

马平, 周金龙, 夏永学, 等. 深部厚硬复合砂岩顶板区域压裂卸压防冲技术及应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(2): 023512.

MA Ping, ZHOU Jinlong, XIA Yongxue, et al. Regional fracturing technology for pressure relief and rock burst prevention in thick and hard composite sandstone roof and its application[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2026, 8(2): 023512.

深部厚硬复合砂岩顶板区域压裂 卸压防冲技术及应用

马平¹, 周金龙^{2,3}, 夏永学^{2,3}, 高敬勇¹, 杜涛涛^{2,3}, 高家明^{2,3}, 邬建宏^{2,3}

(1. 中天合创能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017010; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 门克庆煤矿 3-1 煤层具有强冲击倾向性, 煤层埋深大, 工作面开采强度高, 煤层上覆存在厚度较大的复合砂岩顶板, 工作面开采期间易诱发冲击地压。针对中高位厚硬顶板常规卸压措施处理高度和范围有限, 难以达到理想卸压效果, 本文在分析冲击主控致灾因素基础上, 采用顶板岩性分析、关键层理论计算、微震监测及岩层破断能量传递计算, 综合确定了冲击致灾关键岩层, 揭示了井下长孔区域压裂卸压防冲机理, 开展了井下长孔区域压裂卸压防冲工程实践, 并进行了卸压防冲效果分析。结果表明: 工作面大埋深提供了充足的基础静载荷, 3-1 煤层及顶底板具有发生冲击地压的能力, 完整性强、连续性好的复合砂岩顶板破断动载是诱发冲击地压的主要力源。井下长孔区域压裂对厚硬复合砂岩顶板进行超前预裂, 压裂后岩层裂隙扩展明显, 顶板预裂效果良好。工作面开采期间压裂区域大能量微震事件频次、能量、集中程度显著降低, 工作面来压强度降低, 来压步距减小。工程实践表明井下长孔区域压裂技术具有有效性, 显著降低了冲击地压发生风险, 保障了工作面安全开采, 研究成果可为类似条件矿井冲击地压防治提供借鉴。

关键词: 深部开采; 厚硬顶板; 冲击地压; 区域压裂; 关键层理论; 微震监测

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2026)02-3512-17

Regional fracturing technology for pressure relief and rock burst prevention in thick and hard composite sandstone roof and its application

MA Ping¹, ZHOU Jinlong^{2,3}, XIA Yongxue^{2,3}, GAO Jingyong¹, DU Taotao^{2,3}, GAO Jiaming^{2,3}, WU Jianhong^{2,3}

(1. Zhongtian Hechuang Energy Co., Ltd., Ordos 017010, China; 2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The 3-1 coal seam in Menkeqing Coal Mine has strong propensity for rock burst. Given the large coal seam burial depth, high mining intensity, and the presence of a thick composite sandstone roof overlying the coal seam, rock burst disasters are likely to be induced during mining of the working face. Conventional pressure relief measures targeting medium- to high-position thick and hard roofs are limited in both treatment height and range,

收稿日期: 2025-06-05

修回日期: 2025-09-17

责任编辑: 山世昌

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2025-1187

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174118)

作者简介: 马平 (1987—), 男, 陕西神木人, 工程师, 主要从事煤矿开采、冲击地压防治方面的研究工作。E-mail: 524263577@qq.com

通信作者: 周金龙 (1990—), 男, 陕西兴平人, 博士 (后), 副研究员, 主要从事冲击地压防治理论与技术方面的研究工作。E-mail: zhoujlcumb@163.com

often failing to achieve the desired pressure relief effect. In response to this problem, dominant disaster-inducing factors for rock burst were analyzed first. On this basis, roof lithology analysis, key strata theory calculation, microseismic monitoring, and strata fracture energy transfer calculation were performed to identify the dominant strata responsible for rock burst and reveal the mechanism of regional fracturing with long boreholes for pressure relief and rock burst prevention. Furthermore, the engineering practice of regional fracturing with long boreholes was conducted, and the corresponding effect analysis was carried out. The results show that the large burial depth of the working face provides sufficient foundation static load. The 3-1 coal seam and its roof and floor have the potential to generate rock burst, and the dynamic load arising from the breakage of the highly integral and continuous composite sandstone roof is the main source triggering rock burst. Regional fracturing with long boreholes was used for advanced prefracturing of the thick and hard composite sandstone roof. After the construction was completed, cracks propagated notably in fractured strata, and a remarkable prefracturing effect was achieved. During mining of the working face, the frequency, energy, and concentration of high-energy microseismic events in the fracturing area were significantly reduced, the intensity and distance of periodic weighting of the working face decreased. The engineering practice demonstrates the effectiveness of regional fracturing with long boreholes in significantly reducing the risk of rock burst disasters and ensuring safe mining of the working face. The research results can provide reference for the prevention and control of rock burst in coal mines with similar conditions.

Key words: deep mining; thick and hard roofs; rock burst; regional fracturing; key strata theory; microseismic monitoring

冲击地压灾害是煤炭深部开采面临的重大工程难题之一^[1-4]。冲击地压发生时常造成人员伤亡, 设备损坏, 经济损失严重, 给矿井安全高效开采带来严重影响^[5-6]。深部开采巷道围岩静载应力高, 若存在厚硬顶板悬顶破断动载作用时易诱发冲击地压, 深部开采厚硬顶板破断动载是此类冲击地压的主要诱因, 采取有效的卸压措施降低厚硬顶板破断动载是冲击地压防治的关键之一^[7-8]。

学者们针对厚硬顶板卸压防冲技术开展了大量研究。在厚硬顶板爆破、水力压裂卸压防冲方面, 郝宪杰等^[9]提出了高位坚硬岩层超前整层爆破“人造预裂层”防冲技术, 通过施工高位岩巷和高位钻场, 在高位钻场内进行长钻孔爆破, 以实现高位岩层大范围预裂卸压; 韩刚等^[10]研究得出沿空侧厚硬顶板破裂动载为沿空巷道冲击的主因, 通过对沿空侧厚硬顶板进行爆破卸压, 有效降低了巷道静载集中程度; 顾情悦等^[11]针对高位厚硬顶板, 提出了高位钻场长钻孔爆破防冲技术, 揭示了该技术卸压防冲机理, 工程实践表明卸压效果显著; 张俊文等^[12]为防治低位厚硬顶板垮落诱发冲击地压, 采用顶板水力压裂与爆破切顶相结合的方式处理顶

板, 实践表明, 微震总能量、频次均显著降低; 赵善坤等^[13]提出了3种顶板水压致裂防冲的类型及机理, 通过多种监测手段对比分析了水力压裂卸压防冲效果。

在厚硬顶板区域压裂卸压防治强矿压、冲击地压研究方面, 康红普等^[14-16]开展了厚硬顶板井下长孔压裂现场试验, 结果表明井下长孔压裂可极大地促进工作面厚硬顶板破断、垮落, 降低工作面周期来压强度, 缩短来压步距及持续时间, 显著降低厚硬顶板破断动载, 有利于强矿压和冲击地压防治; ZHUANG等^[17]采用数值模拟分析了区域压裂卸压过程及对岩层的弱化作用, 研究了区域压裂对采动应力及微震分布的影响, 揭示了区域压裂卸压防冲机理; 潘俊锋等^[18-19]采用相似模拟实验研究了区域压裂对覆岩结构与载荷的调控作用, 区域压裂可使采掘活动处于低应力区, 实现“人造解放层”卸压防冲效果; 夏永学等^[20-21]分析了超长水平孔分段压裂卸压防冲效果, 提出采用超长水平孔分段压裂技术对中央大巷复合构造区进行卸压, 降低压裂区下方煤层的静载水平, 实现有效防冲; 于斌等^[22]提出了坚硬顶板地面压裂防控采场强矿压方法, 建

立了压裂层位确定模型及选取准则, 研发了水力压裂裂缝井上下一体化监测技术; 高端等^[23] 采用地面压裂技术对高位厚硬顶板进行区域压裂改造, 实现了厚硬顶板工作面强矿压有效防控; 尚晓光等^[24] 通过地面直井压裂降低厚硬顶板的完整性, 减小厚硬岩层破断运动释放的弹性能, 实现降低动力灾害发生频次目的; 郑凯歌、钟坤等^[25-26] 通过定向长孔水力压裂对坚硬顶板进行卸压, 完成了顶板分区分段可控破断距的垮落, 实现了顶板应力转移、消散及动力灾害控制; 徐东等^[27] 研究发现压裂裂隙扩展耗散能与水压及岩层损伤程度成正比, 水力压裂可增大岩层压裂裂隙区、塑性软化区的耗散能, 降低弹性区的可释放弹性能, 实现卸压防冲; 李云鹏等^[28] 采用井上下联合水力压裂, 在坚硬岩层中形成明显裂缝, 在岩层间形成破坏, 降低其整体性, 进而降低坚硬岩层强度, 工作面来压步距、支架工作阻力和巷道变形量均有所降低; 马玉镇等^[29-30] 分析了地面水力压裂对厚硬岩层运动形式及覆岩采动动载调控作用, 揭示了地面压裂防冲机理, 提出了主控致灾层位识别方法及卸压防冲效果评价方法; 郑建伟等^[31] 提出了基于井下超长孔水力压裂卸压的顶板条带弱化法致裂采场上覆厚硬顶板, 改造厚硬顶板的储能特性, 降低能量释放诱发冲击地压风险。

综上所述, 在厚硬顶板局部和区域卸压防冲方面开展了卓有成效的研究, 但在厚硬顶板井下长孔区域压裂冲击致灾关键岩层判识、区域压裂卸压防冲机理及卸压防冲效果分析等方面开展系统性的研究较少。本文在前人研究基础上, 针对门克庆煤矿 11-3106 和 11-3107 工作面存在厚硬顶板破断诱发冲击地压的问题。通过顶板岩性分析、关键层理论计算、微震监测及岩层破断能量传递计算, 综合确定冲击致灾关键岩层, 开展井下长孔区域压裂卸压防冲机理研究, 同时, 开展井下长孔区域压裂防冲工程实践。根据压裂前后岩层裂隙扩展观测、微震事件分布特征及工作面来压强度分析, 评价井下长孔区域压裂卸压防冲效果。研究成果可为本矿井接续工作面及类似条件矿井冲击地压防治提供借鉴。

1 工程概况

门克庆煤矿位于鄂尔多斯市呼吉尔特矿区

中部, 井田东西宽 7.6 km, 南北长 12.3 km, 面积 88.6 km²。井田内地质构造简单, 主采 3-1 煤层, 属稳定类型, 厚度为 1.41~6.17 m。

门克庆煤矿在开采初期曾发生过冲击地压, 主要表现为邻空工作面开采时邻空巷道超前工作面区域瞬间底鼓、帮鼓、顶板下沉、单体支柱损坏、煤体抛出等, 冲击地压发生时井下情况如图 1 所示。

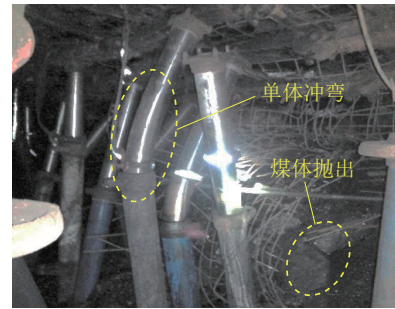


图 1 巷道冲击地压发生时现场照片

Fig. 1 Photo of coal burst in roadway

矿井开采初期留设的宽区段煤柱易造成巷道围岩静载应力集中, 为巷道冲击提供了静载荷。工作面上覆厚硬顶板破断动载与高静载叠加诱发巷道冲击地压。经历过几次冲击地压显现后, 开始采用小煤柱沿空掘巷, 在一定程度上降低了巷道围岩应力, 但在工作面上覆厚硬顶板破断动载作用下仍存在诱发冲击地压风险。

为降低工作面厚硬顶板破断动载诱发冲击地压的概率, 门克庆煤矿已在 11-3106 和 11-3107 工作面实施了厚硬顶板井下长孔压裂卸压防冲措施。11-3106 和 11-3107 工作面均已安全开采完毕, 11-3106 和 11-3107 工作面位于 3-1 煤 11 盘区南翼, 工作面走向长度约 2 922 m, 倾向长度为 320 m, 煤层倾角 1°~3°, 平均采高为 4.5 m, 平均埋深约 680 m, 采用一次采全高综采工艺。11-3106 工作面北侧为 11-3104 采空区, 区段煤柱宽度为 6 m, 南侧为实体煤; 11-3107 工作面南侧为 11-3104 采空区, 区段煤柱宽度为 6 m; 北侧为实体煤。两工作面东侧为 3-1 煤南翼大巷, 西侧为 3-1 煤南翼泄水巷。11-3106 和 11-3107 工作面布置如图 2 所示。11-3106 和 11-3107 工作面典型钻孔柱状如图 3 所示, 由图 3 可知, 两工作面上覆存在厚度约为 35 m 的复合砂岩顶板。根据岩石力学实验, 工作面上覆砂岩抗压强度为 30~35 MPa, 11-3106 和 11-3107 工作面存在厚硬顶板悬顶破断诱发冲击地压风险。

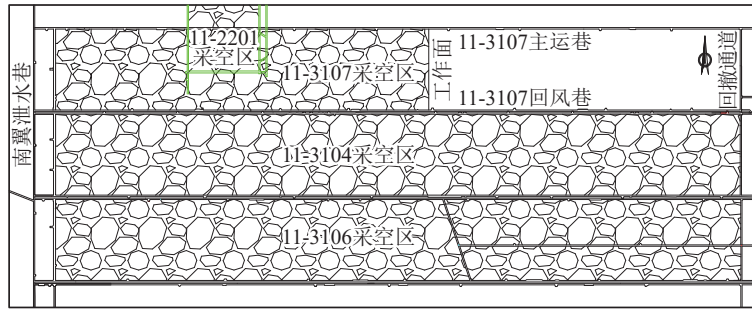


图2 11-3106和11-3107工作面布置

Fig. 2 Layout of 11-3106 and 11-3107 working faces

层厚/m	累厚/m	柱状	岩性名称
7.91	89.49		砂质泥岩
3.47	81.58		细砂岩
24.81	78.11		复合砂岩顶板 中砂岩
3.09	53.30		细砂岩
3.54	50.21		中砂岩
1.74	46.67		砂质泥岩
0.64	44.93		细砂岩
1.29	44.29		砂质泥岩
1.80	43.00		细砂岩
1.41	41.20		砂质泥岩
3.21	39.79		2-2煤
0.77	36.58		砂质泥岩
2.25	35.81		细砂岩
4.56	33.56		泥岩
12.15	29.00		细砂岩
0.96	16.85		砂质泥岩
5.01	15.89		粉砂岩
5.53	10.88		砂质泥岩
5.35	5.35		3-1煤

(a) 11-3106工作面

层厚/m	累厚/m	柱状	岩性名称
6.54	85.03		砂质泥岩
13.02	78.49		复合砂岩顶板 细粒砂岩
10.84	65.47		中粒砂岩
10.44	54.63		粗砂岩
5.11	44.19		砂质泥岩
1.49	39.08		细粒砂岩
2.92	37.59		2-2煤
10.55	34.67		细粒砂岩
3.90	24.12		粉砂岩
5.97	20.22		细粒砂岩
5.05	14.25		砂质泥岩
1.78	9.20		细粒砂岩
2.70	7.42		砂质泥岩
4.72	4.72		3-1煤

(b) 11-3107工作面

图3 11-3106和11-3107工作面典型钻孔柱状(局部)
Fig. 3 Typical drilling column of 11-3106 and 11-3107 working faces(partial)

经评价 11-3106 工作面具有中等冲击危险性, 虽然采取了顶板深孔爆破和煤层大直径钻孔卸压措施, 但在开采过程中, 仍发生多次大能量微震事件。ARAMIS M/E 微震监测结果显示, 11-3106 工

作面开采期间在距开切眼 0~1 300 m 范围频繁发生大能量微震事件, 主要分布在煤层上方 0~110 m 范围厚硬砂岩层(图 4)。11-3106 工作面为邻空工作面, 开采到一定距离时工作面上覆岩层与 11-3104 采空区顶板形成大空间覆岩结构, 厚硬顶板形成的大面积悬顶破断时释放能量发生大能量微震事件。大能量微震事件给工作面安全高效开采造成巨大威胁, 为有效降低大能量微震事件频次、能量, 防治工作面冲击地压, 需采取更具针对性和有效性的防治方法。

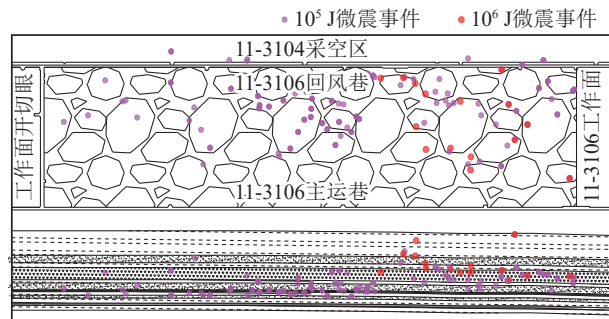


图4 11-3106工作面大能量微震事件空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of high-energy microseismic events of 11-3106 working face

2 工作面冲击危险主控因素分析

门克庆煤矿 11-3106 和 11-3107 工作面埋深、顶板岩性等相差不大, 同时均为邻空开采工作面, 两工作面地质及开采条件相近, 因此以 11-3106 工作面为例分析工作面冲击危险主控因素。

2.1 开采深度

冲击地压的发生与煤层埋深有一定关系, 鄂尔多斯地区冲击地压的临界开采深度一般在 500 m 左右。11-3106 工作面埋深约 680 m, 从开采深度来判断, 当前埋深已具备发生冲击地压的条件。

2.2 煤岩冲击倾向性

11-3106 工作面 3-1 煤层的冲击倾向性测定结果见表 1。根据各项指标, 综合判定 3-1 煤层具有强冲击倾向性。顶板和底板的冲击倾向性测定结果均为弱冲击倾向性。表明 11-3106 工作面所在 3-1 煤岩系统具有发生冲击地压的能力。

表 1 3-1 煤层冲击倾向性测定结果

Table 1 Determination results of bursting liability of No. 3-1 coal seam

项目	单轴抗压强度/MPa	动态破坏时间/ms	弹性能量指数	冲击能量指数
3-1 煤上分层	33.54	325.20	18.67	10.71
3-1 煤下分层	28.01	254.00	8.84	6.53
均值	30.78	289.60	13.76	8.62
冲击倾向性	强	弱	强	强
综合评判结果	强			

2.3 复合砂岩顶板

根据 11-3106 工作面附近取芯钻孔柱状图可得, 11-3106 工作面走向方向顶板岩性剖面如图 5 所示。由图 5 可知, 3-1 煤层顶板岩性主要为细、中、粗砂岩及粉砂岩, 局部层间赋存有小范围砂质泥岩, 煤层顶板存在多厚层复合砂岩层。11-3106 工作面上覆厚硬复合砂岩顶板破断动载对冲击地压影响显著。

2.4 侧向采空区

11-3106 工作面北侧为 11-3104 工作面采空区, 采空区上覆岩层自重向采空区周围岩层转移, 使 11-3106 工作面邻近采空区侧煤岩体应力升高, 采空区侧向支撑压力增大。11-3106 回风巷为邻空小煤柱巷道, 在采空区侧向支撑压力及上覆厚硬顶板破断动载扰动下, 发生冲击地压的风险较高。

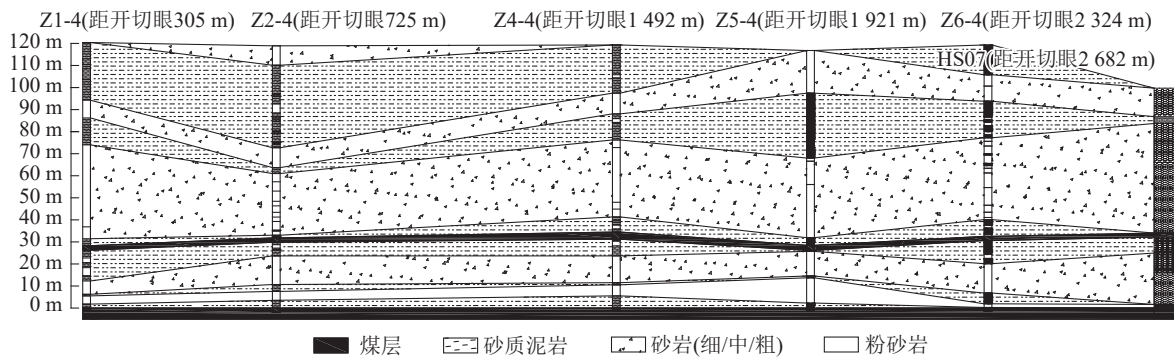


图 5 工作面覆岩岩性剖面

Fig. 5 Lithological profile of working face overlying strata

3 厚硬顶板分布及区域压裂卸压防冲机理

3.1 厚硬顶板分布特征

以 11-3106 工作面顶板岩层赋存情况为例分析 3-1 煤层顶板厚硬岩层分布特征, 为区域压裂方

案设计提供依据。11-3106 工作面附近 Z1-4、Z4-4 和 Z5-4 钻孔揭露的工作面上方 100 m 范围厚层砂岩赋存情况见表 2。总体来看, 11-3106 工作面覆岩岩性分布较稳定, 工作面上覆多层厚度大于 10 m 的砂岩层, 部分岩层厚度超过 35 m, 这些厚层砂岩

表 2 11-3106 工作面上方 100 m 范围厚层砂岩顶板分布

Table 2 Distribution of thick sandstone roof within 100 m above 11-3106 working face

序号	Z1-4			Z4-4			Z5-4		
	岩性	厚度/m	距煤层/m	岩性	厚度/m	距煤层/m	岩性	厚度/m	距煤层/m
5	—	—	—	—	—	—	细粒砂岩	17.62	99.18
4	—	—	—	—	—	—	粗粒砂岩	10.57	56.01
3	细粒砂岩	8.03	86.20	中粒砂岩	9.38	88.07	中粒砂岩	24.10	31.91
2	中粒砂岩	37.15	36.83	中粒砂岩	24.81	47.96	细粒砂岩	11.14	14.54
1	细粒砂岩	6.04	6.24	细粒砂岩	12.15	20.10	粉砂岩	11.45	2.27
0	3-1 煤	4.76	—	3-1 煤	4.63	—	3-1 煤	4.68	—

顶板突然破断产生大量弹性能, 是诱发冲击地压的直接力源。

将工作面上覆厚砂岩层按照层位分类, 煤层上方 30 m 范围存在粉砂岩、细粒砂岩, 为煤层上覆低位顶板。煤层上方 30~80 m 范围存在复合砂岩顶板, 为煤层上覆中高位顶板。工作面低位顶板破断对采场支护和工作面来压影响显著; 中高位顶板一方面通过对低位顶板施加载荷影响工作面矿压显现, 另一方面中高位厚硬顶板突然破断释放大量能量传递至煤层时易诱发冲击地压, 是需要卸压处理的关键岩层。

3.2 冲击致灾关键岩层判识

通过工作面冲击危险主控影响因素分析得出 11-3106 工作面主要致灾因素为工作面上覆厚硬岩层。结合门克庆煤矿 11-3106 工作面开采条件, 以及微震监测数据, 综合采用关键层判别、大能量微震事件分布、岩层破断能量传递等方法确定 11-3106 工作面冲击地压致灾关键岩层。

3.2.1 覆岩关键层判别

基于覆岩关键层理论^[32], 计算出上覆岩层中对采场矿压显现有显著影响的一层或几层关键层, 并初步认为该岩层或岩层组为诱发冲击地压的关键控制岩层。

首先对关键层进行判别, 假设某一岩层为关键层, 该岩层控制的范围达到第 n 层, 则第 $n+1$ 层成为第二层关键层的条件为

$$\begin{cases} q_{n+1} < q_n \\ q_n = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, q_{n+1} , q_n 分别为计算到第 $n+1$ 层与第 n 层时, 第一层关键层所受荷载, MPa; h_i 为岩层厚度 ($i=1, 2, \dots, n$), m; γ_i 为第 i 层的岩层容重, 一般可取 24~30 kN/m³; E_i 为第 i 层的弹性模量, 一般可取 4~6 GPa。

由此可根据如下程序进行关键层判别:

首先, 利用具体的岩层赋存地质综合柱状图, 根据岩层的厚度和岩性, 初步确定可能为关键层的厚岩层, 作为确定关键层的基础。

然后根据关键层的刚度条件, 进一步确定需要强度条件判别的对象

$$\sum_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i > \sum_{i=1}^n E_i h_i^3 \sum_{i=1}^{n+1} \gamma_i h_i \quad (2)$$

若式 (2) 成立, 则说明该岩层可能成为关键层, 以此类推到最后一层硬岩。由此可按照式 (2), 对涉及到的岩层从下到上逐层判别, 直至确定出位于最上方可能成为关键层的硬岩层位置, 设覆岩共有 k 层硬岩层满足式 (2) 要求。

最后, 关键层除满足式 (2) 要求, 还需用关键层要求的强度条件来判定第 n 层是否为关键层。即满足上层硬岩层的破断距大于下层硬岩层的破断距

$$\begin{cases} l_j < l_{j+1} (j = 1, 2, \dots, k) \\ l_j = h_j \sqrt{\frac{2R_{Tj}}{q_j}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, l_j , l_{j+1} 分别为第 j , $j+1$ 层的破断距, m; k 为硬岩层层数; h_j 为第 j 层的岩层厚度, m; R_{Tj} 为第 j 层的抗拉强度, MPa; q_j 为第 j 层所受载荷, MPa。

若第 j 层硬岩层不满足式 (3), 则应将第 $j+1$ 层硬岩层所控制的全部岩层载荷作用到第 k 层上, 重新计算第 k 层硬岩层破断距后再继续进行判别。

由式 (1)~(3) 计算得出 11-3106 工作面煤层上方 100 m 范围自下而上存在关键层 I (平均厚度为 13.18 m 细粒砂岩, 距煤层平均距离为 8.65 m)、关键层 II (平均厚度为 40.05 m 细/中/粗粒复合砂岩, 距煤层平均距离为 42.30 m)。

3.2.2 大能量微震事件分布

11-3106 工作面开采过程 10³ J 及以上能级微震事件垂向分布如图 6 所示。由图 6 可知, 10³ J 微震事件主要分布在煤层上方 0~30 m, 10⁴ J 微震事件主要分布在煤层上方 20~60 m, 10⁵ J 及以上微震事件主要分布在煤层上方 40~80 m。从大能量微震事件分布层位可知, 煤层上方 40~80 m 岩层为诱发冲击地压关键岩层。

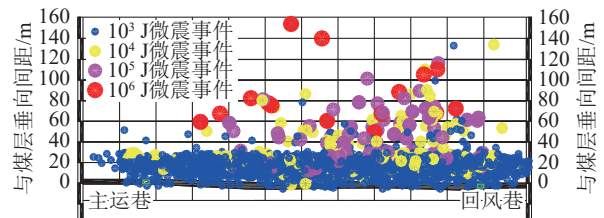


图 6 10³ J 及以上能级微震事件垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of microseismic events with energy levels of 10³ J and large than it

3.2.3 顶板破断能量传递

从顶板破断产生能量向煤层传递能量大小的角度分析不同层位岩层对采掘空间影响程度, 并考

虑能量传递过程中的衰减。能量在岩体中以指数形式衰减, 假设岩层水平赋存, 各岩层破断能量传递至煤层能量为

$$U' = Ur^{-\eta} \quad (4)$$

式中, U 为岩层破断释放的能量, J; r 为岩层破断位置与煤层的距离, m; η 为能量衰减指数, 一般可取 1.150 9~2.130 9。

研究表明, 煤岩体储存的弹性能 (即岩层破断释放的能量 U) 由体变弹性能 U_v 、形变弹性能 U_t 和顶板弯曲弹性能 U_w 3 部分组成^[33]

$$U = U_v + U_t + U_w \quad (5)$$

体积变形而积聚的体变弹性能为

$$U_v = \frac{(1-2\mu)(1+\mu)^2}{6E(1-\mu)^2} \gamma^2 H^2 \quad (6)$$

式中, μ 为泊松比; γ 为岩层容重, N/m³; H 为埋深, m; E 为岩层的弹性模量, GPa。

形状变形而积聚的形变弹性能为

$$U_t = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)^2}{3E(1+\mu)^2} \gamma^2 H^2 \quad (7)$$

顶板弯曲弹性能计算分为初次破断和周期破断 2 种情况, 计算公式为

$$\begin{cases} U_{w1} = \frac{M\varphi}{2} = \frac{q^2 L^5}{576EI} \Leftrightarrow \begin{cases} M = \frac{qL^2}{12} \\ \varphi = \frac{qL^3}{24EI} \end{cases} \quad (\text{初次破断}) \\ U_{w2} = \frac{M\varphi}{2} = \frac{q^2 L^5}{8EI} \Leftrightarrow \begin{cases} M = \frac{qL^2}{2} \\ \varphi = \frac{qL^3}{2EI} \end{cases} \quad (\text{周期破断}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, U_{w1} 、 U_{w2} 为工作面厚硬顶板初次破断、周期破断时释放能量, J; q 为厚硬顶板载荷, MPa; L 为厚硬顶板悬顶长度, m; I 为惯性矩, m⁴。

由式 (4)~(8) 可得, 顶板岩层破断释放能量传递至某处的剩余能量。

根据上述方法, 计算得到距煤层平均距离为 42.30 m 的关键层 II 破断传递至煤层的能量为 3.84×10^6 J, 大于关键层 I 破断传递能量 2.53×10^5 J。

综上分析, 位于煤层上方 40~80 m, 距煤层平均距离为 42.30 m 的关键层 II 破断产生的微震能级更高, 且传递至煤层的剩余能量更大, 为 11-3106 工作面冲击地压致灾关键岩层。

3.3 厚硬顶板区域压裂卸压防冲机理

针对大理深工作面中高位厚硬复合砂岩顶板主控因素导致的冲击地压, 常规低位顶板爆破切顶难以对中高位厚硬顶板进行有效卸压。依据冲击地压“消源”的防治思想, 可采用覆盖范围更广、卸压能力更强的区域压裂技术对中高位厚硬复合顶板进行超前弱化处理。

3.3.1 区域压裂卸压技术

井下长孔分段区域压裂卸压技术秉承冲击地压防治中“区域先行”的原则。针对中高位厚硬顶板致灾风险, 突破了远场围岩处理和局部卸压的技术瓶颈, 形成了厚硬顶板超前预处理和区域卸压技术, 在鄂尔多斯、榆林、彬长等矿区广泛应用。该项区域压裂卸压技术, 针对多煤柱巷道群应力集中, 实现“人造解放层”区域卸压^[19]; 针对采场中高位顶板, 超前“关键层预裂”降低采场应力的同时预裂邻空巷道采空区侧向悬顶, 降低巷道动静载荷水平; 针对坚硬岩层悬顶问题, 基于“大块变小块”控制覆岩活动范围和强度。井下长孔区域压裂系统主要由供电系统、供水系统、通讯系统、压裂工具、工况监测、安全监控、施工钻机等组成, 如图 7 所示。

3.3.2 工作面静载荷疏解作用

煤层顶板实施井下长孔压裂后在厚硬岩层内形成人造缝网, 可用于吸收顶板破断能量和减缓上覆岩层应力传递, 在压裂区域形成减压区, 压裂边缘区域形成增压区, 远处恢复原岩应力状态 (原压区), 应力分布规律如图 8 所示。将工作面煤层所受垂直应力简化为受非均布载荷 $q(x)$ 作用的半无限平面应变问题, 可得出压裂后工作面煤层中应力场分布的解析解^[19]。

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{2y}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x-\xi)^2 q(\xi)}{[(x-\xi)^2 + y^2]^2} d\xi - \gamma'y \\ \sigma_y = -\frac{2y^3}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{q(\xi)}{[(x-\xi)^2 + y^2]^2} d\xi - \delta\gamma'y \\ \tau_{xy} = -\frac{2y^2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x-\xi)q(\xi)}{[(x-\xi)^2 + y^2]^2} d\xi \end{cases} \quad (9)$$

式中, σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 分别为 (x, y) 点处的水平应力、垂直应力和剪应力, MPa; x 为工作面走向推进距离, m; ξ 为函数卷积的傅里叶变换时的实常数; y 为压裂层与待开采煤层间距, m; δ 为侧压系数; γ' 为压裂下层岩层容重, N/m³。

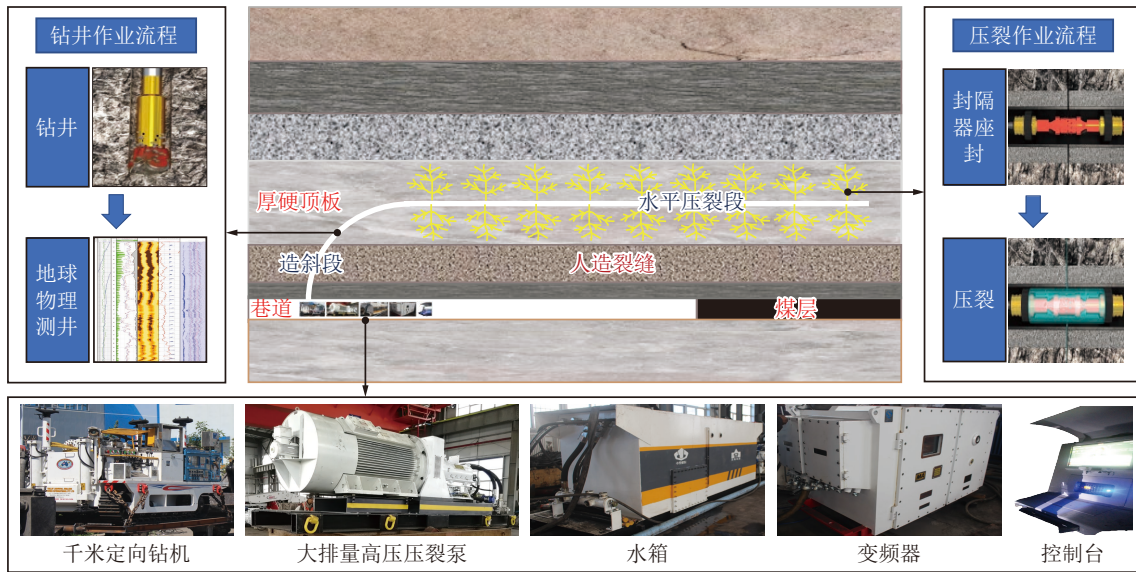


图 7 井下长孔压裂技术与装备示意

Fig. 7 Schematic diagram of regional fracturing technology with long drilling and equipment

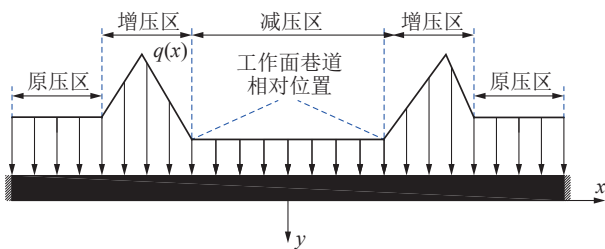


图 8 工作面煤层受力模型

Fig. 8 Stress model of coal seam in working face

由式 (9) 分析可知, 压裂层与待开采煤层间距 y 是影响采动应力场分布的重要因素, 当 y 无限大时可等同视为煤层上方无压裂层, 此时煤层采动应力较实施压裂后大。即可得出煤层上方岩层压裂后可降低煤层采动静载应力水平。

3.3.3 厚硬顶板弱化改性卸压防冲机理

区域压裂通过在厚硬顶板中形成复杂压裂缝网, 实现导通岩层原生裂隙, 降低岩层整体强度, 从而使单层厚岩层变为多层薄岩层, 长岩梁变短岩梁, 降低原厚硬岩梁悬伸时积聚的弯曲弹性能。由顶板初次及周期破断时弯曲弹性能计算公式 (式 (8)) 可知, 弯曲弹性能 U_w 与悬顶长度 L^5 成正比关系, 弱化厚硬岩层完整性, 减小悬顶长度可显著降低厚硬顶板突然破断释放大量弹性能诱发冲击地压风险。

另一方面, 压裂弱化使得岩层整体强度降低, 能量通过该岩层传递时阻尼增大, 参考式 (4), 传递能量呈指数级减小, 且压裂后厚硬顶板能及时垮落

并充填采空区形成缓冲垫层。实施压裂后上方岩层破断释放弹性能向煤层传递时能量衰减效应更强, 从而降低了传递至煤层的能量, 减小了顶板动载荷, 降低了冲击地压发生风险。

工作面上覆厚硬顶板实施区域压裂前后顶板周期破断时覆岩结构及动静载叠加示意如图 9 所示。

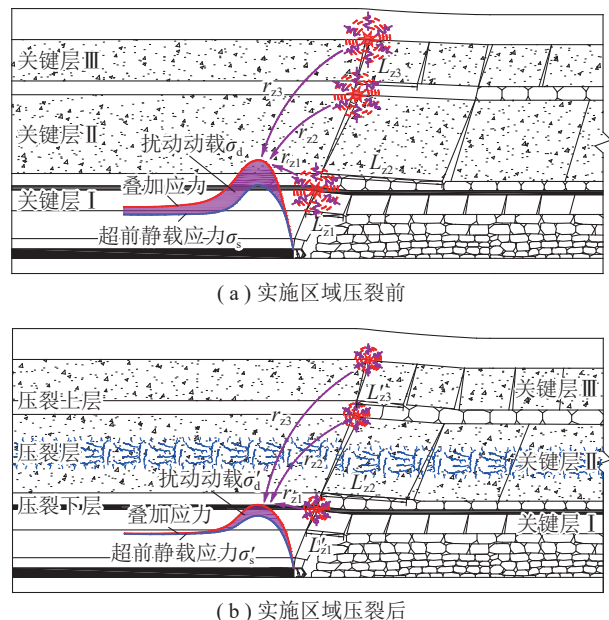


图 9 实施区域压裂前后厚硬顶板周期破断时覆岩结构及动静载叠加示意

Fig. 9 Schematic diagram of overlying strata structure and superposition of dynamic and static loads during periodic fracture of thick and hard roofs before and after regional fracturing

区域压裂主要对工作面上覆厚硬岩层进行压裂卸压, 对厚硬顶板破断动载影响显著。文献[34]提出了厚硬顶板破断时形成动载的计算方法, 基于此可得未实施区域压裂时关键层 I、II、III 周期破断时形成动载传递至工作面的剩余动载分别为

$$\begin{cases} \sigma_{d1} = 0.0645\rho V_s \left(\zeta \frac{q_{z1}^2 L_{z1}^5}{8EI} \right)^{0.3566} r_{z1}^{-\beta_1}, \\ \sigma_{d2} = 0.0645\rho V_s \left(\zeta \frac{q_{z2}^2 L_{z2}^5}{8EI} \right)^{0.3566} r_{z2}^{-\beta_2}, \\ \sigma_{d3} = 0.0645\rho V_s \left(\zeta \frac{q_{z3}^2 L_{z3}^5}{8EI} \right)^{0.3566} r_{z3}^{-\beta_3}, \end{cases} \quad (10)$$

式中, σ_{d1} 、 σ_{d2} 、 σ_{d3} 分别为关键层 I、II、III 周期破断时形成动载传递至工作面的剩余动载, MPa; ρ 为介质密度, kg/m^3 ; V_s 为 S 波传播速度, m/s; ζ 为能量转换系数; q_{z1} 、 q_{z2} 、 q_{z3} 分别为未实施区域压裂时关键层 I、II、III 上覆岩层载荷, MPa; L_{z1} 、 L_{z2} 、 L_{z3} 分别为未实施区域压裂时关键层 I、II、III 周期破断步距, m; r_{z1} 、 r_{z2} 、 r_{z3} 分别为关键层 I、II、III 破断形成震动波传播的距离, m; β_1 、 β_2 、 β_3 分别为关键层 I、II、III 破断形成震动波传播的衰减指数。

工作面上覆 3 组关键层 I、II、III 同步破断时形成的动载最强烈, 对工作面及巷道围岩影响显著, 未实施区域压裂时各厚硬顶板周期破断时形成动载传递至工作面总动载为

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \sigma_{d1} + \sigma_{d2} + \sigma_{d3} = 0.0645\rho V_s \left(\zeta \frac{q_{z1}^2 L_{z1}^5}{8EI} \right)^{0.3566} \\ & r_{z1}^{-\beta_1} + 0.0645\rho V_s \left(\zeta \frac{q_{z2}^2 L_{z2}^5}{8EI} \right)^{0.3566} r_{z2}^{-\beta_2} + \\ & 0.0645\rho V_s \left(\zeta \frac{q_{z3}^2 L_{z3}^5}{8EI} \right)^{0.3566} r_{z3}^{-\beta_3} = 0.0645\rho V_s \left(\frac{\zeta}{8EI} \right)^{0.3566} \\ & \left[\left(q_{z1}^2 L_{z1}^5 \right)^{0.3566} r_{z1}^{-\beta_1} + \left(q_{z2}^2 L_{z2}^5 \right)^{0.3566} r_{z2}^{-\beta_2} + \right. \\ & \left. \left(q_{z3}^2 L_{z3}^5 \right)^{0.3566} r_{z3}^{-\beta_3} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

由图 9 可知, 相比于厚硬顶板实施区域压裂前, 实施区域压裂后, 可有效弱化厚硬顶板强度, 降低其完整性, 实现厚硬岩层改性。在工作面开采过程中上覆岩层能及时破断、垮落, 顶板悬顶长度减小, 岩层弹性模量增大, 动载衰减程度增强。由式 (11) 可知, 厚硬顶板周期破断时形成动载传递至工作面总动载减小, 煤岩体所受动静载叠加总应力降低, 低于煤岩体冲击失稳临界应力, 从而降低冲击风险, 实现冲击地压有效控制。

4 厚硬顶板井下长孔区域压裂工程实践

4.1 11-3106 工作面压裂方案

在 11-3106 工作面距开切眼 1 300~1 800 m 范围设计 6 个压裂钻孔进行区域压裂, 压裂钻孔布置方案如图 10 所示。根据 3.2 节分析, 压裂目标层位为煤层上方 40~80 m 范围坚硬砂岩层, 为避免 11-3104 工作面侧向采空区上方裂隙造成压裂不保压, 影响卸压效果, 将采空区侧层位设计为 70 m。根据钻孔目标层位及布置方位的差异, 钻孔设计长度为 550~726 m, 包含压裂段和造斜段。采用后退式分段压裂工艺, 分段压裂间距为 30 m, 分段压裂时间不小于 30 min, 压裂钻孔设计参数见表 3。

4.2 11-3107 工作面压裂方案

根据前文提出的区域压裂方案设计方法, 设计 11-3107 工作面井下长孔压裂方案, 在工作面距开切眼 540 m 范围布置 5 个压裂钻孔, 压裂钻孔层位为 50 m 和 55 m, 钻孔间距为 70 m, 压裂钻孔布置平面图如图 11 所示。采用后退式分段压裂工艺, 分段压裂间距为 30 m, 分段压裂时间不小于 30 min, 压裂钻孔设计参数见表 4。

4.3 顶板区域压裂施工情况

11-3106 工作面井下长孔压裂稳压期间压裂压力为 18~19 MPa, 11-3107 工作面井下长孔压裂稳压期间压裂压力为 18~21 MPa。11-3106 和 11-3107 工作面长孔压裂典型压力、流量-时间曲线如图 12 所示。

压力、流量-时间曲线能较好地反映顶板岩层压裂时裂缝的扩展过程。由图 12 可知, 压裂过程可分为以下 4 个阶段: ①压裂初始阶段, 泵组压力快速升高, 压裂液由压裂工具串进入岩层钻孔内达到座封压力; ②随着压力继续快速升高, 压力达到岩层起裂压力, 岩层内形成主裂缝伴随着压力的小幅突降; ③随着压力提升达到泵组额定功率, 压力曲线呈现锯齿状小幅波动, 表明在持续稳定的高压压裂液冲刷作用下, 岩层内裂缝持续发育扩展; ④在压裂中期, 压力出现波动, 表明岩层内形成新的主裂缝, 之后伴随着裂缝稳定持续扩展至压裂结束。

以 11-3106 工作面 6 号钻孔压裂期间相邻 2 号钻孔出水情况验证井下长孔压裂破岩效果及压裂半径。6 号钻孔压裂期间未发生煤炮, 巷道无变形、掉渣现象, 在 6 号钻孔试验段压裂期间, 相邻 2 号

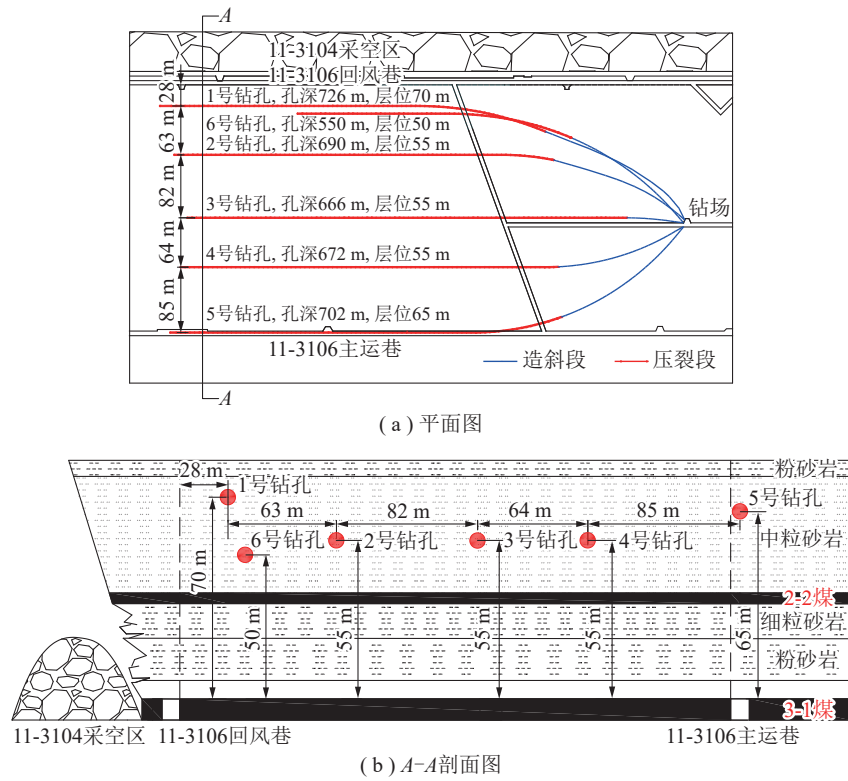


图 10 11-3106 工作面井下长孔压裂钻孔布置

Fig. 10 Drilling layout of regional fracturing with long drilling of 11-3106 working face

表 3 11-3106 工作面井下长孔压裂钻孔参数

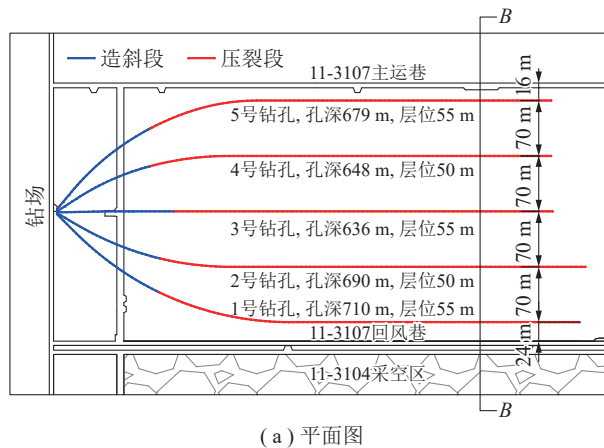
Table 3 Drilling parameters of regional fracturing with long drilling of 11-3106 working face

钻孔编号	设计长度/m	与 11-3106 回风巷距离/m	终孔高度/m	拐弯长度/m	压裂段长度/m	压裂段数
1 号	726	28	70	210	606	20
2 号	690	91	55	210	570	19
3 号	666	173	55	264	606	19
4 号	672	237	55	180	612	21
5 号	702	322	65	210	584	19
6 号	550	38	50	198	450	15

观测孔持续涌水, 较压裂前出水量增多、涌水速度增大, 涌水呈现喷射状 (图 13), 表明水力压裂使 2 个压裂孔导通, 压裂裂缝扩展半径大于 2 个压裂孔 30 m 间距, 区域压裂可实现对目标岩层的有效弱化卸压。

5 厚硬顶板井下长孔区域压裂防冲效果分析

针对 11-3106 和 11-3107 工作面实施的井下长孔压裂卸压工程, 通过顶板岩层漏失率观测, 工作面微震监测及支架压力数据分析评价井下长孔压裂卸压防冲效果。



(a) 平面图

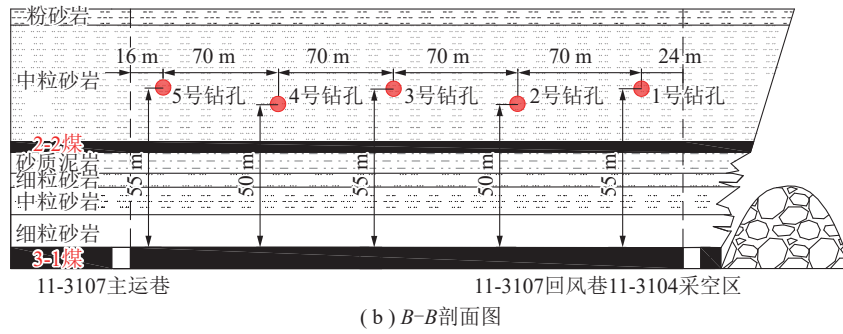


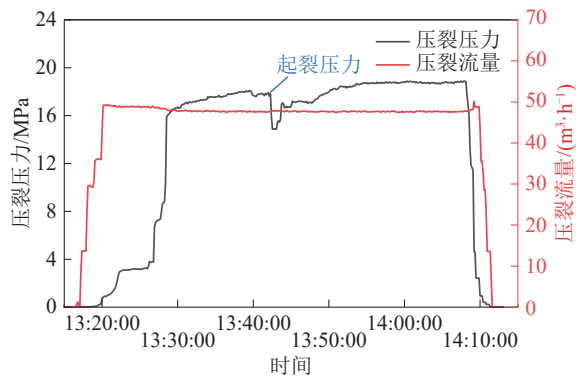
图 11 11-3107 工作面井下长孔压裂钻孔布置

Fig. 11 Drilling layout of regional fracturing with long drilling of 11-3107 working face

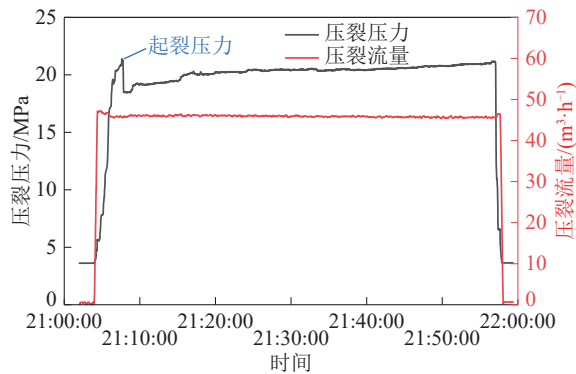
表 4 11-3107 工作面井下长孔压裂钻孔参数

Table 4 Drilling parameters of regional fracturing with long drilling of 11-3107 working face

钻孔编号	设计长度/m	水平距 11-3107 回风巷距离/m	终孔高度/m	拐弯长度/m	压裂段长度/m	压裂段数
1 号	710	24	55	189	540	18
2 号	690	94	50	177	540	18
3 号	636	164	55	174	480	16
4 号	648	234	50	147	540	18
5 号	679	304	55	168	540	18



(a) 11-3106 工作面



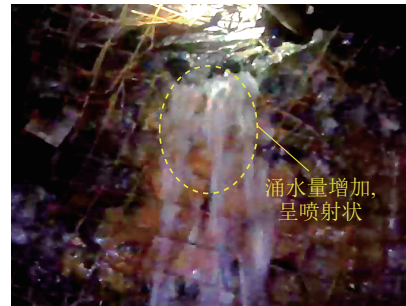
(b) 11-3107 工作面

图 12 11-3106 和 11-3107 工作面长孔压裂典型压力、流量-时间曲线

Fig. 12 Typical fracturing curve of regional fracturing with long drilling of 11-3106 and 11-3107 working faces



(a) 压裂前



(b) 压裂后

图 13 区域压裂前后观测孔出水对比

Fig. 13 Comparison of water output of observation holes before and after regional fracturing in roof

5.1 压裂岩层裂隙扩展程度分析

在工作面顶板长孔压裂施工前后采用顶板岩层漏失率观测方法评估目标岩层的裂隙扩展情况。设计在 11-3106 工作面回风巷内距腰巷 100 m 位置施工岩层漏失率观测钻孔, 分别在压裂施工前后进行岩层漏失率对比观测。观测钻孔施工参数为: 孔径为 89 mm, 方位角为 210°, 倾角为 60°, 垂高为 80.5 m, 深度为 93 m, 观测钻孔布置如图 14 所示。探测获得不同层位高度的顶板注水漏失量变化如图 15 所示。

由图 15 可知, 压裂施工前煤层上方 7~30 m 范围为砂岩层, 岩层注水漏失量稳定在 1.8~3.6 L/min; 煤层上方 33~77 m 范围岩层注水漏失量随着层位

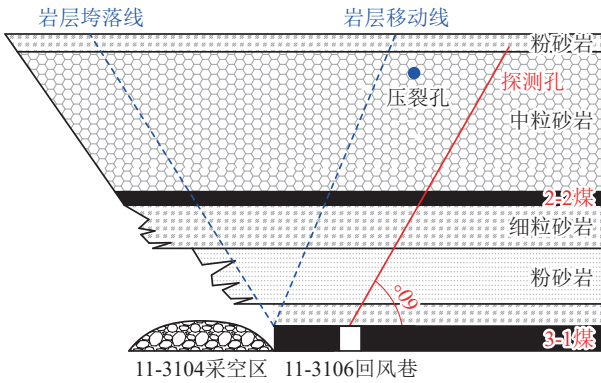


图 14 探测钻孔布置

Fig. 14 Layout of detecting drilling

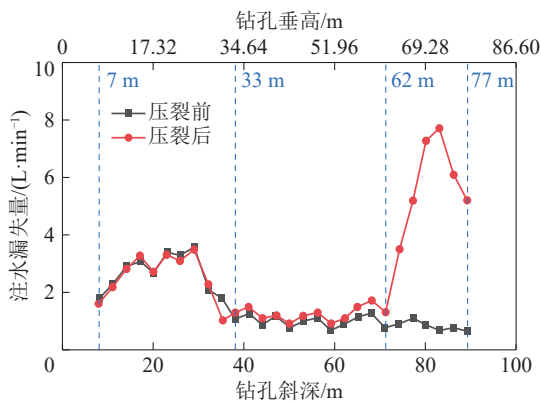


图 15 区域压裂前后顶板注水漏失量变化

Fig. 15 Changes of water injection leakage before and after regional fracturing in roof

高度增长呈现稳定趋势, 漏失量稳定在 0.7~1.3 L/min, 表明 11-3106 工作面实体侧煤层上方岩体受侧向工作面采空影响形成的采动裂缝发育高度约为 30 m, 30 m 以上更高层位岩层未受明显采动影响且原生裂隙不发育。同时, 由图 15 可知, 压裂施工后煤层上方 7~62 m 范围岩层注水漏失量及变化趋势较压裂前无明显变化, 而煤层上方 62~77 m 范围岩层注水漏失量大幅增加, 该区域压裂前后岩层注水漏失量分别为 0.6~1.1 L/min 和 3.5~7.7 L/min。相比于压裂前, 压裂后岩层注水漏失量增加 4.8~6.0 倍, 表明该层位对应的压裂钻孔在煤层上方 70 m 上下一定范围形成了良好的人造裂缝, 实现了对中高顶板岩层的有效区域压裂。

5.2 大能量微震事件显现特征

11-3106 工作面未压裂区域 (距开切眼 800~1 300 m 范围) 和压裂区域 (距开切眼 1 300~1 800 m 范围) 大能量微震事件空间分布如图 16 所示。

由图 16 可知, 11-3106 工作面未压裂和压裂区

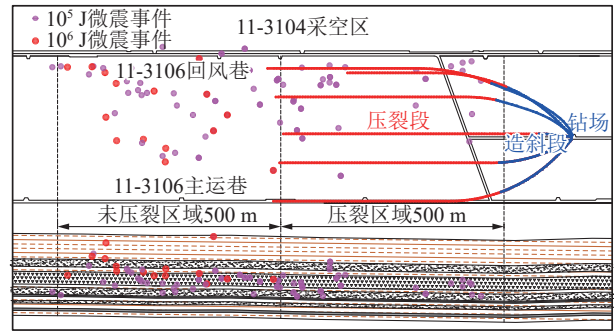


图 16 11-3106 工作面未压裂、压裂区域大能量微震事件空间分布

Fig. 16 Spatial distribution of high-energy microseismic events in unfractured and fractured areas of 11-3106 working face

域大能量微震事件分布特征如下: ① 10^5 J 和 10^6 J 微震事件主要分布在靠近回风巷, 即侧向采空区一侧; ②压裂区域仅在压裂边界附近发生 1 次 10^6 J 微震事件, 相比未压裂区域大能量微震事件频次显著减少, 微震事件分布集中程度降低。另外, 通过现场数据分析发现, 压裂区域大能量微震事件发生层位较未压裂区域明显降低, 煤层上方 100 m 及以上未发生大能量微震事件。

11-3106 工作面未压裂区域和压裂区域 10^5 J 和 10^6 J 微震事件时序散点分布如图 17 所示。

由图 17 可知, 未压裂区域发生 10^5 J 微震事件 46 次, 10^6 J 微震事件 14 次, 最大能量为 2.4×10^6 J, 微震延米发生频次约为 0.12 次/m, 延米释放能量约为 7.91×10^4 J/m。压裂区域未发生 10^6 J 微震事件, 仅发生 35 次 10^5 J 微震事件, 最大能量为 7.91×10^5 J, 微震延米发生频次约为 0.07 次/m, 延米释放能量约为 1.69×10^4 J/m。相比未压裂区域, 压裂区域微震延米发生频次降低约 41.67%, 微震延米释放能量降低约 78.63%, 表明实施长孔压裂对工作面上覆厚硬顶板进行弱化卸压可有效减少厚硬顶板突然破断产生的大能量微震事件, 减弱厚硬顶板破断动载作用, 可有效降低冲击地压发生几率。

5.3 微震事件能量、频次变化规律

11-3106 工作面未压裂区域和 11-3107 工作面压裂区域相同开采范围 (距开切眼 0~370 m 范围) 工作面微震事件能级分布如图 18 所示。

由图 18 可知, 未实施长孔压裂的 11-3106 工作面以 10^3 J 微震事件为主, 10^4 J 及以上微震事件 92 个, 其中 10^5 J 微震事件 11 个。实施长孔压裂的

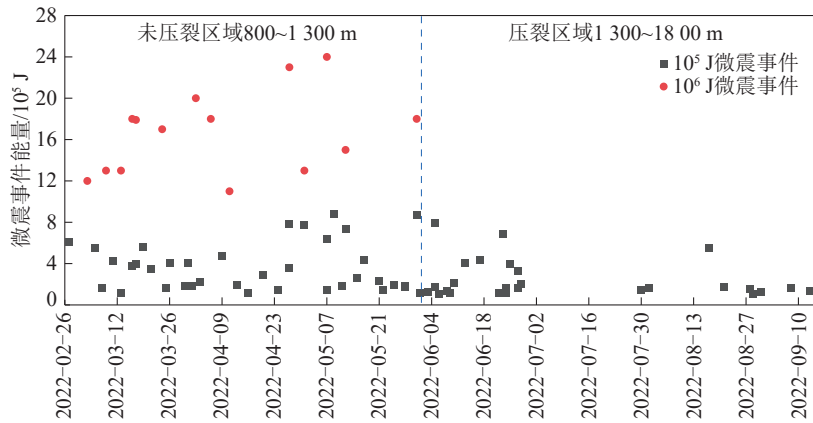


图 17 11-3106 工作面未压裂、压裂区域大能量微震事件时序分布

Fig. 17 Time series distribution of high-energy microseismic events in unfractured and fractured areas of 11-3106 working face

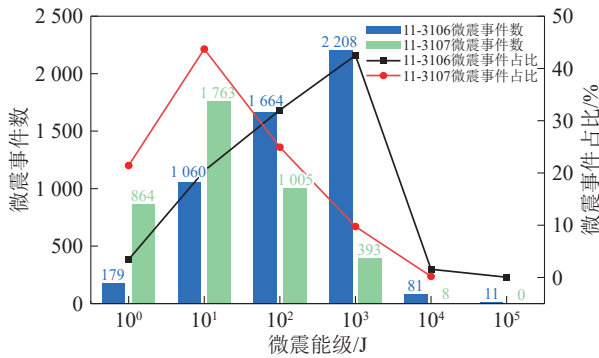


图 18 11-3106 和 11-3107 工作面微震事件能级分布

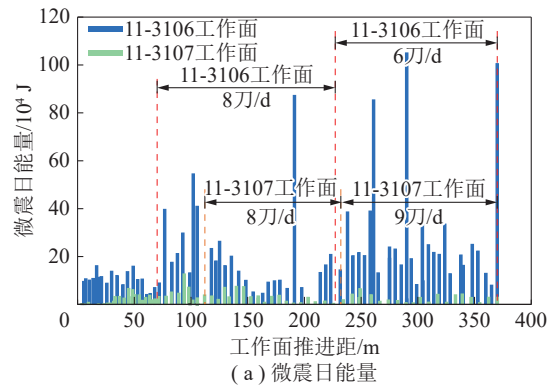
Fig. 18 Energy level distribution of microseismic events of 11-3106 and 11-3107 working faces

11-3107 工作面以 10^3 J 以下小能量微震事件为主, 10^4 J 微震事件 8 个, 未发生 10^5 J 微震事件。与 11-3106 工作面相比, 11-3107 工作面 10^4 J 以上微震事件减少约 91%, 表现为高频次、低能量特征, 区域压裂实现了微震能量的持续稳定释放, 有利于冲击地压防治。

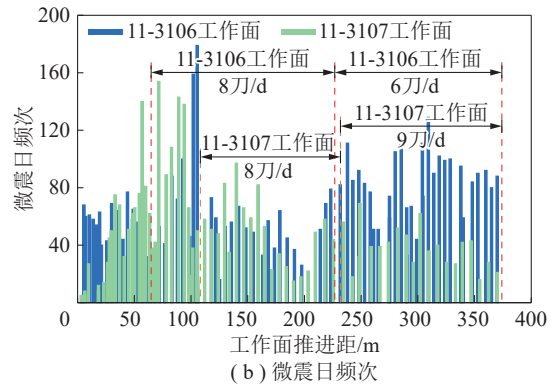
11-3106 工作面未压裂区域和 11-3107 工作面压裂区域相同开采范围 (距开切眼 0~370 m 范围) 工作面微震日能量、频次变化如图 19 所示。

由图 19 可知, 在 11-3106 和 11-3107 工作面以相同推进速度开采时实施长孔压裂的 11-3107 工作面微震日能量、日频次均值分别降低了约 86.04%、20.63%。在 11-3107 工作面比 11-3106 工作面推进速度快时实施长孔压裂的 11-3107 工作面微震日能量、日频次均值分别降低了约 78.24%、53.65%。实施区域压裂可显著降低微震日能量和日频次, 有利于提高工作面推进速度。

总体来看, 相比于 11-3106 工作面, 11-3107 工



(a) 微震日能量



(b) 微震日频次

图 19 11-3106 和 11-3107 工作面微震日能量、频次变化
Fig. 19 Daily energy and frequency changes of microseismic of 11-3106 and 11-3107 working faces

作面实施长孔压裂后工作面微震日均能量降低了约 92.03%, 日均频次降低了约 47.83% (图 20), 表明井下长孔压裂能有效弱化工作面上覆厚硬岩层, 减弱厚硬岩层积聚和释放弹性能的能力, 显著降低微震日均能量和频次。

5.4 工作面来压强度、来压步距分析

11-3106 工作面在 2022 年 4 月 1 日~2022 年 6 月 7 日开采期间工作面支架压力如图 21 所示。由

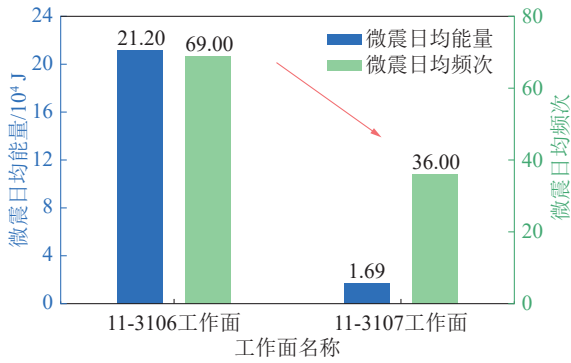


图 20 11-3106 和 11-3107 工作面微震日均能量、频次变化

Fig. 20 Daily average energy and frequency changes of microseismic of 11-3106 and 11-3107 working faces

图 21 可知, 5 月 28 日 11-3106 工作面进入压裂区域, 工作面支架压力在 5 月 21 日后出现明显降低, 表明顶板区域压裂影响范围约为 25 m (5 月 21

日—28 日工作面推进距)。11-3106 工作面在未压裂区域开采期间工作面支架压力整体较高, 来压强度大, 来压影响范围广; 工作面进入压裂影响区域后工作面支架压力显著降低, 相比于未压裂区域, 压裂区域支架压力降低约 15%, 周期来压步距减小约 20%, 来压强度和影响范围明显减小。

11-3106 工作面未压裂区域和 11-3107 工作面压裂区域相同开采范围工作面支架压力分布如图 22 所示。

由图 22 可知, 11-3106 工作面未压裂区域支架压力表现为全区域大范围来压, 来压时支架压力为 45~48 MPa, 来压步距为 11~17 m, 分布不均匀。11-3107 工作面压裂区域支架压力表现为全工作面均匀、分散来压, 来压时支架压力为 35~38 MPa, 来压步距为 8~10 m, 分布均匀, 工作面矿压显现缓和 (图 23)。

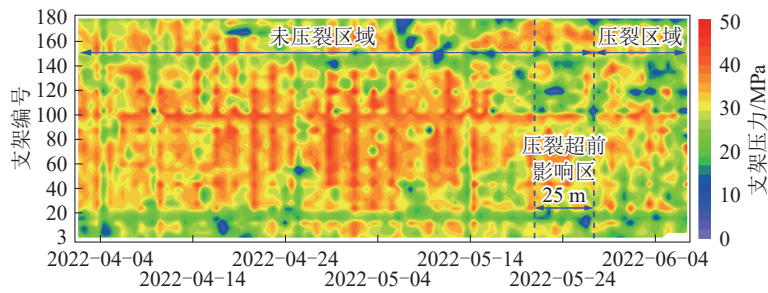
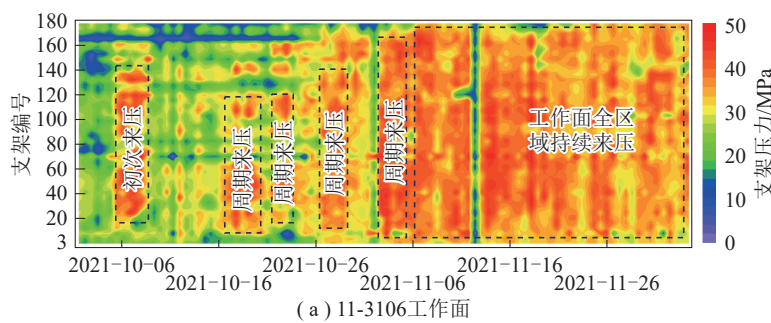
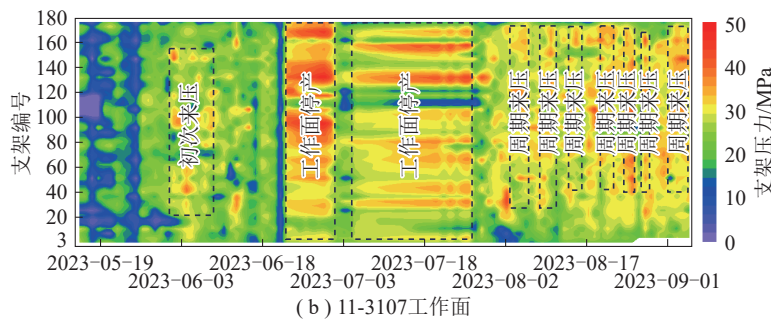


图 21 2022-04-01—2022-06-07 期间 11-3106 工作面支架压力分布

Fig. 21 Support pressure of 11-3106 working face at 2022-04-01—2022-06-07



(a) 11-3106 工作面



(b) 11-3107 工作面

图 22 11-3106 和 11-3107 工作面支架压力分布

Fig. 22 Support pressure of 11-3106 and 11-3107 working faces

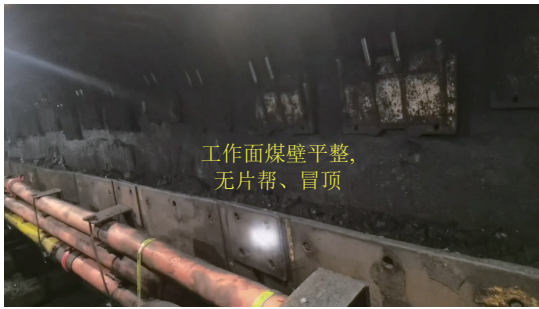


图 23 11-3107 工作面矿压显现情况

Fig. 23 Strata behaviour of 11-3107 working face

相比于 11-3106 工作面, 11-3107 工作面实施长孔压裂后支架压力降低约 22%, 周期来压步距减小约 36%。

综上分析, 井下长孔区域压裂实现了对煤层上覆厚硬顶板的大范围区域弱化, 显著降低了厚硬顶板破断能量释放, 大幅降低了大能量微震事件发生频次。同时, 压裂后厚硬顶板破断步距缩短, 垮落强度降低, 压裂岩层对上覆顶板破断载荷的传递由“硬传递”转化为“软传递”, 显著降低诱发冲击地压的动载荷, 继而降低冲击地压发生风险。

6 结论

(1) 具有冲击倾向性的煤层、顶底板岩层提供了发生冲击地压的基础条件, 工作面大埋深可形成充足的静载荷; 工作面上覆完整性强、连续性好的复合砂岩顶板破断动载是诱发冲击的主要力源。

(2) 根据顶板岩性分析、关键层理论计算、微震监测及岩层破断能量传递计算, 综合确定 3-1 煤层上方 40~80 m 的复合砂岩顶板为冲击致灾关键岩层, 是实施区域压裂的目标岩层。

(3) 实施井下长孔区域压裂对厚硬复合砂岩顶板进行超前预裂处理, 相比于压裂前, 压裂后岩层注水漏失量增加 4.8~6.0 倍, 表明压裂岩层裂隙扩展明显, 顶板预裂效果显著。

(4) 井下长孔区域压裂使上覆厚硬顶板强度降低, 大能量微震事件显著减少, 微震日能量及频次降低, 微震事件集中程度降低。同时, 工作面支架压力降低 15%~22%, 周期来压步距减小 20%~36%, 表明井下长孔区域压裂可有效减少厚硬顶板释放能量, 降低冲击地压发生风险。

参考文献 (References):

[1] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理

论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861-1874.

QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861-1874.

[2] 窦林名, 王永忠, 卢方舟, 等. 急倾斜特厚煤层冲击地压防治探索与总结[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 84-94.
DOU Linming, WANG Yongzhong, LU Fangzhou, et al. Exploration and summary of prevention and control of rock burst in steeply inclined and ultra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 84-94.

[3] 谭云亮, 张修峰, 肖自义, 等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 367-379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367-379.

[4] 曹安业, 郭文豪, 温颖远, 等. 托顶煤巷道锚固“梁-拱”结构分类及顶板冲击失稳机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1752-1770.

CAO Anye, GUO Wenhao, WEN Yingyuan, et al. Classification and instability mechanism of anchored "beam-arch" composite structure in rock burst roadways with top-coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1752-1770.

[5] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.

QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.

[6] 朱斯陶, 刘金海, 姜福兴, 等. 我国煤矿顶板运动型矿震及诱发灾害分类、预测与防控[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 807-816.

ZHU Sitao, LIU Jinhai, JIANG Fuxing, et al. Classification, prediction, prevention and control of roof movement-type mine earthquakes and induced disasters in China's coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 807-816.

[7] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152-171.

DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.

[8] 潘俊锋, 夏永学, 王书文, 等. 我国深部冲击地压防控工程技术难题及发展方向[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1291-1302.

PAN Junfeng, XIA Yongxue, WANG Shuwen, et al.

- Technical difficulties and emerging development directions of deep rock burst prevention in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1291-1302.
- [9] 郝宪杰, 孙希奎, 唐忠义, 等. 覆岩高位整层爆破卸压“人造预裂层”源头防治冲击地压技术体系及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1318-1331.
HAO Xianjie, SUN Xikui, TANG Zhongyi, et al. Technology system and application of "artificial pre-fracture layer" by high level whole layer blasting for pressure releasing to source prevention and control of rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1318-1331.
- [10] 韩刚, 窦林名, 张寅, 等. 沿空巷道动力显现影响机制与防治技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 730-738, 748.
HAN Gang, DOU Linming, ZHANG Yin, et al. Influence mechanism and prevention technology of dynamic manifestation of roadway along goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 730-738, 748.
- [11] 顾倩悦, 曹安业, 杨耀, 等. 高位长钻孔爆破防治冲击地压技术研究及应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2): 023024.
GU Qianyue, CAO Anye, YANG Yao, et al. Research and application of high-level long drilling blasting technology for preventing and controlling rock burst[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 023024.
- [12] 张俊文, 董续凯, 柴海涛, 等. 厚煤层一次采全高低位厚硬岩层垮落致冲机理与防治[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 734-744.
ZHANG Junwen, DONG Xukai, CHAI Haitao, et al. Mechanism and prevention of rock burst caused by the collapse of low-level thick hard rock strata at full-height mining face in thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 734-744.
- [13] 赵善坤, 张广辉, 柴海涛, 等. 深孔顶板定向水压致裂防冲机理及多参量效果检验[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1247-1255.
ZHAO Shankun, ZHANG Guanghui, CHAI Haitao, et al. Mechanism of rockburst prevention for directional hydraulic fracturing in deep-hole roof and effect test with multi-parameter[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1247-1255.
- [14] 康红普, 冯彦军, 张震, 等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 31-44.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHANG Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 31-44.
- [15] 康红普, 姜鹏飞, 冯彦军, 等. 煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 1-15.
KANG Hongpu, JANG Pengfei, FENG Yanjun, et al. De-stressing technology for rock around coal mine roadways and its applications[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 1-15.
- [16] KANG Hongpu, JIANG Pengfei, FENG Yanjun, et al. Application of large-scale hydraulic fracturing for reducing mining-induced stress and microseismic events: a comprehensive case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 56(2): 1399-1413.
- [17] ZHUANG Jiaxin, MU Zonglong, CAI Wu, et al. Multi-stage hydraulic fracturing of a horizontal well for hard roof related coal burst control: insights from numerical modelling to field application[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2024, 34(8): 1095-1114.
- [18] 潘俊锋, 邬建宏, 贺海鸿, 等. 煤层顶板“人造解放层”采动响应规律相似模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2): 023023.
PAN Junfeng, WU Jianhong, HE Haihong, et al. Similarity simulation study on the mining response law of artificial stress relief layer in coal seam roof[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 023023.
- [19] 潘俊锋, 康红普, 闫耀东, 等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 636-648.
PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 636-648.
- [20] 夏永学, 潘俊锋, 谢非, 等. 特厚煤层大巷复合构造区重复冲击致灾机制及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2199-2209.
XIA Yongxue, PAN Junfeng, XIE Fei, et al. Disaster mechanism and control technology of large roadway group with repeated impact in extra-thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2199-2209.
- [21] 夏永学, 潘俊锋, 谢非, 等. 井下超长水平孔分段压裂防冲机理及效果[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 115-124.
XIA Yongxue, PAN Junfeng, XIE Fei, et al. Mechanism and effect of the rock burst prevention using overlength horizontal hole staged fracturing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 115-124.
- [22] 于斌, 高瑞, 夏彬伟, 等. 大空间坚硬顶板地面压裂技术与应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 800-811.
YU Bin, GAO Rui, XIA Binwei, et al. Ground fracturing technology and application of hard roof in large space[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 800-811.
- [23] 高瑞, 戴祥淋, 于斌, 等. 特厚煤层孤岛工作面坚硬顶板矿压动力灾害地面区域压裂防控研究[J]. 采矿与安全工

- 程学报, 2025, 42(3): 532–543.
- GAO Rui, DAI Xianglin, YU Bin, et al. Study on prevention and control of roof dynamic disasters by ground regional fracturing in isolated working face of extra-thick coal seam mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2025, 42(3): 532–543.
- [24] 尚晓光, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 地面直井水压致裂防控巨厚硬岩运动型矿震试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S2): 639–650.
- SHANG Xiaoguang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Experimental study on the prevention and control of mine earthquake by high pressure water fracturing of huge thick strata in vertical shaft[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 639–650.
- [25] 郑凯歌, 袁亮, 杨森, 等. 基于分区弱化的复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(2): 322–333.
- ZHENG Kaige, YUAN Liang, YANG Sen, et al. Study on prevention and control of rock burst staged fracturing area of composite hard roof based on zoning weakening[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(2): 322–333.
- [26] 钟坤, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 煤矿坚硬顶板分段水力压裂防冲效果监测与评价[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(7): 2582–2593.
- ZHONG Kun, CHEN Weizhong, ZHAO Wusheng, et al. Monitoring and evaluation of segmented hydraulic fracturing effect in rock burst prevention on hard roof of coal mine[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2022, 53(7): 2582–2593.
- [27] 徐东, 邓广哲, 刘华, 等. 压裂煤岩分区破坏能量耗散机理与应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 404–410, 418.
- XU Dong, DENG Guangzhe, LIU Hua, et al. Mechanism and application of energy dissipation of partition failure in fractured coal rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(2): 404–410, 418.
- [28] 李云鹏, 张宏伟, 苏怀瑞, 等. 复杂坚硬岩层井上下联合水力压裂控制技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(4): 704–713.
- LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, SU Huairui, et al. Research on control technology of coordinated hydraulic fracture under complicated hard rock strata condition[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(4): 704–713.
- [29] 马玉镇, 高永涛, 朱斯陶, 等. 煤矿地面水力压裂防冲机理及效果评价方法[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(11): 4390–4405.
- MA Yuzhen, GAO Yongtao, ZHU Sitao, et al. Mechanism and evaluation method of rock burst prevention in coal mines using surface hydraulic fracturing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(11): 4390–4405.
- [30] 马玉镇, 朱斯陶, 潘俊锋, 等. 煤矿覆岩主控致灾层位危险识别及现场应用[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(6): 2589–2603.
- MA Yuzhen, ZHU Sitao, PAN Junfeng, et al. Identification and on-site application of the main hazard-causing stratum of overlying strata in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(6): 2589–2603.
- [31] 郑建伟, 鞠文君, 吕大钊, 等. 顶板条带弱化防治中央大巷冲击地压机制及实践[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1169–1178.
- ZHENG Jianwei, JU Wenjun, LU Dazhao, et al. Mechanism and practice of roof strip weakening method for preventing rockburst in central roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(3): 1169–1178.
- [32] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(3): 225–230.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 225–230.
- [33] 阿维尔申. 冲击地压[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1959: 45–78.
- [34] 赵毅鑫, 周金龙, 刘文岗. 新街矿区深部开采邻空巷道受载特征及冲击失稳规律分析[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1595–1606.
- ZHAO Yixin, ZHOU Jinlong, LIU Wengang. Characteristics of ground pressure and mechanism of coal burst in the gob side roadway at Xinjie deep mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1595–1606.