



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

大采高采场变厚顶板岩层结构力学模型及其破断模式

路洋波 闫少宏 周坤友 王元杰 符鹏 张晨曦

引用本文:

路洋波, 闫少宏, 周坤友, 等. 大采高采场变厚顶板岩层结构力学模型及其破断模式[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(11): 242–257.

LU Yangbo, YAN Shaohong, ZHOU Kunyou. Structural mechanics model and its fracture mode of variable-thickness roof strata in large mining height stope[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(11): 242–257.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1923>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采动巷道侧向高低位厚硬顶板破断模式试验研究

Experimental study on fracture mode of lateral high and low thick and hard roof in mining roadway

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 111–120 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.014>

采场围岩能量演化及释放模拟研究

Simulation study on energy evolution and release of surrounding rock in stope

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3176f746-9835-4f1a-a21e-c0c2a9117877>

采动影响下断层活化失稳及能量释放规律研究

Study on law of fault activation, failure and energy release under influence of mining

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 75–83 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/def8c440-b2f2-42a1-8128-263b30c3ebb3>

微波弱化煤体微结构损伤特征及能量释放规律分析

Analysis of microstructure damage characteristics and energy release law of coal weakened by microwave

煤炭科学技术. 2025, 53(4): 233–243 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-2019>

远场高位厚硬岩层破断运动机理及响应规律研究

Study on mechanism and response of fracture and movement of the far-field high-position hard-and-thick stratum

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 12–22 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2027>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

采矿科学与工程



移动扫码阅读

路洋波, 闫少宏, 周坤友, 等. 大采高采场变厚顶板岩层结构力学模型及其破断模式[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(11): 242–257.

LU Yangbo, YAN Shaohong, ZHOU Kunyou, *et al.* Structural mechanics model and its fracture mode of variable-thickness roof strata in large mining height stope[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(11): 242–257.

大采高采场变厚顶板岩层结构力学模型及其破断模式

路洋波¹, 闫少宏¹, 周坤友², 王元杰³, 符 鹏¹, 张晨曦¹

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001;

3. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)

摘 要:掌握岩层的破断运动规律对于采场矿压控制及强矿震等动力灾害防控意义重大。薄岩层与厚岩层的破断模式具有显著的差异性, 并在生产实践中由于地层地质条件的复杂性, 岩层厚度表现为“变厚度”特征。为统一分析不同厚度条件下岩层的破断模式, 以内蒙古母杜柴登煤矿 30202 工作面为研究背景, 建立了采场变厚顶板岩层结构力学模型, 分析了岩层厚度斜率、岩层暴露长度以及岩层力学强度等因素对岩层破断模式的影响机制, 揭示了岩层不同破断模式的力学机理。结果表明, 随着岩层厚度斜率的增加, 岩层所受主导应力由拉应力向剪应力转变, 使得岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变; 岩层的暴露长度随着抗拉强度和抗剪强度的增加而增加, 并在不同的岩层厚度斜率下呈现不同的增加趋势。基于此, 结合数值模拟试验得到在 30202 工作面地质条件下, 厚硬岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度约为 16.5 m, 揭示了具体地质条件下不同厚度岩层破断模式的差异性, 并基于微震监测的震源破裂机制响应规律以及厚硬岩层破断所成结构进行了验证分析。同时根据现场微震监测数据和厚硬岩层破断所成结构的关联性, 通过反演分析厚硬岩层下采场覆岩结构演化与矿震活动的全过程, 得到了岩层不同破断模式与能量释放的关系。研究成果可为采场矿压控制及动力灾害防治提供理论与技术支持。

关键词: 变厚顶板岩层; 结构力学模型; 破断模式; 微震事件; 能量释放

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)11-0242-16

Structural mechanics model and its fracture mode of variable-thickness roof strata in large mining height stope

LU Yangbo¹, YAN Shaohong¹, ZHOU Kunyou², WANG Yuanjie³, FU Peng¹, ZHANG Chenxi¹

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Understanding the fracture movement laws of rock strata plays an important role in the control of mine pressure and the prevention and control of dynamic disasters such as strong mine seismic events in stope. The fracture modes of thin rock strata and thick rock strata are obviously different, and in the production practice, due to the complexity of geological conditions, rock strata thickness often displays “variable-thickness” characteristics. To systematically analyze fracture modes under varying thickness conditions, this study established a structure mechanical model of variable-thickness roof strata in the stope based on the geological setting of 30202 longwall face in Muduchaideng Coal Mine, and the influence mechanism of factors such as strata thickness gradient, unsupported span length, and mechanical strength on fracture modes were investigated, revealing the mechanical principles governing different fracture behaviors. The results show that with the thickness gradient increase, the dominant stress acting on the strata transitions from tensile stress to shear stress, shifting the fracture mode from “tensile fracture” to “shear fracture”, and the unsupported span length of rock strata shows an increase with the increase of tensile strength and shear strength of rock strata, and shows different growth trends under different thickness gradients. Com-

收稿日期: 2025-03-10

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 钱小静

DOI: 10.12438/cst.2024-1923

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304197)

作者简介: 路洋波(1991—), 男, 河北保定人, 博士研究生。E-mail: luyangbo_study@163.com

通讯作者: 闫少宏(1966—), 男, 陕西武功人, 教授, 博士生导师。E-mail: 202002@cumtb.edu.cn

bined with the numerical simulation test, it is obtained that under the geological conditions of 30202 longwall face, the critical thickness of the rock strata in which the fracture mode of the thick and hard rock strata evolves from “tensile fracture” to “shear fracture” is 16.5 m, which reveals the different of fracture mode of rock strata with different thickness under specific geological conditions. Based on the response law of the seismic source fracture mechanism and the structure formed by the fracture of thick and hard rock strata, it is verified that the fracture modes of rock strata with different thicknesses are different. At the same time, based on the correlation between the on-site microseismic monitoring data and the structure formed by the fracture of thick and hard rock strata, through the inversion analysis of the whole process of overburden structure evolution and mine earthquake activity under thick and hard rock strata, the relationship between different fracture modes of rock strata and energy release is clarified. The research results can provide theoretical and technical support for the prevention and control of dynamic disasters.

Key words: variable-thickness roof strata; structural mechanics model; fracture modes; microseismic events; energy release

0 引 言

大采高工作面高强度开采极易引起采场上覆岩层突然破断、垮落形成动力灾害,严重影响煤矿安全生产。尤其当顶板近场岩层中存在厚硬岩层时,其破断运动将影响覆岩结构的稳定性^[1]。以鄂尔多斯地区为例,煤系地层中存在多层厚硬岩层,由于其强度高、厚度大、距离煤层近,在煤炭开采实践中,极易引起大能量矿震频发、支架安全阀开启等强矿压现象^[2-4]。因此,控制采场上覆厚硬岩层运动是采场矿压控制及动力灾害防控的关键,而深入研究厚硬岩层的破断力学机理及其破断模式是控制岩层运动的基础^[5]。

为了研究厚硬岩层在煤矿开采过程中的破断运动规律,国内外学者开展了大量的研究工作,取得了诸多有益成果。左建平^等^[6-7]基于中厚板理论建立了厚岩层力学模型,并通过顶板破断模拟试验装置对不同厚度岩层的破断模式进行了研究。杨胜利^等^[8]基于中厚板理论研究了厚硬顶板受力与破断特征,提出了厚硬顶板破断模式判据。蒋金泉^等^[9]、秦广鹏^等^[10]基于薄板理论,建立了厚硬岩层力学模型,得到厚硬岩层破断步距计算公式。张广超^等^[11]建立了远场高位厚硬岩层破断力学模型,分析了厚硬岩层的破断演化力学过程,并利用地表沉陷、微震进行了岩层破断响应规律分析。张明^等^[12]基于厚硬岩层运动状态,建立了厚硬岩层悬顶状态下的水平应力估算模型,得到了受水平应力影响的厚硬岩梁的拉伸破坏模式及其失稳步距的表达式。CHEN ^等^[13]提出一种岩层断裂生成方法获取覆岩断裂形态并讨论了裂隙发育的力学机理。JU ^等^[14]通过连续离散元法(CDEM)研究了顶板运动规律。ZUO ^等^[15]讨论了西部浅埋厚岩层的破断规律,指出剪应力是造成顶板全厚度切落的重要力学因素,同时任艳芳^[16]对西部浅埋厚岩层的全厚度切落现象的发生和演化过程进行了试验研究。夏彬伟^等^[17]以工作面坚硬顶板为研究对象,采用岩层控制关键层理论、

Vlasov 厚板理论及薄板理论,分析了近距离厚度差异较大的坚硬岩层的破断步距,揭示了工作面顶板岩层垮落引起大小来压现象。

上述研究成果为厚硬岩层破断力学机理和破断模式研究提供了有益借鉴,但上述研究针对的具体岩层均为“等厚度”岩层,由于地层地质条件的复杂性,岩层的物理力学特性及其在地层中的赋存状态存在一定差异,使得岩层厚度在工程实践中并非完全处于等厚状态,表现为“变厚度”特征。为了对不同厚度岩层破断模式进行统一分析,揭示不同厚度岩层破断力学机理及其垮落特征,以鄂尔多斯母杜柴登煤矿 30202 大采高工作面地质参数为基础,通过力学分析建立采场变厚顶板岩层结构力学模型,分析变厚度岩层可能出现的破断模式及其影响机制,结合变厚度岩层破断模式的数值模拟计算,确定具体地质条件下岩层不同破断模式转变的岩层临界厚度,并通过现场微震震源破裂机制响应规律以及厚硬岩层破断所成结构进行验证分析,揭示不同厚度岩层的破断运动规律及垮落特征的差异性,并得到岩层不同破断模式与能量释放的关系。

1 工程概况

母杜柴登煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市西南部的乌审旗。该矿主采 3-1 煤层,为近水平煤层,煤层平均埋深约 630 m,煤层厚度平均为 5.5 m。30202 工作面位于 302 盘区,为该盘区第 2 个工作面,工作面倾向长度 268 m,走向长度 3 718 m。工作面采用综合机械化一次采全高,全部垮落法管理顶板,采高为 6 m。

30202 工作面东部为 30201 工作面采空区,西部为实体煤,北部为盘区大巷,南部为井田边界,工作面布置如图 1 所示,30202 工作面安装有 ARAMIS 微震监测系统,可实时采集微震波形并进行定位及震源能量计算。图 2 为 30202 工作面 B17 钻孔柱状图,可以看出煤层顶板存在多层厚岩层,并以砂岩为主。

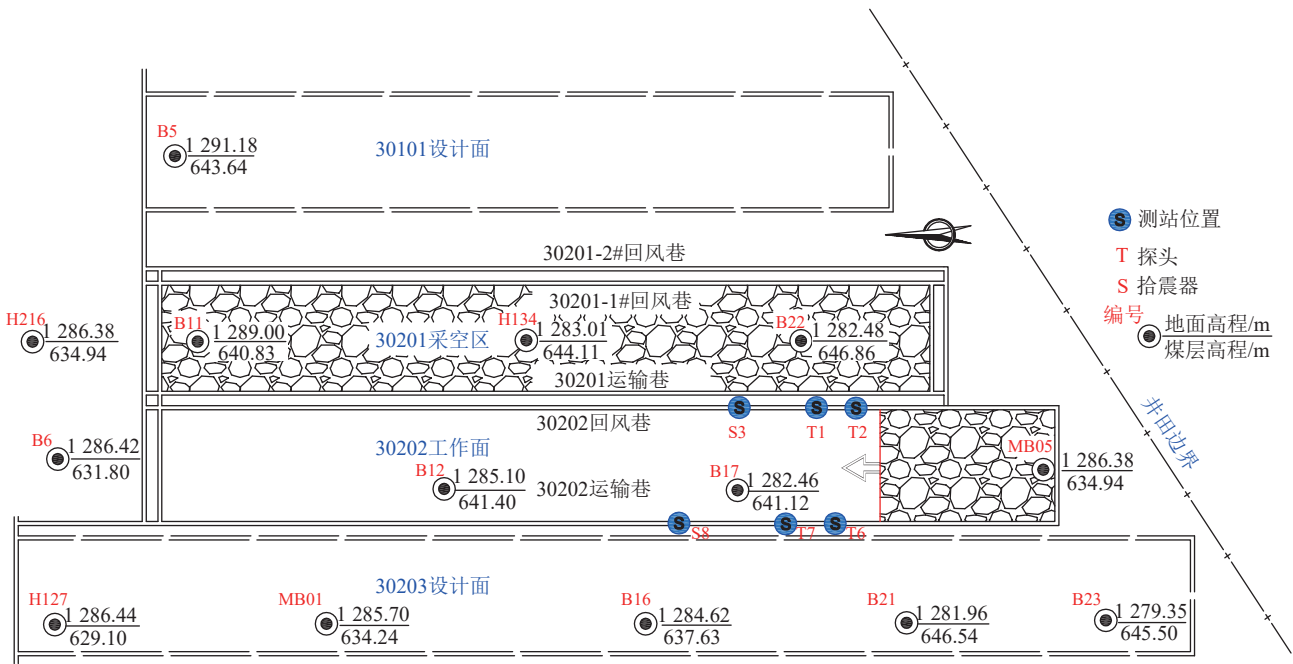


图 1 30202 工作面及微震监测台网布置

Fig.1 Layout diagram of 30202 longwall face and seismic monitoring network

柱状	厚度/m	埋深/m	岩性	关键层
	3.49	452.94	粗粒砂岩	
	15.88	456.43	粉砂岩	
	14.90	472.21	中粒砂岩	
	13.74	487.21	泥岩	
	12.90	500.91	细粒砂岩	
	25.26	513.81	泥岩	
	35.69	539.07	细粒砂岩	关键层Ⅲ
	6.70	574.76	泥岩	
	3.74	581.46	细粒砂岩	
	14.25	585.20	粗粒砂岩	关键层Ⅱ
	5.60	599.45	中粒砂岩	
	0.37	605.05	泥岩	
	0.32	605.42	煤	
	0.71	605.74	粉砂岩	
	1.64	606.54	中粒砂岩	
	0.60	608.09	粉砂岩	
	1.43	608.69	2-2中煤	
	1.50	610.12	泥岩	
	8.83	611.62	细粒砂岩	
	15.47	620.45	粗粒砂岩	关键层Ⅰ
	0.90	635.92	泥岩	
	5.60	636.87	3-1煤	

图 2 B17 钻孔柱状图

Fig.2 Column map of B17

通过关键层理论^[18]计算可知,工作面上覆岩层 100 m 范围内存在 3 层关键层,分别为与煤层间距 0.9 m 的粗粒砂岩,岩层平均厚度 15.47 m,为关键层 I;与煤层间距 36.5 m 的粗粒砂岩,岩层平均厚度 14.25 m,为关键层 II;以及与煤层间距 61.2 m 的细粒砂岩,岩层平均厚度 35.69 m,为关键层 III。结果表明,工作面顶板中存在多层厚度大、强度高、整体性强,且与煤层距离较近的厚硬岩层。其中,由于关键层 I 为煤层直接顶,随着工作面回采无法形成铰接结构,因此根据关键层定义该岩层并不能称为关键层,仅能作为承载层,承担上覆软弱岩层对煤层的应力,但为了统一表述文中将其称为关键层。

通过对 30202 工作面附近 14 个钻孔柱状(钻孔位置如图 1 所示)情况分析得到,沿着工作面推进方向,工作面上覆关键岩层的厚度表现出一定差异性。为表征工作面上覆关键岩层的厚度变化特征,通过克里金插值法得到关键岩层等值线,如图 3 所示。可以看出,30202 工作面上覆关键岩层的厚度沿工作面推进方向表现出“变厚度”特征,其中关键层 I 在工作面前 1 800 m 范围内厚度为 10~20 m,平均为 15 m,在工作面后 1 800 m 范围内厚度为 20~36 m,平均为 25 m;关键层 II 在工作面前 1 800 m 范围内厚度为 7~22 m,平均为 14 m,在工作面后 1 800 m 范围内厚度为 22~37 m,平均为 29 m;关键层 III 在工作面前 1 800 m 范围内厚度为 30~42 m,平均为 35 m,在工作面后 1 800 m 范围内厚度为 14~34 m,

平均为 22 m。因此,关键层 I、关键层 II 随工作面的推进其厚度呈增加趋势,其厚度变化最大角度约为 5° ,关键层 III 随着工作面的推进其厚度呈减小趋势。

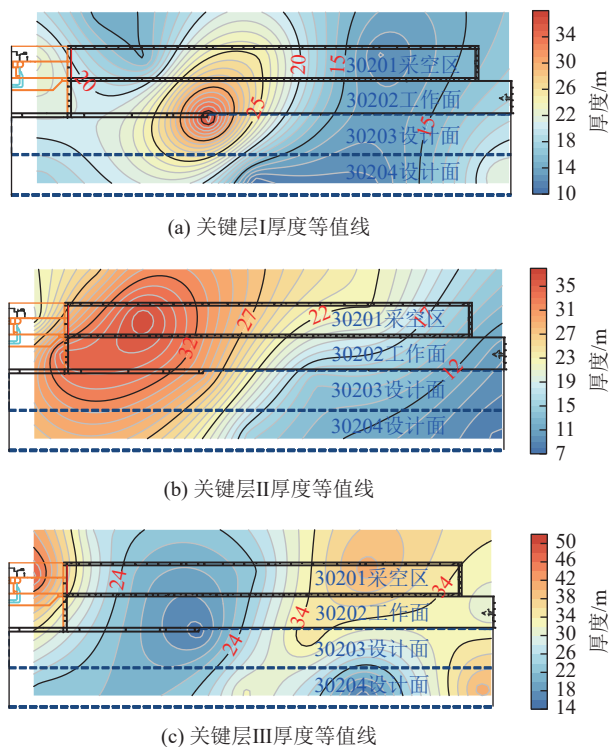


图 3 30202 工作面关键层等值线
Fig.3 Contour map of key strata at 30202 longwall face

通过对岩层厚度与所受应力之间的关系不断深入研究,相关学者指出随着岩层厚度增加,岩层所受

剪应力也会增加,剪应力也有可能诱发岩层的破断^[6,19-21]。为准确反映岩层的破断模式,根据断裂力学的概念,将拉应力主导并引起的破断称之为拉裂破断,由剪应力主导并引起的破断称之为剪切断裂。基于 30202 工作面顶板厚硬岩层表现的“变厚度”特征,建立采场变厚顶板岩层结构力学模型,统一分析不同厚度条件下岩层破断模式和破断力学机制。

2 采场变厚顶板岩层结构力学模型

2.1 采场变厚顶板岩层结构力学模型构建

为分析岩层在不同厚度条件下的应力变化特征和破断模式,通过结构力学分析,并结合 3-1 煤层上覆关键层厚度变化特征,建立采场变厚顶板岩层结构力学模型,如图 4 所示。其中,图 4a 为煤矿开采简化模型,模型中 X 为工作面推进方向, Y 为截面垂直方向, Z 为截面侧向方向。初次断裂前变厚顶板岩层可以简化为固支梁,假定岩层的截面宽度 b 为常数,且对称于通过形心的垂直轴,当工作面推进步距为 x (m) 时岩层厚度为 h_x (m),且岩层厚度按 $\alpha_x = \tan^{-1}(dh_x/dx)$ 的斜率增加,如图 4b 所示。同时,取岩层截面侧向应力为 0,即 $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$,这样岩层处于二维应力状态,如图 4c 所示,展示了变厚顶板岩层微元体处于二维应力状态下的内力素(N_x 、 M_z 、 Q_y)之间的关系,其中, N_x 为岩层的轴向力,假定为常数; M_z 为岩层沿 Z 方向的弯矩; Q_y 为岩层沿 Y 方向的剪力。

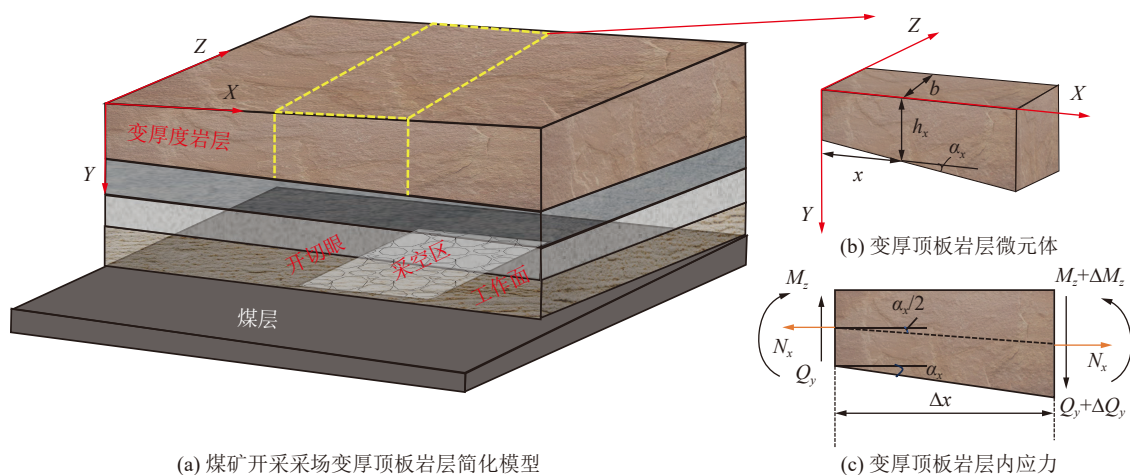


图 4 采场变厚顶板岩层结构力学模型
Fig.4 Structural mechanics model of variable-thickness roof strata in stope

由于岩层的形心位置沿工作面推进方向一直处于变化状态,故最方便的办法是不用 y 坐标,而选择一个其原点不随 x 变化的横截面坐标,根据这一点引入一个新的坐标系 ξ ,如图 5 所示。

2.2 采场变厚顶板岩层力学解析

基于采场变厚顶板岩层结构力学模型,建立变厚顶板岩层应力函数,根据变厚顶板岩层截面尺寸得到

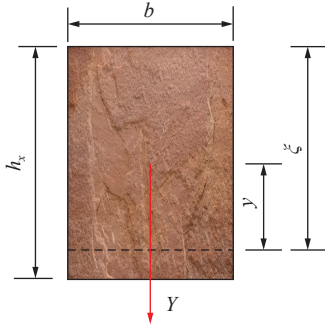


图 5 变厚顶板岩层截面尺寸

Fig.5 Section size of variable-thickness roof strata

$$\xi = \frac{h_x}{2} + y \quad (1)$$

对于等厚度岩层,沿工作面推进方向的拉应力按材料力学公式的表达式为

$$\sigma_x = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{I_z} y \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得到变厚顶板岩层沿工作面推进方向的拉应力公式为

$$\sigma_x = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{I_z} \left(\xi - \frac{h_x}{2} \right) \quad (3)$$

式中: σ_x 为变厚顶板岩层沿工作面推进方向的拉应力; A 为岩层横截面面积; I_z 为中心轴的惯性矩。

假设不存在体力,用应力表示平衡微分方程为

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial \xi} = 0 \quad (4)$$

因此,变厚顶板岩层沿工作面推进方向的垂向剪应力表达式为

$$\tau_{xy} = - \int \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} d\xi + g(x) \quad (5)$$

式中: $g(x)$ 为 x 的函数,由边界条件来确认。

将式(3)代入式(5),求解积分式,可得

$$\tau_{xy} = \xi \frac{N_x}{A^2} \frac{dA}{dx} + \frac{\xi}{2} (\xi - h_x) \left(\frac{M_z}{I_z} \frac{dI_z}{dx} - \frac{1}{I_z} \frac{dM_z}{dx} \right) + \xi \frac{M_z}{2I_z} \frac{dh_x}{dx} + g(x) \quad (6)$$

由于在 $\xi = 0$ 处 τ_{xy} 一定为 0^[22], 得到 $g(x) = 0$, 同时根据力矩平衡条件(图 4c), 可得关系式为

$$\frac{dM_z}{dx} = Q_y - N_x \tan \frac{\alpha_x}{2} = Q_y - \frac{N_x}{2} \frac{dh_x}{dx} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$\tau_{xy} = \xi N_x \left(\frac{1}{A^2} \frac{dA}{dx} + \frac{\xi - h_x}{4I_z} \frac{dh_x}{dx} \right) + \frac{\xi}{2} (\xi - h_x) \left(\frac{M_z}{I_z} \frac{dI_z}{dx} - \frac{Q_y}{I_z} \right) + \xi \frac{M_z}{2I_z} \frac{dh_x}{dx} \quad (8)$$

由于矩形截面中 $A = bh_x$ 、 $I_z = bh_x^3/12$, 因此式(8)等于

$$\tau_{xy} = \frac{6Q_y\xi}{bh_x^2} \left(1 - \frac{\xi}{h_x} \right) - \left(\frac{N_x\xi}{bh_x^2} + \frac{6M_z\xi}{bh_x^3} \right) \frac{dh_x}{dx} \left(2 - 3\frac{\xi}{h_x} \right) \quad (9)$$

式中: τ_{xy} 为变厚顶板岩层沿工作面推进方向的垂向剪力; $Q_y = xp_y/2$, p_y 为变厚顶板岩层单位长度上的沿截面垂直方向的外载荷; $M_z = x^2 p_y/2$ 。

将 $\xi = 0$ 代入式(3)、式(9)得到变厚顶板岩层在截面顶部的拉应力和剪应力为

$$\begin{cases} (\sigma_x)_R = -\frac{11x^2P_y}{4bh_x^2} \\ (\tau_{xy})_R = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将 $\xi = h_x/2$ 代入式(3)、式(9)得到变厚顶板岩层在截面中部的拉应力和剪应力为

$$\begin{cases} (\sigma_x)_C = \frac{x^2P_y}{4bh_x^2} \\ (\tau_{xy})_C = \frac{3xP_y}{4bh_x} - \frac{13x^2P_y}{16bh_x^2} \tan \alpha_x \end{cases} \quad (11)$$

将 $\xi = h_x$ 代入式(3)、式(9)得到变厚顶板岩层在截面底部的拉应力和剪应力为

$$\begin{cases} (\sigma_x)_B = \frac{13x^2P_y}{4bh_x^2} \\ (\tau_{xy})_B = \frac{13x^2P_y}{4bh_x^2} \tan \alpha_x \end{cases} \quad (12)$$

基于上述力学解析,将 30202 工作面关键层 II 粗粒砂岩作为表征岩层进行岩层受力分析,其相关力学参数见表 1,并通过关键层载荷计算得到关键层 II 所受载荷为 478.6 kPa。首先,假定岩层厚度变化斜率 $\alpha_x = 0$, 此时岩层视为“等厚度”岩层,将相关参数代入式(10)一式(12),计算得到在工作面不同推进距下,关键层 II 在截面不同区域的应力变化情况,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,随着工作面推进,等厚度岩层沿岩层截面方向所受拉应力由岩层中部向岩层底部呈逐渐增加趋势,表现出拉裂效应;由岩层中部向岩层顶部呈负值增加趋势,表现出挤压效应;并在岩层中部表现出拉裂效应与挤压效应的转变。同时,在回采初期,等厚度岩层所受剪应力整体较小,随着工作面推进,岩层截面不同区域所受剪应力均呈增加趋势,且岩层中部所受剪应力大于岩层底部和顶部的剪应力。

基于等厚度岩层在截面不同区域所受应力的变化情况,得到不同推进距下等厚度岩层所受应力与其力学强度关系曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知,在等厚度条件下,随着工作面推进岩层底部的拉应力首先达到抗拉强度,此时推进步

表 1 30202 工作面煤岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock mass in 30202 longwall face

岩性	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
粗粒砂岩	2 440	0.90	2.19	5.35	2.26	35
中粒砂岩	2 450	0.82	2.27	5.41	2.26	27
细粒砂岩	2 500	0.90	2.19	5.35	0.78	31
粉砂岩	2 400	1.16	3.92	11.90	2.24	35
泥岩	2 100	0.77	2.84	6.65	2.00	26
煤	1 330	0.59	0.92	2.11	2.30	28

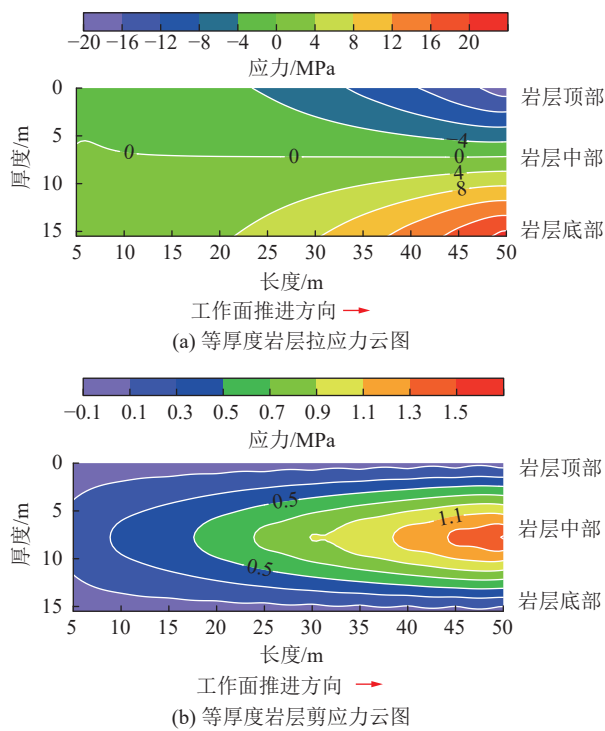


图 6 不同推进距离下等厚度岩层应力云图

Fig.6 Stress cloud diagram of constant-thickness rock strata under different advancing distances

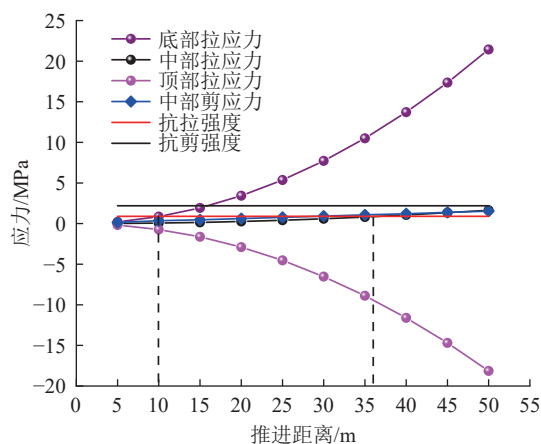


图 7 不同推进距离下等厚度岩层应力与力学强度关系曲线

Fig.7 Relationship curves between stress change and mechanical strength of constant-thickness strata under different advancing distances

距约为 10 m, 随后岩层中部的拉应力达到抗拉强度, 此时推进步距约为 36 m, 当岩层因拉应力作用形成的张开型裂纹超过岩层厚度一半时可认为岩层处于拉断状态^[23], 此时岩层将发生拉裂破断, 因此对于关键层 II 在厚度为 15 m 条件下主要呈现拉裂破断, 且岩层断裂距约为 36 m。

基于等厚度岩层破断演化过程分析得到, 当岩层发生拉裂破断时, 岩层底部拉应力先达到抗拉强度出现张开型裂纹, 当岩层中部拉应力达到抗拉强度时, 张开型裂纹发育到岩层中部, 此时岩层发生拉裂破断。因此, 拉裂破断过程中, 受拉应力作用形成的张开型裂纹沿岩层截面由下至上逐渐贯通, 并在岩层顶部表现出挤压效应, 岩层初次拉裂破断过程如图 8 所示。随着岩层厚度增加, 岩层所受剪应力增大, 当岩层因剪应力作用发生剪切断裂时, 根据岩层截面剪应力分布情况以及文献 [24-25] 研究得到, 随着工作面推进, 岩层底部所受剪应力呈增加趋势, 由于岩层中部剪应力大于岩层底部剪应力, 因此当岩层底部所受剪应力大于抗剪强度时, 岩层中部的剪应力必然能够满足抗剪强度, 使得岩层形成滑移

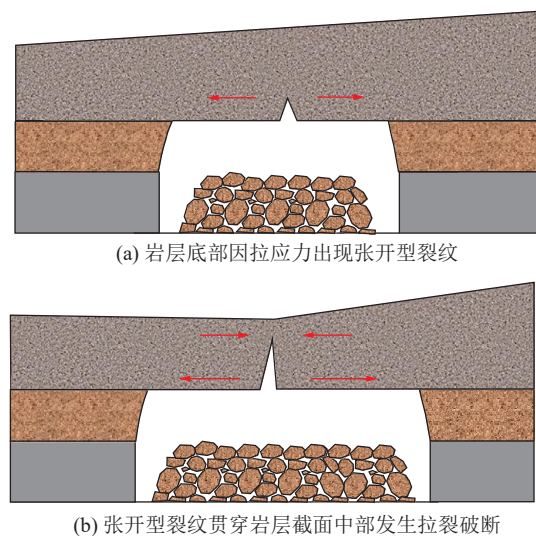


图 8 岩层拉裂破断过程

Fig.8 Rock tensile fracture process

型裂纹,并沿岩层截面发生全厚度剪切滑移现象,如图 9 所示,因此岩层发生剪切破断的必要条件为岩层底部剪应力达到抗剪强度。

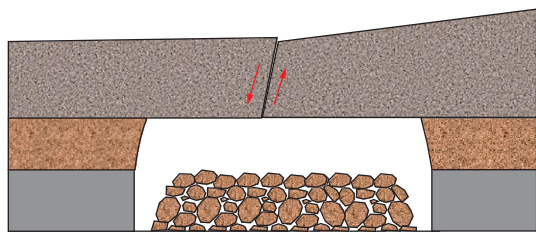


图 9 岩层因滑移型裂纹贯通发生剪切断裂

Fig.9 Shear fracture occurs in rock strata due to sliding crack coalescence

上述分析表明,岩层断裂力学特征主要表现为在岩层底部和中部因拉应力达到抗拉强度出现拉裂破断或岩层底部因剪应力达到抗剪强度出现全厚度剪切滑移形成剪切断裂。因此,文中关于变厚岩层破断模式分析,主要针对岩层底部和中部拉应力变化特征以及岩层底部剪应力变化特征进行分析,并将岩层底部和中部的拉应力表征为岩层所受拉应力,将岩层底部剪应力表征为岩层所受剪应力。

3 采场变厚顶板岩层破断机制影响因素分析

根据式(10)一式(12)可知,影响岩层破断机制的主要因素有岩层单位长度上沿截面垂直方向的外载荷 p_y ,岩层厚度 h_x ,工作面推进长度(或岩层暴露长度) x 以及岩层力学强度。在具体赋存条件下岩层单位长度上的外载荷为固定值,但不同岩性的岩层抗拉强度和抗剪强度存在一定差异;同时岩层厚度斜率 α_x 主要与工作面推进不同长度 x 下的岩层厚度 h_x 相关。因此,本节采用单因素控制变量法,探究岩层厚度斜率变化、岩层暴露长度、岩层抗拉强度和抗剪强度等因素对岩层破断模式的影响机制。

3.1 岩层厚度斜率变化影响分析

根据关键层Ⅱ在整个工作面内的厚度变化情况得到,该岩层随工作面推进其厚度变化最大角度约为 5° ,对应的厚度斜率近似为 0.09。为突出分析岩层厚度斜率变化对岩层破断模式的影响,以关键层Ⅱ物理力学参数为基础,将岩层厚度变化角度设为 $5^\circ \sim 50^\circ$,并以 5° 为间隔进行分析,则对应的岩层厚度斜率 α_x 分别为 0.09、0.18、0.27、0.36、0.47、0.58、0.70、0.84、1.00、1.19。计算得到在推进步距为 30 m 时不同厚度斜率下岩层受力变化情况,如图 10 所示。

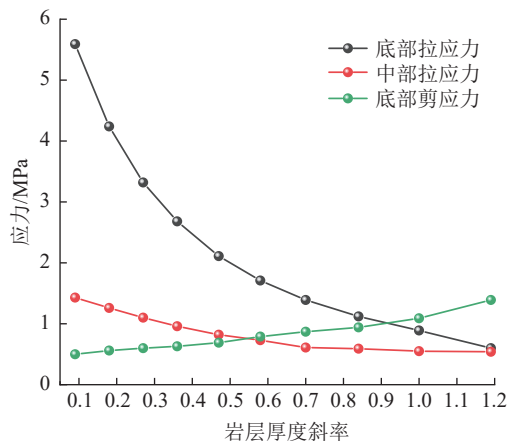


图 10 相同推进距离下岩层厚度斜率与应力关系曲线

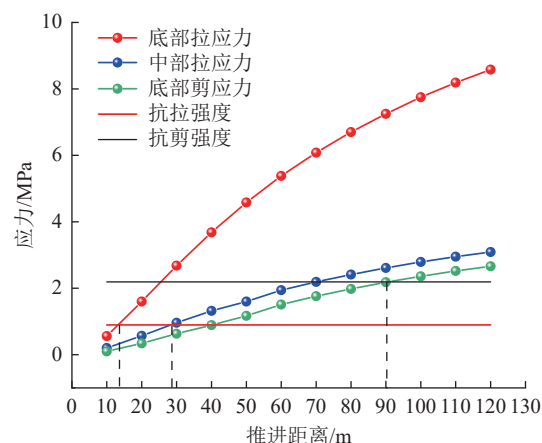
Fig.10 Relationship curves between rock thickness gradient and stress under same advancing distances

由图 10 可知,在相同步距下随着岩层厚度斜率的增加,岩层底部和中部的拉应力呈减小趋势,其中岩层底部拉应力降低速率明显大于中部拉应力降低速率;而岩层底部剪应力随岩层厚度斜率的增加呈增大趋势,且岩层所受拉应力的减小速率明显大于剪应力增加速率。由此可见,随着岩层厚度斜率的增加,岩层所受拉应力逐渐减小,而剪应力逐渐增大。即随着岩层厚度的增加,岩层所受主导应力由拉应力向剪应力转变,使得岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变。

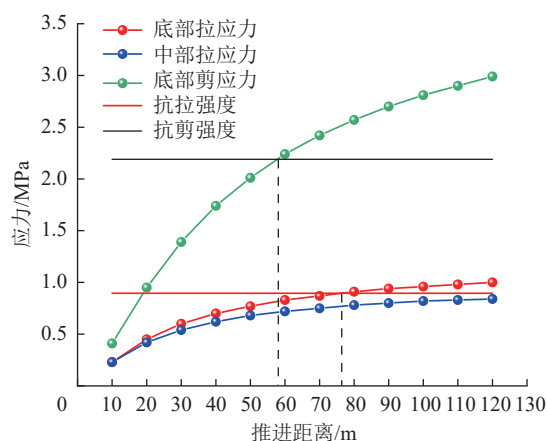
3.2 岩层暴露长度影响分析

图 11 为相同厚度斜率条件下岩层所受应力与岩层暴露长度之间的关系曲线。由图 11 可知,随着岩层暴露长度的增加,岩层所受拉应力与剪应力呈增加趋势,其中当岩层厚度斜率相对较小时(斜率 $\alpha_x = 0.09$),岩层厚度增加速率较小,此条件下岩层底部和中部所受拉应力增长速度明显大于岩层底部剪应力增长速度,如图 11a 所示,此时岩层因拉应力达到抗拉强度发生破断的速度明显大于岩层因剪应力达到抗剪强度发生破断的速度。其中,当岩层暴露长度为 29 m 时岩层发生初次破断形成拉裂破断,对应的岩层厚度为 10.6 m;随着工作面推进,若岩层暴露长度达 61 m 时发生周期破断,则岩层形成剪切断裂,对应的岩层厚度为 16.1 m,此时变厚度岩层呈现拉裂-剪切混合破断,并以拉裂破断为主。当岩层厚度斜率相对较大时(斜率 $\alpha_x = 0.36$),此条件下岩层底部和中部所受拉应力增长速率明显小于岩层底部剪应力增长速率,并随着岩层暴露长度的增加,岩层所受拉应力增长速率趋于减缓,如图 11b 所示,此时岩层因剪应力达到抗剪强度发生破断的速度明显大于岩层因拉应力达到抗拉强度发生破断的速度。其中,

当岩层暴露长度为 58 m 时岩层发生初次破断形成剪切断裂,对应的岩层厚度为 28.9 m,随着工作面推进,若岩层暴露长度为 18 m 时发生周期破断,则岩层形成拉裂破断,此时变厚度岩层呈现剪切-拉裂混合破断,并以剪切破断为主。



(a) 岩层厚度斜率 $\alpha_x=0.09$



(b) 岩层厚度斜率 $\alpha_x=0.36$

图 11 相同斜率条件下岩层应力与岩层暴露长度关系曲线

Fig.11 Relationship curves between rock stress and unsupported span length of rock strata under same thickness gradient

综上所述,在岩层厚度斜率一定条件下,随着岩层暴露长度的增加,岩层所受拉应力以及剪应力均呈增加趋势,同时随着岩层厚度斜率的增加,岩层底部所受剪应力的增长速率明显大于岩层底部和中部拉应力变化速率,使得岩层所受主导应力由拉应力向剪应力转变,导致岩层的破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变。其中,在岩层厚度斜率为 0.09 条件下,岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度为 16.1 m。

3.3 力学强度影响分析

图 12 为岩层暴露长度与抗拉强度之间的关系曲线。由图 12 可知,岩层的暴露长度随抗拉强度的增大而增加,其中当岩层厚度斜率较小时 ($\alpha = 0.09$),

岩层暴露长度的增加速率较小,呈线性增长;随着岩层厚度斜率的增加 ($\alpha = 0.36/0.47/0.58$),岩层暴露长度的增加速率明显增大,并呈指数型增长。因此,岩层的暴露长度随抗拉强度的增大而增加,并在不同的岩层厚度斜率下呈现不同的增加趋势。

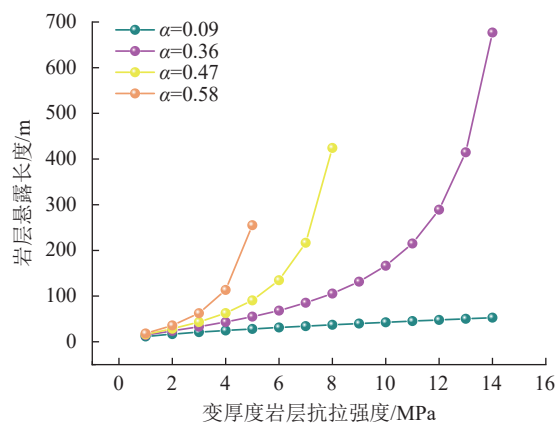


图 12 岩层暴露长度与抗拉强度关系曲线

Fig.12 Relationship curves between tensile strength and unsupported span length of rock strata

图 13 为岩层暴露长度与抗剪强度之间的关系曲线,由图 13 可知,变厚度岩层的暴露长度同样随着抗剪强度的增大而增加,并呈现明显的阶段特征。其中,当岩层厚度斜率较小时 ($\alpha = 0.09$),岩层的暴露长度随着抗剪强度的增大呈线性增加趋势,增长速率近似保持固定不变;随着岩层厚度斜率的增加 ($\alpha = 0.36/0.58/1.19$),岩层暴露长度由线性增加转变为指数型增加,且岩层厚度斜率越大,岩层暴露长度由线性增加转变为指数型增加的突变点越小。

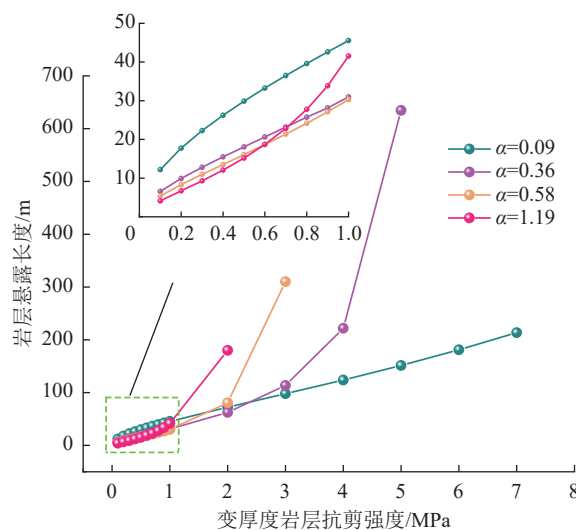


图 13 岩层暴露长度与抗剪强度关系曲线

Fig.13 Relationship curves between shear strength and unsupported span length of rock strata

综上分析,由于岩体抗拉强度、抗剪强度的增加,岩体的整体性增强,并随着岩层厚度斜率增加,岩层厚度急剧增加,使得岩层发生破断难度急剧增大,因此需要更大的开采空间才能达到岩层断裂的条件。基于此,为了降低厚硬顶板大面积悬顶状态,可通过相关措施降低岩层力学强度或岩层垮落厚度。

4 采场变厚顶板岩层破断模式数值模拟分析

4.1 模型建立

为统一分析厚硬岩层在不同厚度下的破断模式,确定具体条件下不同破断模式转变的岩层临界厚度,基于 30202 工作面地质条件和开采情况,建立 3DEC 数值计算模型,如图 14 所示。其中,关键层 I 为工作面直接顶,随工作面回采其下部应力得到释放,使其并不能完全表征变厚顶板岩层结构力学模型中的受力情况,同时关键层 III 的厚度斜率变化与关键层 II 相比较小,因此选择关键层 II 作为变厚顶板岩层目标层,其他岩层为等厚岩层;根据关键层 II 厚度最大变化情况,赋予关键层 II 沿工作面推进方向以 0.09 的厚度斜率增加。

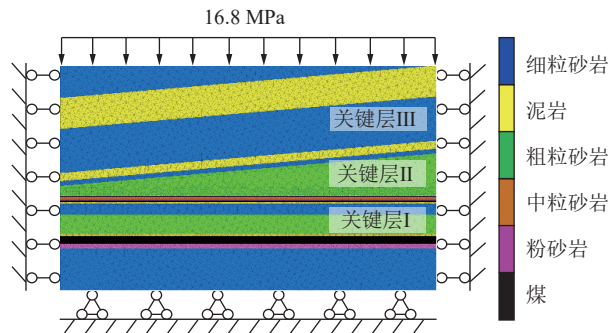


图 14 变厚顶板岩层数值计算模型
Fig.14 Numerical model of variable-thickness roof strata

模型尺寸为 300 m×10 m×182 m(长×宽×高),根据岩层的力学性质和厚度对岩层进行网格划分,模型底部为固定边界,四周为位移约束边界,模型上部施加等效载荷 16.8 MPa。为去除边界效应,模型两端留设 70 m 宽边界煤柱。模拟工作面采高 6 m,走向推进 160 m,开采范围内对应的岩层的厚度变化为 7.6~20.5 m,采用分步开挖,每步推进 10 m,共计 16 步。块体采用莫尔-库仑模型,节理采用库仑滑移模型。工作面煤岩层和节理的物理力学参数见表 1 和表 2。

4.2 计算结果与讨论

图 15 为工作面推进不同距离时上覆岩层下沉位移及塑性区变化情况。其中,图 15a 为工作面推

表 2 数值模型节理物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of joints in numerical model

岩性	法向刚度/ GPa	剪切刚度/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
粗粒砂岩	0.65	0.43	36.94	1.01	0.42
中粒砂岩	0.83	0.61	32.85	0.56	0.43
细粒砂岩	0.87	0.65	32.85	0.53	0.41
粉砂岩	1.10	0.66	40.00	1.65	0.40
泥岩	0.66	0.50	34.96	1.00	0.21
煤	0.29	0.25	33.00	0.07	0.03

进 30 m 时工作面覆岩下沉位移及塑性区情况,此时关键层 I 在采空区两端出现张拉破坏区,但破坏区域并未贯通岩层横截面,因此岩层并未发生垮落,工作面覆岩下沉位移较小;同时由于回采距离较小,变

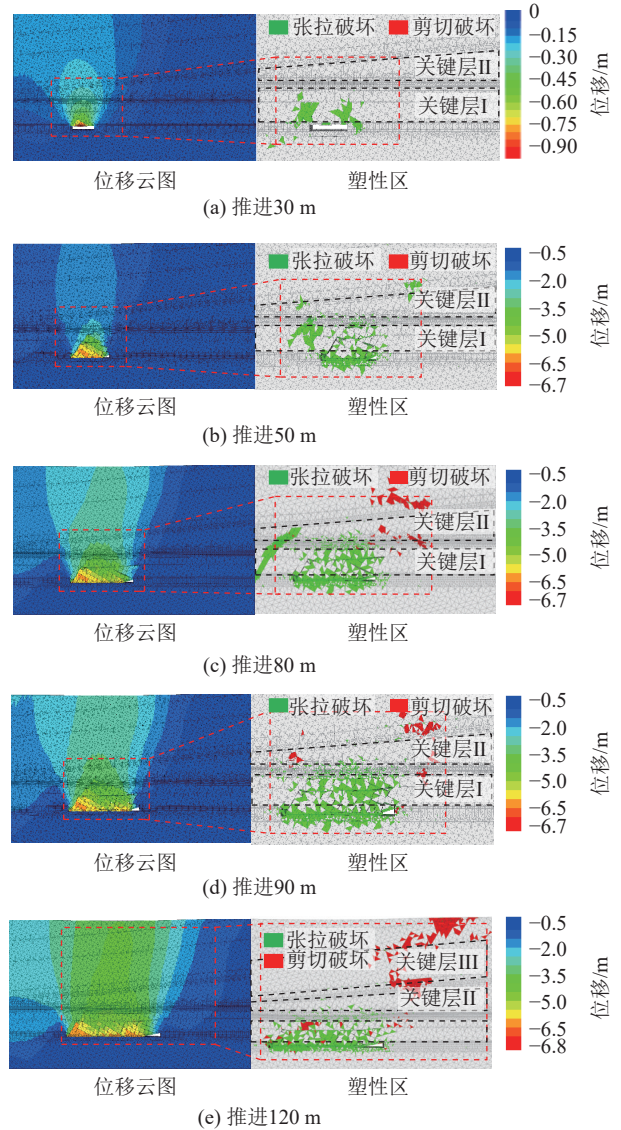


图 15 变厚顶板岩层破断模式计算结果
Fig.15 Fracture mode results of variable-thickness roof strata

厚顶板岩层(关键层Ⅱ)并未出现明显破坏,此阶段开采范围对应的关键层Ⅱ的厚度为 7.6~10.1 m。图 15b 为工作面推进 50 m 时工作面覆岩下沉位移及塑性区情况,此时煤层上部至关键层Ⅱ下部岩层发生明显下沉位移,且关键层Ⅰ在采空区上方及两端形成张拉破坏区,表明关键层Ⅰ破断主要受拉应力作用影响;此阶段关键层Ⅱ仅在开切眼侧形成一定范围的张拉破坏区域,开采范围对应关键层Ⅱ的厚度为 7.6~11.7 m。图 15c 为工作面推进 80 m 时工作面覆岩下沉位移及塑性区情况,此时受工作面回采影响关键层Ⅱ出现明显破坏区域,其中关键层Ⅱ在开切眼侧(对应岩层厚度为 7.6 m)张拉破坏区域贯通整个岩层厚度,因此岩层在开切眼侧发生张拉破坏,并在工作面前方 30 m 范围内分别在关键层Ⅱ和关键层Ⅲ岩层底部出现不同程度的剪切破坏区域,此时关键层Ⅱ形成的剪切破坏区域对应的岩层厚度为 14.1~16.5 m。图 15d 为工作面推进 90 m 时工作面覆岩下沉位移及塑性区情况,此时关键层Ⅱ相较于图 15c 在工作面前方 20 m 范围内的剪切破坏区域明显增多,并贯通整个岩层厚度,此时关键层Ⅱ出现剪切破断形成整体切落,关键层Ⅱ切落区域对应的岩层厚度为 16.5 m。图 15e 为工作面推进 120 m 时工作面覆岩下沉位移及塑性区情况,随着工作面继续推进,工作面覆岩破坏区域进一步向上发育,此时受超前应力等影响在工作面前方 10~20 m 内关键层Ⅲ形成的剪切破坏区域贯通整个岩层厚度,此时关键层Ⅲ发生剪切滑落失稳。

通过数值模拟试验得到,关键层Ⅰ随着工作面回采其断裂模式为拉裂破断,关键层Ⅱ在回采初期其断裂模式为拉裂破断,但随着岩层厚度的增加,特别是当岩层厚度大于 16.5 m 时,关键层Ⅱ出现剪切断裂,关键层Ⅲ由于厚度较大其断裂模式同样为剪切断裂。结果表明,随着岩层厚度的增加,岩层所受主导应力由拉应力向剪应力转变,使其破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”演化,其中在 30202 工作面赋存条件下岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度为 16.5 m,数值模拟试验结果与力学计算结果基本一致。同时,随着工作面的推进和岩层厚度的增加,当岩层发生剪切破坏时,破坏区域主要沿岩层截面底部向上部发育,这与文献[24-25]分析结果一致。

5 厚硬岩层破断响应与能量释放规律分析

基于力学计算和数值模拟分析得出,随着岩层厚度的增加,岩层所受主导应力由拉应力向剪应力

转变,使得岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”演化。其中,在 30202 工作面地质条件下,岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度为 16.5 m。由于在工作面前 1 800 m 范围内关键层Ⅰ厚度平均为 15.0 m、关键层Ⅱ厚度平均为 14.0 m、关键层Ⅲ厚度平均为 35.0 m,因此关键层Ⅰ、关键层Ⅱ的破断主要呈拉裂破断,关键层Ⅲ的破断呈剪切断裂。为了验证 30202 工作面上覆不同厚度关键岩层破断模式的差异性和厚硬岩层由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度的准确性,基于工作面前 1 800 m 范围内的关键层Ⅰ、关键层Ⅱ和关键层Ⅲ所表征的岩层平均厚度,将其作为不同厚度岩层进行对比分析,结合现场微震监测数据通过震源机制响应特征分析工作面上覆不同厚度岩层的破断模式,并采用数值模拟试验得到不同厚度岩层在不同破断模式下形成的覆岩结构,揭示不同厚度岩层破断模式与矿震活动规律的关联性。

5.1 微震震源破裂机制响应规律分析

根据已有研究,工作面顶板微震事件的发生多由本工作面顶板岩层的不同类型破断引起^[26-27]。因此随着微震监测系统在煤矿顶板灾害防治中广泛应用,基于微震监测的震源破裂机制解析技术可应用于岩层破裂机制及预警研究中。根据 30202 工作面安装的 ARAMIS 微震监测系统(图 1),工作面推进 420~450 m 过程中在工作面上覆不同层位关键层范围内发生了 11 次典型的大能量($E \geq 10^3$ J)微震事件,如图 16a 所示。基于混合矩张量反演方法^[27-29],对 11 次大能量微震事件的震源机制进行求解,分析微震事件的震源机制响应特征,并得到对应微震事件的震源机制沙滩球分布情况,如图 16b 所示,其中 ISO 为震源破裂的各向同性、CLVD 为轴向拉伸、DC 为剪切成分。并通过 CLVD-ISO 钻石图^[30-31]对 11 次大能量微震事件的震源机制沙滩球计算结果进行统计分析,如图 17 所示。图中第一与第三象限边缘分别对应拉伸破裂与压缩破裂,当 $C_{DC} \leq 40\%$ 且 $C_{ISO} > 0$ 时,为拉裂破断(第一象限);当 $C_{DC} \leq 40\%$ 且 $C_{ISO} < 0$ 时,为压缩破断(第三象限);当 $C_{DC} \geq 60\%$ 时,为剪切破断;当 $40\% < C_{DC} < 60\%$ 且 $C_{ISO} > 0$ 时,为张拉-剪切混合破断(第一象限);当 $40\% < C_{DC} < 60\%$ 且 $C_{ISO} < 0$ 时,为压缩-剪切混合破断(第三象限),其中, C_{ISO} 为震源破裂各向同性的占比; C_{DC} 为剪切成分的占比。

根据图 16a 可知,在工作面推进过程中,关键层Ⅰ发生 2 次大能量微震事件,分别为微震事件 1、微

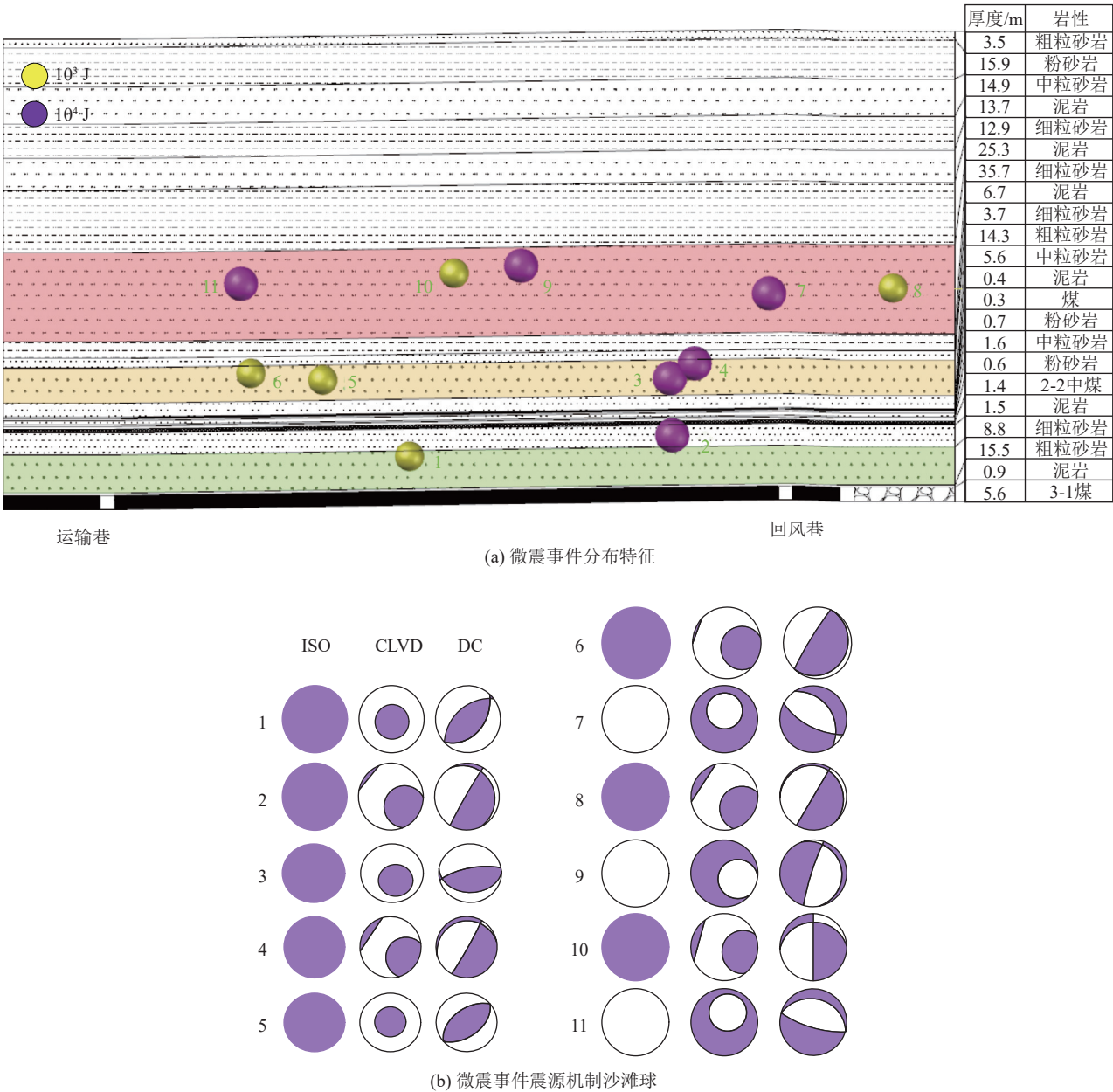


图 16 30202 工作面上覆岩层微震事件分布及微震事件震源机制沙滩球
Fig.16 Microseismic events distribution and focal mechanism beach ball diagrams in overlying strata of 30202 longwall face

震事件 2; 关键层 II 发生 4 次大能量微震事件, 分别为微震事件 3 ~ 微震事件 6; 关键层 III 发生 5 次大能量微震事件, 分别为微震事件 7 ~ 微震事件 11。基于图 16b 和图 17 分析得到, 微震事件 1、2、3、5、6 破裂方式为拉裂破断, 微震事件 4、8、10 破裂方式为剪切-拉裂混合破断, 但主要以剪切破坏为主, 微震事件 11 破裂方式为压缩破断, 微震事件 7、9 破裂方式为剪切-压缩混合破断, 同样以剪切破坏为主。因此, 基于微震事件层位分布以及微震事件震源机制求解得到, 30202 工作面关键层 I、关键层 II 的破断模式主要为拉裂破断; 关键层 III 的破断模式主要为剪切断裂。

通过对 30202 工作面顶板 3 层目标岩层的震源

破裂机制进行对比分析得到, 当岩层厚度小于临界厚度时其破断主要呈拉裂破断, 随着岩层厚度的增加, 当岩层厚度大于临界厚度时其破断主要呈剪切断裂。验证了 30202 工作面上覆不同厚度关键岩层破断模式的差异性和厚硬岩层由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度的准确性。

5.2 厚硬岩层破断所成结构

钱鸣高院士等^[18, 32] 基于大量的现场观测提出了砌体梁结构模型, 在砌体梁模型中, 一般考虑岩层破断形成砌体结构是由于岩层的拉裂破断造成的; 对于厚度较大的岩层, 岩块难以回转下沉, 易发生全厚度切落现象^[15-16, 32-33]。基于此, 结合岩层在断裂前是

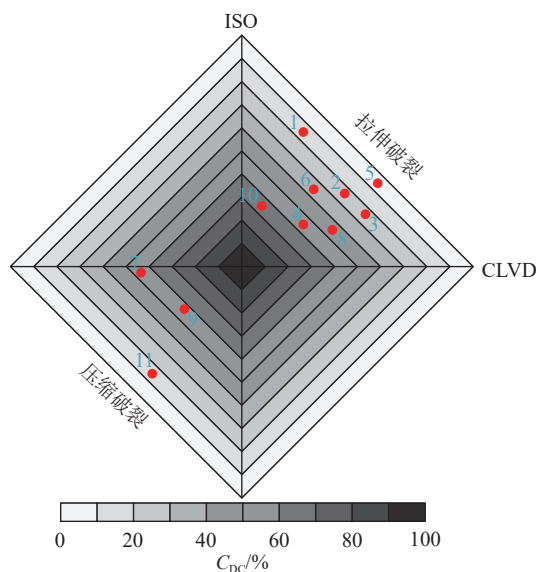


图 17 11 次大能量微震事件的 CLVD-ISO 钻石图

Fig.17 CLVD-ISO diamond plot for 11 high-energy microseismic events

否能够触矸可判断得到,当岩层在拉应力主导作用下发生拉裂破断时,易形成砌体结构或悬臂结构;当岩层在剪应力主导下发生剪切断裂时,岩层剪切滑落失稳易形成切落台阶结构或悬臂结构。

基于上述分析,根据 30202 工作面地质条件建立 UDEC 数值计算模型,如图 18 所示,岩层和节理的物理力学参数见表 1 和表 2。基于关键层 I、关键层 II 和关键层 III 所表征的岩层厚度,将其作为不同厚度岩层的目标层进行对比分析,得到不同目标层破断形成的覆岩结构,并根据上述岩层不同破断模式与其形成的覆岩结构的关系,确定 30202 工作面上覆不同厚度关键岩层所表现的破断模式,进一步验证 30202 工作面上覆不同厚度关键岩层破断模式的差异性和厚硬岩层由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度的准确性。

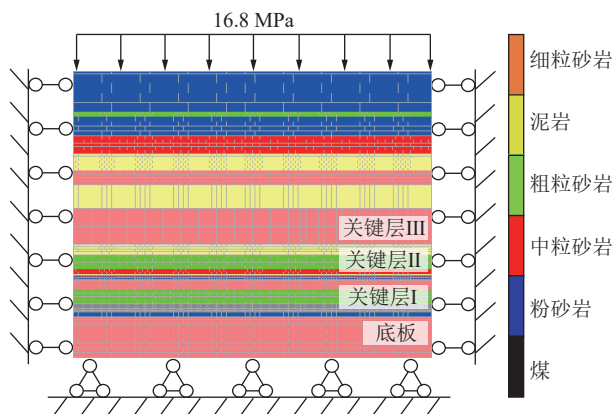
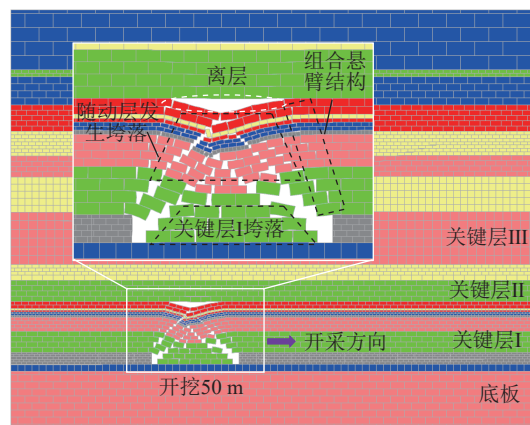


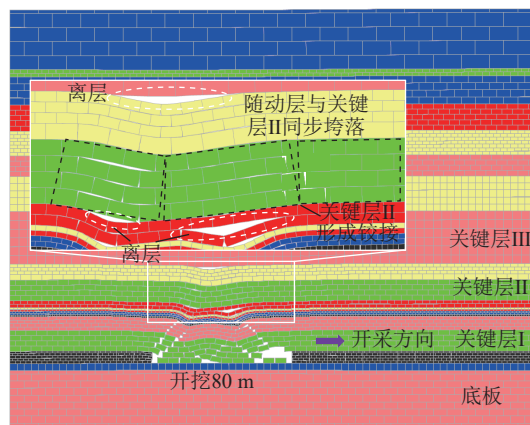
图 18 数值计算模型

Fig.18 Number calculation model

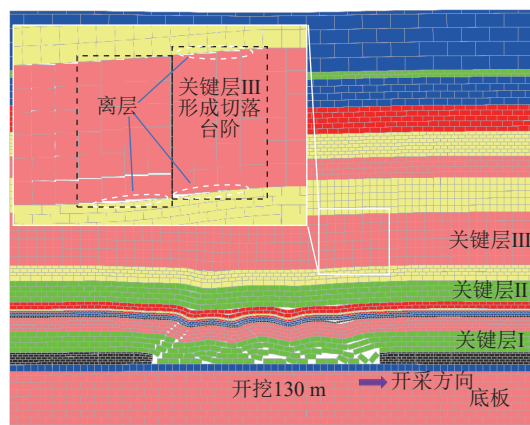
图 19 为 30202 工作面覆岩破断运移情况。其中,当工作面回采 50 m 左右时,关键层 I 发生垮落,其上覆软弱岩层发生同步运动,形成组合悬臂结构,并与关键层 II 形成离层,如图 19a 所示;当工作面推进 80 m 左右时,受垮落矸石对采空区充填作用,关键层 II 在垮落前发生触矸形成砌体梁结构,其上覆软弱岩层随关键层 II 发生同步运动,并与关键层 III 形成离层,如图 19b 所示;当工作面推进 130 m 左右时,关键层 III 发生全厚度切落,由于关键层 III 在完全



(a) 工作面推进50 m



(b) 工作面推进80 m



(c) 工作面推进130 m

图 19 30202 工作面覆岩运移情况

Fig.19 Overburden rock migration at 30202 longwall face

切落前能够达到触矸状态,使得岩层垮落后形成切落台阶结构,如图 19c 所示。

上述分析表明,随着 30202 工作面推进,工作面上覆关键岩层因所受应力以及与煤层距离的不同,使得不同厚度的关键岩层破断形成不同结构。其中,关键层 I 及其上覆随动层形成组合悬臂结构,关键层 II 形成砌体梁结构,关键层 III 形成切落台阶结构。根据岩层所成结构与破断模式的关系得出,关键层 I、关键层 II 形成悬臂结构和砌体结构主要原因为岩层厚度小于岩层临界厚度使其受拉应力主导发生拉裂破断所致,且关键层 I 垮落前无法达到触矸状态,关键层 II 垮落前可达到触矸状态;关键层 III 形成切落台阶结构主要原因为岩层厚度大于岩层临界厚度使其受剪应力主导发生剪切断裂形成全厚度切落所致,并在完全切落前可达到触矸状态。所得结论进一步验证了 30202 工作面上覆不同厚度关键岩层破断模式的差异性和厚硬岩层由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度的准确性。

5.3 厚硬岩层破断模式与能量释放关系

从能量角度来说,矿震事件的发生是岩层破断过程中弹性能释放的结果^[25]。为揭示厚硬岩层不同破断模式与矿震活动的关联性,结合工作面微震事件实测数据(图 20)和不同厚度关键岩层破断形成的覆岩结构,构建厚硬岩层下采场覆岩结构演化模型,如图 21 所示,对工作面回采过程中采场覆岩结构形成、演化与矿震活动的全过程进行反演分析,进而明晰岩层不同破断模式与能量释放的关系。其中,根据工作面微震事件分布情况(图 20)可以看出,工作面回采过程中关键层 I 中多为 $10 \sim 10^2$ J 能级事件,

关键层 II 中多为 $10^2 \sim 10^3$ J 能级事件,关键层 III 中多为 $10^3 \sim 10^5$ J 能级事件。结合 5.2 节厚硬岩层破断形成的覆岩结构演化过程得到,工作面回采过程中采场覆岩结构形成、演化与矿震活动的全过程共经历 3 个阶段。

第 1 阶段:随着工作面推进,关键层 I 所受拉力大于抗拉强度,产生张开型裂纹,随着张开型裂纹发育,岩层积聚的弹性能得到释放,当工作面推进 50 m 左右时张开型裂纹贯通岩层截面,岩层发生拉裂破断,此阶段释放的弹性能形成 $10 \sim 10^2$ J 矿震事件,此时覆岩离层发育至关键层 II 下部,关键层 II 处于稳定阶段,关键层 II 下方形成离层空间,使得关键层 II 不断积聚弹性能,如图 21a 所示。由于关键层 I 紧邻煤层,煤层采出后关键层 I 极限下沉量小于可能下沉量,使得关键层 I 在垮落前难以触矸,形成悬臂结构,期间上覆随动层随关键层 I 发生同步运动。

第 2 阶段:随着工作面继续推进,垮落区高度增加,当工作面推进 80 m 左右时关键层 II 由于所受拉力达到抗拉强度,岩层形成拉裂破断,使得岩层积聚的弹性能得到释放,释放的弹性能形成 $10^2 \sim 10^3$ J 矿震事件;随着关键层 II 变形破断,其上覆随动层发生同步变形破断,覆岩离层位置向上发展,此阶段关键层 III 处于稳定阶段,覆岩离层位置发育到关键层 III 下方,使得关键层 III 不断积聚弹性能,如图 21b 所示。由于关键层 II 下方垮落矸石对采空区的充填作用,其极限下沉量大于可能下沉量,使得关键层 II 在垮落前达到触矸状态,因此关键层 II 变形破断形成砌体结构。

第 3 阶段:随着工作面继续推进,离层在垂直方

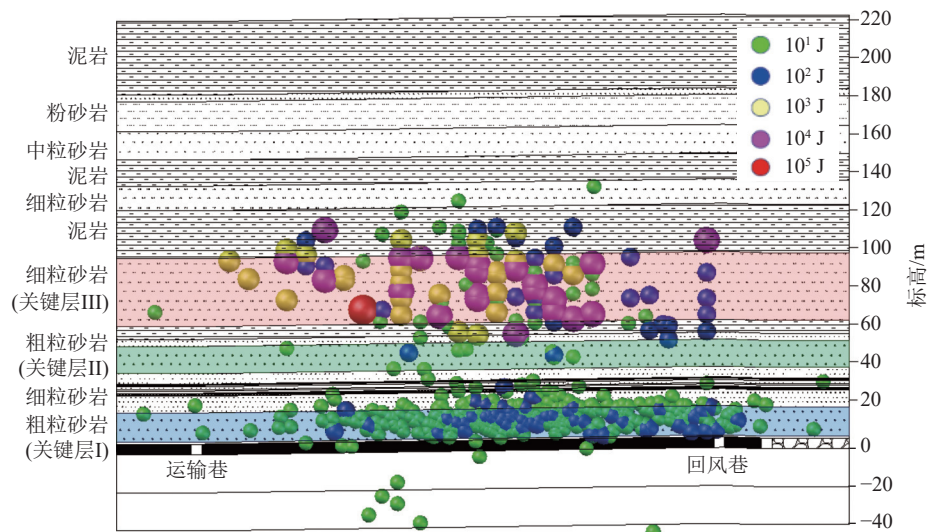


图 20 30202 工作面微震事件垂直分布

Fig.20 Vertical distribution map of microseismic events at 30202 longwall face

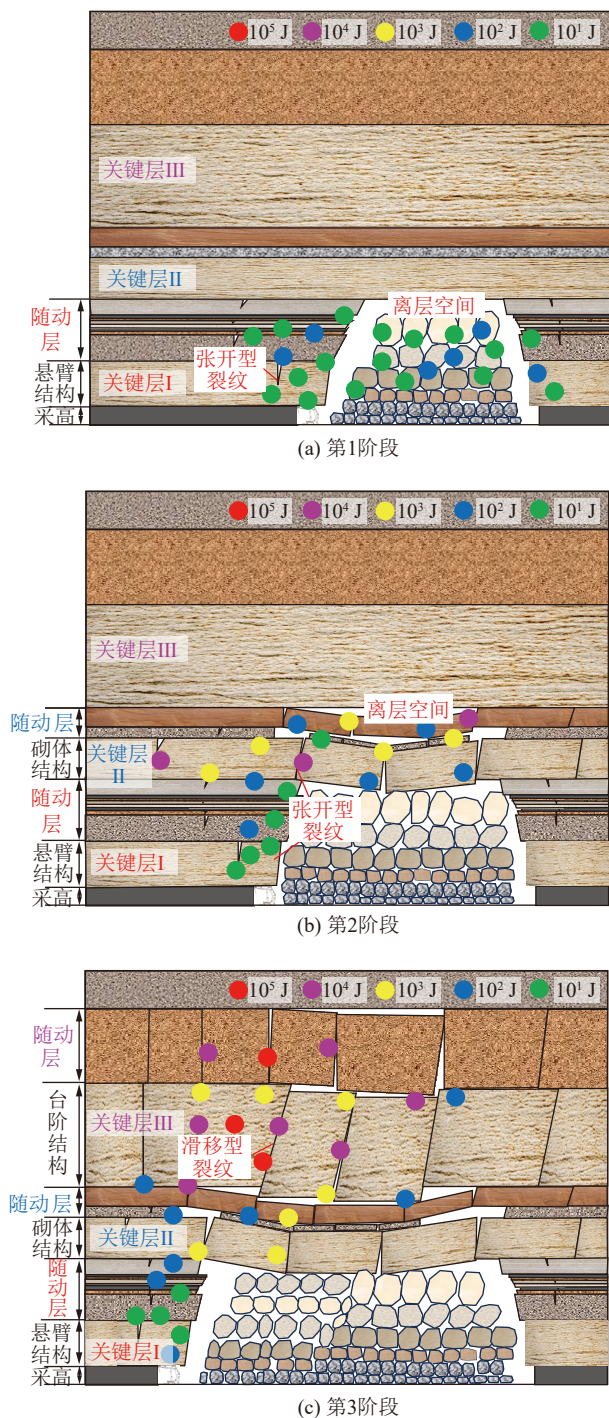


图 21 30202 工作面厚硬岩层下采场覆岩结构演化模型
Fig.21 Structure evolution model of overlying strata in stope beneath thick-hard rock strata at 30202 longwall face

向继续发育。当工作面推进 130 m 左右时关键层Ⅲ所受剪应力达到抗剪强度时,岩层形成滑移型裂纹,使得岩层积聚的弹性能达到释放,随着工作面推进,岩层发生全厚度切落,如图 21c 所示,此阶段释放的弹性能形成 $10^3 \sim 10^5$ J 能级矿震事件。同样受下方垮落矸石对采空区充填的影响,关键层Ⅲ极限下沉量大于可能下沉量,使得关键层Ⅲ在垮落前达到触

矸状态,形成切落台阶结构,此时覆岩垮落高度达到最大值。

基于 30202 工作面厚硬岩层下采场覆岩结构演化模型分析得到,受岩层厚度及其与煤层距离影响,随着岩层厚度的增加,岩层因剪切断裂形成的切落台阶结构所释放的弹性能大于岩层因拉裂破断形成的砌体结构和悬臂结构所释放的弹性能,即岩层因剪切破断所释放的能量大于岩层因拉裂断裂所释放的能量。同时,随着岩层厚度的增加,易导致下伏煤层垂直应力集中^[34],为煤矿安全回采带来重大影响。因此,为了降低工作面上覆厚硬岩层破断所释放能量,可改变岩层垮落厚度或岩层断裂尺寸,进而达到采场矿压控制及动力灾害防治的要求。

6 结 论

1) 基于煤层顶板厚硬岩层表现出的“变厚度”特征,建立了采场变厚顶板岩层结构力学模型。通过分析岩层厚度斜率、岩层悬露长度、岩层强度等因素对岩层破断模式的影响机制,得到随着岩层厚度斜率的增加,岩层破断模式由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变,同时岩层的悬露长度随着抗拉强度和抗剪强度的增加而增加,并在不同的岩层厚度斜率下呈现不同的增加趋势。

2) 基于采场变厚顶板岩层力学计算以及岩层破断模式数值模拟分析,确定在 30202 工作面赋存条件下厚硬岩层由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度为 16.5 m。验证得到,随着岩层厚度的增加发生剪切破坏时,破坏区域主要沿岩层截面底部向上部发育。

3) 通过现场微震震源破裂机制响应规律以及厚硬岩层破断所成结构分析得到,30202 工作面回采前期随着工作面推进,由于关键层Ⅰ、关键层Ⅱ的厚度小于岩层临界厚度,受拉应力主导形成拉裂破断;关键层Ⅲ厚度由于大于岩层临界厚度,受剪应力主导形成剪切断裂。验证了 30202 工作面不同厚度关键岩层破断模式的差异性和厚硬岩层由“拉裂破断”向“剪切断裂”转变的岩层临界厚度的准确性。

4) 构建了厚硬岩层下采场覆岩结构演化模型,通过分析厚硬岩层不同破断模式与矿震活动规律的关联性得到,在不同厚度岩层破断模式下,岩层因剪切破断所释放的能量大于岩层因拉裂断裂所释放的能量。为了降低工作面上覆厚硬岩层破断所释放能量,并解决厚硬岩层大面积悬顶状态,可通过改变岩

层垮落厚度或岩层断裂尺寸,进而达到采场矿压控制及动力灾害防治的要求。

参考文献(References):

- [1] 蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(3): 5-13.
CAI Meifeng. Key theories and technologies for surrounding rock stability and ground control in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(3): 5-13.
- [2] 张俊文, 白旭阳, 董续凯, 等. 煤岩动力灾害结构场孕育演化及调控技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 82-95.
ZHANG Junwen, BAI Xuyang, DONG Xukai, et al. Structural field breeding and evolution and control technology of coal-rock dynamic disasters[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 82-95.
- [3] 王书文, 智宝岩, 杜涛涛, 等. 厚硬顶板潜在矿震风险地面压裂预控技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 1-11.
WANG Shuwen, ZHI Baoyan, DU Taotao, et al. Ground fracturing pre-control technology for potential mine seismic risk of thick and hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 1-11.
- [4] 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.
- [5] NING J G, WANG J, TAN Y L, et al. Mechanical mechanism of overlying strata breaking and development of fractured zone during close-distance coal seam group mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(2): 207-215.
- [6] 左建平, 于美鲁, 孙运江, 等. 不同厚度岩层破断模式转变机理及力学模型分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1449-1463.
ZUO Jianping, YU Meilu, SUN Yunjiang, et al. Analysis of fracture mode transformation mechanism and mechanical model of rock strata with different thicknesses[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1449-1463.
- [7] 左建平, 于美鲁, 胡顺银, 等. 不同厚度岩层破断模式实验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 88-96.
ZUO Jianping, YU Meilu, HU Shunying, et al. Experimental investigation on fracture mode of different thick rock strata[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 88-96.
- [8] 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.
- [9] 蒋金泉, 张培鹏, 聂礼生, 等. 高位硬厚岩层破断规律及其动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1366-1374.
JIANG Jinquan, ZHANG Peipeng, NIE Lisheng, et al. Fracturing and dynamic response of high and thick stratas of hard rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1366-1374.
- [10] 秦广鹏, 蒋金泉, 张培鹏, 等. 硬厚岩层破断机理薄板分析及控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(5): 726-732.
QIN Guangpeng, JIANG Jinquan, ZHANG Peipeng, et al. Thin plate analysis of hard thick strata failure mechanism and its control technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(5): 726-732.
- [11] 张广超, 曲治, 孟祥军, 等. 远场高位厚硬岩层破断运动机理及响应规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 12-22.
ZHANG Guangchao, QU Zhi, MENG Xiangjun, et al. Study on mechanism and response of fracture and movement of the far-field high-position hard-and-thick stratum[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 12-22.
- [12] 张明, 姜福兴, 陈广尧, 等. 基于厚硬岩层运动状态的采场应力转移模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1396-1407.
ZHANG Ming, JIANG Fuxing, CHEN Guangyao, et al. A stope stress transfer model based on the motion state of thick and hard rock strata and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1396-1407.
- [13] CHEN J C, ZHOU L, XIA B W, et al. Numerical investigation of 3D distribution of mining-induced fractures in response to long-wall mining[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(1): 889-916.
- [14] JU Y, WANG Y L, SU C S, et al. Numerical analysis of the dynamic evolution of mining-induced stresses and fractures in multilayered rock strata using continuum-based discrete element methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 113: 191-210.
- [15] ZUO J P, YU M L, LI C Y, et al. Analysis of surface cracking and fracture behavior of a single thick main roof based on similar model experiments in western coal mine, China[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(1): 657-680.
- [16] 任艳芳. 浅埋深工作面基岩层全厚切落的时空演化过程[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 561-570.
REN Yanfang. Spatiotemporal evolution process of full thickness cutting of roof bedrock layer in shallow buried working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 561-570.
- [17] 夏彬伟, 李晓龙, 卢义玉, 等. 大同矿区坚硬顶板破断步距及变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1038-1044.
XIA Binwei, LI Xiaolong, LU Yiyu, et al. Study on the breaking span and deformation of hard roof in Datong mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(6): 1038-1044.
- [18] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [19] 赵毅鑫, 王新中, 周金龙, 等. 综采工作面基本顶厚跨比对其初次断裂失稳影响规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 94-104.
ZHAO Yixin, WANG Xinzhong, ZHOU Jinlong, et al. Influence of main roof thickness-span ratio on the initial cracking induced instability in fully mechanized longwall face[J]. Journal of China

- Coal Society, 2019, 44(1): 94–104.
- [20] YU M L, ZUO J P, SUN Y J, et al. Investigation on fracture models and ground pressure distribution of thick hard rock strata including weak interlayer[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(1): 137–153.
- [21] 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.
- [22] ODEN J T, RIPPERGER E A. Mechanics of elastic structures[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation McGraw Hill Book Company, 1981.
- [23] JI S T, WANG Z, KARLOVŠEK J. Analytical study of subcritical crack growth under mode I loading to estimate the roof durability in underground excavation[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(2): 375–385.
- [24] LEI B, ZUO J P, LIU H Y, et al. Experimental and numerical investigation on shale fracture behavior with different bedding properties[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 247: 107639.
- [25] 张广超, 尹茂胜, 周广磊, 等. 厚硬岩层下板结构破断应力-能量场积聚演化规律[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(4): 647–663.
- ZHANG Guangchao, YIN Maosheng, ZHOU Guanglei, et al. Evolution law of stress and energy field accumulation during the fracture of plate structure in thick and hard rock strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(4): 647–663.
- [26] 白贤栖, 曹安业, 刘耀琪, 等. 基于震源机制解析的巨厚覆岩矿震破裂机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4024–4035.
- BAI Xianxi, CAO Anye, LIU Yaoqi, et al. Mine earthquake mechanism of extremely thick strata based on focal mechanism analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4024–4035.
- [27] 曹安业, 陈凡, 刘耀琪, 等. 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 722–733.
- CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi, et al. Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 722–733.
- [28] 陈凡. 煤矿矿震破裂机制及其震源力学参量响应规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- CHEN Fan. Failure mechanism of mining induced tremor and response law of its source mechanics parameters[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [29] 白贤栖, 曹安业, 杨耀, 等. 高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 10–20.
- BAI Xianxi, CAO Anye, YANG Yao, et al. Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 10–20.
- [30] VAVRYČUK V. Moment tensor decompositions revisited[J]. Journal of Seismology, 2015, 19(1): 231–252.
- [31] 刘耀琪, 曹安业, 王常彬, 等. 基于震源机制与定位误差校准的冲击地压危险预测方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2065–2077.
- LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Changbin, et al. Prediction method of coal burst risk based on focal mechanism and location error calibration[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2065–2077.
- [32] 黄庆享, 马龙涛, 董博, 等. 大采高工作面等效直接顶与顶板结构研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(5): 541–546, 610.
- HUANG Qingxiang, MA Longtao, DONG Bo, et al. Research on equivalent immediate roof and roof structure of large mining height face[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(5): 541–546, 610.
- [33] 黄庆享, 赵萌焱, 黄克军. 浅埋煤层群开采顶板双关键层结构及支护阻力研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 71–77, 86.
- HUANG Qingxiang, ZHAO Mengye, HUANG Kejun. Study of roof double key strata structure and support resistance of shallow coal seams group mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 71–77, 86.
- [34] 朱卫兵, 宁杉, 曹安业, 等. 非均厚“弓形”巨厚关键层动静载作用机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(10): 4311–4324.
- ZHU Weibing, NING Shan, CAO Anye, et al. Dynamic and static load effect of non-uniformly “bow-shaped” super-thick key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(10): 4311–4324.