



## 硬厚难垮顶板工作面矿压显现特征及顶板灾害防治技术

徐刚 张震 李正杰 冯彦军 张春会 薛吉胜 刘前进 蔺星宇 马镕山

### 引用本文:

徐刚, 张震, 李正杰, 等. 硬厚难垮顶板工作面矿压显现特征及顶板灾害防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 27–42.  
XU Gang, ZHANG Zhen, LI Zhengjie. Characteristics of mine pressure and roof disaster prevention and control technology on hard and thick roof of working face[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 27–42.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0203>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 厚硬顶板潜在矿震风险地面压裂预控技术

Ground fracturing pre-control technology for potential mine seismic risk of thick and hard roof

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 1–11 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1012>

#### 综放工作面顶板灾害类型和发生机制及防治技术

Types, occurrence mechanisms and prevention techniques of roof disasters in fully-mechanized top coal caving face

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 44–57 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1634>

#### 大采高工作面生命周期内坚硬厚顶板破断机制

Breaking mechanism of hard thick roof during the life cycle of large mining height working face

煤炭科学技术. 2025, 53(7): 25–34 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0546>

#### 工作面顶板灾害类型、监测与防治技术体系

Types, monitoring and prevention technology system of roof disasters in mining face in China

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 1–11 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.001>

#### 厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制与防控技术

Catastrophe mechanism and prevention and control technology on soft coal mining with large inclination angle under thick and hard roof

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 12–20 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.002>

#### 井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用

System and application of regional fracking of coal seam roof on and under the ground to prevent rockburst

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 106–115 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0903>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

徐 刚, 张 震, 李正杰, 等. 硬厚难垮顶板工作面矿压显现特征及顶板灾害防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 27–42.

XU Gang, ZHANG Zhen, LI Zhengjie, *et al.* Characteristics of mine pressure and roof disaster prevention and control technology on hard and thick roof of working face[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 27–42.



徐刚, 男, 内蒙古商都人, 研究员, 硕士生导师, 博士, 全国杰出工程师青年奖, 中国煤炭科工集团首席科学家, 孙越崎青年科技奖获得者, 现任中煤科工开采研究院有限公司副总经理。研究方向: 矿山压力与岩层控制技术、工作面顶板灾害防治技术、地面压裂区域卸压技术。主要成果: 主持和参与国家科技支撑及重点研发计划项目/课题 6 项, 获得省部级科技奖励 10 余项(特等奖和一等奖 6 项)和国家发明专利银奖 1 项; 发表学术论文 60 余篇, 出版专著 2 本; 授权发明专利 40 余项。

## 硬厚难垮顶板工作面矿压显现特征及顶板灾害防治技术

徐 刚<sup>1,2,4</sup>, 张 震<sup>1,2</sup>, 李正杰<sup>1,2</sup>, 冯彦军<sup>1,2</sup>, 张春会<sup>3</sup>, 薛吉胜<sup>1,2</sup>, 刘前进<sup>1,2</sup>, 蔺星宇<sup>1,2,4</sup>, 马镕山<sup>1,2,4</sup>

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100014; 3. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北石家庄 050018; 4. 矿山顶板灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100013)

**摘 要:** 硬厚难垮顶板工作面开采期间矿压显现异常强烈, 该类型顶板灾害的防控一直是困扰我国工作面安全高效生产的难题。基于顶板灾害案例分析, 梳理了我国硬厚难垮顶板类型及致灾特点, 开展了硬厚难垮顶板工作面强动载矿压发生机理及影响因素研究, 从预先设计、采前弱化和采中监测预警 3 个阶段提出了针对性的防控手段, 并进行了实践应用。研究表明: 硬厚难垮顶板具有强度高、厚度大、整体性强的特点, 可分为抗压强度高的厚顶板、整体性较好的厚顶板及基本顶直覆顶板 3 类; 硬厚难垮顶板大面积瞬时垮落多伴随工作面强来压、飓风等现象, 易造成设备损坏、瓦斯超限或爆炸, 危及人身安全; 硬厚难垮顶板存在 2 种诱发工作面强矿压的顶板破断形式, 一是顶板长悬顶状态下弯曲下沉, 发生架后断裂, 二是长悬顶顶板在煤壁前方超前断裂产生快速回转; 硬厚难垮顶板采场矿压符合 I-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ分区支承模型运动形式, 顶板厚度大、抗拉强度高、周期垮落步距长, 断裂时更易引起煤壁处下沉量增大, 支架显著增阻, 此即为硬厚难垮顶板工作面矿压显现强烈的原因。基于以上分析, 提出顶板弱化与矿压监测相结合的顶板灾害防治方法, 在预先探明覆岩赋存特征、合理支架选型条件下, 采用微震监测确定压裂目标层, 基于矿压监测评价工作面支护-卸压效果, 该方法在曹家滩煤矿 10 m 超大采高工作面得以成功应用, 开采期间工作面初次来压步距由 100 m 以上减小至 49.35 m, 4 次方以上微震大能量事件占比仅 1.2%, 取得了较好的防控效果。

**关键词:** 硬厚难垮顶板; 顶板灾害防治; 强矿压发生机理; 分区支承模型; 区域压裂

中图分类号: TD326

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)08-0027-16

### Characteristics of mine pressure and roof disaster prevention and control technology on hard and thick roof of working face

XU Gang<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Zhen<sup>1,2</sup>, LI Zhengjie<sup>1,2</sup>, FENG Yanjun<sup>1,2</sup>, ZHANG Chunhui<sup>3</sup>, XUE Jisheng<sup>1,2</sup>, LIU Qianjin<sup>1,2</sup>, LIN Xingyu<sup>1,2,4</sup>, MA Rongshan<sup>1,2,4</sup>

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 4. Key Laboratory of National Mine Safety Supervision Bureau for Mine Roof Disaster Prevention and Control, Beijing 100013, China)

收稿日期: 2025-02-18

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2025-0203

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC2907501); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2023-2-TD-ZD003)

作者简介: 徐 刚(1979—), 男, 内蒙古商都人, 研究员, 硕士生导师, 博士。E-mail: 357851823@qq.com

**Abstract:** Mine pressure appears extremely strong during mining in hard and thick roof working faces. The prevention and control of this type of roof disaster has always been a problem that has plagued the safe and efficient production of working faces in my country. Based on the analysis of roof disaster cases, the types and disaster-causing characteristics of hard thick and difficult roof in my country are sorted out, and research on the occurrence mechanism and influencing factors of strong dynamic load mine pressure in hard thick and difficult roof working faces is carried out. Targeted prevention and control measures have been proposed in three stages: pre-design, pre-mining weakening and mid-mining monitoring and early warning, and have been applied in practice. The research shows that the hard thick and difficult to collapse roofs have the characteristics of high strength, large thickness and strong integrity, and can be divided into three categories: thick roof with high compressive strength, thick roofs with good integrity, and roofs directly covering basic roofs. Large-area instantaneous collapse of hard thick and difficult to collapse roofs is often accompanied by strong pressure from the working face, hurricanes and other phenomena, which may easily cause equipment damage, gas overlimits or explosion, endangering personal safety. There are two types of roof failure types that induce strong mine pressure in the working face. One is that the roof bends and sinks under the state of long overhanging roof, resulting in back-frame fractures; the other is that the long overhanging roof fractures in front of the coal wall, causing rapid rotation. The mine pressure in the stope with hard thick and difficult to collapse roof conforms to the movement form of the I-II-III-IV zoning support model. The roof has a large thickness, high tensile strength, and long cyclic collapse steps. When breaking, it is easier to cause the subsidence at the coal wall to increase, and significantly increase the resistance of the support, which is the reason why the mine pressure appears strong in the working face with hard thick and difficult to collapse roof. Based on the above analysis, a roof disaster prevention and control method that combines roof weakening and mine pressure monitoring is proposed. Under the conditions of pre-verification of the occurrence characteristics of overlying rocks and reasonable support selection, microseismic monitoring is used to determine the fracturing target layer, and the working face support-pressure relief effect is evaluated based on mine pressure monitoring. This method has been successfully applied in the 10 m super-high mining face of Caojiatan Coal Mine. During mining, the first weighting step distance of the working face has been reduced from more than 100 m to 49.35 m, and the high-energy microseismic events above the fourth power accounts for only 1.2%, achieving good prevention and control effects.

**Key words:** hard and thick roof; roof disaster prevention and control technology; occurrence mechanism of strong mine pressure; zoned support model; regional fracturing

## 0 引言

采场围岩控制是煤矿安全高效开采的核心,而硬厚难垮顶板因其质地致密、强度高、厚度大的特征,工作面开采期间矿压显现异常强烈,多年来硬厚难垮顶板灾害的防控一直是困扰工作面安全高效生产的难题<sup>[1-2]</sup>。据不完全统计,我国属于坚硬难垮顶板的煤层占比约 1/3,且分布在 50% 以上的矿区,如大同、榆神、黄陵、鹤岗、枣庄、通化、神府、乌鲁木齐、晋城、潞安、兖州等。

多年来,针对硬厚难垮顶板致灾机理,国内学者开展了大量研究与实践工作。朱德仁等<sup>[3]</sup>基于主结构块的受力、活动与平衡力学分析,确定了工作面强矿压发生条件,认为厚硬顶板条件下冲击载荷的强烈程度与基本顶断裂线至工作面煤壁的相对距离有关。杨胜利等<sup>[4-5]</sup>运用中厚板理论推导出适用于煤矿坚硬厚顶板的中厚板理论模型,基于此确定了顶板破断位置,并初步给出顶板破断判据,揭示了坚硬厚顶板破断失稳致灾机理。姜福兴等<sup>[6-7]</sup>针对厚层坚硬顶板条件,构建了“载荷三带”力学结构模型,开发了冲击危险性评价、监测及防治的治理体系。于斌

等<sup>[8-10]</sup>提出大空间采场覆岩具有显著的“低-中-高”层位结构,揭示了大同矿区特厚煤层厚硬顶板综放开采下采场大小周期来压及强矿压作用机理。靳钟铭等<sup>[11-12]</sup>在已有矿压观测成果基础上提出了坚硬顶板弹性悬梁结构模型,根据悬梁结构揭示了来压前岩体下沉加速和反弹现象以及支架-围岩力学体系的内在联系。针对硬厚难垮顶板灾害防治,为降低强动载对工作面的影响,我国逐步形成了深孔爆破<sup>[13-15]</sup>、水力压裂<sup>[16-18]</sup>等一系列坚硬顶板控制方法。

以上研究成果为我国硬厚难垮顶板工作面安全高效开采奠定了坚实的基础。在上述研究基础上,笔者梳理了我国硬厚难垮顶板类型及特点,基于硬厚难垮顶板灾害案例分析,探讨硬厚难垮顶板强动载矿压致灾机理,并提出了针对性的防控手段。

## 1 我国煤矿硬厚难垮顶板类型及特点

硬厚难垮顶板一般是指岩层强度高、厚度大、节理裂隙不发育、整体性好、自稳能力强的岩层,煤层开采后硬厚顶板会大面积暴露而不垮落。从工程实际情况和垮落特点来看,工作面基本顶硬厚难垮顶板可分为抗压强度高的厚顶板、整体性好的厚顶板和基本顶直覆顶板。



### 1.1 抗压强度高的厚顶板

硬厚顶板多为砂岩、砂页岩和石灰岩，少数为砾岩及辉绿岩，一般为钙质或硅质胶结。一般而言，坚硬难垮落顶板岩石的单轴抗压强度大于 60 MPa，有的高达 100 MPa 以上，例如，平庄矿区古山三井 6-1 号煤层开采，煤层厚度平均 12 m，煤层上方基本顶岩层为辉绿岩侵入体，单轴抗压强度变化范围为 135 ~ 161 MPa，总体强度高，开采期间发生冲击地压及矿震。钻孔柱状图如图 1 所示。

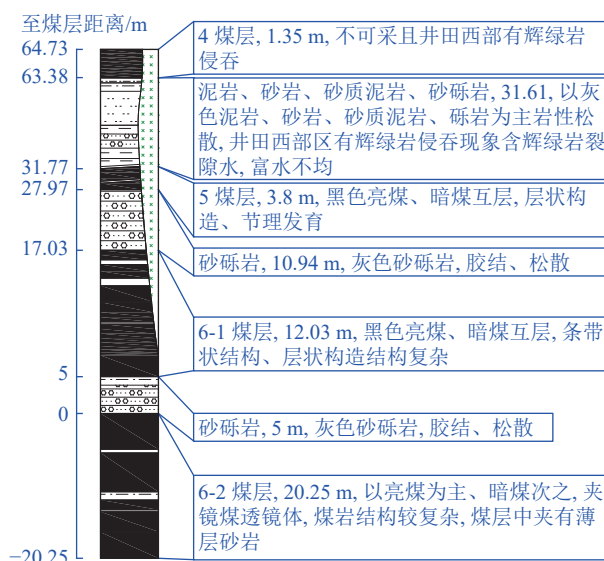


图 1 古山三井上覆岩层赋存情况

Fig.1 Occurrence of overlying strata in Gushan No.3 Mine

### 1.2 整体性好的厚顶板

煤层地质赋存中，有的煤层顶板岩层单轴抗压强度低于 60 MPa，但由于其厚度大，节理裂隙不发育，分层性差，整体性强，工作面回采后亦难以垮落。例如，鄂尔多斯呼吉特尔矿区、新街台格庙矿区 3-1 煤层部分顶板厚度达到 60 m，其抗压强度 30 ~ 60 MPa，但由于其整体性较强，开采过程中难以垮落，造成工作面强矿压显现、冲击地压及矿震的发生。钻孔柱状图如图 2 所示。

### 1.3 基本顶直覆顶板

基本顶直覆顶板是指煤层上方无直接顶或直接顶厚度较薄，煤层上方为基本顶直覆，且基本顶为抗压强度高的厚硬顶板或整体性较强。由于煤层开采后采空区无垮落的直接顶及时充填，基本顶大面积悬顶到一定范围后突然垮落，形成飓风，对支架形成冲击，导致工作面顶板灾害的发生。例如，榆神矿区曹家滩煤矿 2-2 煤层 122106 大采高工作面部分地段顶板为基本顶直覆顶板，直接顶仅有 2.6 m，其上为

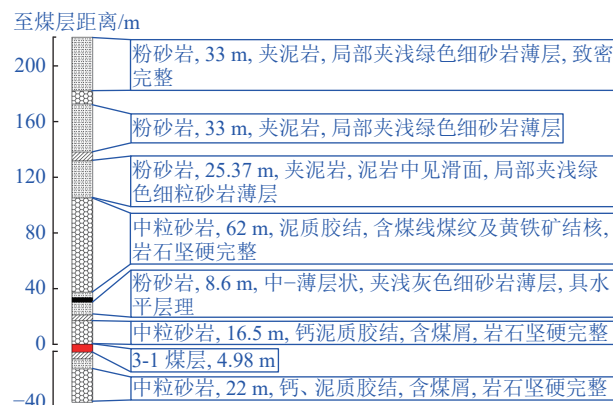


图 2 呼吉特尔矿区门克煤矿上覆岩层赋存情况

Fig.2 Occurrence of overlying strata in Menke Coal Mine of Hujitel Mining Area

24 m 的中砂岩，单轴抗压强度达到 50 MPa 以上，且整体性较好，钻孔柱状图如图 3 所示。工作面开采期间周期性强来压显著，造成支架立柱开裂、平衡千斤顶折断等，如图 4 所示。

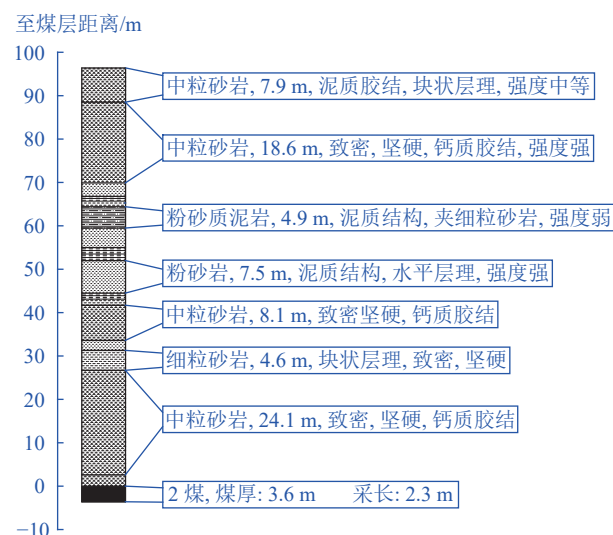
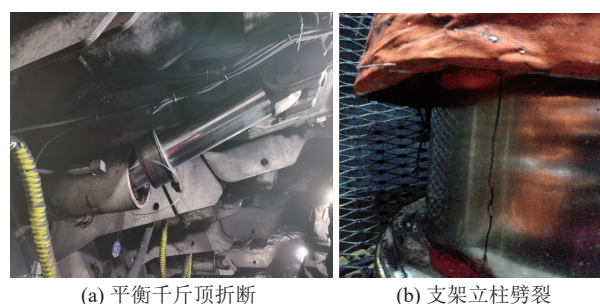


图 3 曹家滩煤矿 No.2-2 煤上覆岩层赋存情况

Fig.3 Occurrence of overlying strata in No.2-2 coal seam of Caojiatan Coal Mine



(a) 平衡千斤顶折断 (b) 支架立柱劈裂

图 4 基本顶直覆顶板强动载来压情况

Fig.4 Strong dynamic pressure on the roof directly overlying the basic roof



2 硬厚难垮工作面顶板灾害案例

2.1 硬厚难垮工作面顶板灾害危害

工作面回采后上覆硬厚难垮顶板不能及时垮落,产生大面积悬顶,当悬顶面积达到一定程度后,顶板发生瞬时垮落。顶板破断时工作面强来压,并伴有飓风现象,造成工作面设备损坏、瓦斯超限或爆炸,危及人身安全。硬厚难垮工作面顶板灾害危害如图 5 所示。

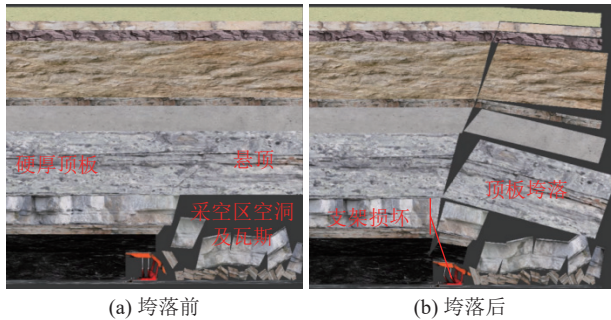


图 5 硬厚工作面顶板垮落及危害示意

Fig.5 Schematic diagram of roof collapse and hazards in hard and thick working face

2.1.1 工作面矿压显现强烈

硬厚顶板工作面悬顶范围大,工作面初次和周期来压步距大,来压强烈,安全阀大面积开启,来压时顶板下沉速度快,下沉量大,可能存在较为明显的动压冲击载荷现象,剧烈的矿压显现常造成支护设备损坏,人身伤亡等事故。

2.1.2 产生“飓风”

硬厚难垮顶板破断垮落具有瞬时性,其破断急促、时间短,垮落过程长约几秒,短则几十毫秒。由于大面积岩体整体瞬时落下,采空区空洞及工作面周围气体被瞬时压缩,形成破坏力极强的“飓风”冲击波,飓风强度可达 10 级以上风速,冲击工作面人员和生产支护设备,导致人员伤亡和设备损坏。如大同马脊梁矿曾经发生过一次大面积垮落,垮落时排风量约 59.4 万 m<sup>3</sup>,约 20 s 暴风即喷出井口,暴风气浪摧毁工作面及巷道的支架、风门、密闭墙,设备被掀起破坏。

2.1.3 工作面设备损坏

硬厚难垮顶板工作面断裂垮落线在 2 个位置,一是在支架后方采空区内,二是在支架上方。当在支架上方突然断裂垮落时,由于垮落范围较大且瞬时发生,对支架有较大的冲击,可能会造成支架结构损坏、立柱爆缸、顶梁穿透等,图 6 为顶板在煤壁处突然断裂垮落时造成的支架损坏现象。



图 6 支架损坏示意

Fig.6 Support damage diagram

2.1.4 工作面瓦斯超限或爆炸

采空区大面积硬厚难垮顶板悬顶情况下,采空区内存在大量的空洞,风速极小或无风,无法有效稀释瓦斯,在瓦斯矿井采空区空洞内存在大量的瓦斯,如图 5a 所示。当顶板大面积突然断裂垮落时,在“挤出效应”下,大量的瓦斯瞬时涌入至工作面和上、下隅角,造成瓦斯超限,若“飓风”冲击电器设备或电缆发生火花,易引发瓦斯爆炸事故。

2.2 硬厚难垮顶板灾害案例分析

2.2.1 酸刺沟煤矿综放工作面

1)工作面及顶板条件。酸刺沟煤矿位于鄂尔多斯地区准旗,其 6<sup>上</sup>105-2 工作面开采 6<sup>上</sup>煤层,平均厚度 10 m,煤层倾角 0°~5°,工作面埋深 204~380 m,倾斜长度 245 m。工作面内钻孔柱状如图 7 所示。Y11 钻孔显示煤层上方为 27.89 m 的含砾粗砂岩,无直接顶,Y09 钻孔表明煤层上方存在 2 m 的中粒砂岩和砾岩互层,之上为 41.16 m 的粗粒砂岩,致密。地质赋存条件表明,工作面顶板为基本顶直覆或直接顶较薄的直覆岩层,且基本顶厚度大、整体性较好。

柱状图	岩性	累深/m	层厚/m	柱状图	岩性	累深/m	层厚/m
					砂质泥岩	131.75	2.90
					细粒砂岩	134.17	2.42
					含砾粗砂岩	141.33	7.16
					粗粒砂岩	146.11	4.78
	粗粒砂岩	167.80	41.16				
					含砾粗砂岩	174.00	27.89
	中粒砂岩	168.91	1.11				
	砾岩	169.81	0.90				
	粗粒砂岩	170.95	1.14				
	煤	185.53	14.58		煤	189.15	15.15

(a) Y11 钻孔

(b) Y09 钻孔

图 7 6<sup>上</sup>105-2 工作面上覆岩层赋存情况

Fig.7 Occurrence of overlying strata on 6<sup>up</sup> 105-2 working face

2)工作面来压及支架损坏情况。开采期间,6<sup>上</sup>105-2 工作面来压及支架损坏情况见表 1。由于顶板为直接顶较薄的直覆岩层,岩层整体性较好,工作面推进 60 m 开始发生局部断裂垮落,推进至 78 m 顶板大范围垮落,推进至 81 m 时工作面大范围来压形成飓风,部分支架顶梁被穿透,如图 7 所示。在推进至 155 m 和 182 m 时,多个支架持续损坏,至 200 m 左右时,工作面已有 60% 的支架发生损坏。

表 1 6<sup>上</sup>105-2 工作面来压及支架损坏情况  
Table 1 Pressure and support damage of 6<sup>上</sup>105-2 working face

推进距离/m	来压及支架损坏情况
60.9	机头顶板100架处垮落
78.5	10—50支架处顶板垮落
81.0	80—120支架来压, 支架损坏且有飓风
155.0	工作面来压, 支架损坏
182.0	工作面来压, 支架损坏

2.2.2 千树塔煤矿综放工作面

1)工作面及顶板条件。千树塔煤矿 11302 工作面开采 3 号煤层,煤层厚度为 9.75 ~ 11.21 m,平均 10.61 m,采用一次采全厚综采放顶煤开采,割煤高度 4.3 m,放煤高度 6.3 m,工作面倾向长度 150 m,埋深约 150 m。直接顶以泥岩为主,粉砂质泥岩、粉砂岩次之;基本顶为长石砂岩,平均厚度达 16 m,单轴抗压强度 24.9 ~ 108.1 MPa,强度较高。工作面钻孔柱状图如图 8 所示。

2)工作面来压及支架损坏情况。11302 工作面顶板属于硬厚顶板,在 2020 年 3 月 1 日至 4 月 1 日期间,工作面共出现 8 次动载冲击影响,具体情况见表 2。该工作面每推进约 20.9 m 发生一次冲击,冲击持续时长 11 ~ 72 s,平均 34.1 s,每次冲击后支架安全阀开启,工作面大范围来压,来压强度和范围较大。

支架动载冲击现象如图 9 所示,个别支架冲击载荷瞬时达到了 60 MPa,远超支架安全阀开启压力 45.8 MPa,从现场所观测的 10 台支架来看,均存在冲击载荷现象,且具有明显的周期性,动载冲击前后支架工作阻力降低 30% ~ 50%,冲击持续时间短。

2.2.3 曹家滩煤矿大采高工作面

1)工作面及顶板条件。122106 工作面为曹家滩煤矿首采工作面,开采 2-2 煤层,煤层埋深 255 ~ 338 m,厚度 9.93 ~ 12.09 m,平均 11.01 m,采用一次采全高大采高综采,设计割煤高度 7.0 m,工作面倾向长度 350 m,采用型号为 ZY20000/34/70D 液压支

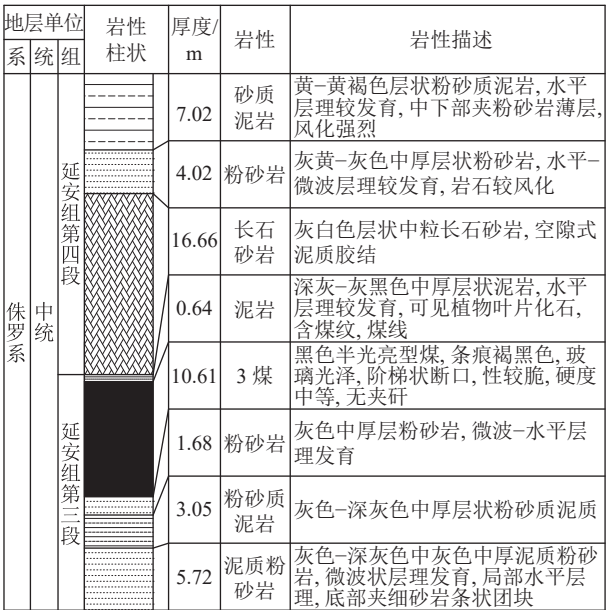


图 8 千树塔煤矿 3 号煤层上覆岩层赋存情况

Fig.8 Occurrence of overlying strata in No.3 coal seam of Qianshuta Coal Mine

表 2 11302 工作面动载冲击情况

Table 2 Dynamic load impact of the 11302 working face

序号	发生时间	间隔距离/m	冲击持续时间/s	冲击影响范围
1	03-04 18:55:35	—	14	整个工作面
2	03-09 19:57:06	20.0	16	整个工作面
3	03-13 6:26:34	29.1	26	1—90号支架
4	03-15 7:23:14	16.3	12	40号支架 ~ 机尾
5	03-20 5:45:48	27.1	72	1—80号支架
6	03-22 6:37:22	13.3	56	1—100号支架
7	03-25 4:33:49	18.6	46	整个工作面
8	03-29 3:12:35	22.2	11	整个工作面

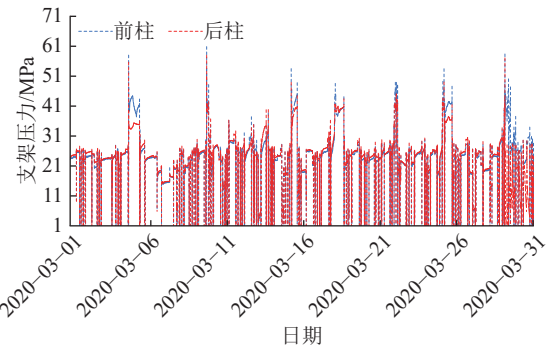


图 9 110 号支架受动载冲击现象

Fig.9 Dynamic load impact phenomenon of No.110 support

架,支护强度 1.63 ~ 1.70 MPa。顶板多为砂岩,存在多层硬厚层顶板,工作面内补 59 钻孔柱状如图 10 所示,煤层上方分别为 2.2 m 细粒砂岩、4.2 m 粉砂岩和 21.3 m 中粒砂岩,其单轴抗压强度在

50 ~ 60 MPa。

柱状	岩层	底板标高/m	层厚/m	垂高/m	岩性描述
	粉砂岩	203.50	3.40	120.62	波状层理, 夹泥岩薄层
	细粒砂岩	238.10	34.60	86.02	灰白色、白色, 成分以石英为主, 长石次之, 分选中等, 次圆状, 局部钙质胶结, 块状层理, 夹细粒砂岩薄层
	中粒砂岩	264.20	26.10	59.92	浅灰色、灰白色, 成分以石英为主, 长石次之, 分选较好, 圆状、次圆状, 局部钙质胶结, 块状层理, 夹中粒砂岩薄层
	粉砂岩	274.60	10.40	49.52	兰灰色, 波状层理, 夹细粒砂岩薄层
	粗粒砂岩	285.20	10.60	38.92	块状层理, 见碳屑、白云母碎片, J2z 底界
	粉砂岩	291.12	5.92	33.00	夹砂质泥岩薄层
	煤	292.34	1.22	31.75	—
	细粒砂岩	295.95	3.61	28.17	见煤线、炭屑, 夹薄煤层
	煤	296.50	0.55	27.62	—
	中粒砂岩	317.70	21.20	6.42	灰白色, 成分以石英为主, 长石次之, 分选中等, 次圆状, 局部钙质胶结, 块状层理, 见炭屑、镜煤条带
	粉砂岩	321.90	4.20	2.22	夹细粒砂岩薄层
	细粒砂岩	324.12	2.22	0	见煤线、炭屑, 夹薄煤层
	2-2 煤	334.72	10.60	—	厚度: 10.60 m, 采长: 9.50 m

图 10 曹家滩煤矿 122106 工作面上覆岩层赋存情况  
Fig.10 Occurrence of overlying strata in 122106 working face of Caojiatan Coal Mine

2)工作面来压情况。曹家滩煤矿 2-2 煤层上覆多层硬厚顶板, 且 122106 工作面为首采工作面, 工作面初次来压步距为 157 m, 来压过程中多次出现小型“飓风”现象, 周期来压步距超过 20 m 的占比 26.19%, 来压时支架立柱下缩量, 最大可达 1.2 m, 有时存在动载现象。初次来压支架工作阻力曲线及周期来压步距分布如图 11、12 所示。

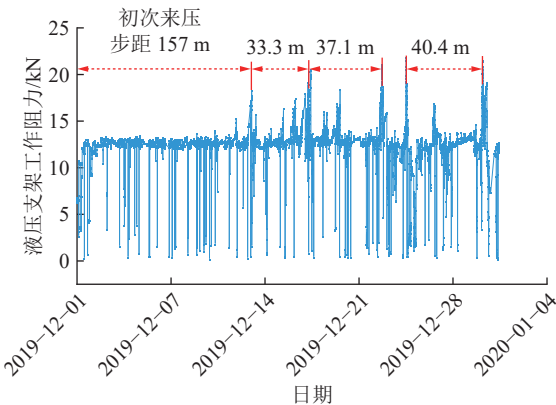


图 11 122106 工作面支架工作阻力曲线  
Fig.11 Support working resistance curve of 122106 working face

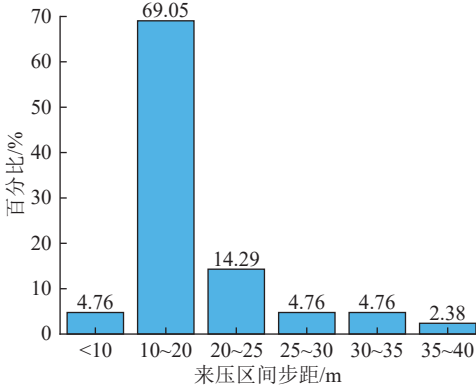


图 12 122106 工作面来压步距分布  
Fig.12 Pressure step distribution diagram of 122106 working face

3 硬厚难垮顶板工作面强矿压发生机理

3.1 强矿压发生类型及原因

工作面矿压显现是由于煤层采出后上覆岩层发生变形、断裂和失稳所致, 变形、断裂、失稳位置和程度均影响矿压显现强度。根据工作面矿压显现和顶板垮落实测情况, 认为硬厚难垮顶板条件下产生强矿压显现的原因大致可分为 2 类: 一是顶板悬顶长度较大, 发生架后断裂; 二是顶板在工作面前方发生断裂。

3.1.1 顶板悬顶长且架后断裂

目前支架工作阻力增阻速度、循环末阻力大小以及支架下缩量是评价工作面矿压显现强度的最重要指标, 支架工作阻力增阻和支架下缩量与顶板下沉量成正比关系, 具体关系如下:

$$\Delta F = K S_z \tag{1}$$

$$S_z = \delta S_d \tag{2}$$

式中:  $\Delta F$  为支架工作阻力增阻量, kN;  $K$  为支架刚度系数, kN/mm;  $S_z$  为支架高度下缩量, mm;  $S_d$  为工作面控顶区顶底板收敛量, mm;  $\delta$  为系数, 根据顶板性质系数为 0.5 ~ 0.9, 顶板硬度越大系数越大。

可知, 工作面控顶区顶底板收敛量越大, 支架高度下缩量越大, 支架工作阻力增阻量越大。对硬厚难垮顶板而言, 工作面回采后顶板不能及时断裂垮落, 在采空区内悬顶较长, 顶板在采空区和控顶区持续弯曲下沉, 控顶区顶底板收敛量随推进持续增大, 尤其是采空区顶板矸石支撑不充分的情况下。

某硬厚顶板工作面在 2024 年 3 月 11 日出现较为强烈的强矿压显现, 如图 13 所示, 来压步距为 24 m, 其中 2 次周期来压间隔为 16.8 m, 持续距离 7.2 m。工作面在位置①处时, 前次周期来压结束; 随



工作面推进至区域②范围,采空区后方硬厚顶板为短距离悬顶状态,由于工作面悬顶长度有限及采空区矸石对顶板的支撑作用,顶板下沉量有限,支架工作阻力增阻较为缓慢,此时工作面处于非来压状态;当悬顶达到一定程度,在自重及外部压力作用下,顶板发生下沉,尤其悬顶长度过长时,顶板加速下沉,支架工作阻力增阻加快,工作面发生周期来压,如图 13 位置③区域;工作面继续向前推进,顶板在采空区(支架后方)断裂,此时来压结束,如图 13 位置

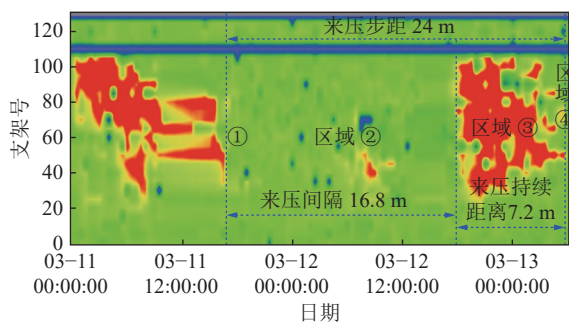


图 13 悬顶长导致的周期来压云图

Fig.13 Periodic pressure cloud map caused by long hanging roof

④区域,具体来压过程如图 14 所示。

### 3.1.2 顶板超前断裂

某硬厚顶板工作面在 2021 年 11 月 20 日出现较为强烈的强矿压显现,支架压力与覆岩运移监测结果如图 15 所示。工作面上方 21.3 m 附近硬厚顶板,在采空区后方 0 ~ -13.6 m 内始终处于稳定悬顶

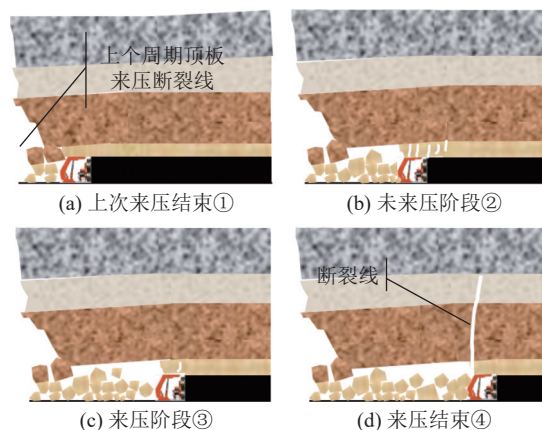
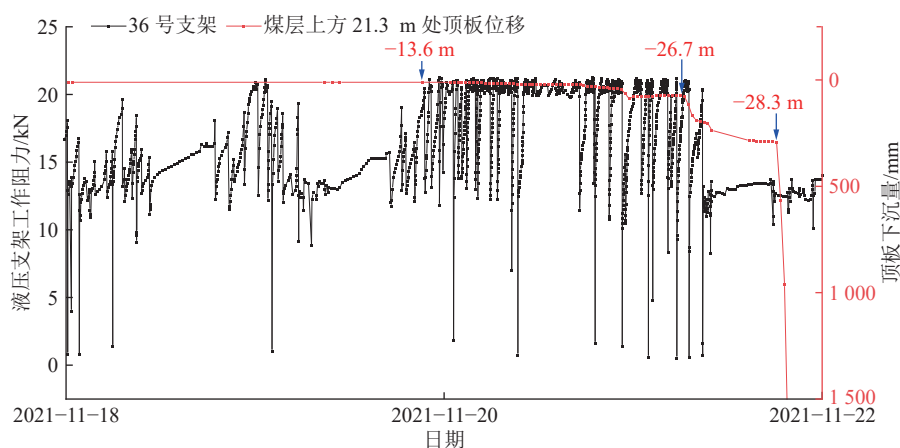
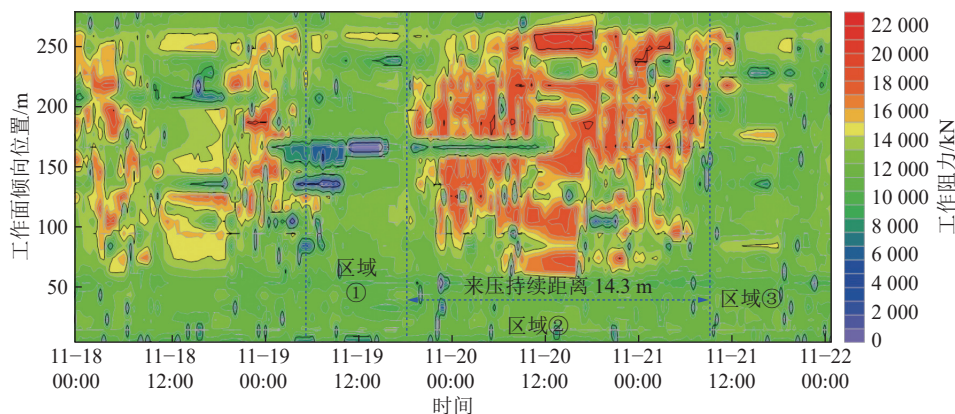


图 14 悬顶长导致的强周期来压过程分解

Fig.14 Decomposition of strong periodic pressure process caused by hanging roof length



(a) 液压支架工作阻力与顶板下沉量关系



(b) 工作面压力云图

图 15 顶板超前断裂强来压顶板运移及压力演化

Fig.15 Roof migration and pressure evolution with strong pressure from advanced roof faults

状态,悬顶期间,其下方覆岩破断造成工作面局部小周期来压,此时上覆硬厚顶板处于悬顶状态,顶板下沉量较小,支架工作阻力增阻缓慢,为非来压状态,如图 15b 中①区域;进入采空区后方-13.6 m 范围,顶板发生架前破断回转,断裂后的顶板由于后方悬顶较长,旋转下沉加速,支架工作阻力急速增加,如图 15a,工作面开始发生强矿压显现,如图 15b 中②区域,支架安全阀频繁开启,工作面强矿压显现来压持续距离 14.3 m,支架下缩量 400~850 mm。随着工作面的推进,煤壁距顶板断裂线位置逐渐逼近,顶板持续旋转下沉,工作面持续来压。至采空区后方-26.7 m,工作面推过顶板断裂线位置,周期来压结束,如图 15b 中③区域。具体来压分解过程如图 16 所示。

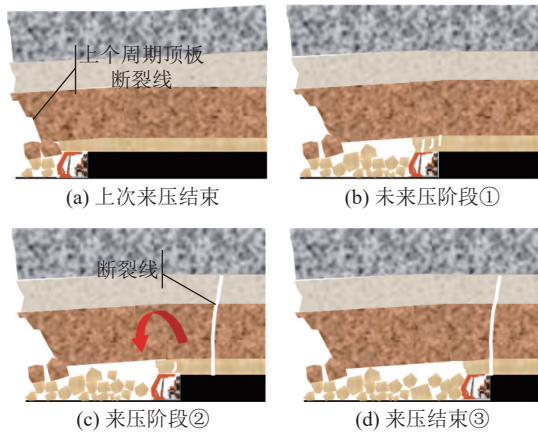


图 16 顶板超前断裂导致的周期来压过程分解

Fig.16 Decomposition of periodic weighting process caused by advanced roof rupture

### 3.2 强矿压影响因素及发生机理

#### 3.2.1 硬厚顶板工作面分区支承模型

根据工作面支承基本顶性质和位置的不同,可把工作面分为不同的支承区。当基本顶为硬厚顶板,直接顶厚度相对采厚较薄时,基本顶可分为 4 个支承区,工作面前方煤壁支承为 I 区,支架支承为 II 区,靠近工作面附近的直接顶垮落矸石量有限,基本顶旋转下沉量较小无法触矸,形成采空区无支承的 III 区,远离工作面的基本顶回转下沉量增大,下位基本顶发生垮落,形成采空区支承的 IV 区,这 4 个区共同形成 I-II-III-IV 四区支承的工作面顶板结构,如图 17 所示。

以煤壁处基本顶中心  $o$  为原点,建立  $xoy$  坐标系,如图 18 所示。根据 Winkler 弹性地基梁理论,取单位宽度基本顶进行研究,建立弹性基础梁板力学模型,则有

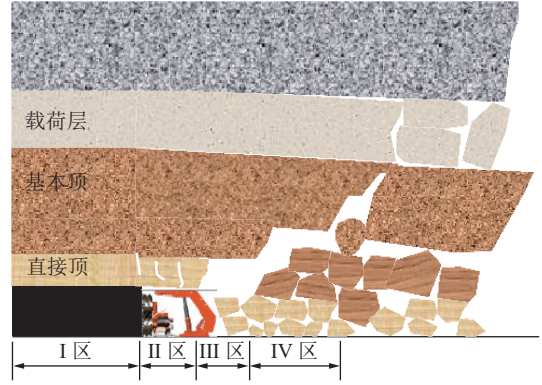


图 17 硬厚顶板分区支承示意

Fig.17 Schematic diagram of zoning support for hard and thick roof

$$EI \frac{d^4 y'}{dx^4} = q_y - K_I y' \quad (3)$$

式中: $x$  为沿采空区水平方向; $y$  为垂直于  $x$  沿地表方向; $E$  为基本顶单元体弹性模量; $I$  为基本顶单元体惯性矩; $q_y$  为上覆岩层分布荷载; $K_I$  为不同支承区域法向综合支承刚度系数,在 I 区、II 区、III 区和 IV 区分别为  $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$  和  $K_{IV}$ 。

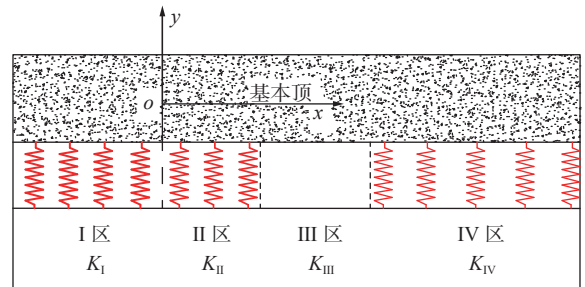


图 18 基本顶 4 区支承模型

Fig.18 Support model drawing of basic roof area 4

对于如图 18 所示的基本顶 4 区支承承载结构,将基本顶视作无限长梁,煤壁处为坐标原点,煤壁前方为  $x$  负方向( $x < 0$ ),为原岩支承,煤壁后方为  $x$  正方向( $x > 0$ ),分别为液压支架控顶区、采空区及垮落矸石支承区,可以求得基本顶在覆岩荷载作用下的内力和变形。

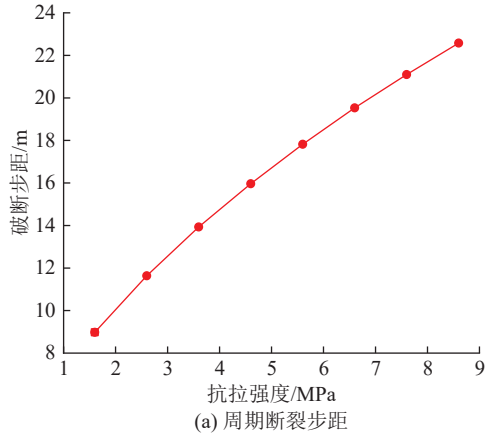
支架控顶 II 区工作面煤壁前方( $x < 0$ )处,基本顶挠曲及弯矩表达式为

$$y = \frac{q_y}{K_I} + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{q_y}{K_{II}} e^{\alpha x} \left( \cos \alpha x - \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \sin \alpha x \right)$$

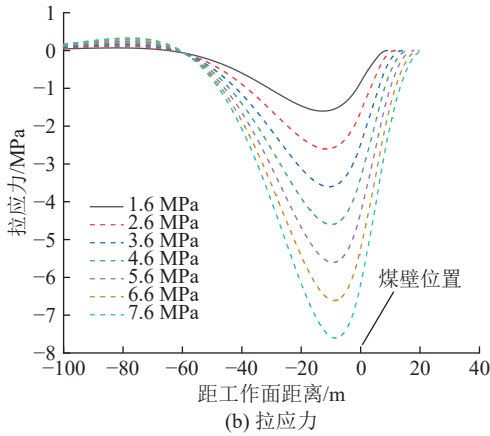
$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = 2EI\beta^2 \frac{q_y}{K_{II}} e^{\alpha x} \left( \sin \alpha x + \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \cos \alpha x \right)$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{K_I}{4EI}}$$

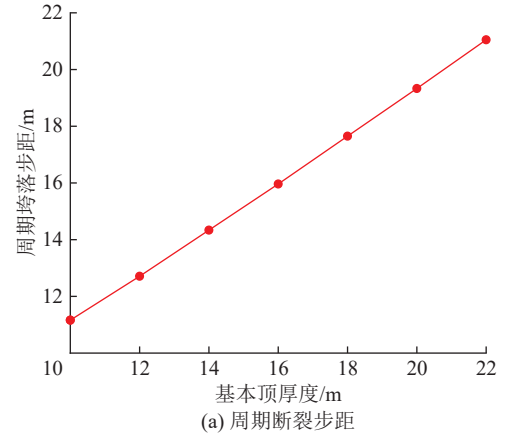
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_{II}}{4EI}}$$



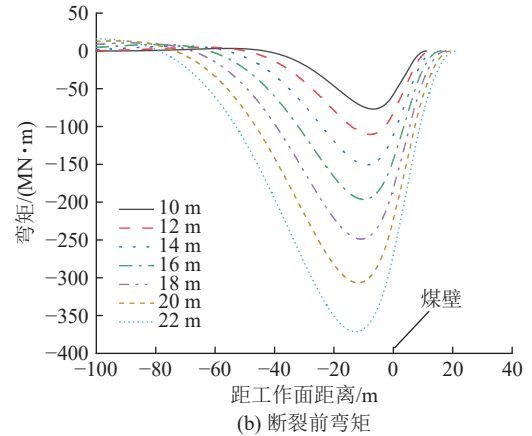
(a) 周期断裂步距



(b) 拉应力



(a) 周期断裂步距



(b) 断裂前弯矩

图 19 基本顶不同抗拉强度与断裂步距及拉应力关系

Fig.19 Relationship between different tensile strength of basic roof and breaking step and tensile stress

支架控顶 II 区工作面煤壁后方(支架控顶区  $x>0$ )处,工作面基本顶挠曲及弯矩表达式为

$$y = \frac{q_y}{K_I} + \frac{q_y}{K_{II}} \left[ 1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} - e^{-\beta x} \left( \cos \beta x - \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \sin \beta x \right) \right]$$

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = 2EI \beta^2 \frac{q_y}{K_{II}} e^{-\beta x} \left( \sin \beta x + \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \cos \beta x \right)$$

垮落矸石填充 IV 区工作面基本顶挠曲及弯矩表达式为

$$y = y_{so} + e^{-\beta_s x} (B_3 \sin \beta_s x + B_4 \cos \beta_s x)$$

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -2EI \beta_s^2 e^{-\beta_s x} (B_4 \sin \beta_s x - B_3 \cos \beta_s x)$$

$$\beta_s = \sqrt[4]{\frac{K_{III}}{4EI}}$$

式中:  $y_{so}$  为支架控顶区与垮落矸石充填区交界处的顶板下沉量;  $B_3$ 、 $B_4$  为待确定常数。

### 3.2.2 强矿压影响因素

结合初始边界值条件,可求解工作面基本顶在覆岩荷载作用下的内力和变形,笔者编制和开发了上述工作面顶板分区支承力学模型的求解程

图 20 基本顶不同厚度与断裂前弯矩关系

Fig.20 Relationship between different thickness of basic roof and bending moment before fracture

序<sup>[19-20]</sup>。

以酸刺沟煤矿为例,直接顶支承刚度系数为 800 MPa/m,底板支承刚度系数为 800 MPa/m,煤层支承刚度系数为 120 MPa/m,支架刚度为 50 MPa/m。于是,  $K_I=92.3$  MPa/m,  $K_{II}=44.4$  MPa/m,  $K_{III}=0$ , 其煤壁处和采空区强度降低系数取为 0.2 和 0.5, 对应煤壁处强度和支架后方顶板抗拉强度分别为 3.68 MPa 和 2.3 MPa。

图 19a 为基本顶不同抗拉强度下的周期断裂步距,随着基本顶抗拉强度增加,基本顶抵抗弯拉破坏能力增强,相应周期断裂步距近似线性增大。图 19b 为不同抗拉强度基本顶断裂前的拉应力分布,随着基本顶抗拉强度增加,顶板内的拉应力增大,最大拉应力发生位置向煤壁处缓慢移动。

图 20a 为基本顶厚度与周期断裂步距的关系,随着基本顶厚度增加,基本顶抵抗弯能力增大,相应周期垮落步距增大。图 20b 为不同厚度基本顶破断前的弯矩分布,随着基本顶厚度增加,基本顶抵抗抗弯能力增大,且最大弯矩出现位置逐渐远离煤壁。



不同支架刚度的基本顶弯矩和顶板下沉量如图 21 所示,随着支架刚度增加,基本顶弯矩减小,但煤壁前方减小程度远大于煤壁处,煤壁处减小程度又远大于支架处,因此增加支架刚度能降低煤壁前方和煤壁处的弯矩,使得基本顶更容易发生采空区断裂。另外,增加支架刚度也能降低基本顶的下沉量,有利于顶板灾害控制,如图 21b 所示。

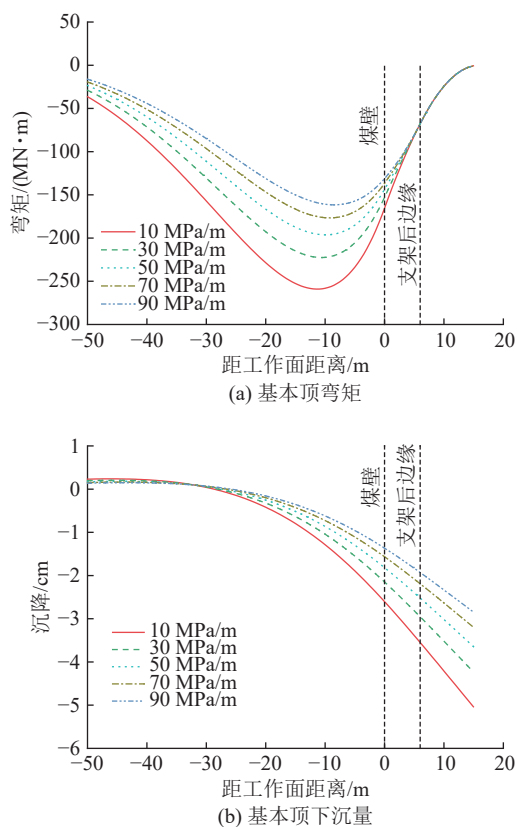


图 21 不同支架刚度下基本顶弯矩及下沉量关系

Fig.21 Relationship between basic top bending moment and subsidence under different support stiffness

分析可知,厚硬顶板破断造成强矿压主要影响因素包括:基本顶厚度、基本顶抗拉强度、支架刚度等。随基本顶厚度、支架刚度的增大,厚硬顶板更易发生架后断裂;随基本顶抗拉强度的增大,厚硬顶板更易发生架前断裂。

### 3.2.3 强矿压发生机理

工作面强矿压显现表现为:顶板下沉速度快、下沉量大,液压支架工作阻力快速增阻或有动载,安全阀大范围长时间开启。当工作面厚硬基本顶在煤壁前方发生断裂后,基本顶断裂为 2 段。断裂线处两侧基本顶由于彼此的咬合,仍能够抵抗水平方向力。断裂后基本顶绕断裂位置发生回转和下沉。断裂位置简化后的顶板边界条件如图 22 所示。基本顶在煤壁前方断裂后,后方一段基本顶仍为煤壁、支架和

采空区矸石支承,煤壁前方为原岩支承,在控顶区为液压支架支撑,在采空区则为悬臂状态(或部分矸石支撑)<sup>[21-22]</sup>。

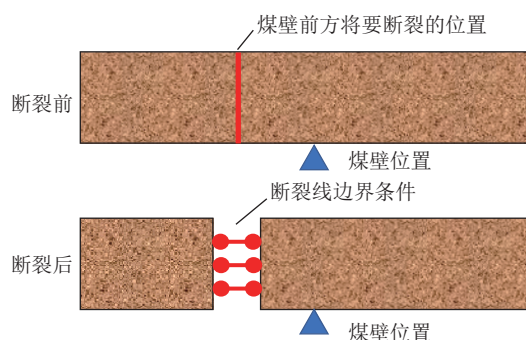


图 22 基本顶在煤壁前方断裂前后示意

Fig.22 Schematic diagram before and after the basic roof is fractured in front of the coal wall

根据分区支承模型计算,图 23 为煤壁前方断裂前、后不同抗拉强度基本顶的弯矩和下沉量。由图 23a 可知,煤壁前方断裂后,基本顶弯矩重新分布,重新分布弯矩近似在煤壁处最大,但基本顶断裂前在煤壁处的弯矩仍然大于基本顶断裂后在煤壁处的

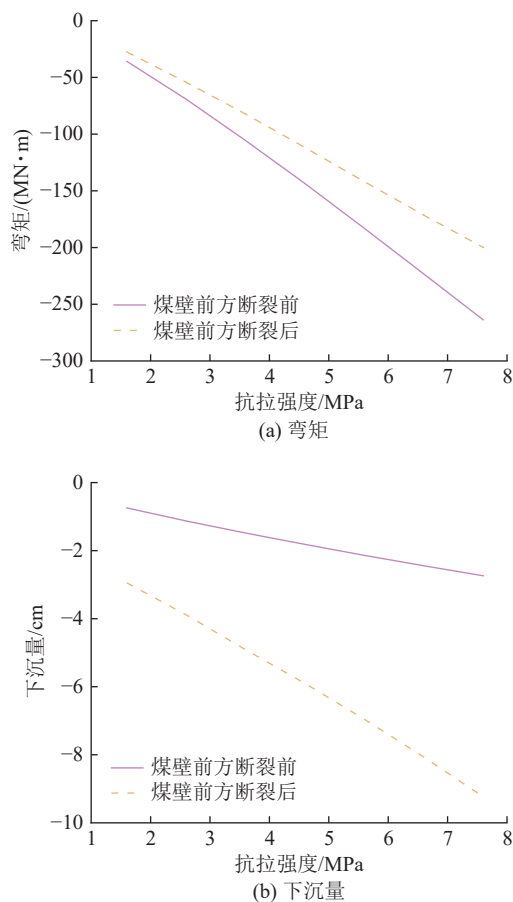


图 23 煤壁处顶板弯矩和下沉量对比

Fig.23 Comparison of roof bending moment and subsidence at coal wall

弯矩,意味着顶板煤壁前方断裂后煤壁及煤壁后方弯矩也显著降低,顶板再次断裂的风险不大。由图 23b 可知,基本顶煤壁前方断裂后,顶板绕断裂位置转动,煤壁处下沉量大幅增大,这将引起液压支架大幅增阻。从计算结果来看,基本顶抗拉强度越大,周期跨落步距越大,相应的顶板断裂引起的煤壁处下沉量增量也越大,支架增阻也就越强烈。

图 24 为厚硬顶板架前断裂后随工作面推进时顶板结构失稳。可知,随工作面推进,在上覆岩层载荷和基本顶自重影响下,若支架支撑能力不足,或顶板下沉量较大,A 块和 B 块的铰接面破坏,A 块顺时针大幅度旋转,结构失稳,造成较为明显的动压冲击载荷现象。

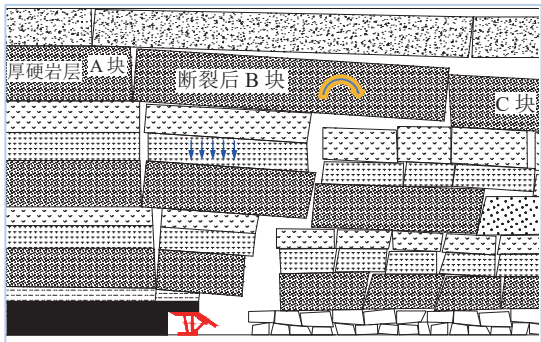


图 24 厚硬顶板架前断裂后随工作面推进时顶板结构失稳示意

Fig.24 Instability diagram of broken overburden structure in front of thick and hard roof frame

架后断裂来压为采空区后方上覆厚硬顶板长距悬顶弯曲下沉造成的支架工作阻力快速增阻强来压,其在支架后方断裂时,若低位垮落顶板充填空间有

限,上覆厚硬顶板大面积架后断裂将会造成小型飓风,如图 14d 所示。

4 硬厚难垮顶板灾害防治技术

硬厚难垮顶板灾害防治可分为预先设计、采前弱化和采中监测预警 3 个阶段。预先设计包括地质条件分析、采煤方法及工艺确定、工作面参数设计和工作面支架选型;采前弱化就是根据工作面条件选择合理的弱化技术和参数,在工作面回采前对坚硬顶板进行预先弱化;采中监测就是在回采过程中采用微震和矿压在线监测系统,实时监测工作面顶板活动、矿压显现和支架工况等情况。

4.1 硬厚难垮顶板弱化技术

根据上述分析,硬厚难垮顶板灾害产生的主要原因是顶板超前断裂或悬顶过长,采空区矸石支撑能力不足或无矸石支撑。基于此,采用顶板弱化技术对厚层顶板进行人工分层,预先形成裂隙,使其在矿山压力作用下及时垮落,避免顶板超前断裂和大范围悬顶造成的强矿压显现。

从距离煤层高度上来看,目前顶板弱化层位一般可分为高位、中位和低位,但并没有严格的数据区分三者界限,一般认为距煤层 100 m 以上的岩层为高位顶板,50 ~ 100 m 范围岩层为中位顶板,50 m 范围内岩层则为低位顶板。

硬厚难垮顶板弱化技术分为深孔爆破和水力压裂。其中:水力压裂技术包括井下短孔压裂、井下定向深孔压裂、地面水平井及垂直井定向压裂,其弱化技术优缺点及效果见表 3。地面压裂排量(10 m<sup>3</sup>/min)

表 3 不同弱化技术参数及优缺点对比

Table 3 Comparison of different weakening technical parameters and advantages and disadvantages

弱化技术	地面水平井压裂	地面垂直井压裂	井下深孔压裂	短孔压裂	深孔爆破
压力/MPa	60 ~ 120	60 ~ 120	45 ~ 70	50 ~ 66	300 ~ 1 000
压裂排量/(m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup> )	10 ~ 15	10 ~ 15	0.6 ~ 1.5	0.1	—
水平裂缝半径/m	100 ~ 150	100 ~ 150	30 ~ 60	15 ~ 20	2 ~ 5
垂直裂缝半径/m	10 ~ 30	10 ~ 30	5 ~ 10	5	2 ~ 5
钻孔长度/m	1 000 ~ 2 000	500 ~ 1 000	500 ~ 700	<100	<100
有效长度/m	800 ~ 1 500	400 ~ 900	400 ~ 600	—	—
分段长度/m	50 ~ 60	50 ~ 60	30	5 ~ 15	—
处理范围	高、中、低位全长工作面顶板	高、中和低位全长工作面顶板	中位和低位全长工作面顶板	中位、低位及两端头顶板	低位及两端头顶板
预先射孔	是	是	是/无	无	无
优点	压裂范围大,效果好,不影响工作面回采	压裂范围大,效果好,不影响工作面回采,可旨化多个层位	压裂范围较大,多个孔可实现区域压裂	操作方便,安全,成本较低	成本低
缺点	需要征地,成本高	需要征地,成本高	井下需水较多,成本较高	压裂范围较小	弱化范围小,产生有害气体

是短孔压裂(约  $0.1\text{ m}^3/\text{min}$ )的 100 倍左右,是井下深孔压裂( $1\text{ m}^3/\text{min}$ )的 10 倍左右,因此该技术处理范围大,覆盖范围广,可同时弱化高、中和低位顶板。短孔压裂和深孔爆破只能处理低位和中位顶板,无法实现高位顶板及大范围的顶板弱化。各项卸压技术弱化原理如图 25-27 所示。

4.2 顶板活动及矿压显现监测技术

对采场顶板活动和矿压显现实现有效监测预警是预防顶板灾害事故发生的重要手段。通过微震监测技术明确覆岩破断能量和断裂位置,确定主导岩层层位。采用矿压在线监测系统实时观测支架工作阻力和下缩量变化,掌握支架工况和工作面矿压显现情况以反映顶板弱化效果。

4.2.1 基于微震监测技术的主导岩层确定

有时工作面上方存在多层硬厚难垮顶板,其中的一层或多层是强矿压、冲击地压及矿震的主导岩层,通过布置微震传感器对微震事件波形进行实时采集和震源定位,统计微震事件的震源位置、发震时间和能量大小,结合岩层钻孔柱状图,确定硬厚难垮顶板的层位,并对其预先弱化。对于近水平煤层,应采用井上和井下微震联合监测系统提高垂直高度的定位精度,图 28 为采用井上和井下微震系统大能量事件定位结果,结合钻孔柱状图,得出距离煤层

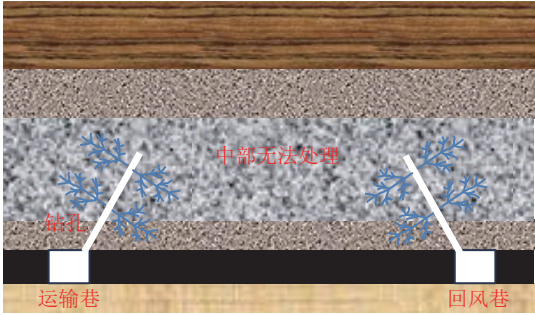


图 25 短孔压裂示意

Fig.25 Schematic diagram of short pore fracturing

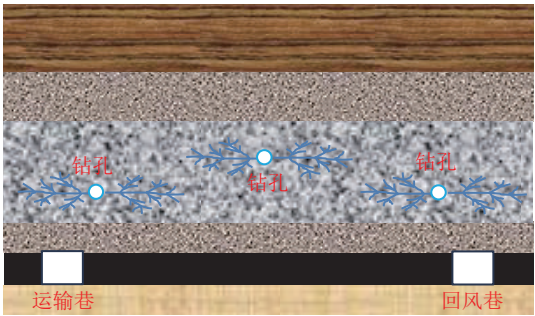


图 26 井下深孔压裂示意

Fig.26 Schematic diagram of downhole deep hole fracturing

23 ~ 84 m 的中粒砂岩为强矿压主导岩层,需要对其进行弱化处理。

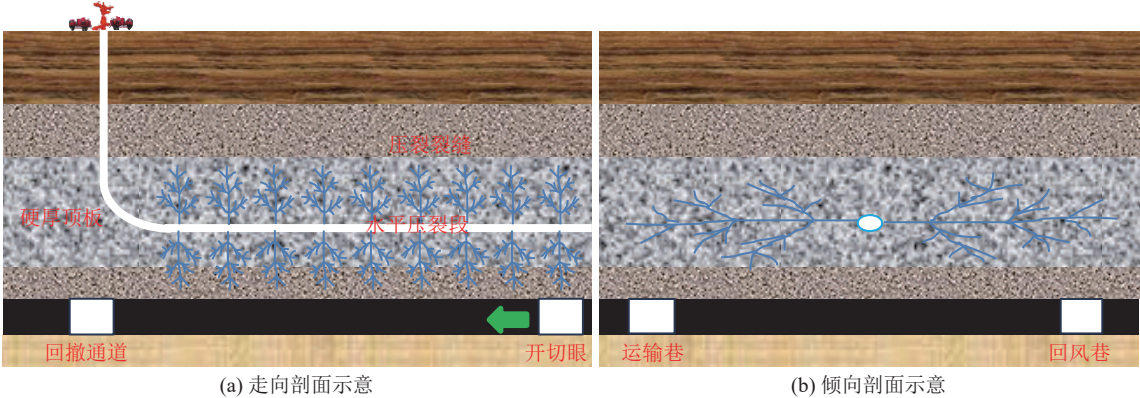
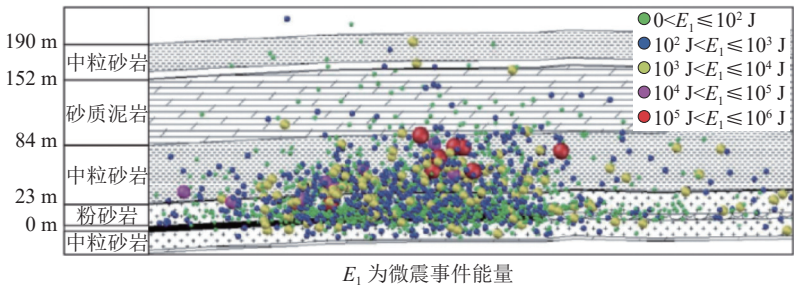


图 27 地面水平井压裂示意

Fig.27 Fracturing schematic diagram of surface horizontal wells



$E_1$  为微震事件能量

图 28 鄂尔多斯新街矿区某矿微震事件定位示意

Fig.28 Location map of microseismic event of a mine in Xinjie mining area, Ordos



#### 4.2.2 基于矿压在线监测系统的支护-卸压效果评价

基于现场安装的矿压监测系统,将支架初撑力不合格比例、工作阻力高报比例、安全阀开启比例、支架不保压比例、不平衡比例 6 个指标作为实时评价支架工况的主要指标,据此判断支架选型或支架工作状态是否合理。图 29 为鄂尔多斯某矿 F6225 综放工作面支架工况雷达图,综合 6 个指标的实时评价结果,该工作面支架工况中等,基本满足工作面控顶要求,现场进一步通过调节放煤方式改善前后立柱受力均衡性、适当提升安全阀开启压力提高支架支护能力,从而优化了支架工作阻力分布不合格比例、不平衡比例,提高了支架的支撑效率,促进了工作面顶板安全管理。

### 5 防治案例

以曹家滩煤矿 122104 的 10 m 超大采高工作面为例,采用井下定向长水平孔区域压裂进行煤层上覆硬厚顶板弱化,以达到降低强动载来压目的。

#### 5.1 地质赋存

122104 工作面煤层埋藏深度 362.2 ~ 365.4 m,平均 363 m,可采厚度 7.2 ~ 12.3 m,平均 10.5 m。煤层倾角 0° ~ 6°,煤层坚固性系数 2 ~ 3。煤层直接顶



图 29 鄂尔多斯某矿支架工况

Fig.29 Working condition diagram of a support in Ordos mine

主要为粉砂岩、中粒砂岩,厚度 11.5 ~ 34.3 m,直接顶上方 100 m 范围内赋存有多层厚度为 10 ~ 20 m 的砂岩顶板,层理不发育,坚固性系数 5.0 以上,底板为粉砂岩,厚度 1.4 ~ 16.6 m。

#### 5.2 顶板灾害防治

##### 5.2.1 预先设计

为全面掌握曹家滩煤矿超大采高工作面顶板岩层赋存状态,采用井下巷道围岩强度触探测定装置及电子钻孔窥视仪,沿工作面走向方向详细探测了煤层上覆岩层赋存情况,如图 30 所示。

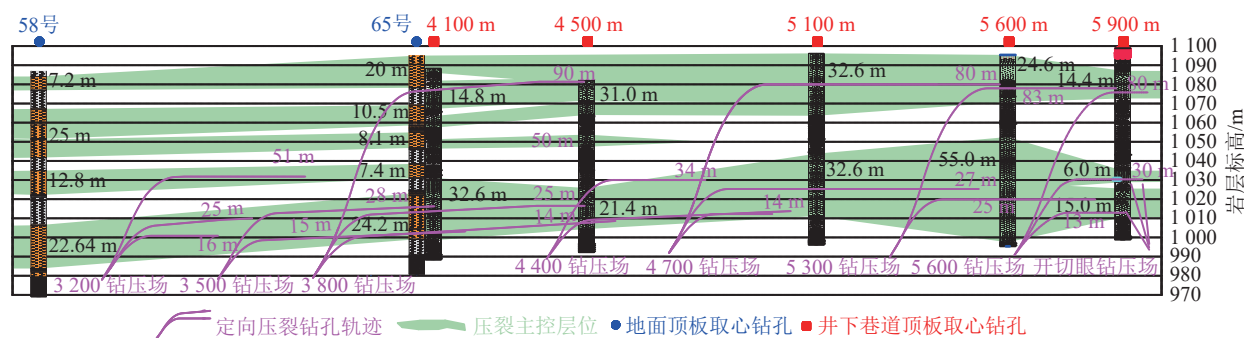


图 30 正常开采期间压裂钻孔布置

Fig.30 Fracturing borehole layout during normal production

在装备设计方面,采用高初撑力和高工作阻力液压支架,提高支架支护能力,降低工作面顶板早期下沉。基于已采工作面矿压显现情况,结合本工作面覆岩赋存,综合考虑支架制造能力、搬运能力、巷道断面大小等,确定了支护强度为 1.8 ~ 1.9 MPa 的 ZY29000/45/100D 型两柱掩护式支架。

##### 5.2.2 采前弱化

工作面硬厚顶板沿工作面走向厚度变化较大,基于钻孔柱状情况,结合已采工作面顶板破断特征,以“一钻场一方案”原则动态调整井下压裂层位和参

数。其中在工作面走向 3 780 ~ 5 600 m 内共布置 5 个压裂钻场,顶板定向钻孔布置如图 30 所示。

1) F2 钻压场(5 300 m 联络巷): 共设置 2 个压裂层位: 25、83 m, 6 个顶板定向长钻孔, 25 m 层位钻孔间距为 99 m, 83 m 层位钻孔间距为 100 m; 单孔压裂间隔为 30 m, 压裂时长 90 min, 瞬时压力平均为 33 MPa, 平均流量为 180 m<sup>3</sup>/h。

2) F3 钻压场(4 700 m 联络巷): 共设置 3 个压裂层位: 14、27、80 m, 15 个顶板定向长钻孔(其中包括一个探顶孔)。单孔压裂间隔为 50 m, 压裂时长

为 120 min, 瞬时压力平均为 30 MPa, 平均流量为 185 m<sup>3</sup>/h。

3) F4 钻压场(4 400 m 联络巷): 共设置 2 个压裂层位: 14、34 m, 10 个顶板定向长钻孔。设置 14 m 层位钻孔间隔为 60~65 m, 34 m 层位钻孔间距为 67 m。钻孔单孔压裂间隔为 15 m, 压裂时长为 40~60 min, 瞬时压力平均为 18 MPa, 平均流量为 160 m<sup>3</sup>/h。

### 5.2.3 采中监测预警

在开采过程中掌控工作面矿压显现情况与液压支架实时工况, 通过对周期性强来压的预测预警, 指导井下及时提高支架初撑力、合理优化推进速度和采高等, 以此大幅降低顶板灾害的发生, 并为水力压裂卸压效果的评价及压裂参数的优化提供可靠依据。采用 KJ21 顶板灾害监测预警平台对 10 m 超大采高工作面矿压进行实时监测预警, 如图 31 所示。预警平台具有液压支架工况多参量综合评价与预警功能, 能够及时发现支架初撑力不足、立柱不保压等不良工况, 为保障超大采高液压支架达到良好的支护性能提供数据支撑。

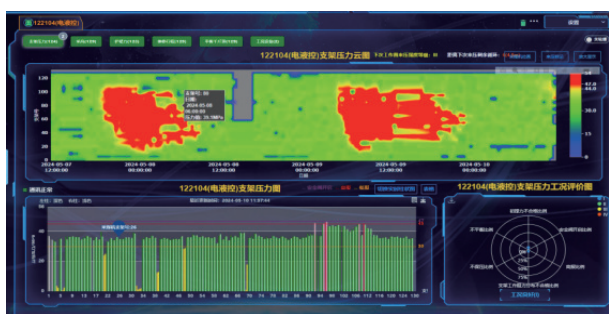


图 31 KJ21 顶板灾害监测预警平台实时监测界面

Fig.31 KJ21 real-time monitoring interface of roof disaster monitoring and early warning platform

## 5.3 防治效果

### 5.3.1 立柱下沉量

图 32 为工作面正常高度开采期间立柱下缩量对比, 可知, 超大采高工作面开采期间厚硬顶板得到了有效弱化, 支架来压期间工作面支架平均下缩量分布在 0.091~0.790 m, 集中于 0.1~0.4 m, 平均 0.32 m, 较 122108 工作面(平均 0.46 m)和 122110 工作面(平均 0.48 m)非压裂区域分别降幅 30.4% 和 33.3%。

来压期间支架最大下缩量分布在 0.16~1.44 m, 聚集于 0.4~1.0 m, 1.0 m 以上范围占比 12.4%, 平均 0.63 m。其中超大采高液压支架最大下缩量较 122108 工作面(最大值 1.88 m)和 122110 工

作面(最大值 1.75 m)非压裂区域分别降幅 23.4% 和 17.7%。

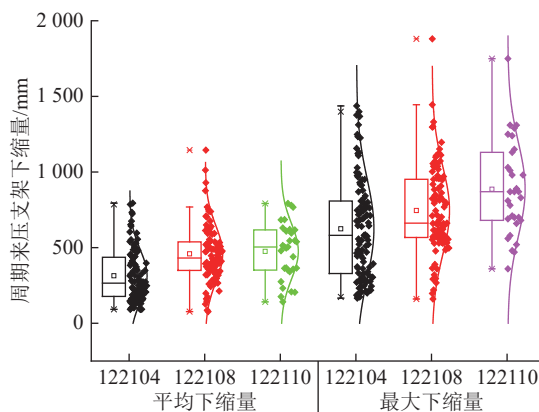


图 32 工作面周期来压期间立柱下缩量对比

Fig.32 Comparison of the shrinkage of the column during the periodic weighting period of the working face

### 5.3.2 工作面动载系数

统计分析工作面周期来压动载系数分布情况, 如图 33 所示。分析数据表明, 工作面周期来压平均动载系数分布范围 1.19~1.56, 平均 1.42, 以 1.4~1.5 为主, 占比 51.8%, 动载系数大于 1.5 的占比 14%, 而 122108 和 122110 工作面非压裂区域周期来压平均动载系数大于 1.5 的占比分别为 37.3%、39.6%, 对比而言, 降幅分别为 23.3%、25.6%。

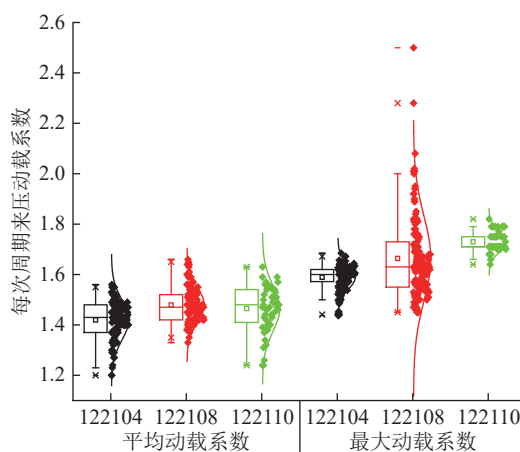


图 33 工作面周期来压期间动载系数对比

Fig.33 Comparison of dynamic load coefficients during periodic weighting of working face

工作面周期来压最大动载系数分布范围 1.44~1.68, 平均 1.60, 以 1.5~1.7 为主, 占比 97.4%, 1.7 以上比例占比为 0, 而 122108 和 122110 工作面非压裂区域周期来压最大动载系数大于 1.7 的占比分别为 28.7%、84.9%。

## 6 结 论

1)硬厚难垮顶板强度高、厚度大、整体性强,基于赋存特征将硬厚难垮顶板分为 3 类:抗压强度高的厚顶板、整体性较好的厚顶板及基本顶直覆顶板。

2)工作面开采后硬厚难垮顶板难以及时垮落,大面积悬顶具有瞬时破断的特征,工作面强来压,并伴有飓风现象,造成工作面设备损坏、瓦斯超限或爆炸,危及人身安全。

3)硬厚难垮顶板断裂存在 2 种类型,一是顶板悬顶长度大,发生架后断裂,二是顶板在工作面前方发生断裂,2 种情况均会产生强矿压现象。

4)硬厚难垮顶板灾害防治分为预先设计、采前弱化和采中监测预警 3 个阶段,其中预先设计是厚硬顶板灾害防治是否成功的前提。曹家滩 10 m 超大采高硬厚难垮顶板灾害防治实践表明,开采全过程的顶板灾害综合防治可有效保障工作面安全高效开采。

### 参考文献(References):

- [1] 康红普,徐刚,王彪谋,等.我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2): 7-39.  
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7-39.
- [2] 徐刚,张震,张春会,等.我国煤矿开采工作面顶板灾害及防治技术研究现状[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(5): 16-41.  
XU Gang, ZHANG Zhen, ZHANG Chunhui, et al. Review on roof disaster and prevention technology for coal mining face in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(5): 16-41.
- [3] 朱德仁,钱鸣高,徐林生.坚硬顶板来压控制的探讨[J].煤炭学报,1991,16(2): 11-20.  
ZHU Deren, QIAN Minggao, XU Linsheng. Discussion on control of hard roof weighting[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(2): 11-20.
- [4] 杨胜利,王家臣,李良晖.基于中厚板理论的关键岩层变形及破断特征研究[J].煤炭学报,2020,45(8): 2718-2727.  
YANG Shengli, WANG Jiachen, LI Lianghui. Deformation and fracture characteristics of key strata based on the medium thick plate theory[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2718-2727.
- [5] 杨胜利.基于中厚板理论的坚硬厚顶板破断致灾机制与控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.  
YANG Shengli. Study on the disaster-causing mechanism and control criteria of the hard and thick roof strata based on medium thick plate theory[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [6] 姜福兴,刘懿,张益超,等.采场覆岩的“载荷三带”结构模型及其在防冲领域的应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(12): 2398-2408.  
JIANG Fuxing, LIU Yi, ZHANG Yichao, et al. A three-zone structure loading model of overlying strata and its application on rock-burst prevention[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2398-2408.
- [7] 姜福兴,刘懿,杨伟利,等.郧城煤矿冲击地压与载荷三带关系研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(3): 405-410.  
JIANG Fuxing, LIU Yi, YANG Weili, et al. Relationship between rock burst and the three zone structure loading model in Yuncheng coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 405-410.
- [8] 于斌,朱卫兵,高瑞,等.特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J].煤炭学报,2016,41(3): 571-580.  
YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Strata structure and its effect mechanism of large space stope for fullymechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 571-580.
- [9] 于斌,高瑞,孟祥斌,等.大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5): 1134-1145.  
YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, et al. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134-1145.
- [10] 于斌,杨敬轩,刘长友,等.大空间采场覆岩结构特征及其矿压作用机理[J].煤炭学报,2019,44(11): 3295-3307.  
YU Bin, YANG Jingxuan, LIU Changyou, et al. Overburden structure and mechanism of rock pressure in large space stope[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3295-3307.
- [11] 靳钟铭.坚硬顶板长壁采场的悬梁结构及其控制[J].煤炭学报,1986,11(2): 71-79.  
JIN Zhongming. The hanging beam structure of hard roof in long-wall workings and its control[J]. Journal of China Coal Society, 1986, 11(2): 71-79.
- [12] 靳钟铭,牛彦华,魏锦平,等.“两硬”条件下综放面支架围岩关系[J].岩石力学与工程学报,1998,17(5): 514-520.  
JIN Zhongming, NIU Yanhua, WEI Jinping, et al. Relation between support and surrounding rocks of fully mechanized sub level caving mining working face under two hard condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 514-520.
- [13] 徐刚,黄志增,范志忠,等.工作面顶板灾害类型、监测与防治技术体系[J].煤炭科学技术,2021,49(2): 1-11.  
XU Gang, HUANG Zhizeng, FAN Zhizhong, et al. Types, monitoring and prevention technology system of roof disasters in mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 1-11.
- [14] 徐刚,刘全明.深孔爆破弱化坚硬顶板不耦合系数研究[J].煤矿开采,2009(1): 20-21, 4.  
XU Gang, LIU Quanming. Research on non-coupling charging coefficient in softening hard roof with deep-hole blasting[J]. Coal Mining Technology, 2009(1): 20-21, 4.



- [15] 高晓进, 张震, 黄志增, 等. 深井直覆硬厚顶板侧向破断模式及采动应力响应特征研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(8): 2450–2461.  
GAO Xiaojin, ZHANG Zhen, HUANG Zhizeng, et al. Lateral fracture mode and mining stress response characteristics of overlying and thick-hard roof in deep mining well[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(8): 2450–2461.
- [16] 康红普, 冯彦军. 煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 1–9.  
KANG Hongpu, FENG Yanjun. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 1–9.
- [17] 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.
- [18] 冯彦军, 康红普. 定向水力压裂控制煤矿坚硬难垮顶板试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1148–1155.  
FENG Yanjun, KANG Hongpu. Test on hard and stable roof control by means of directional hydraulic fracturing in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1148–1155.
- [19] 徐刚, 张春会, 蔺星宇, 等. 基于分区支承力学模型的综放工作面顶板矿压演化与压架预测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3622–3633.  
XU Gang, ZHANG Chunhui, LIN Xingyu, et al. Predicting ground pressure evolution and support crushing of fully mechanized top coal caving face based on zoning support mechanical model[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3622–3633.
- [20] 徐刚, 张春会, 张振金. 综放工作面顶板缓慢活动支架增阻预测模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3678–3687.  
XU Gang, ZHANG Chunhui, ZHANG Zhenjin. Prediction model for increasing resistance of hydraulic support due to slow motion of the roof in mechanized mining working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3678–3687.
- [21] 宁静, 徐刚, 张春会, 等. 综放工作面多区支撑顶板的力学模型及破断特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3418–3426.  
NING Jing, XU Gang, ZHANG Chunhui, et al. Mechanical model and fracturing characteristics of multi-area supporting roof in fully mechanized mining working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3418–3426.
- [22] 徐刚, 范志忠, 张震. 综采工作面顶板灾害防控技术[M]. 科学出版社, 2023.  
XU Gang, FAN Zhizhong, ZHANG Zhen. Roof disaster prevention and control technology of fully mechanized mining face[M]. Science Press, 2023.