发育，破坏了岩层的整体性。

3) 治理效果评价

对比分析 2-2^上 102 工作面上覆遗留煤柱水力压裂治理前后矿压显现、支架参数、围岩变形等参数(表 2)，综合评价超前弱化治理效果。

表 2 对比分析相关参数
Table 2 Comparative analysis of relevant parameters

范围	来压峰值/MPa	平均来压值/MPa	动载系数峰值	平均动载系数	立柱最大下沉量/m	巷道顶板最大下沉量/m	立柱下沉大于 0.4 m 的支架占比
未整理区域	57.1	49.2	2.3	2.02	0.8	0.3	74.70%
治理区域	48.3	45.12	1.9	1.78	0.4	0.2	0
降幅	15.41%	8.29%	17.39%	11.88%	50.00%	33.33%	—

由表 2 可知，工作面过上覆遗留煤柱时，水力压裂超前弱化治理后，周期来压强度、巷道变形、支架立柱下沉等参数均大幅降低。治理后，来压峰值及平均来压值降幅分别降低 15.41%，8.29%，动载系数峰值及平均动载系数降幅分别为 17.39%，11.88%，立柱最大下沉量降幅达 50.00%，巷道顶板最大下沉量降幅 33.33%，表明水力压裂超前弱化分散了采场的应力集中，降低了能量突然释放的程度，有效控制了巷道围岩变形(图 18)。该工作面采煤机采高 1.5 ~ 3.0 m，煤层厚度 1.9 m，支架立柱下沉量大于 0.4 m 后正常回采将受影响。工作面过未治理煤柱时，立柱下沉大于 0.4 m 的支架占比

74.70%，且部分支架阀组、液管损坏，导致回采停滞；水力压裂治理后，立柱最大下沉量均小于 0.4 m。



图 18 治理前后遗留煤柱影响区域巷道围岩变形
Fig.18 Surrounding rock deformation of roadway in the area affected by residual coal pillar before and after treatment

工作面安全通过上覆遗留煤柱区域。工程试验验证了超前区域弱化治理的有效性。

4 结 论

1) 采用特征归纳、数值模拟计算、理论分析等方法,明确了上覆遗留煤柱强矿压灾害机理,揭示了浅埋近距离煤层上覆遗留煤柱致灾机理,当工作面出煤柱时,煤柱及承载体受采动影响易发生突然失稳,能量瞬间释放,继而发生动力灾害。

2) 基于上覆遗留煤柱强矿压灾害发生规律及机理研究,提出了基于“垮落充填体支撑+关键岩层弱化+应力传递路径转移”防治理念的超前区域弱化防治技术,指导了工程应用。

3) 针对神东煤炭石圪台煤矿上覆遗留煤柱区域强矿压问题,开展了水力压裂超前区域弱化防治技术工程试验。压裂曲线显示,泵注压力变化规律整体呈现“锯齿状”波动并伴有压力突变,表明水力裂缝在岩体内主裂缝与微裂缝交替发育,破坏了岩层的整体性。

4) 该技术应用前后,治理区域来压峰值及平均来压值分别降低 15.41%,8.29%,动载系数峰值及平均动载系数降幅分别为 17.39%,11.88%,立柱最大下沉量小于 0.4 m,工作面巷道顶板最大下沉量降幅 33.33%,能量释放程度及应力集中得到有效改善,工作面安全回采通过遗留煤柱区域,验证了超前区域弱化防治技术的有效性。

参考文献(References):

- [1] 郑凯歌,杨俊哲,李彬刚,等.基于垮落充填的坚硬顶板分段压裂弱化解危技术[J].*煤田地质与勘探*,2021,49(5):77-87.
ZHENG Kaige, YANG Junzhe, LI Bingang, *et al.* Collapse filling-based technology of weakening and danger-solving by staged fracturing in hard roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 77-87.
- [2] 付兴玉,李宏艳,李凤明,等.房式采空区集中煤柱诱发动载矿压机理及防治[J].*煤炭学报*,2016,41(6):1375-1383.
FU Xingyu, LI Hongyan, LI Fengming, *et al.* Mechanism and prevention of strong strata behaviors induced by the concentration coal pillar of a room mining goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1375-1383.
- [3] 李浩荡,杨汉宏,张 斌,等.浅埋房式采空区集中煤柱下综采动载控制研究[J].*煤炭学报*,2015,40(S1):6-11.
LI Haodang, YANG Hanhong, ZHANG Bin, *et al.* Control study of strong strata behaviors during the fully mechanized working face out of con-centrated coal pillar in a shallow depth seam in proximity beneath a room mining goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 6-11.
- [4] 田 臣,刘英杰,周海丰.综采工作面回采过上覆集中煤柱及采空区技术[J].*煤炭科学技术*,2014,42(8):125-128,124.
TIAN Cheng, LIU Yingjie, ZHOU Haifeng. Technology of fully-mechanized coal mining face passing through overburden concentrated coal pillar and goaf[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(8): 125-128,124.
- [5] 郑凯歌.碎软低透煤层底板梳状长钻孔分段水力压裂增透技术研究[J].*采矿与安全工程学报*,2020,37(2):272-281.
ZHENG Kaige. Permeability improving technology by sectional hydraulic fracturing for comb-like long drilling in floor of crushed and soft coal seam with low permeability[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2): 272-281.
- [6] 杨俊哲,郑凯歌,赵继展,等.浅埋近距离上覆遗留煤柱应力集中灾害压裂治理技术研究[J].*矿业安全与环保*,2020,47(4):82-87.
YANG Junzhe, ZHENG Kaige, ZHAO Jizhan, *et al.* Research on fracturing treatment technology of concentrated stress disaster by the overlying coal pillar in close distance shallow seam.[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2020, 47(4): 82-87.
- [7] 杨俊哲,王振荣,吕情绪,等.坚硬顶板超前区域治理技术在神东布尔台煤矿的应用[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(2):17-23.
YANG Junzhe, WANG Zhenrong, LYU Qingxu, *et al.* Application of advanced regional treatment technology of hard roof in Buertai Coal Mine of Shendong Coal Group[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 17-23.
- [8] 杜君武,黄庆享.浅埋煤层群不同煤柱错距覆岩结构演化规律及煤柱稳定性分析[J].*采矿与岩层控制工程学报*,2022,4(1):16-24.
DU Junwu, HUANG Qingxiang. Overburden structure evolution and coal pillar stability analysis with different offset distance of coal pillars in shallow multi-seam[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(1): 16-24.
- [9] 吴文达.浅埋煤层群上部遗留煤柱联动失稳压架机理与控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
WU Wenda. Study on mechanism and control of the support crushing disaster caused by interactive failure of upper residual pillars in shallow multiple coal seams[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [10] 张 威.上覆采空区遗留煤柱下孤岛工作面回采冲击矿压防治技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
ZHANG Wei. Study on prevention and control technology of rock burst in isolated island working face under coal pillar left in overlying goaf [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [11] 李春元,王泓博,石瑶玉.上覆遗留区段煤柱对下伏煤层开采扰动影响研究[J].*煤炭科学技术*,2020,48(3):232-239.
LI Chunyuan, WANG Hongbo, SHI Yaoyu. Study on disturbing influence of overlying remaining coal pillars on under-lying coal seam mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(3): 232-239.
- [12] 黄庆享,王林涛,杜君武,等.浅埋极近距采空区下相向开采房柱采空区煤柱稳定性分析[J].*采矿与安全工程学报*,2022,39(1):118-125.

- HUANG Qingxiang, WANG Lintao, DU Junwu, *et al.* Stability of coal pillars in room-and-pillar goaf with opposite mining under ultra-close shallow goafs[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 118–125.
- [13] 黄庆享, 贺雁鹏, 罗利卜, 等. 浅埋极近距离煤层采空区垮落顶板活化结构及支架阻力研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 561–566.
- HUANG Qingxiang, HE Yanpeng, LUO Libo, *et al.* Study on the active structure of caved roof and support resistance in shallow buried and ultra-close coal seams mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3): 561–566.
- [14] 姜鹏飞, 康红普, 张 剑, 等. 近距煤层群开采在不同宽度煤柱中的传力机制[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(3): 345–349.
- JIANG Pengfei, KANG Hongpu, ZHANG Jian, *et al.* Mechanism of load-transfer between coal pillars with different widths in mining the short-range seams[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(3): 345–349.
- [15] 姜鹏飞, 林 健, 张 剑, 等. 近距煤层群开采在不同宽度煤柱中的能量分布[J]. *煤矿开采*, 2011, 16(1): 52–54.
- JIANG Pengfei, LIN Jian, ZHANG Jian, *et al.* Energy distribution of coal pillars with different-width in mining close coal seams[J]. *Coal Mining Technology*, 2011, 16(1): 52–54.
- [16] 冯国瑞, 白锦文, 史旭东, 等. 遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论及其应用展望[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 164–179.
- FENG Guorui, BAI Jinwen, SHI Xudong, *et al.* Key pillar theory in the chain failure of residual coal pillars and its application prospect[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 164–179.
- [17] 贺顺泰. 葫芦素矿近距离上覆遗留煤柱下巷道位置分析及实践研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- HE Shuntai. Position analysis and practice research of roadway closing to overlying residual coal pillar in hulusu mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [18] 秦 凯, 王健达, 李宏艳, 等. 集中煤柱诱发下伏近距离煤层异常矿压及机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(8): 102–107.
- QIN Kai, WANG Jianda, LI Hongyan, *et al.* Study on abnormal mine pressure and mechanism of near-distance coal seam induced by concentrated coal pillar[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 102–107.
- [19] 徐敬民, 朱卫兵, 鞠金峰. 浅埋房采区下近距离煤层开采动载矿压机理[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 500–509.
- XU Jingmin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Mechanism of dynamic mine pressure occurring below adjacent upper chamber mining goaf with shallow cover depth[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 500–509.
- [20] 周海丰. 综采工作面过上覆集中煤柱压架机理分析[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(7): 120–123, 128.
- ZHOU Haifeng. Analysis on hydraulic support crushed mechanism when fully-mechanized coal mining face passed through concentrated coal pillar area in above seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(7): 120–123, 128.