

# 采动影响下坚硬岩桥型断层活化与储能演变规律

吕进国<sup>1,2,3,4</sup>, 韩文鹤<sup>1,3</sup>, 张学朋<sup>2</sup>, 彭意胜<sup>1,3</sup>, 潘一山<sup>1,3,5</sup>, 代连朋<sup>5</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 3. 辽宁工程技术大学 矿山安全技术装备研究院, 辽宁 阜新 123000; 4. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 5. 辽宁大学 灾害力学研究所, 辽宁 沈阳 110036)

**摘要:** 断层阻滑结构的存在会改变断层能量积聚与滑移行为规律, 导致断层活化失稳机理与以往存在较大差异。为研究采动影响下坚硬岩桥型断层活化及储能的演化规律, 理论分析了含坚硬岩桥型阻滑结构的断层活化条件; 采用物理模拟试验方法, 研究了开采扰动下含坚硬岩桥型断层的滑移规律, 分析了含坚硬岩桥与无阻滑结构的断层活化差异特征, 研究了工作面回采过程中含坚硬岩桥与无阻滑结构的断层带正、剪应力变化特征; 采用数值模拟方法, 研究了临近断层开采过程中含坚硬岩桥与无阻滑结构的断层带应力分布与能量积聚规律。研究表明: 开采扰动下含坚硬岩桥的断层呈现了更强的非均匀性滑移, 但断层的滑移量明显减小, 活化程度降低, 坚硬岩桥可增加断层的稳定性, 其稳定性的提高主要体现在断层面黏聚力的增加; 靠近工作面的坚硬岩桥应力集中程度最高, 最易发生剪切破坏, 但在一定程度上坚硬岩桥会分散应力集中带; 对于无阻滑的断层带, 其弹性应变能密度随靠近断层开采而逐步增高, 但增加幅度有限, 且弹性应变能密度峰值始终呈现在工作面前方区域; 而坚硬岩桥的存在改变了断层带能量的分布规律, 其应变能密度峰值主要聚集在坚硬岩桥与断层带接触处位置。越靠近岩桥的断层带, 其滑移挤压程度越高, 能量积聚程度也越高; 含坚硬岩桥的断层能量积聚程度远大于无阻滑结构断层, 阻滑结构可大幅度提升断层带储能潜力。

**关键词:** 阻滑结构; 坚硬岩桥; 应变能; 断层活化; 失稳破坏

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)02-0902-15

## Evolution law of the activation and energy storage of fault with hard rock bridge under mining influence

LYU Jinguo<sup>1,2,3,4</sup>, HAN Wenhe<sup>1,3</sup>, ZHANG Xuepeng<sup>2</sup>, PENG Yisheng<sup>1,3</sup>, PAN Yishan<sup>1,3,5</sup>, DAI Lianpeng<sup>5</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Qingdao 266590, China; 3. Research Institute for Technology & Equipment of Coal Mine Safety, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 4. College of Mining and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 5. Institute of Disaster Rock Mechanics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract:** The presence of slide-resistant structures within faults alters the laws of energy accumulation and slip behavior, resulting in significant differences in the mechanisms of fault activation and instability compared to conventional under-

收稿日期: 2024-09-23 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1136

基金项目: 山东科技大学矿山灾害预防控制实验室开放基金资助项目 (MDPC202005); 辽宁省教育厅服务地方资助项目 (JYTMS20230793); 国家自然科学基金资助项目 (52374205)

作者简介: 吕进国 (1984—), 男, 辽宁阜新人, 副教授, 博士。Email: glvjinguo2005@163.com

引用格式: 吕进国, 韩文鹤, 张学朋, 等. 采动影响下坚硬岩桥型断层活化与储能演变规律[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 902-916.

LYU Jinguo, HAN Wenhe, ZHANG Xuepeng, et al. Evolution law of the activation and energy storage of fault with hard rock bridge under mining influence[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 902-916.



移动阅读

standing. To study the evolution laws of activation and energy storage of hard rock-bridge-type faults under mining influence, the activation conditions of faults with slide-resistant structures of hard rock bridges were theoretically analyzed. The slip laws of faults with hard rock bridges under mining disturbances was studied by physical simulation experiments. The differential characteristics of fault activation between faults with hard rock bridges and those without slide-resistant structures were analyzed. Moreover, the variation characteristics of normal and shear stresses in the fault zones with hard rock bridges and without slide-resistant structures during the working face extraction process were studied. Using the numerical simulation method, the stress distribution and energy accumulation laws in the fault zones with hard rock bridges and without slide-resistant structures during the mining process near the fault were studied. The research results indicate that faults with hard rock bridges under mining disturbances exhibit more pronounced non-uniform slip behavior. However, the fault slippage amount is significantly reduced, and the degree of activation is decreased. The hard rock bridges can enhance fault stability, and this improvement in stability is primarily reflected in the increased cohesion of the fault surface. The hard rock bridge near the working face has the highest stress concentration and is most prone to shear failure, but to a certain extent, the hard rock bridge will disperse the stress concentration zone. For fault zones without slide-resistant structures, the elastic strain energy density gradually increases as mining approaches the fault, but the extent of increase remains limited, and the peak value of elastic strain energy density consistently occurs in the area ahead of the working face. However, The existence of hard rock bridge alters the energy distribution law in the fault zone, with the peak of strain energy density is mainly concentrated in the contact between hard rock bridge and fault zone. The closer locations within the fault zone is to the rock bridge, the higher the degree of slip compression and the higher the degree of energy accumulation. The energy accumulation in faults containing hard rock bridges is significantly greater than in faults without slide-resistant structures. The slide-resistant structures can greatly enhance the energy storage potential of fault zones.

**Key words:** slide-resistant structure; hard rock bridge; strain energy; fault activation; instability failure

## 0 引 言

断层作为煤矿开采中普遍存在的一种地质构造,其破坏失稳诱发的冲击地压灾害给我国造成了巨大的人员伤亡和财产损失。据不完全统计,河南、山东、辽宁、黑龙江、河北与北京等多个矿区频繁发生断层诱发的冲击地压灾害<sup>[1-2]</sup>。断层冲击地压是因井田范围内存在的断层、节理及层理等不连续面,在采矿活动影响下引起了突然相对错动并伴随大量应变能释放而形成的煤岩冲击灾害<sup>[3-5]</sup>。断层冲击地压具有释放能量强度高、震级大的特点,其发生机理更为复杂,难以防治,已成为我国急需解决的工程难题之一。

对于断层诱发的冲击地压机理做了大量研究,主要存在以下观点:从失稳释能角度来看<sup>[3-6]</sup>,采掘工作面的采动影响会使得断层活化,最终演变成失稳滑动,并伴随弹性变形能的释放,对采场巷道围岩造成动载扰动,引起冲击地压灾害。从应力角度来看<sup>[7-13]</sup>,断层和顶板相互作用产生的动载与煤柱的静载相叠加,超过了断层煤柱的极限承载力,使得煤柱发生失稳破坏,导致断层发生滑移,最终演变成了冲击地压灾害。综上所述,断层冲击地压与采动影响条件下的断层活化及能量积聚程度密切相关,若要开展该研究,应首先解答如下问题。

① 正断层一般属于张性断层,断层带介质强度较弱,难以积聚大量的弹性应变能。但现实表明,正断层诱发的冲击强度同样很大,可伴随大范围的强烈震动。若基于原有的认识,难以解释断层震源机理。② 在断层活化与微震活动时空关系的实际监测中发现<sup>[14]</sup>:若微震事件在断层构造附近集中,且不随采掘工作面的移动而迁移,表明应力在断层构造附近积聚,称为增压型断层;否则,称为减压型断层。增压型断层发生冲击地压危险较高,说明了增压型断层带应存在承载能力与储能潜力较高的未知结构。③ 煤岩试件摩擦滑动试验表明<sup>[15]</sup>:岩体光滑接触面上存在微小凹凸体,在外力作用下,若达到凸凹体的抗剪强度,则凸凹体将被剪断,进而滑面发生突然错动,滑面的滑移呈非均匀性分布,说明滑移较小之处受到的阻碍大,反之阻碍小,表现出了明显的分区阻滑特征。相对光滑的接触面尚且如此,大尺度非均质性的复杂断层带更是如此。④ 若断层带内部全部为低强度介质,那么在临近断层的强烈采动下断层应发生失稳,但事实并不完全遵循这一规律,说明断层带中必然存在强度较高的阻滑区段。

秦四清等<sup>[16-18]</sup>在地震研究过程中所提出的断层锁固段理论,使得采矿工程中的断层动力响应问题得到了新的启示。锁固理论认为孕震断层存在 4 种锁

固体,分别为岩桥、凸凹体、断层未破裂区段、次级断层所围限的块体,锁固段的破坏是地震高能量释放的来源,并利用若干实例说明了锁固段的客观存在及自洽性,进而提出了预测地震的锁固段理论模型。采矿科学学者也尝试应用锁固段理论来揭示断层冲击地压的发生机理,例如王晓卿等<sup>[19]</sup>设计了“煤矿巷道断层滑移型冲击地压模拟试验系统”,研制了大型三维断层滑移型冲击地压物理模拟仪器,设计了单断层和双断层布置条件下开挖诱导断层滑移的试验方案。

锁固段观点及研究方法值得岩石力学与采矿工程学者的借鉴。为此,课题组在 2013 年陈约提出了断层滑动启动过程中的阻滑现象<sup>[4,20]</sup>,进而提出了断层阻滑结构这一概念。断层带上任何介质或结构都有一定的阻滑作用,但具有显著阻滑特性的结构,可称为阻滑结构。阻滑结构与锁固段的概念相似,而研究的方法、研究对象及研究目标不同。

地震是由岩体长期缓慢的蠕变失稳释能所引起,而煤矿开采中的断层活化失稳是一个动静载叠加作用下的快速变形失稳问题,两者存在较大差异,需要不同的研究方法。针对阻滑结构的研究目标不是单一的结构体,而是由阻滑体、断层两盘所组成的阻滑系统,体现出研究对象的不同。阻滑结构侧重表达断层与两盘围岩所形成的结构,其破坏会诱发断层整体或局部的失稳,具体表现在动静载作用下断层阻滑结构的加速破坏而引起断层活化-失稳效应,而锁固段主要反映一种坚硬岩体的破坏释能效应,这是研究目标差异之处,如图 1 所示。

课题组在采矿工程领域提出易于释能发震的断层会含有非均质、高抗剪强度及强储能特性的阻滑结构,其存在将改变断层释能及滑移行为规律,导致断层活化失稳与以往存在较大差异,不同的阻滑结构会引起断层滑移及能量积聚程度有所不同,但基本的演化规律与变化特征是相似的。因此,本文以坚硬岩桥型阻滑结构为重点研究对象,采用相似模拟试验与数

值模拟相结合的方法,分析临近断层开采过程中含坚硬岩桥型的断层滑移、应力分布与能量积聚规律,为揭示断层冲击地压发生机理提供新思路。

## 1 断层阻滑结构的概念模型

所谓断层阻滑结构,即易于释能发震的断层内部应存在非均质、高强度的坚硬岩体,与断层两盘围岩、断层带软弱介质共同形成某种结构,对断层两盘起着阻滑的作用,这是一种良好的储能结构。它的存在,不仅会增强断层积聚应变能的潜力,还会提高断层带的抗滑性。

若断层带全部是软弱介质,可认为该阻滑结构强度极弱,对断层的阻滑作用较小,也可认为是无阻滑结构;若断层带局部存在未完全贯通区段,如图 2b 所示,当剪切驱动力大于未贯通区段岩体的抗剪强度时,断层才会发生活化失稳;若断层两盘坚硬围岩侵入断层带内部,形成了坚硬岩桥,可显著增加断层的阻滑作用,如图 2c 所示;若断层带所夹的软弱介质较少,其两盘局部区域岩体直接咬合,形成了凸凹接触面的阻滑结构,如图 2d 所示,一旦咬合位置被剪断,断层将会活化失稳;无论阻滑结构以何种形式赋存于断层带中,都可用一种概念模型进行统一表达,如图 2a 所示。

在临近落差较大的断层开采过程中,虽然阻滑结构能够起到遏制断层活化的作用,但由于开采会产生断层附加应力,使得阻滑结构不断积聚应变能,一旦超过阻滑结构的临界承载力,阻滑结构会发生失稳破坏,导致断层突然错动,同时伴随释能发震现象,促使临近断层的采场岩层发生运动,引起采场煤岩应力场与应变能分布发生突变,从而满足煤岩动力灾害发生的基本条件,增加冲击灾害发生的几率,如图 2 所示。

取含断层微元为研究对象,受力分析如图 3 所示。断层滑面上的正应力和剪应力分别为

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1)$$

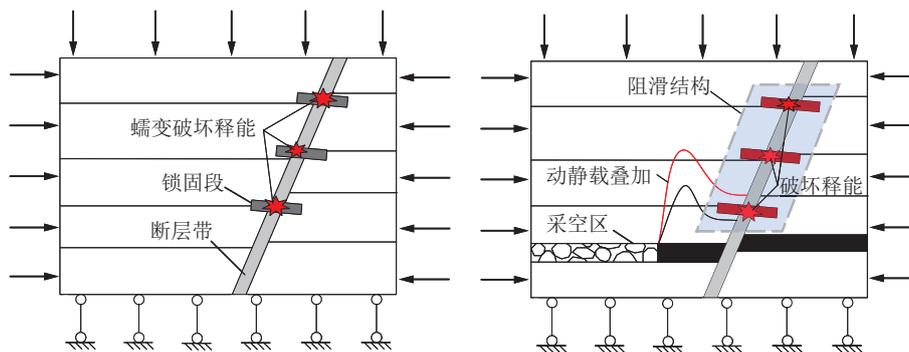


图 1 阻滑结构与锁固段差异

Fig.1 Differences between slide-resistant structures and locked segments

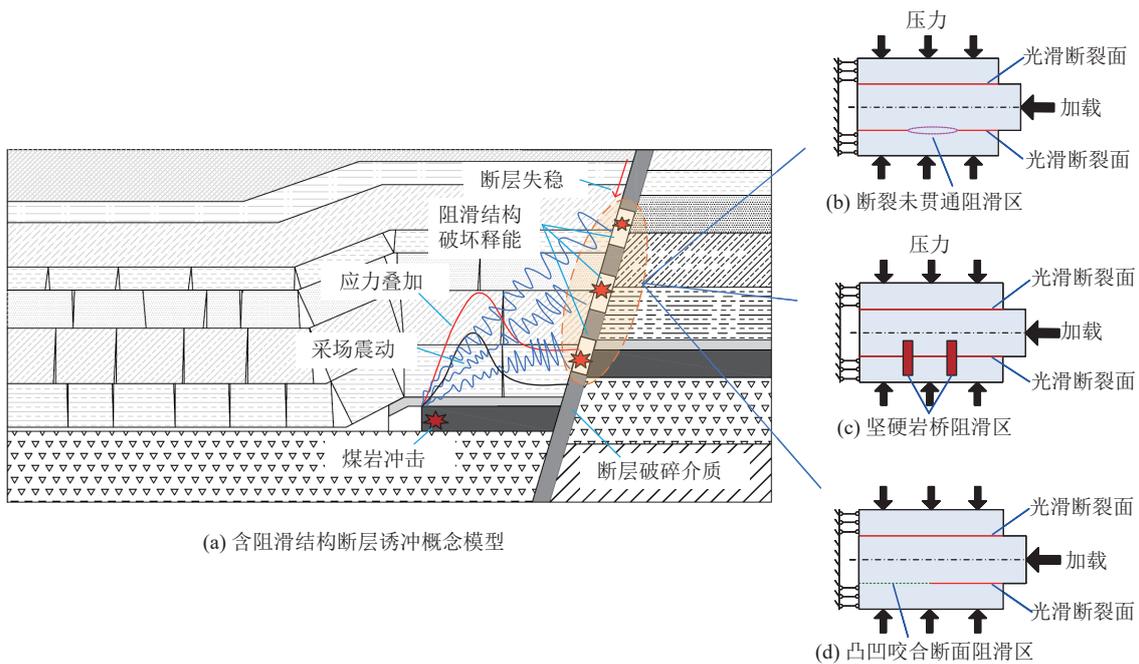


图2 断层阻滑结构及其诱冲模型

Fig.2 Fault slide-resistant structures and its rockburst model

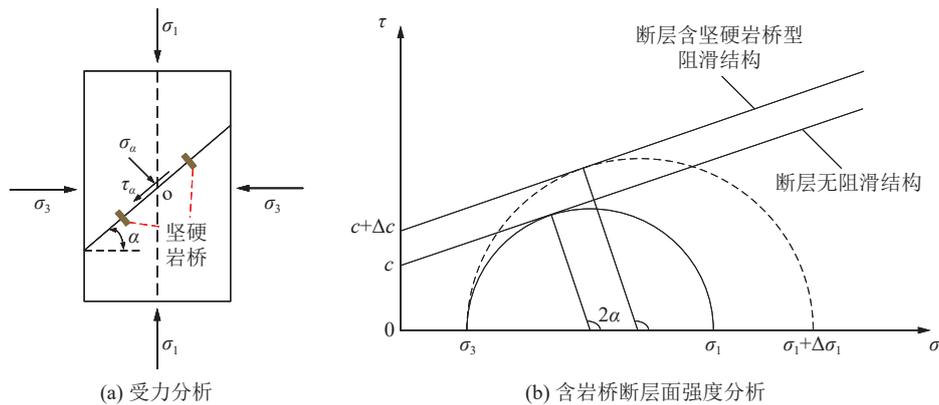


图3 含坚硬岩桥的断层力学分析

Fig.3 Mechanical analysis of fault with hard rock bridges

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (2)$$

式中:  $\sigma_1$  为最大主应力, MPa;  $\sigma_3$  为最小主应力, MPa;  $\alpha$  为断层倾角, ( $^\circ$ );  $\tau_\alpha$  为断层面上的剪应力, MPa;  $\sigma_\alpha$  为断层面上的正应力, MPa。

根据摩尔库仑屈服准则, 断层滑面所能承受极限剪切强度为

$$\tau_f = \sigma_\alpha \tan \varphi_f + c \quad (3)$$

式中:  $\varphi_f$  为断层面内摩擦角, ( $^\circ$ );  $c$  为断层面黏聚力, MPa。

断层面发生剪切破坏而活化的临界条件为  $\tau_\alpha = \tau_f$ , 则联立式 (1)、(2) 与 (3), 可得

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c + \sigma_3 \tan \varphi_f)}{(1 - \tan \varphi_f \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (4)$$

当作用在断层上的主应力满足式 (4) 条件时, 断层面将处于临界滑动状态。将式 (4) 对  $\alpha$  求一阶导, 并令其为零, 将计算出的极值角度再代入式 (4), 最终可得到断层活化所需  $\sigma_1$  的极小值为

$$\sigma_{1,\min} = \sigma_3 + \frac{2(c + \sigma_3 \tan \varphi_f)}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_f} - \tan \varphi_f} \quad (5)$$

由式 (5) 可知,  $\sigma_{1,\min}$  为第一主应力极小值, 断层的活化主要取决于外荷载、断层的内摩擦角  $\varphi_f$  和断层黏聚力  $c$ 。对于坚硬岩桥型的阻滑结构而言, 岩桥介质与整个断层面相比, 所占比例极少, 断层的内摩擦角不会发生明显变化, 而坚硬岩桥却可显著增加断层面的黏聚力, 使得断层的稳定性得到提高。若使断层活化, 需提高主应力  $\sigma_{1,\min}$  下限, 即阻滑结构的存在, 可增

加断层的稳定性。

## 2 含岩桥断层活化相似模拟试验

### 2.1 试验方案

如图 4 所示,以现场为工程背景,设计了断层无阻滑结构与含岩桥型的阻滑结构两组相似材料模型,主要由基岩、煤体工作面和断层组成。断层带的阻滑

结构设计为坚硬岩桥型,无阻滑结构的断层带为软弱介质,断层倾角约为  $70^\circ$ ,上下两盘煤层落差为 3.0 m,煤层厚 4.5 m。依据实际岩层结构与性质进行相应材料的建模,模型的几何相似比为 1:100,容重相似比为 1:1.5,弹性模量相似比为 1:150,强度相似比为 1:175,相似模型整体尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 高=1 350 mm $\times$ 200 mm $\times$ 1 000 mm。具体材料配比见表 1。

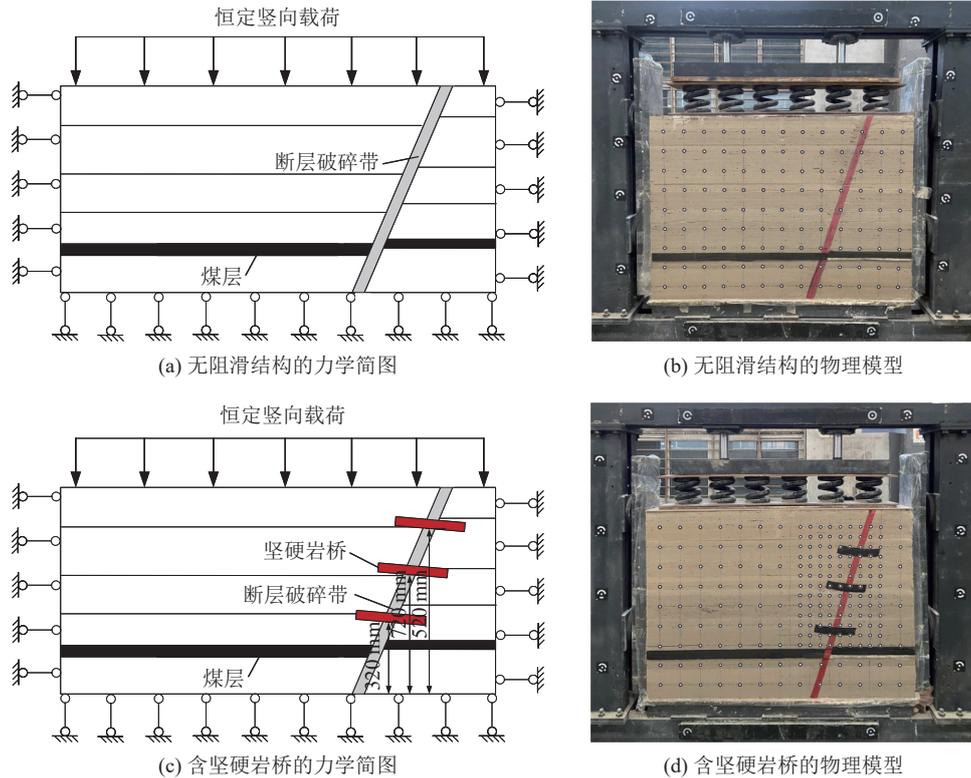


图 4 物理相似模型

Fig.4 Physical similarity model

由于采动引起的断层活化强释能均位于高位岩层,为此,在煤层上方的断层带共布设 3 个坚硬岩桥,距模型底部分别为 320 mm、520 mm 与 720 mm,相邻两坚硬岩桥之间的间隔为 200 mm。多个岩桥可更加充分揭示断层能量积聚演化规律,但对于坚硬岩桥几何尺寸等参数难于界定,为了保证开采过程中的断层带能够发生滑移,岩桥的尺寸不宜过大,设计每个坚硬岩桥长为 200 mm,宽为 30 mm,沿水平方向倾斜  $7^\circ$ 。

两组模型的底部边界限制竖向位移,左侧边界和右侧边界限制水平位移,在模型顶部施加恒定的竖向载荷。在试验模型上粘贴外径 20 mm、内径 10 mm 的标准黑白点,采用数字散斑技术,监测煤层开采过程中顶板运动与断层的滑移。采用应力测试技术,监测断层面正应力与剪应力的变化特征。

### 2.2 开采扰动下断层滑移规律

1) 基于位移云图的断层整体滑移规律。在有、无

阻滑结构的相似材料模拟开采过程中,选取工作面距断层 4 种不同距离的全场位移作为研究对象,4 种距离的选取主要以顶板垮落、断层滑移显著性为依据。无阻滑结构断层的相似材料模型散斑位移场如图 5 所示,特征如下:①当工作面距断层 27.6 m 时,采空区顶板发生初次垮落,最大下沉量为 4.3 m,断层下滑量在断层上端最大,其值为 0.32 m,且下滑量从断层上端至下端逐渐变小,表现为非均匀滑动;②当工作面距断层 20.4 m 时,采空区顶板垮落的水平范围增大,顶板下沉量最大达到 4.8 m,断层下滑量最大为 0.54 m;③当工作面距断层 10.8 m 时,采空区顶板垮落高度明显增加,最大下沉量为 4.9 m,断层下滑量最大为 0.67 m;④当工作面距离断层 6 m 时,采空区顶板岩层移动破坏程度加剧,断层整体上发生了较大的滑移,断层下滑量最大值为 4.4 m,散斑摄录后不久,断层上部出现了大面积的剥落,呈现失稳破坏模式。

表1 相似材料模型配比  
Table 1 Matching ratio of similar material model

编号	岩性	模型厚度/cm	材料配比					单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa	视密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
			砂胶比	配比号	石灰	石膏	水分			
1	细粒砂岩	10.0	4:1	437	0.3	0.7	1/9	0.298	0.027	1.5
2	粗粒砂岩	6.0	4:1	446	0.4	0.6	1/9	0.253	0.026	1.5
3	中粒砂岩	6.0	4:1	455	0.5	0.5	1/9	0.208	0.025	1.5
4	细粒砂岩	10.0	4:1	455	0.5	0.5	1/9	0.208	0.025	1.5
5	砂泥岩互层	9.0	4:1	455	0.5	0.5	1/9	0.208	0.025	1.5
6	粗粒砂岩	6.0	5:1	537	0.3	0.7	1/9	0.144	0.024	1.5
7	粉砂岩	4.5	5:1	537	0.3	0.7	1/9	0.144	0.024	1.5
8	砂质泥岩	6.0	5:1	546	0.4	0.6	1/9	0.109	0.019	1.5
9	泥岩	6.0	5:1	546	0.4	0.6	1/9	0.109	0.019	1.5
10	煤层	4.5	5:1	555	0.5	0.5	1/9	0.107	0.014	1.5
11	砂质泥岩	3.0	5:1	537	0.3	0.7	1/9	0.144	0.024	1.5
12	铝质泥岩	6.0	4:1	455	0.5	0.5	1/9	0.208	0.025	1.5
13	砂质泥岩	8.0	4:1	446	0.4	0.6	1/9	0.253	0.026	1.5
14	断层破碎带	—	7:1	773	0.7	0.3	1/9	0.059	0.007	1.5
15	坚硬岩桥	—	3:1	337	0.3	0.7	1/9	0.368	0.044	1.5

含坚硬岩桥断层的相似材料模型散斑位移场如图6所示,特征如下:①当工作面距断层25.2 m时,顶板采空区发生初次垮落,在采空区上方大范围岩层产生了显著的变形移动,但下沉量相对较小,同时含有坚硬岩桥的断层下滑量从上端至下端逐渐减小,分区性明显,与无阻滑结构类似,最大为0.1 m,断层发生了微小错动;②当工作面距断层20.4 m时,采空区顶板发生了第二次垮落,断层最大下滑量较之前略有增大,为0.11 m,变化较小;③当工作面至距断层15.6 m时,采空区顶板垮落范围变化较小,断层最大下滑量为1.2 m;④当工作面距断层6 m时,采空区垮落水平范围与高度明显增加,断层最大下滑量为1.3 m。

总体上,随着采掘工作面不断临近断层,含坚硬岩桥的断层滑移量比无阻滑断层更小,无阻滑断层最大滑移量为阻滑型断层的3.4倍,采动对含坚硬岩桥的断层影响较小,该类断层更为稳定,说明坚硬岩桥对断层具有显著的阻滑作用,可提高断层的抗滑能力。

2) 基于散斑测点曲线的断层局部滑移规律。在断层带上选取散斑点作为断层滑移测点,由图7a的无阻滑结构断层滑移曲线可知:①当工作面距断层大于35 m时,断层下滑量较小,基本保持不变;②当工作面距断层小于35 m且大于6 m时,断层下滑量随工作面距断层距离的减小而呈线性增加趋势;③当工作面距断层小于6 m时,断层下滑量突增,此时断层发生了失稳破坏,约为失稳前累积滑移量的7倍。

由图7b含坚硬岩桥的断层滑移曲线可知:①当工作面距断层大于25 m时,位于断层上端的C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>测点下滑量很小,但呈现一定的波动性;②当工作面距断层大于25 m且小于35 m时,各测点的断层下滑量随工作面距断层距离的减小而呈缓慢线性增加趋势;③当工作面距断层小于25 m时,各测点的下沉量突增且随工作面距断层距离的减小而呈非线性波动增加。尤其工作面距断层小于10 m时,断层下滑速率最高,但总体上断层仍保持稳定。

坚硬岩桥的存在使断层呈现了更强的非均匀性滑移,但断层的滑移量明显减小,说明坚硬岩桥在一定程度上增强断层抗滑能力。

### 2.3 断层带应力变化规律

在断层附近共布置A、B、C与D共4个测点,以2个压力盒组成一个测点,其中一个压力盒沿断层倾斜方向布置,可直接测量断层带法向应力;另一个沿水平方向布置,测量上覆岩层的竖向应力。

根据微元体的静力学平衡条件列出平衡方程,进而求解断层剪应力。

$$\tau_f = \frac{\sigma_f \cos \theta - \sigma_z}{\sin \theta} \quad (6)$$

式中: $\sigma_f$ 为断层面上正应力,MPa; $\sigma_z$ 为断层面附近的自重应力,MPa; $\theta$ 为断层倾角,(°)。另外,图8c中的 $\sigma_x$ 为断层面附近的水平应力,MPa。

由图9与图10可知:

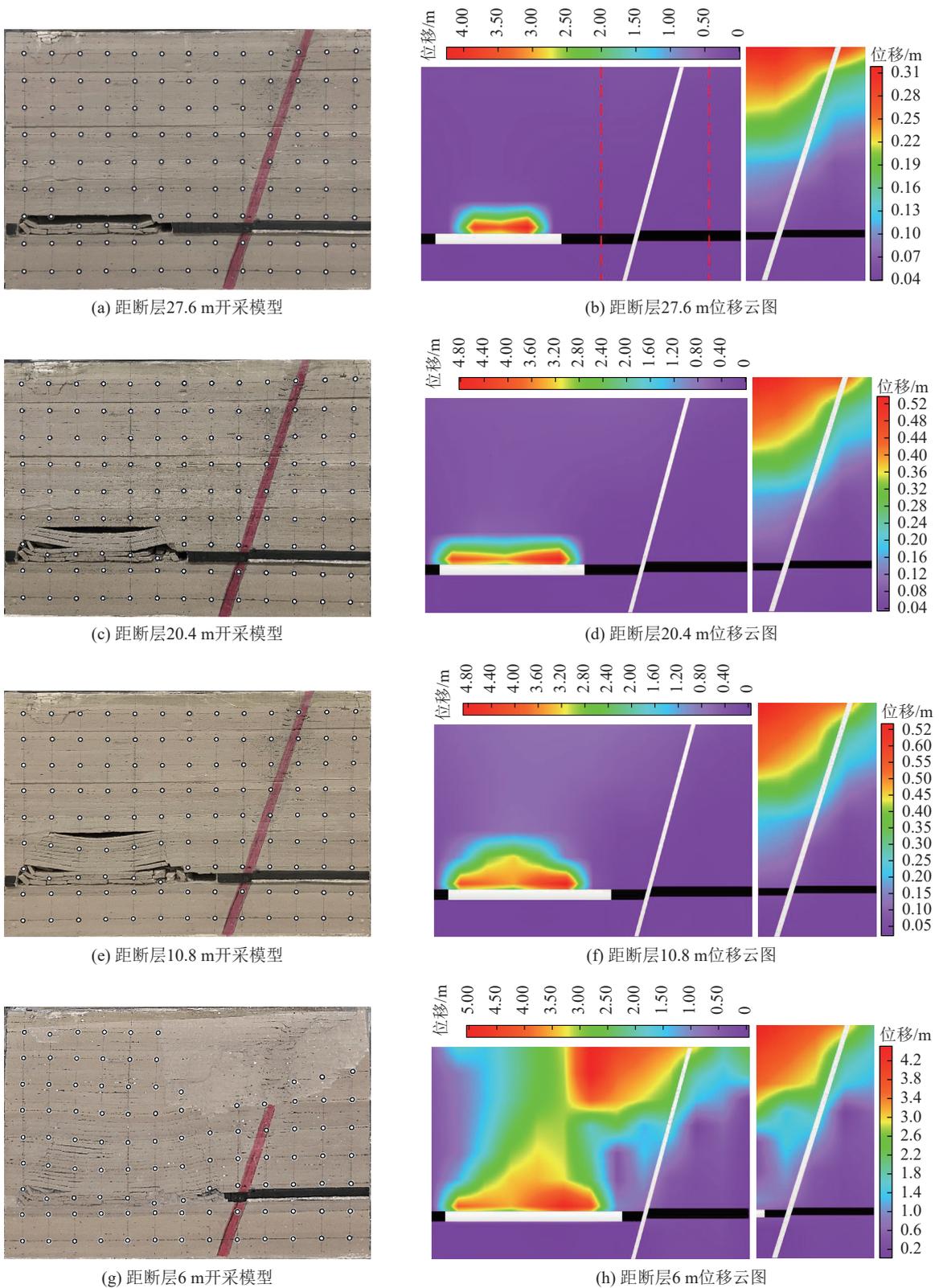


图 5 无阻滑结构的断层竖向位移

Fig.5 Vertical displacement of faults without slip-resistant structures

1) 含坚硬岩桥结构与无阻滑结构的断层带各测点正应力与剪应力变化特征相似, 但含坚硬岩桥的断层带正应力峰值与剪应力峰值均高于无阻滑结构断层, 说明阻滑型断层的承载力更强。

2) 无论是否存在阻滑结构, 正应力由断层上端到下端逐渐变小, 而各测点的剪应力由断层上端到到下端逐渐变大。A 点正应力最小, 剪应力最大, 说明靠近煤柱的断层易于满足摩尔库仑屈服条件, 该断层区段更

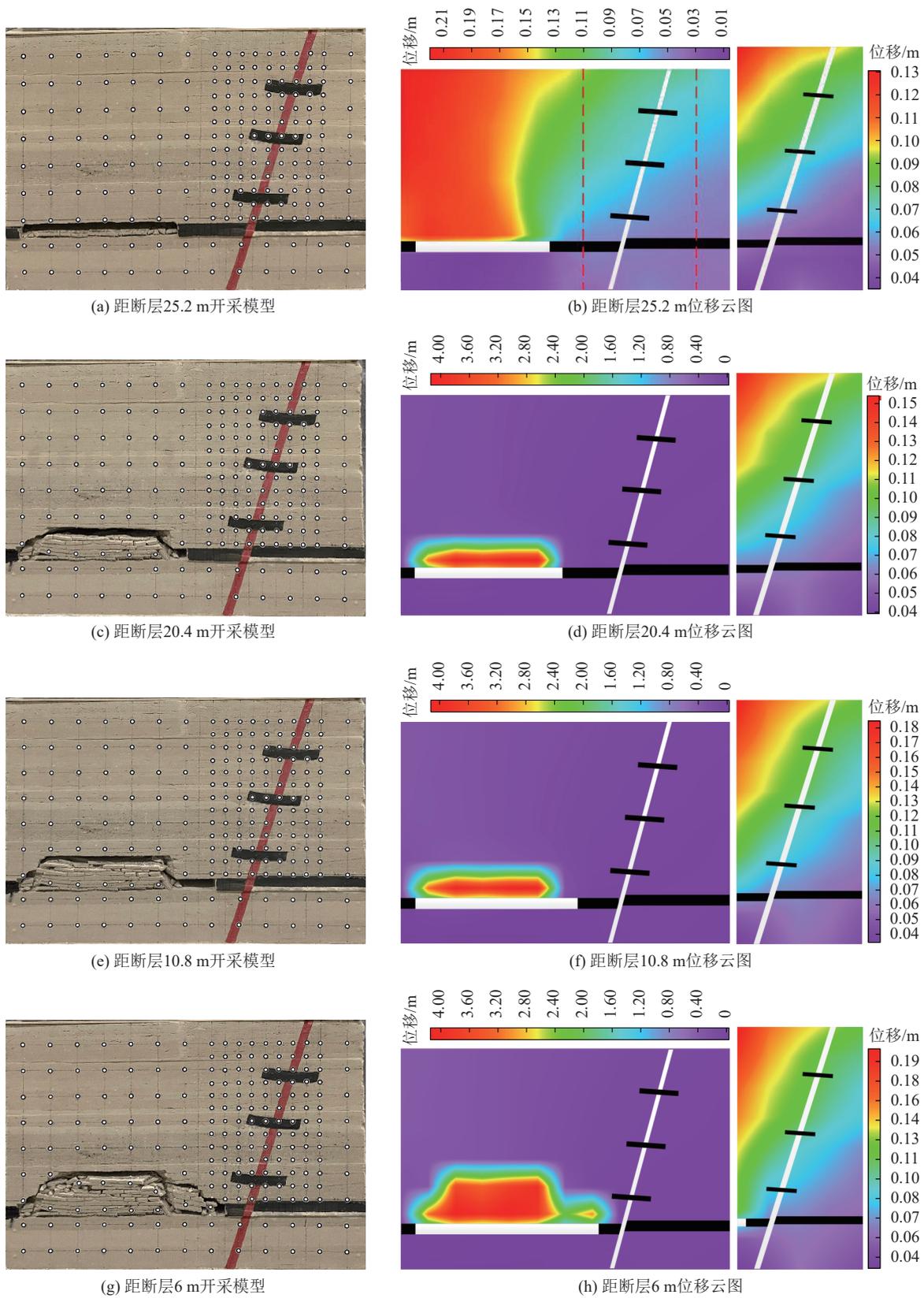


图 6 含坚硬岩桥的断层竖向位移

Fig.6 Vertical displacement of faults with hard rock bridges

易发生剪切滑动; *D* 点正应力偏大, 而剪应力最小, 说明该断层区段不易发生剪切滑动。

3) 无论是否存在阻滑结构, 当工作面距断层大于

30 m 时, 断层正应力与剪应力随工作面距断层距离的降低而缓慢增长。当工作面距断层小于 30 m 时, 断层正应力与剪应力随工作面距断层距离的减小而快

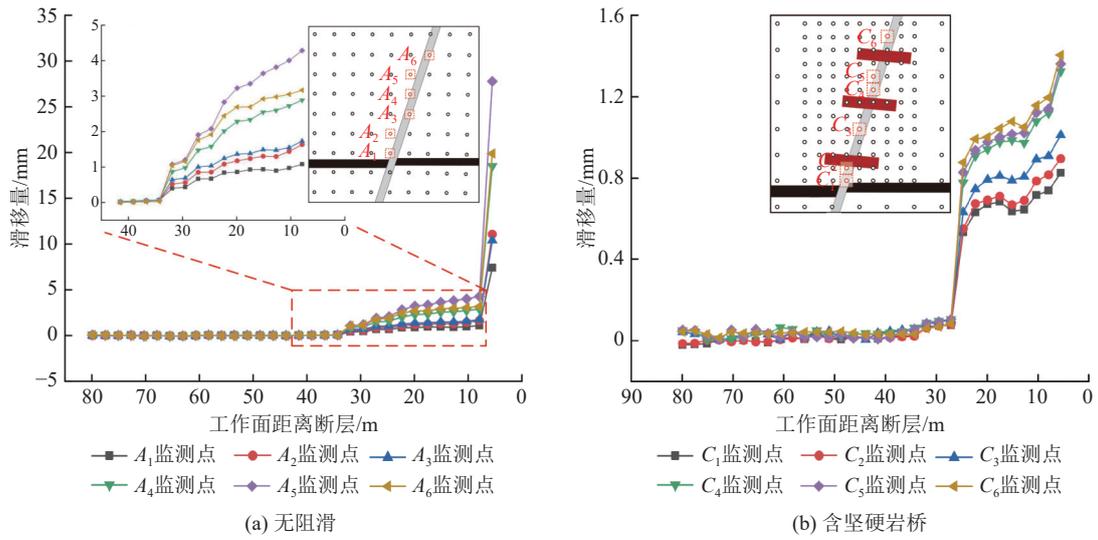


图 7 有、无坚硬岩桥的断层竖向位移曲线

Fig.7 Vertical displacement curves of faults with and without hard rock bridges

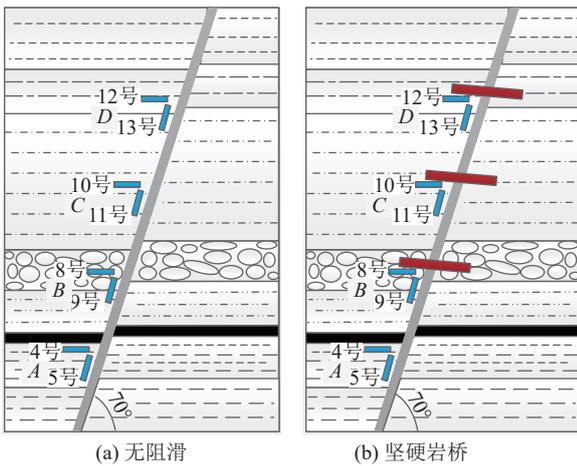


图 8 应力监测方案

Fig.8 Stress monitoring scheme

速增加,且正应力与剪应力呈现波动变化,说明在采动影响下断层带内部正在经历着循环加、卸载作用,断层带正在发生滑动;当工作面距断层 6 m 时,测点 A 的正应力与剪应力急剧下降,说明 A 点已发生了剪切破坏,应力释放。

4) 当工作面距断层 27.6 m 与 20.4 m 时,无阻滑断层剪应力分别发生突降,且正处于采空区覆岩垮落的过程;当工作面距断层 25.2 m 与 20.4 m 时,含坚硬岩桥断层的剪应力分别发生突降,此时同样正处于采空区覆岩垮落过程。以上说明,当工作面临近断层开采时,采空区顶板运动会对断层产生扰动,加速断层活化,但采掘工作面距含坚硬岩桥的断层较近时才会对其造成影响,含坚硬岩桥的断层比无阻滑结构的更加稳定。

### 3 含坚硬岩桥断层应力及储能特征

#### 3.1 三维数值模型建立

参考现场地质资料与物理相似模型,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件,分别建立无阻滑结构与含坚硬岩桥的断层三维数值模型,如图 11 所示。模型长×宽×高=200 m×40 m×100 m,网格单元采用六面体单元,模型网格单元数量为 63.35 万,网格节点数量为 66.29 万。煤层厚度 4.5 m,断层落差 3.0 m,断层倾角取 70°,煤层埋深 680 m。在模型顶部施加 15 MPa 荷载来模拟上覆岩层自重,考虑深部及断层影响,侧压系数取 1.3。在模型左右、前后边界施加法向位移约束,模型底部固定。计算过程中采用摩尔-库仑屈服准则,煤岩层物理力学参数见表 2。

#### 3.2 断层带应力变化规律

无阻滑结构的断层带垂直应力分布如图 12 所示,断层带垂直应力总体保持较低水平。随着采掘工作面不断临近断层开采,断层带仍难以形成应力集中,而是在断层附近的煤岩层积聚应力,并且应力集中程度随工作面不断靠近断层而逐渐增高,尤其工作面距

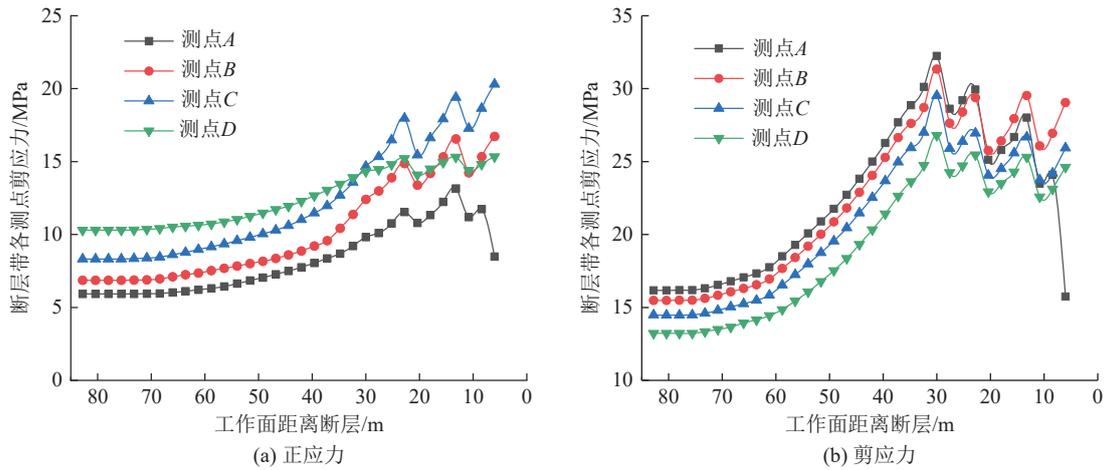


图 9 无阻滑结构的断层面正、剪应力变化

Fig.9 Change of normal and shear stress of fault plane without slide-resistant structure

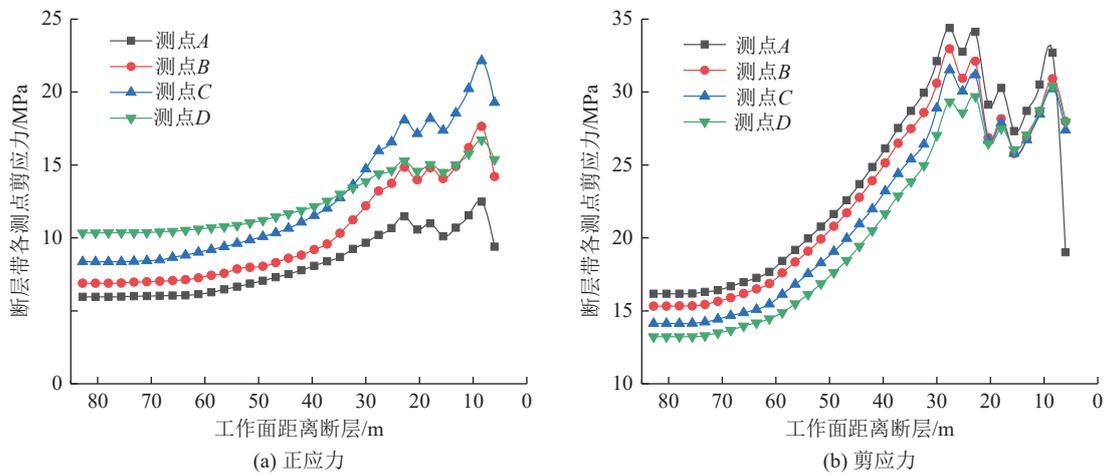


图 10 含坚硬岩桥的断层面正、剪应力变化

Fig.10 Change of normal and shear stress of fault plane with hard rock bridges

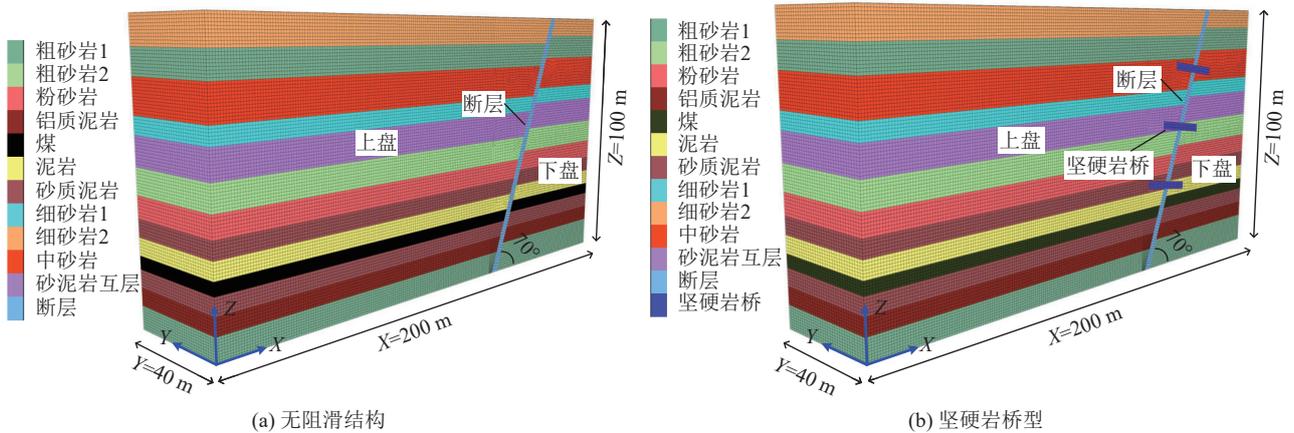


图 11 三维数值模型

Fig.11 Three-dimensional numerical model

断层 8 m 时, 靠近工作面一侧的煤层应力集中程度最高, 这是由于工作面超前支承压力与断层形成的附加应力相叠加所致。

含坚硬岩桥的断层带垂直应力如图 13 所示, 含

坚硬岩桥区段应力保持较高水平, 无岩桥区段的断层带应力仍保持较低水平。随着采掘工作面不断临近断层开采, 靠近工作面一侧的断层附近煤岩层及坚硬岩桥出现了应力集中现象, 其集中程度随距断层距离

表 2 煤岩物理力学参数  
Table 2 Physical and mechanical parameters of coal-rock

序号	岩性	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
1	粗砂岩1	2.65	12.74	7.64	3.07	1.48	39.19
2	粗砂岩2	2.48	7.76	4.88	2.57	1.34	37.17
3	粉砂岩	2.59	6.47	3.88	2.51	1.21	36.72
4	铝质泥岩	2.59	6.92	3.19	2.13	1.31	38.70
5	煤	1.44	2.28	1.44	1.21	0.63	35.34
6	泥岩	2.57	3.42	1.96	1.56	0.90	35.92
7	砂质泥岩	2.58	5.87	3.52	2.06	1.12	36.62
8	细砂岩1	2.63	9.55	6.87	2.95	1.56	37.97
9	细砂岩2	2.65	13.09	8.62	3.32	2.13	39.35
10	中砂岩	2.56	10.07	6.94	2.86	1.45	37.71
11	砂泥岩互层	2.58	6.67	3.81	2.52	1.39	37.63
12	断层	1.62	0.05	0.04	0.03	0.02	18.97
13	坚硬岩桥	2.72	15.84	10.91	4.72	2.52	39.10

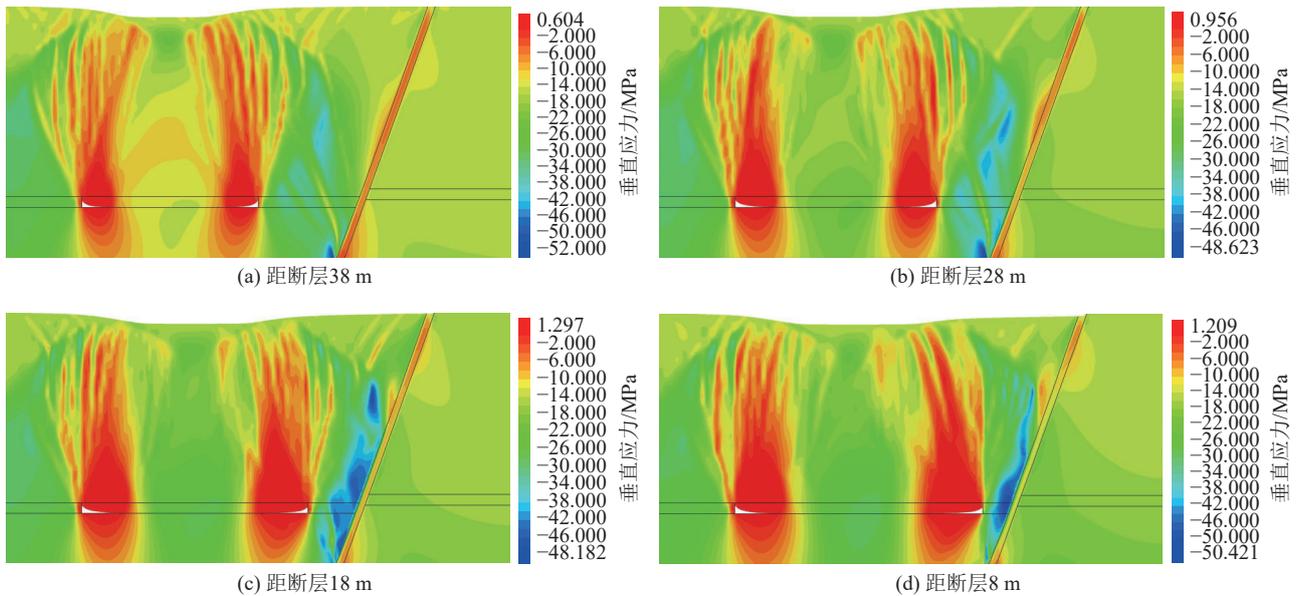


图 12 回采过程中无阻滑结构断层垂直应力分布规律

Fig.12 Vertical stress distribution law of fault zone without slide-resistant structures during the mining

的不断减小而增加,坚硬岩桥的剪切变形程度也随与断层距离的不断减小而升高,尤其采掘工作面距离断层 8 m 时,与无阻滑结构相比,坚硬岩桥附近的煤层应力集中程度较高,达到了 53 MPa,与此同时,在 3 个不同位置处的坚硬岩桥中,靠近煤层的应力集中程度最高,易发生剪切破坏。若阻滑结构一旦发生剪切破坏,所形成的动力扰动与煤岩高应力相叠加,对煤岩动力灾害的发生影响极大。若阻滑结构不发生破坏,会产生类似抗滑桩的作用,可持续承载,在一定程度上可分散断层应力集中范围,有利于断层保持稳定。

3.3 断层带应变能积聚特征

通过 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟计算,提取各单元体的坐

标  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、弹性模量、泊松比及 3 个主应力,利用式 (7),计算所提取每个单元的弹性应变能密度,再利用 Surfer 生成应变能密度等值线云图。

$$U_e = \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)] \quad (7)$$

式中:  $U_e$  为弹性应变能密度, J/m<sup>3</sup>;  $E_0$  为弹性模量, MPa;  $\mu$  为泊松比;  $\sigma_2$  为中间主应力, MPa。

如图 14 所示,对于断层带无阻滑结构而言,在工作面开采过程中弹性应变能密度峰值始终呈现在工作面前方区域,比断层带积聚的程度更高。随着工作面不断靠近断层,工作面前方的煤岩体受到的采动及断层影响也越加显著,说明了临近断层的工作面前方

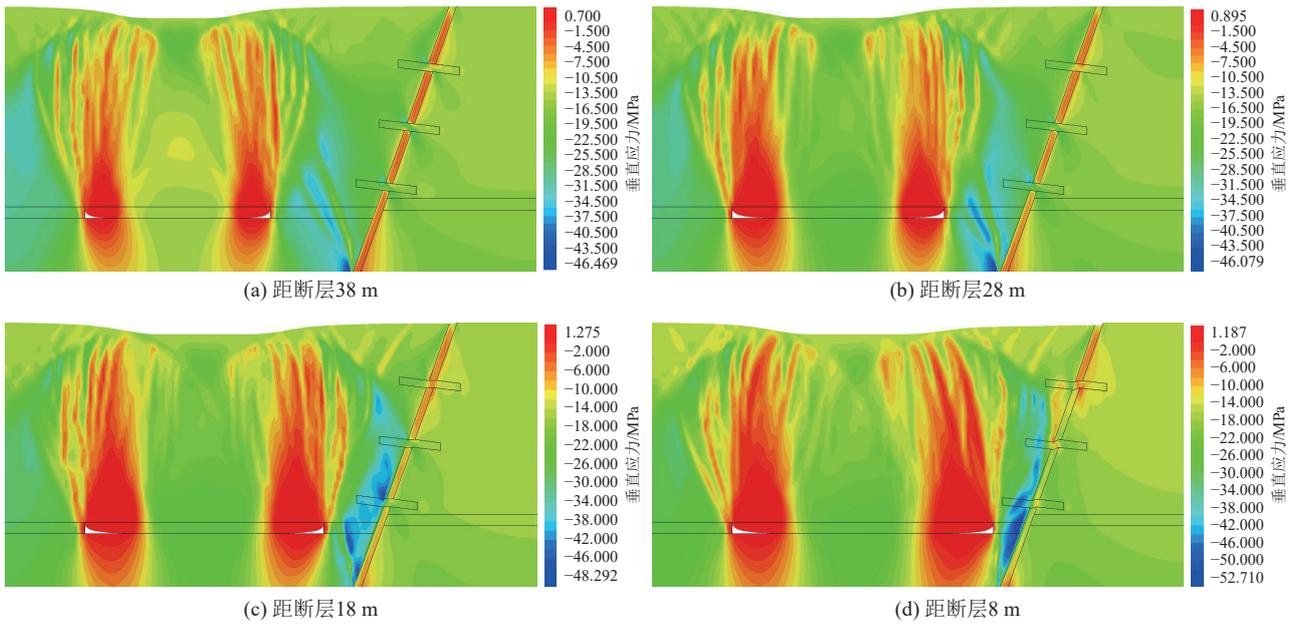


图 13 回采过程中含坚硬岩桥断层带垂直应力分布规律

Fig.13 Vertical stress distribution law of fault zone with hard rock bridges during the mining

煤岩体能量积聚区是最危险区域。

当工作面距断层 38 m 时,靠近工作面的断层带弹性应变能密度最大值达  $152 \text{ kJ/m}^3$ 。当工作面距离断层 28 m 时,断层带局部区段弹性应变能密度积聚程度增大,最大值达  $182 \text{ kJ/m}^3$ ,较前一次开采增大了 20%;当工作面距断层 18 m 时,断层带中部达到弹性应变能密度最大值  $230 \text{ kJ/m}^3$ ,较距断层 38 m 时增加了 51%;当工作面距断层 8 m 时,靠近工作面处断层带弹性应变能密度最大值达到  $320 \text{ kJ/m}^3$ ,较距断层 38 m 时增大了 111%。虽然断层带应变能密度随工作

面逐步临近断层开采而不断增加,但增加幅度有限,从云图颜色所代表的数值范围来看,断层带能量积聚程度比工作面前方煤岩所积聚的小,符合实际情况。

断层带介质强度较低,但在三向应力状态下强度会有所提高,而抵抗变形的能力仍相对偏弱,在外载作用下,断层带剪切变形相对较大,换成应力的表达,如式 (7) 所示,因此只要断层不发生失稳破坏,那么其所积聚的能量不一定低。这是由于开采的影响,断层带会产生附加应力,对断层所做的功必然增加,所积聚的能量也必然增大。

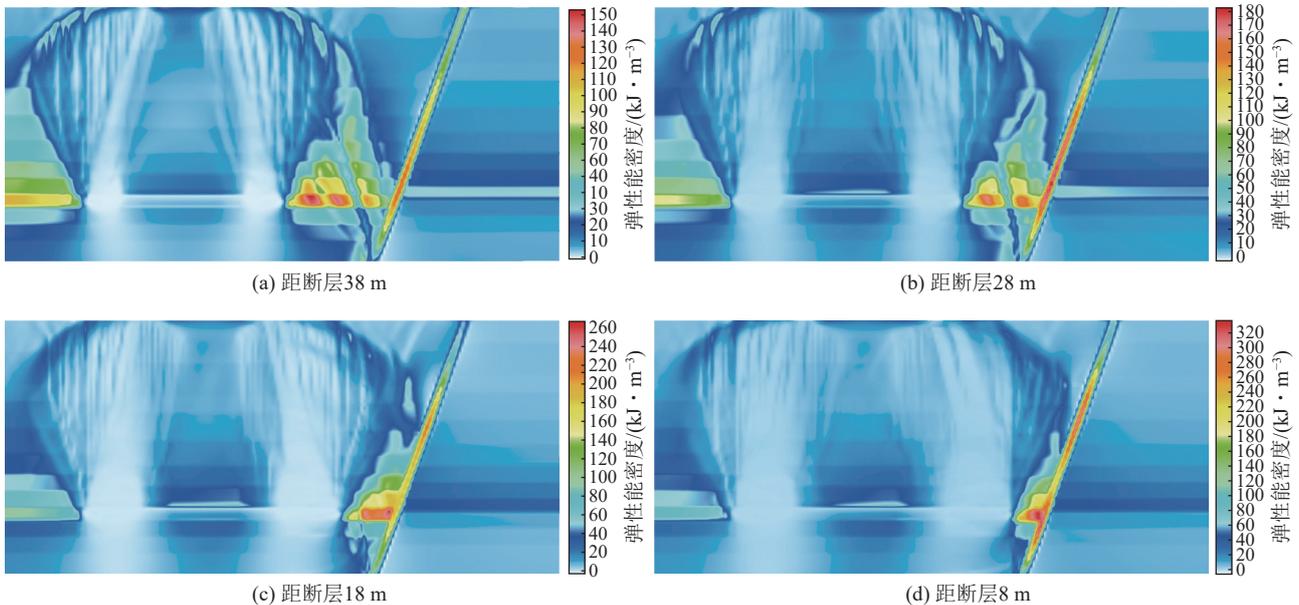


图 14 回采过程中无阻滑结构断层应变能分布

Fig.14 Strain energy distribution of fault without slide-resistant structures during the mining

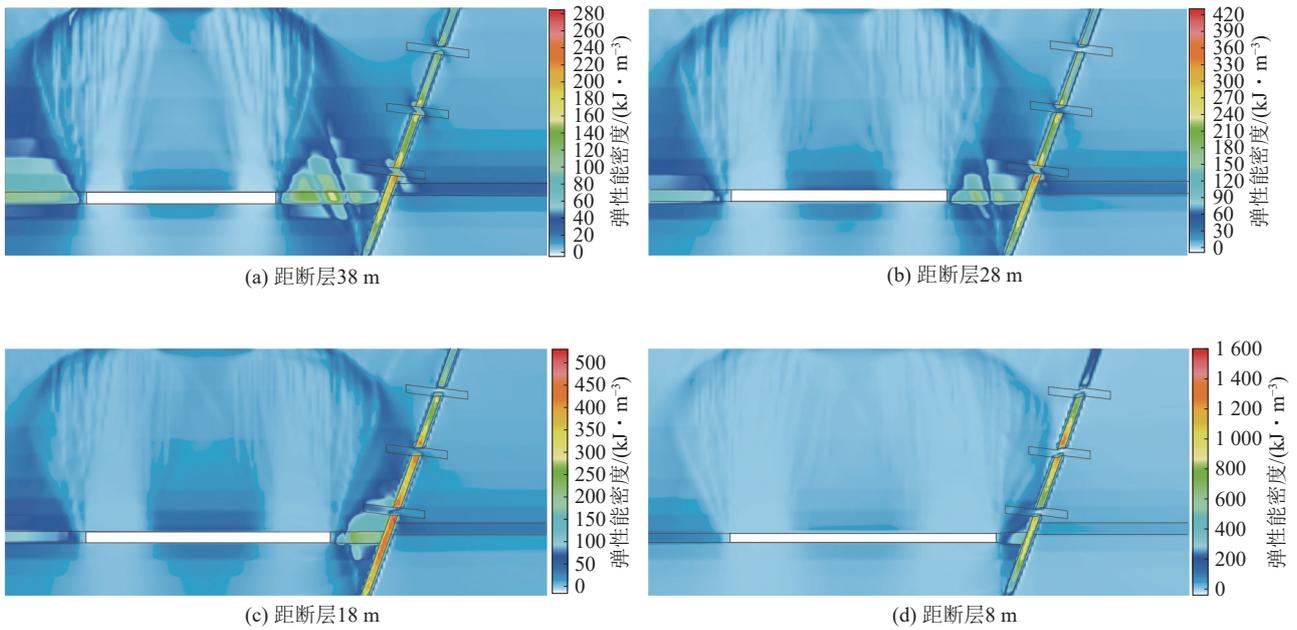


图 15 回采过程中含坚硬岩桥的断层应变能分布

Fig.15 Strain energy distribution of fault with hard rock bridges during the mining

如图 15 所示,对于含坚硬岩桥型的断层而言,其断层带能量积聚与无阻滑结构的断层有明显不同。无阻滑结构断层的能量集中区域位于工作面前方,而断层带坚硬岩桥的存在改变了能量的分布规律,其应变能密度峰值主要聚集在坚硬岩桥与断层带接触处位置。这是由于阻滑结构与断层带接触处属于相互作用的应力集中处,且相互作用之处的变形也同样较大,所以接触处周围的应变能密度最高。另外,靠近坚硬岩桥的区段应变能密度也较大,这是由于阻滑结构会阻挡断层向下滑动,使得断层不断向岩桥之处滑移挤压,与岩桥接触之处会积聚能量,因此越靠近岩桥,其滑移挤压程度越高,能量积聚程度也越高,这是靠近岩桥之处的断层带区段能量较高的直接原因。

结合图 16 可知,当工作面距断层 38 m 时,最靠近工作面的坚硬岩桥弹性应变能密度达到  $284 \text{ kJ/m}^3$ ,与无阻滑结构断层相比,断层能量积聚程度较小。当工作面距断层 28 m 时,坚硬岩桥与断层带相互作用加强,相接触位置弹性应变能积聚程度最高,最大值为  $431 \text{ kJ/m}^3$ ,较距断层 38 m 时增加了 52%。当工作面距断层 18 m 时,断层带坚硬岩桥结构继续积聚能量,靠近工作面的坚硬岩桥与断层带相互接触位置弹性应变能增大到  $530 \text{ kJ/m}^3$ ,较距断层 38 m 时增大了 87%;当工作面距断层 8 m 时,断层中部的坚硬岩桥与断层带相接处弹性应变能密度达到  $1602 \text{ kJ/m}^3$ ,比距断层 38 m 时增大了 464%,说明含坚硬岩桥的断层能量积聚程度远大于无阻滑结构断层。另外,虽然断层软弱介质带弹性应变能密度有一定程度的增加,但与阻滑结构附近的能量峰值相比较小,进一步揭示了阻

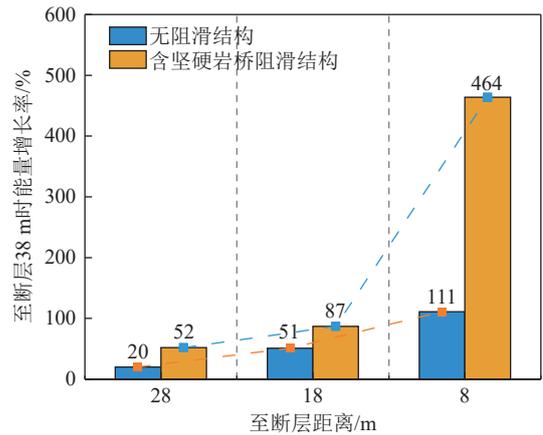


图 16 开采过程中有、无阻滑结构断层能量增长率

Fig.16 Growth rate of fault energy with and without slide-resistant structures during the mining

滑结构可大幅度提升断层带储能潜力。

由于数值模拟并未阐明含阻滑结构断层失稳破坏时能量释放特征,因此,难以明确阻滑结构对煤岩动力灾害的作用,但从能量的变化幅度中可知,阻滑结构具有更大的能量积聚潜力,储能极限远大于无阻滑结构的断层。若采掘工作面距断层足够近时,开采扰动下含阻滑结构断层一旦发生失稳破坏,可释放更大的弹性应变能,此时动力危险会比无阻滑结构的断层更强,但若工作面与断层保持合理的距离,也会比无阻滑结构的断层更加稳定。

#### 4 实例初探及讨论

朝阳煤矿地质构造复杂,3201 工作面周围断层较

为发育, 且煤层及顶板具有冲击倾向性。如图 17a、17b 所示<sup>[14]</sup>, 当回采工作面临近断层时, 微震事件主要集中在工作面前方的断层带附近, 能量释放时间间隔

较均匀, 未有高能量事件发生, 且随工作面不断推进而向其前方迁移, 说明断层带能量积聚程度较弱, 应力随断层带的破坏而发生转移, 表现出了减压型断层。

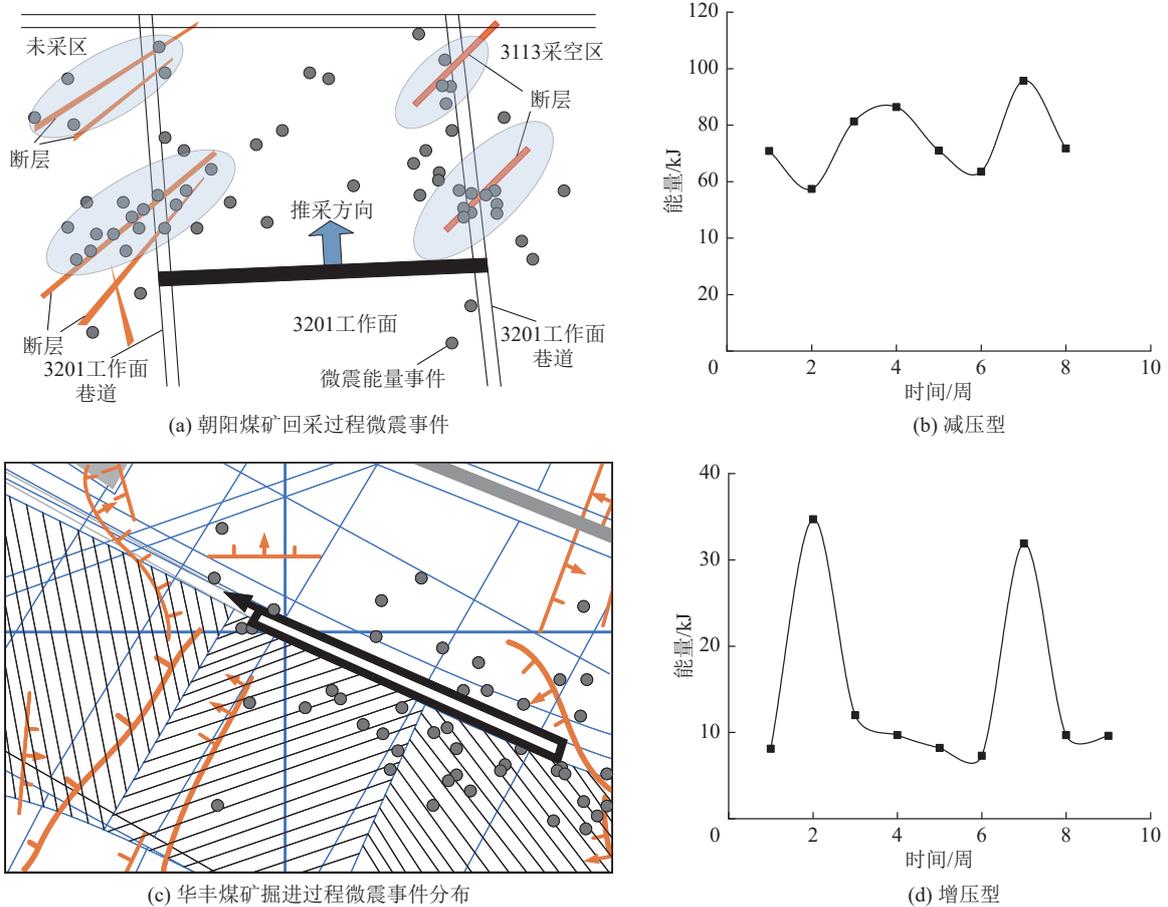


图 17 增压与减压型断层微震能量释放特征

Fig.17 Characteristics of micro-seismic energy release from pressurized and decompressed faults

山东华丰煤矿沿空掘巷过程中的微震事件特征如图 17c、17d 所示, 箭头起点与指向分别表示沿空掘巷位置和方向。微震事件主要分布在巷道两侧的断层附近, 且不再随工作面的掘进而向其前方和周围迁移, 说明断层带应存在储能(阻滑)结构, 使得应变能不断积聚, 该掘进工作面在断层附近发生了冲击地压灾害, 巷道损毁 170 m<sup>[14]</sup>。

此实例并不能说明阻滑结构的赋存类型, 即无法判识坚硬岩桥、断裂未贯通或两盘凸凹直接咬合等结构, 但可证明阻滑结构的客观存在性。无论何种阻滑结构, 它们对断层的作用是相似的, 具有共性特征。为此, 本文选取了坚硬岩桥型阻滑结构为研究对象, 分析采动过程中含阻滑结构条件下的断层滑移、应力分布、应变能积聚的变化特征, 用以揭示含阻滑结构的断层与无阻滑结构的差异特征。如此, 在实际应用中, 方可通过特征参数的变化来辨识是否属于储能断层范畴, 进而采取相应的解危措施或优化回采方案等。

强调实例中究竟是何种阻滑结构的意义不大, 借助含坚硬岩桥型断层的研究结论, 并与实际案例结合, 按照一定的逻辑, 科学地推测出断层能量的积聚状态, 对矿山的安全开采具有一定的工程意义。

### 5 结 论

1) 临近断层开采过程中, 含坚硬岩桥阻滑结构的存在使断层呈现了更强的非均匀性滑移, 断层的滑移量明显减小, 活化程度降低, 坚硬岩桥对断层具有显著的阻滑作用, 提高了断层带的抗滑能力, 在一定程度上增加了断层的稳定性。

2) 随着不断临近断层开采, 含坚硬岩桥断层附近的煤层应力集中程度较无阻滑结构的高, 而靠近煤层的坚硬岩桥应力集中程度最高, 最易发生剪切破坏, 同时坚硬岩桥在一定程度上分散了应力集中带, 有利于断层保持稳定, 若采掘工作面与断层保持合理距离时, 含坚硬岩桥的断层会更加稳定。

3) 对于无阻滑结构而言,随着不断临近断层开采,断层带弹性应变能密度虽有一定程度的增加,但增加幅度有限,且弹性应变能密度峰值主要呈现在工作面前方区域,比断层带积聚程度更高。

4) 坚硬岩桥的存在改变了断层带能量分布规律,其应变能密度峰值主要聚集在坚硬岩桥与断层带接触处位置。越靠近岩桥的断层带,能量积聚程度也越高。含坚硬岩桥的断层能量积聚程度远大于无阻滑结构断层,阻滑结构可大幅度提升断层带储能潜力。

#### 参考文献(References):

- [1] 潘一山. 煤矿冲击地压[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081–2095.  
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081–2095.
- [3] 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.  
PAN Yishan. Study on the occurrence and failure process of rock burst[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999.
- [4] 吕进国, 王涛, 丁维波, 等. 深部开采逆断层对冲击地压的诱导机制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 405–416.  
LYU Jinguo, WANG Tao, DING Weibo, et al. Induction mechanisms of coal bumps caused by thrust faults during deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 405–416.
- [5] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [6] 王爱文, 潘一山, 李忠华, 等. 断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2486–2492.  
WANG Aiwen, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Similar experimental study of rockburst induced by mining deep coal seam under fault action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2486–2492.
- [7] 窦林名, 牟宗龙, 曹安业, 巩思园, 贺虎, 陆莱平. 煤矿冲击地压[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [8] 李志华, 窦林名, 曹安业, 等. 采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 68–73.  
LI Zhihua, DOU Linming, CAO Anye, et al. Mechanism of coal rock impact induced by fault slip under the influence of mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 68–73.
- [9] 姜福兴, 魏全德, 王存文, 等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1191–1196.  
JIANG Fuxing, WEI Quande, WANG Cunwen, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1191–1196.
- [10] 王存文, 姜福兴, 刘金海. 构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 263–268.  
WANG Cunwen, JIANG Fuxing, LIU Jinhai. Analysis on control action of geologic structure on rock burst and typical cases[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 263–268.
- [11] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205–213.
- [12] 王涛. 断层活化诱发煤岩冲击失稳的机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.  
WANG Tao. Study on mechanism of coal and rock impact instability induced by fault activation[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2012.
- [13] 蔡武. 断层型冲击矿压的动静载叠加诱发原理及其监测预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
CAI Wu. Study on the principle of dynamic and static load superposition induced by fault-type rock burst and its monitoring and early warning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [14] 姜福兴, 苗小虎, 王存文, 等. 构造控制型冲击地压的微小地震监测预警研究与实践[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 900–903.  
JIANG Fuxing, MIAO Xiaohu, WANG Cunwen, et al. Predicting research and practice of tectonic-controlled coal burst by microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 900–903.
- [15] 宋义敏, 张悦, 许海亮, 等. 岩石摩擦滑动位移场时空演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1777–1784.  
SONG Yimin, ZHANG Yue, XU Hailiang, et al. Temporal and spatial characteristics of displacement field of rock friction and sliding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1777–1784.
- [16] 秦四清, 徐锡伟, 胡平, 等. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 1001–1014.  
QIN Siqing, XU Xiwei, HU Ping, et al. Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 1001–1014.
- [17] 杨百存, 秦四清, 薛雷, 等. 锁固段损伤过程中的能量转化与分配原理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(7): 975–981.  
YANG Baicun, QIN Siqing, XUE Lei, et al. Energy conversion and allocation principle during the damage process of locked segment[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(7): 975–981.
- [18] 吴晓娟, 秦四清, 薛雷, 等. 孕震断层锁固段累积损伤导致失稳的自组织-临界行为特征[J]. 物理学报, 2018, 67(20): 460–469.  
WU Xiaowen, QIN Siqing, XUE Lei, et al. Behavior characteristics from self-organization to criticality caused by cumulative damage leading to instability of locked segments in seismogenic fault system[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(20): 460–469.
- [19] 王晓卿, 高富强, 李建忠, 等. 开挖诱导锁固断层滑移的实现方式及影响因素[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 692–700.  
WANG Xiaoqing, GAO Fuqiang, LI Jianzhong, et al. Realization mode and influencing factors of excavation-induced locking fault slip[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 692–700.
- [20] 吕进国, 南存全, 张寅, 等. 义马煤田临近逆冲断层开采冲击地压发生机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 567–574.  
LYU Jinguo, NAN Cunquan, ZHANG Yin, et al. Coal bump mechanism in Yima coalfield mining near thrust fault[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 567–574.