

不同厚度岩层破断模式转变机理及力学模型分析

左建平^{1,2}, 于美鲁¹, 孙运江¹, 吴根水¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采动岩层的变形、破断、运动模式与采场矿压显现、地表沉陷等密切相关。薄岩层与厚岩层的破断模式又呈现出显著的差异, 如何将不同厚度岩层的破断模式统一描述并建立力学模型是岩层移动理论难题。统计了23个典型工作面采动岩层破断结构, 基于断裂力学理论对岩层的破断力学因素及运动模式进行了分类, 详细分析了其与岩层厚度之间的关系。基于中厚板理论建立了不同厚度岩层破断力学模型, 揭示了不同厚度岩层的破断力学机理及破断模式, 并给出了相应的判据。结合数值模拟分析了不同厚度岩层在开采过程中的变形、破断和运动规律。研究表明, 不同的应力边界条件作用在不同厚度的岩层上面, 再加上开采条件的不同, 岩层会出现不同的破断模式。随着岩层厚度的增加, 岩层所受剪力不断增大, 岩层的破断力学机理呈现出拉破断、拉剪破断及剪破断的演化规律; 其相应的岩块结构则分别表现为砌体梁结构、分层破断以及台阶岩梁; 统计数据表明岩块厚跨比大于0.5的岩层更易发生剪切破断而形成台阶岩梁。基于上述统计和分析, 针对厚岩层可能发生的拉剪破断问题, 提出混合破断模式的概念, 将岩层破断力学因素细化为拉破断、拉剪破断及剪切破断3种; 将不同厚度岩层的破断模式分为薄岩层常见的拉破断及遇断层引起的剪破断, 厚岩层出现的拉破断、拉剪破断及剪切破断, 其中拉剪混合破断分为端部拉剪混合破断、分层联动运动及分层非协调运动等7类破断模式。对岩层破断模式的进一步研究可为采场矿压控制及地表沉陷灾害的防治提供有益的理论支持。

关键词: 厚板理论; 厚岩层; 岩层移动; 拉剪转换; 混合破断

中图分类号: TD323 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)04-1449-15

Analysis of fracture mode transformation mechanism and mechanical model of rock strata with different thicknesses

ZUO Jianping^{1,2}, YU Meilu¹, SUN Yunjiang¹, WU Genshui¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The deformation, fracture, and movement mode of rock strata are greatly related to underground pressure, surface subsidence, etc. The fracture modes of the thin rock stratum and thick rock stratum are significantly different. How to uniformly describe the fracture modes of rock strata with different thicknesses and establish a mechanical model is a difficult theoretical problem in rock movement. In this paper, the fracture structures of mining strata in 23 typical working

收稿日期: 2022-03-23 修回日期: 2022-06-08 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0371

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(52225404); 北京市卓越青年科学家资助项目(BJWZYJH01201911413037); 中央高校优秀青年团队资助项目(2023YQTD01)

作者简介: 左建平(1978—), 男, 江西高安人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zjp@cumb.edu.cn

引用格式: 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.



移动阅读

faces are investigated. In addition, the fracture mechanical factors and movement modes of the rock stratum are classified based on fracture mechanics, and the relationship between fracture structure and rock stratum thickness is analyzed. Based on the medium-thick plate theory, the fracture mechanical model of rock strata with different thicknesses is established. The fracture mechanical mechanism and fracture mode of rock strata with different thicknesses are revealed, and the corresponding criteria are given. The breakage and movement laws of rock strata with different thicknesses and fracture modes in the mining process are analyzed by numerical simulation. The research shows that when different mining conditions and different stress boundary conditions act on rock strata with different thicknesses, different fracture modes will occur. With the increase of the rock strata thickness, the shear stress of rock strata increases continuously, and the fracture mechanical mechanism of rock stratum presents the evolution law of tensile fracture, tensile shear fracture, and shear fracture. Also, the corresponding rock mass structures are masonry beam structure, layered fracture, and step voussoir beam respectively. Moreover, the statistical data show that the rock layers with a thickness span ratio greater than 0.5 are more prone to occur shear fractures and form step voussoir beams. Based on the above analysis, a mixed fracture model is proposed aiming at the possible tension shear failure of thick rock strata, and the rock fracture mechanical factors are further subdivided into three types: tensile fracture, tensile shear fracture, and shear fracture. There are seven types of fracture modes in rock strata in total. Tensile fracture often occurs in a thin layer, which will change to a shear fracture when the fault appears. Tensile fracture, tensile shear fracture, and shear fracture are typically fracture modes in a thick layer, in which tensile shear mixed fracture is divided into end tensile shear mixed fracture, layered linkage movement, and layered uncoordinated movement. Further research on the fracture modes of rock strata can provide valuable theoretical support for the control of ground pressure and the prevention of surface subsidence hazards in mining.

Key words: thick plate theory; thick rock strata; strata movement; the conversion of tensile to shear; the mixed fracture

埋深浅、基岩薄、松散层厚是陕西、内蒙古等西部浅埋矿区的主要特点^[1]。高强度的开采极易引起浅埋矿区地表的非连续下沉而形成台阶裂缝甚至是塌陷坑。认识和控制岩层移动是防治地表沉陷的关键,深入探讨岩层破断的力学机理及破断模式是解答岩层运动规律的基础。同时,岩层的稳定性与采场矿压显现有直接的关系^[2-3],大多数的采场动力灾害也与采场上覆岩层的破断运动^[4-5]及其岩块结构失稳密切相关^[6]。厚硬岩层的变形破断特征及采动覆岩结构决定了工作面动力显现的程度和影响范围,其失稳运动是诱发工作面动力灾害的主要原因。尤其是在地表沉陷的研究中,关键层的厚度对“类双曲线”的形成有着重要影响^[7-10]。

为了研究不同厚度岩层在煤矿开采过程中的破断运移规律,国内外学者开展了大量的研究工作。在理论方面,史红等^[11]利用两端嵌固梁力学模型讨论了厚岩层可能发生的 3 种断裂模式; CHEN Junchao 等^[12]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;朱卫兵等^[13-14]提出了大空间采场覆岩远场关键层“横 O-X”破断的“三角板”结构力学模型,并给出相应的地面压裂坚硬顶板技术;笔者^[15]通过四边简支的中厚板理论讨论了西部浅埋厚关键层的破断规律,并指出剪应力是造成顶板全厚度切落的重要力学因素;杨胜利等^[16]通过中厚板

理论提出了厚硬顶板破断分区。在数值模拟方面, JU Yang 等^[17]通过连续离散元法 (CDEM) 研究了顶板的破断运移规律;张明等^[18]针对厚硬岩层的运动状态提出了半封闭厚硬岩层采场空间模型; GAO Fuqiang 等^[19], MAJDI A 等^[20], MICHAEL Kelly 等^[21]发现,厚岩层的主要破坏机制是压剪破坏,剪切裂纹占主导地位。在实验方面,任艳芳^[22]对西部浅埋厚顶板的全厚度切落现象的发生和演化过程进行了实验研究;杨科等^[23]开展了真实应力环境厚硬顶板下厚煤层开采覆岩运移规律研究,研究发现厚硬岩层的破断易引起覆岩的整体性运动,且来压强烈;笔者^[24]通过顶板破断模拟实验装置对不同厚度岩层的破断模式进行了研究; NING Jianguo 等^[25]指出控制岩层运动的关键是了解厚硬岩层的运动和断裂模式。对于厚岩层来说,由于梁理论或薄板理论在一定程度上忽略了厚度对剪力的影响。因此,考虑引入中厚板理论进行讨论。目前,王树仁等^[26]、笔者^[15,27]、杨胜利等^[16]、祝方才等^[28]将中厚板理论引入到采矿问题的分析中,为揭示厚岩层的破断机理提供了新的思路。

有鉴于此,笔者以陕西省柠条塔矿的地质参数为基础,结合中厚板理论分析不同厚度岩层的破断规律,讨论随厚度变化岩层可能出现的破断模式及力学机制,并通过数值模拟对比分析岩层厚度对破断模式的

影响,由此可将不同厚度岩层的破断模式进行统一描述。

1 不同条件下岩层破断模式及转变机制

钱鸣高院士^[2]基于大量的现场观测提出了“砌体梁”模型,建立了破断岩块相互铰接结构的力学模型,并确定了其稳定条件,为我国矿山压力与岩层控制的研究奠定了基础。基于砌体梁模型,黄庆享等^[1-2]针对浅埋煤层基本顶的岩块结构提出了“短砌体梁”和“台阶岩梁”结构模型。在砌体梁模型中,一般考虑岩层的拉破断,破断岩块形成稳定的砌体梁结构。而对于一些厚岩层而言^[29-30],由于厚度过大,岩块难以回

转下沉,转而发生全厚度切落现象。有研究指出,“台阶下沉是剪切冒落的结果”^[31],同时厚跨比与岩块结构稳定性有着密切的关系,相较于薄岩层,厚岩层更易发生剪切破断^[32]。有鉴于此,笔者统计了部分典型矿区关键层或基本顶的垮落情况,见表1。表1所示的岩层均为关键层(或基本顶),岩块结构在相关引用文献中均有明确指出。其中,厚跨比取自力学中的概念,主要用于对岩层厚度进行分类,为岩块厚度(h)与岩块跨度(L)的比值,初次来压时岩块跨度约为周期来压步距的2倍,周期来压时岩块跨度约等于周期来压步距,将岩块结构与厚跨比(h/L)之间的关系绘制成图1进行分析。

表1 关键层破断模式统计

Table 1 Stratigraphic characteristics of the key strata

煤矿	岩性	厚度/m	来压步距/m	岩块结构	厚跨比	备注
补连塔煤矿22303综采面 ^[2]	粗粒砂岩	10.10	25.70	砌体梁	0.40	周期来压
新元矿3108综采工作面 ^[30]	细砂岩	2.00	8.00	砌体梁	0.25	周期来压
哈拉沟煤矿12上101工作面 ^[33]	细砂岩	2.98	8.00	砌体梁	0.37	周期来压
宽沟煤矿W1123工作面 ^[34]	粗粒砂岩	14.00	88.00	砌体梁	0.32	初次来压
潘二矿11223工作面 ^[35]	细砂岩	12.00	130.00	砌体梁	0.18	初次来压
塔山矿8108工作面 ^[36]	中粒砂岩	11.00	52.75	砌体梁	0.21	周期来压
塔山矿8105工作面 ^[13]	中砂岩	13.43	164.20	砌体梁	0.16	初次来压
兴隆庄煤矿4326工作面 ^[37]	粉中砂岩互层	11.50	54.00	砌体梁	0.45	初次来压
南屯煤矿1701工作面 ^[38]	细砂岩	3.12	20.40	砌体梁	0.31	初次来压
新巨龙矿井1302工作面 ^[39]	粗砂岩	7.63	33.00	砌体梁	0.46	初次来压
大柳塔矿20604工作面 ^[40]	砂岩	16.00	54.20	台阶岩梁	0.60	初次来压
大柳塔矿C202工作面 ^[41]	砂岩	17.30	24.00	台阶岩梁	1.44	初次来压
			9.00	台阶岩梁	1.92	周期来压
			27.00	台阶岩梁	0.99	初次来压
榆家梁矿43303-2工作面 ^[43]	细砂岩	18.80	50.50	台阶岩梁	0.74	初次来压
石圪台矿31304-1工作面 ^[44]	砂质泥岩	18.40	54.80	台阶岩梁	0.67	初次来压
乌兰木伦12307工作面 ^[43]	粉砂岩	14.82	33.00	台阶岩梁	0.90	初次来压
			13.00	台阶岩梁	1.14	周期来压
哈拉沟煤矿12上101工作面 ^[43]	中砂岩	11.60	39.60	台阶岩梁	0.59	初次来压
			12.40	台阶岩梁	0.94	周期来压
活鸡兔矿21305工作面 ^[44]	中砂岩	18.22	32.90	台阶岩梁	1.10	初次来压
			18.90	台阶岩梁	0.96	周期来压
荣达煤矿6号煤首采工作面 ^[45]	细粒砂岩	7.88	16.76	台阶岩梁	0.94	初次来压
			6.88	台阶岩梁	1.15	周期来压
柠条塔矿N1200工作面 ^[46]	粗粒砂岩	15.00	11.78	台阶岩梁	1.25	周期来压
柠条塔矿N1208工作面 ^[46]	粗粒砂岩	13.87	15.80	台阶岩梁	0.88	周期来压
柠条塔矿N1200-1工作面 ^[46]	中粒砂岩、粉砂岩	18.00	56.10	台阶岩梁	0.64	初次来压
			18.00	台阶岩梁	1.00	周期来压
柠条塔矿N1212工作面 ^[46]	粗粒砂岩、粉砂岩	15.60	14.28	台阶岩梁	1.09	周期来压

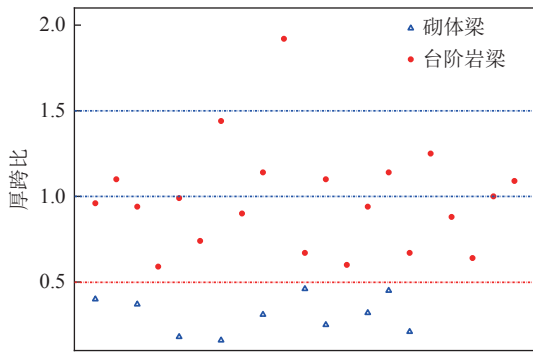


图 1 岩块结构与厚跨比的关系

Fig.1 Relationship between rock mass structure and thickness span ratio

从力学分析来看,当 $h/L \leq 0.125$ 时为薄板, $h/L > 0.125$ 时为中厚板。由表 1 和图 1 所统计的典型矿井基本顶(或关键层)破断岩块结构与厚跨比的关系可以看出,砌体梁结构的岩块厚跨比普遍较低,部分属于薄板的范围,大部分处于薄板与厚板的临界区间,这可能是统计岩层为关键层的缘故,厚度偏大;而形成台阶岩梁的岩块厚跨比则较大,基本上在 0.5 以上,与砌体梁结构的岩块有着明显的差别。

随着研究的深入^[15,27,47],有学者指出随着岩层厚度增加,岩层所受剪应力也会随之增加,剪应力也有可能诱发岩层的破断。根据断裂力学对裂纹扩张的描述^[48-50],在垂直于裂纹面的拉应力作用下扩展的裂纹称之为张开型裂纹(I型);平行于裂纹表面而垂直于裂纹前缘的剪应力作用下扩展的裂纹称之为滑移型裂纹(II型);而由拉、剪共同作用下扩展的裂纹则称之为复合型裂纹。有鉴于此,在分析岩层破断模式时,引入断裂力学的概念对不同厚度岩层破断模式进行分类,由拉应力主导并引起的破断称之为拉破断,由剪应力主导并引起的破断称之为剪破断,而拉应力

与剪应力共同作用的破断则称之为混合破断。

2 不同厚度岩层破断力学模型及理论分析

2.1 岩层破断力学模型

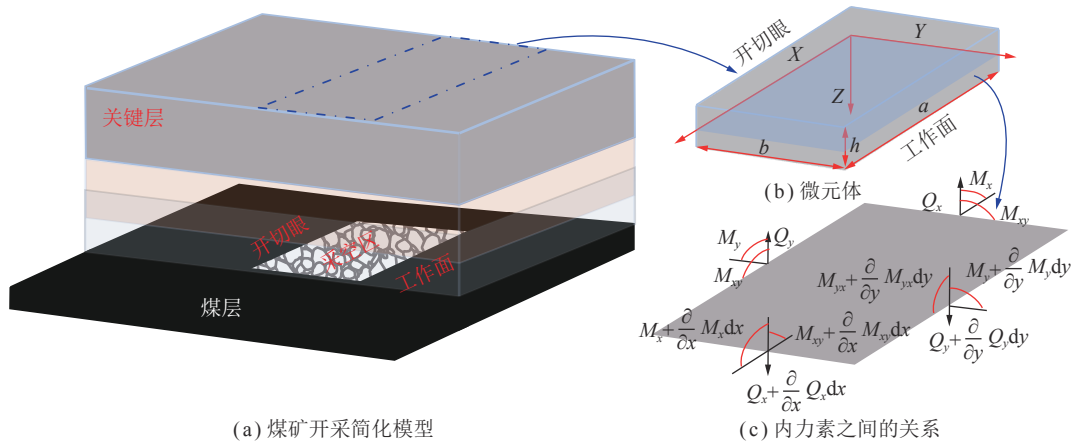
为统一分析不同厚度岩层的破断模式,拟采用胡成栋^[51]提出的矩形中厚板短梁函数解法。该方法相较于其他方法更为简化,便于工程应用。笔者以柠条塔矿 1^{-2} 煤上部厚 28.75 m 的中粒砂岩主关键层为研究对象(表 2)^[52-53],建立岩层破断力学模型,如图 2 所示。其中,图 2(a)为煤矿开采简化模型,初次来压阶段的关键层可简化为四边固支岩层,工作面长度为 a (m);推进步距为 b (m);岩层厚度为 h (m)。图 2(b)为关键层的一个微元体。图 2(c)展示了 6 个内力素 (M_x 、 M_y 、 M_{xy} 、 M_{yx} 、 Q_x 、 Q_y) 之间的关系。其中, Q_x 为岩层 Y 方向的剪力; Q_y 为岩层 X 方向的剪力; M_x 为岩层 Y 方向的弯矩; M_y 为岩层 X 方向的弯矩; M_{xy} 为岩层的扭矩。

表 2 地层物理力学参数^[52-53]

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock strata^[52-53]

岩性	h/m	密度 $\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量 $E/$ MPa	黏聚力 $c/$ MPa	泊松比 ν
黄土	42.00	1 560	23	0.09	0.35
砂质泥岩	14.76	2 560	2 400	3.00	0.24
粉砂岩	21.55	2 420	2 000	2.10	0.32
中粒砂岩	28.75	2 160	1 950	2.05	0.35
粉砂岩	6.70	2 420	2 000	2.10	0.32
中粒砂岩	9.96	2 160	1 950	2.05	0.35
1^{-2} 煤	1.89	1 290	845	0.85	0.28
细粒砂岩	2.85	2 230	2 100	2.50	0.27

首先建立考虑横向剪应力的短梁函数,如式(1)所示^[50]。



(a) 煤矿开采简化模型

图 2 岩层破断力学模型

Fig.2 Fracture mechanics model of rock stratum

$$\begin{cases} w_x = 6ix\left(1 - \frac{x}{a}\right) + 0.5a\left(\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{x^3}{a^3} + \frac{x^4}{a^4}\right) \\ \varphi_x = \frac{x}{a} - 3\frac{x^2}{a^2} + 2\frac{x^3}{a^3} \\ w_y = 6jy\left(1 - \frac{y}{b}\right) + 0.5b\left(\frac{y^2}{b^2} - 2\frac{y^3}{b^3} + \frac{y^4}{b^4}\right) \\ \varphi_y = \frac{y}{b} - 3\frac{y^2}{b^2} + 2\frac{y^3}{b^3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, w_x 为沿 X 轴方向的短梁函数; w_y 为沿 Y 轴方向的短梁函数; φ_x 为 X 方向的转角; φ_y 为 Y 方向的转角; $i=(h/a)^2/(5-5\nu)$, $j=(h/b)^2/(5-5\nu)$ 。

由此可得矩形中厚板的挠度函数和转角函数为

$$\begin{cases} w = ew_xw_y \\ \psi_x = f\varphi_xw_y \\ \psi_y = g\varphi_yw_x \end{cases} \quad (2)$$

式中, w 为挠度; ψ_x 为中厚板在 X 方向的转角; ψ_y 为中厚板在 Y 方向的转角; e, f, g 为待定系数。

根据中厚板的最小势能原理泛函数, 将式 (1)、(2) 代入式 (3)。

$$\begin{cases} \Pi = \iint_{\Omega} (U_M + U_Q - qw) d\Omega \\ U_M = \frac{1}{2}D \left[\frac{\partial\psi_x^2}{\partial x} + \frac{\partial\psi_y^2}{\partial y} + 2\nu \frac{\partial\psi_x}{\partial x} \frac{\partial\psi_y}{\partial y} + \frac{1}{2}(1-\nu) \left(\frac{\partial\psi_x}{\partial x} + \frac{\partial\psi_y}{\partial y} \right)^2 \right] \\ U_Q = \frac{1}{2}C \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi_x \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \psi_y \right)^2 \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中, Π 为总势能; U_M 为应变能; U_Q 为剪力做功; D 为抗弯刚度, $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$; C 为抗剪刚度, $C = 5Eh/[12(1+\nu)]$, E 为弹性模量。

令 Π 分别对待定系数 e, f, g 求偏导, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial\Pi}{\partial e} = 0 \\ \frac{\partial\Pi}{\partial f} = 0 \\ \frac{\partial\Pi}{\partial g} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

通过式 (4) 可求得待定系数 e, f, g , 3 个待定系数十分复杂, 在计算中取有限项可以降低运算量。将 e, f, g 代入式 (2) 可得顶板的挠度近似函数和转角近似函数:

$$\begin{cases} w = e \left[6ix\left(1 - \frac{x}{a}\right) + 0.5a\left(\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{x^3}{a^3} + \frac{x^4}{a^4}\right) \right] \times \left[6jy\left(1 - \frac{y}{b}\right) + 0.5b\left(\frac{y^2}{b^2} - 2\frac{y^3}{b^3} + \frac{y^4}{b^4}\right) \right] \\ \psi_x = f \left[6jy\left(1 - \frac{y}{b}\right) + 0.5b\left(\frac{y^2}{b^2} - 2\frac{y^3}{b^3} + \frac{y^4}{b^4}\right) \right] \times \left(\frac{x}{a} - 3\frac{x^2}{a^2} + 2\frac{x^3}{a^3} \right) \\ \psi_y = g \left[6ix\left(1 - \frac{x}{a}\right) + 0.5a\left(\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{x^3}{a^3} + \frac{x^4}{a^4}\right) \right] \times \left(\frac{y}{b} - 3\frac{y^2}{b^2} + 2\frac{y^3}{b^3} \right) \end{cases} \quad (5)$$

由此可以得到顶板的内力方程为

$$\begin{cases} M_x = -D \left(\frac{\partial\psi_x}{\partial x} + \nu \frac{\partial\psi_y}{\partial y} \right) \\ M_y = -D \left(\frac{\partial\psi_y}{\partial y} + \nu \frac{\partial\psi_x}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_x = C \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi_x \right) \\ Q_y = C \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \psi_y \right) \\ M_{xy} = -\frac{1}{2}D(1-\nu) \left(\frac{\partial\psi_x}{\partial y} + \frac{\partial\psi_y}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (7)$$

顶板所受拉应力为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{12M_x}{h^3}z \\ \sigma_y = \frac{12M_y}{h^3}z \\ \sigma_z = -2q \left(\frac{1}{2} - \frac{z}{h} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right) \end{cases} \quad (8)$$

顶板所受剪力为

$$\begin{cases} \tau_{xz} = \frac{3Q_x}{2h} \left[1 - \left(\frac{z}{h/2} \right)^2 \right] \\ \tau_{yz} = \frac{3Q_y}{2h} \left[1 - \left(\frac{z}{h/2} \right)^2 \right] \\ \tau_{xy} = \frac{12z}{h^3}M_{xy} \end{cases} \quad (9)$$

式中, σ_x 为短边拉应力; σ_y 为长边拉应力; σ_z 为竖向拉应力; τ_{xz} 为短边竖向剪力; τ_{yz} 为长边竖向剪力; τ_{xy} 为横向剪应力。

基于上述结论, 以柠条塔矿 1^{-2} 煤上部厚 28.75 m 的主关键层中粒砂岩进行分析, 已知该岩层的抗拉强度 $\sigma_t=3.5$ MPa, 抗剪强度 $\tau=4.38$ MPa, 泊松比 $\nu=0.35$, 弹性模量 $E=1\ 950$ MPa, 关键层载荷 $q=0.79$ MPa, 工作面长度 $a=350$ m, 其他岩层信息见表 2。表 2 中, c 为黏聚力, ρ 为密度。基于此数据, 进一步探索岩层在不同条件下的断裂力学因素及可能出现的岩块结构。

2.2 厚度影响参数分析

在以往的研究中, 厚岩层与薄岩层破断的研究相对独立, 一般基于最大拉应力理论通过薄板理论或梁理论分析其破断距。而对于厚度较大的岩层, 有可能发生剪切破断时, 则需要通过讨论剪切面的大小来确定所受剪力的情况^[29]。面对这种未知厚跨比的情况下, 中厚板理论具有较好的适用性, 可以将薄岩层与厚岩层统一起来, 分析其破断规律。基于此, 笔者提出了采动覆岩混合破断模式, 旨在通过中厚板理论分析不同厚度岩层的破断机理, 将 2 者建立起联系, 使

厚岩层破断和薄岩层破断的研究有机地统一成一个整体。

将柠条塔矿 1² 煤上部厚 28.75 m 的主关键层中粒砂岩的力学参数代入式 (8)、(9), 求解在此条件下, 不同推进步距情况下的岩层受力情况, 取岩层中部所受拉力 $\sigma_y(a/2, b/2)$ 、长边所受拉力 $\sigma_y(a/2, 0)$ 及剪力 $\tau_{yz}(a/2, 0)$ 进行计算, 如图 3 所示。由图 3 可知, 在该条件下, 岩层长边的拉应力首先达到抗拉强度, 此时推进步距约为 80 m; 其次是中部的拉应力, 此时推进步距约为 112 m。因此, 该岩层将发生拉伸破断, 岩层最大跨距为 112 m。以此数据为基础开展研究并取整数, 令岩块的厚度分别为 5、10、25、40、55 m, 则厚跨比分别为 5/56(薄板)、10/56(临界厚度板)、25/56(中厚板)、40/56(中厚板)、55/56(中厚板), 按照板的厚度分类分别为薄板、临界厚度板、中厚板。

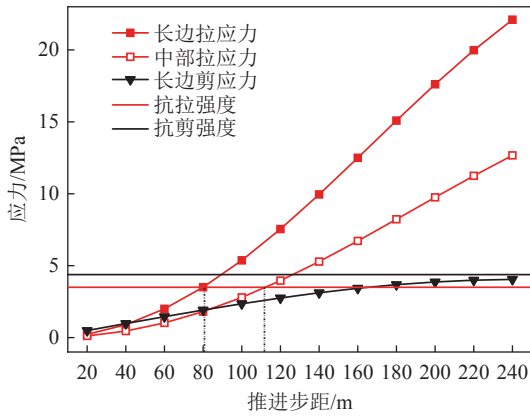


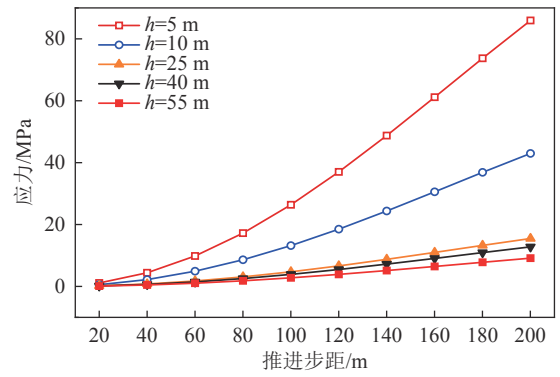
图 3 不同推进步距下的岩层受力情况

Fig.3 Stress of rock strata under different advancing distance

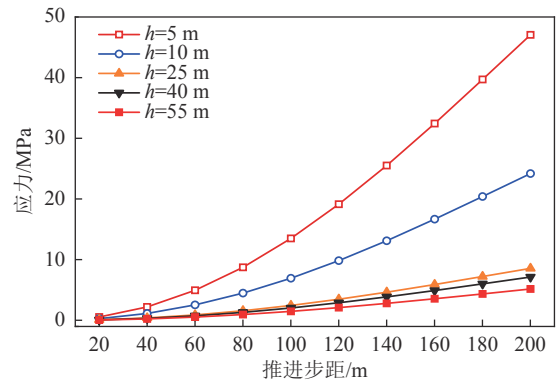
图 4 为不同厚度岩层在不同进步距下的受力情况, 由图 4 可知, 随着工作面的推进, 岩层所受拉应力和剪应力都是逐渐增大的; 相同推进步距时, 随着岩层厚度的增加, 岩层所受拉应力是不断降低的 (图 4(a)、(b)), 而岩层所受剪应力则是不断增大的, 且随着厚度的增加, 增长的速度也逐渐变快 (图 4(c))。由此可见, 随着岩层厚度的增加, 拉应力逐渐降低, 剪应力逐渐增大的趋势会导致岩层在某个厚度的情况下出现岩层所受剪应力大于抗剪强度的情况使岩层出现剪切破断。

2.3 拉剪转换影响参数分析

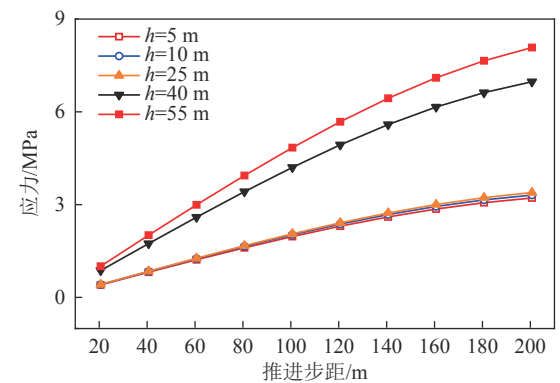
以上述参数及分析为基础绘制不同厚度岩层受力情况, 如图 5 所示。如表 2 所示, 研究对象为 28.75 m 的中粒砂岩 (基本顶), 当它的厚度 $h=5$ m 或 $h=10$ m 时, 该岩层将转化普通岩层, 其上部 21.55 m 的粉砂岩成为关键层, 并控制上覆岩层的运动。那么, 厚度为 $h=5$ m 或 $h=10$ m 的中粒砂岩所承载荷即为其自重,



(a) 长边拉应力



(b) 中部拉应力



(c) 长边剪应力

图 4 不同厚度岩层在不同推进步距下的受力情况

Fig.4 Stress of rock strata with different thickness under different advancing distance

岩层受力情况分别如图 5(a)、(b) 所示。图 5(a) 为薄板状态的下的岩层, 当推进步距达到约 34 m 时, 岩层的长边发生拉破坏; 继续推进至 49 m 左右时, 岩层中部发生拉破坏。由此可推断, 该薄板状态下的岩层呈现拉破断, 推进步距约为 49 m。图 5(b) 为临界厚度状态下的岩层, 当推进步距达到约 50 m 时, 岩层长边出现拉破坏; 工作面继续推进至约 70 m 左右时, 岩层中部发生拉破坏。由此可知, 薄岩层及临界厚度的岩层将发生拉破断, 其所受剪应力较小, 发生剪切破断的可能性较低。

当岩层厚度增加至 25 m 时, 该岩层作为关键层,

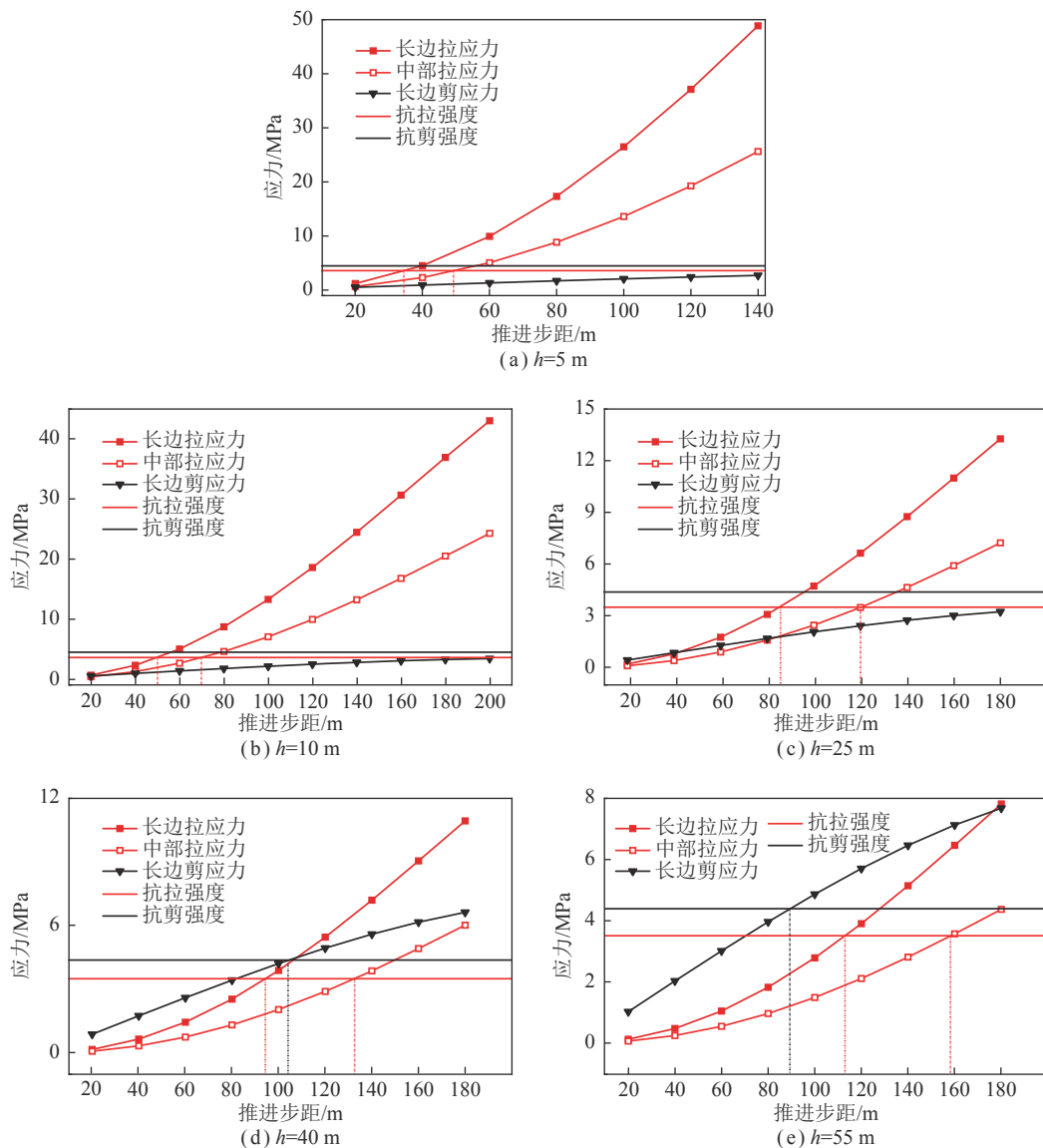


图 5 不同厚度岩层受力情况

Fig.5 Stress of the rock formation with different thicknesses

岩层的受力情况如图 5(c) 所示。当工作面推进至 85 m 左右时,岩层长边出现拉破坏;继续推进至约 120 m 时,岩层中部的拉应力也达到了抗拉强度,因此岩层的长边此时为拉破坏,其最大跨距约 120 m,因此, $h=25\text{ m}$ 的岩层在此条件以拉破坏为主。

如图 5(d) 所示,当岩层厚度增加至 40 m 时,工作面推进至约 94 m 时,岩层长边出现拉破坏;推进至 104 m 时,岩层的长边所受剪应力达到其最大抗剪强度,岩层长边开始出现剪破坏;推进至 132 m 时,岩层中部所受拉应力达到最大抗拉强度,岩层此时达到最大跨距。因此,在岩层完全破断之前,岩层先受到拉破坏、然后是剪破坏,最后是拉破坏,因此该种条件下岩层可能出现端部的拉剪混合破断。

由图 5(a)~(d) 的分析结果可知,随着岩层厚度的增加岩层所受剪应力逐渐增强,并对岩层的破断产生

影响。若考虑关键层 $h=55\text{ m}$ 时,则有如图 5(e) 所示的情况。由图 5(e) 可知,当工作面推进至 89 m 左右时,岩层长边的剪应力首先达到其抗剪强度,岩层开始发生剪切破断;而工作面推进至 113 m 左右时,岩层所受拉应力才达到其抗拉强度,因此该种情况下岩层的破断力学机制以剪切破坏为主。

综上所述,通过中厚板理论讨论了不同厚度岩层的破断力学机制,随着岩层厚度的增加和上覆岩层运移规律的变化,岩层的破断力学机制表现出拉破断→拉剪混合破断→剪破断的演化规律。当岩层端部所受拉应力先达到其抗拉强度,且岩层中部所受拉应力也先达到其抗拉强度,则认为岩层以拉破断为主;当岩层中部所受拉应力未达到其抗拉强度,而岩层端部所受拉应力和剪应力先后达到其抗拉强度和抗剪强度,则认为岩层发生拉剪混合破断;当岩层端部所受

剪应力先达到其抗剪强度时,则认为岩层以剪切破断为主。另外,不同厚度岩层破断力学因素的理论分析在一定程度上也说明了混合破断模式及统计规律(图 1 和表 1)的合理性。

3 厚顶板混合破断模式的数值模拟分析

3.1 模型建立

本文以陕煤柠条塔煤矿地质条件为基础,通过

3DEC 建立数值计算模型。如图 6 所示,根据柠条塔煤矿的覆岩地质条件自下而上共划分了 8 组岩层,岩体物理力学参数见表 3。表 3 中, ϕ 为内摩擦角。其中, 28.75 m 厚的中粒砂岩为主关键层。数值模型两边和底部边界条件通过位移固定。根据 2.2 节分析,拟进行不同厚度岩层破断模式数值分析,以关键层中粒砂岩为研究对象,令其厚度分别为 10、25、40、55 m 进行数值计算。

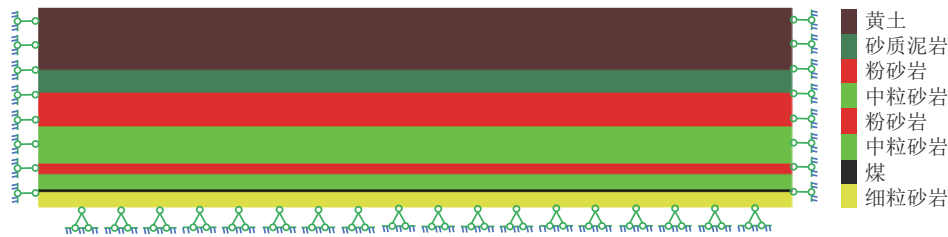


图 6 柠条塔煤矿 3DEC 数值模型

Fig.6 3DEC numerical model of Ningtiaota Coal Mine

表 3 块体之间接触力学参数^[52-53]

Table 3 Contact mechanical parameters between blocks^[52-53]

岩性	h/m	E/MPa	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	c/MPa	σ_t/MPa	$\phi/(^\circ)$	ν
黄土	42.00	23	1 560	0.09	0.30	20	0.35
砂质泥岩	14.76	2 400	2 560	3.00	1.83	29	0.24
粉砂岩	21.55	2 000	2 420	2.10	2.18	33	0.32
中粒砂岩	28.75	1 950	2 160	2.05	3.50	30	0.29
粉砂岩	6.70	2 000	2 420	2.10	2.18	33	0.32
中粒砂岩	9.96	1 950	2 160	2.05	1.83	30	0.28
煤	1.89	845	1 290	0.85	1.34	25	0.28
细粒砂岩	2.85	2 100	2 230	2.50	3.19	30	0.27

3.2 计算结果与讨论

图 7 为不同厚度岩层初次来压期间的破断情况,其中图 7(a)为厚度 10 m 的中粒砂岩,在此条件下,上方的粉砂岩成为关键层,当工作面推进至 70 m 时,岩层破断,由塑性区云图可以看出,岩层的两端和中部出现大量的张拉破坏区,岩层破断力学因素以拉应力为主;图 7(b)为厚度 25 m 的中粒砂岩,在此条件下,中粒砂岩作为主关键层,在推进过程中,中粒砂岩左上方首先出现张拉破坏区,随之在中下方出现张拉破坏区,工作面推进至 90 m 左右时,中粒砂岩的右上部开始出现张拉破坏区,此时达到其最大跨度,岩层中部出现回转下沉现象;图 7(c)为厚度 40 m 的中粒砂岩,在推进过程中,中粒砂岩左上方首先出现张拉破坏区,当推进至 80 m 左右时,岩层的中下方和右上方出现张拉破坏区,且在岩层右下方位置有着显著的压

剪破坏,此时岩层出现端部拉剪混合破断;图 7(d)为厚度 55 m 的中粒砂岩,在推进过程中,中粒砂岩左方首先出现剪切破坏区,当推进至 100 m 左右时岩层右方出现剪切破坏区,且有滑落失稳的倾向性。由此可见,随着岩层厚度的增加,剪应力的作用逐渐增强,岩层越容易受到剪应力的影响而发生滑落失稳。结合数值模拟结果的位移云图及岩块结构来看,关键层及其下部的岩层垮落结构呈倒漏斗形,关键层上部厚松散层(40 m 黄土层)的移动边界线则呈现为漏斗形,那么覆岩整体移动规律将呈现为一个“类双曲线”的形态,在一定程度上符合“类双曲线”模型的基本规律^[54-56];另外,从图 7 可以明显的看出,随着关键层厚度的增加,“类双曲线”下半段的基岩破断迹线的曲率呈现逐渐降低的趋势,由此可见,关键层的厚度对覆岩移动“类双曲线”的演化规律有一定的影响。

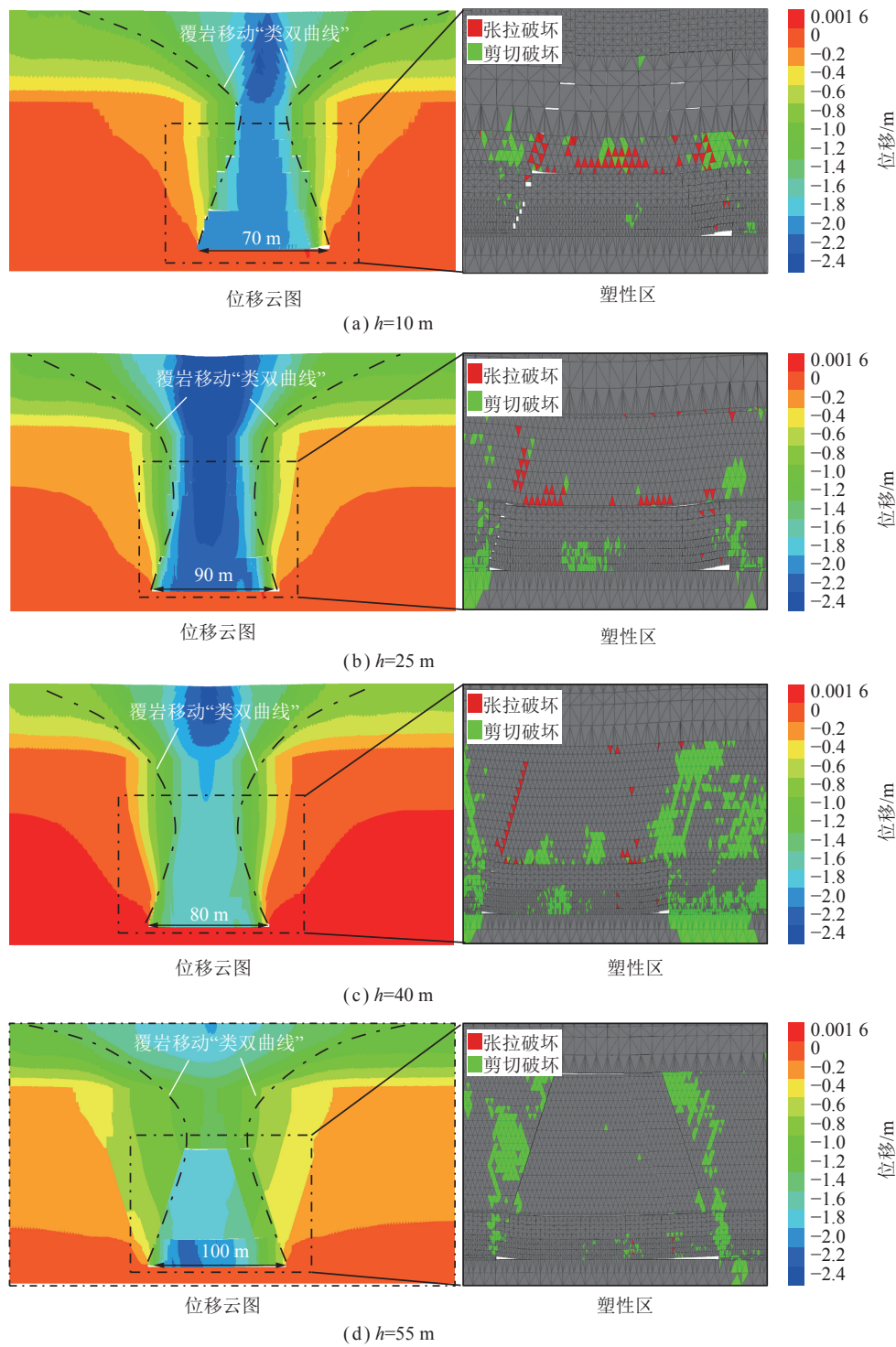


图 7 不同厚度岩层破断模拟结果

Fig.7 Fracture simulation results of different thicknesses rock stratum

图 8(a) 所示为不同厚度关键层工作面前方压力柱状图。由图 8(a) 可知,厚度为 10 m 的关键层推进至 70 m 左右发生初次来压,此时对工作面前方煤体造成的压力约为 4.8 MPa。厚度为 25 m 的关键层推进至 90 m 左右发生初次来压,此时对工作面前方煤体造成的压力约为 5.15 MPa。厚度为 40 m 的关键层推进至 80 m 左右发生初次来压,此时对工作面前方

煤体造成的压力约为 6.45 MPa。厚度为 55 m 的关键层推进至 100 m 左右发生初次来压,此时对工作面前方煤体造成的压力约为 8.2 MPa。由此可见,随着岩层厚度的增加工作面前方的压力逐渐增大,且岩层厚度越大,来压强度越高。其中,当岩层厚度为 40 m 时,工作面推进至 40 m 左右时,工作面前方的压力出现了明显的陡增,与图 7 对比可知,此时岩层出现了

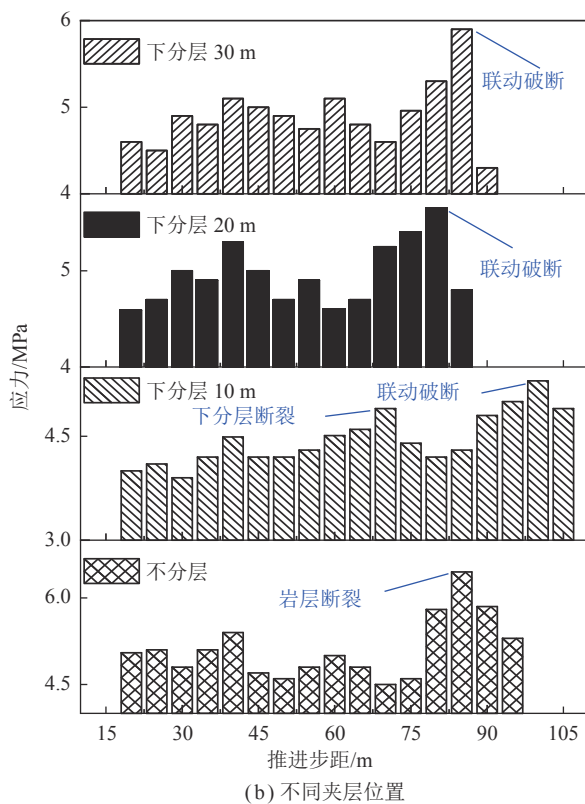
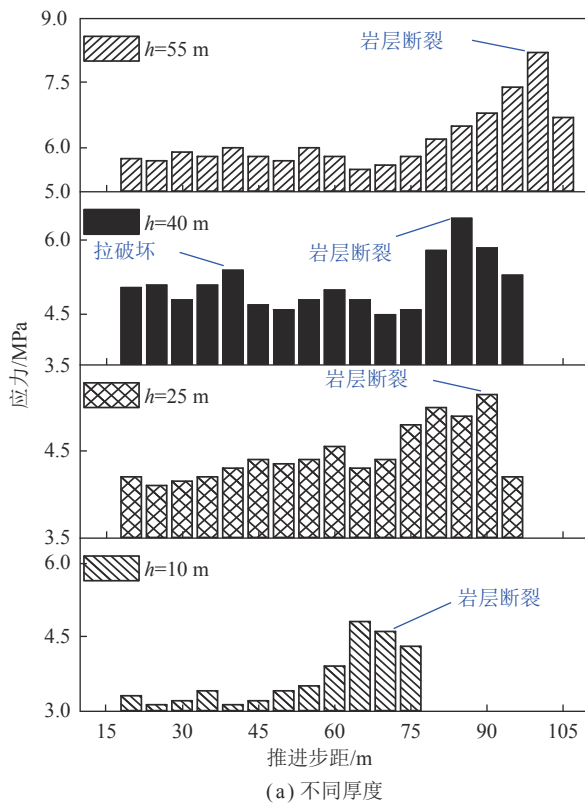


图 8 不同厚度、不同夹层位置的工作面前方压力

Fig.8 Pressure in front of the working face with different thickness and different interlayer positions

拉破坏, 岩层变形显著, 对前方的工作面也造成了一定程度的影响。

厚岩层需要考虑弱夹层或原生裂隙的影响, 开采过程中横向剪应力会引起弱夹层或原生裂隙的活化进而有可能导致分层, 上下分层的非协调变形有可能引起岩层的联动运动或分层非协调运动。令中粒砂岩厚度为 40 m, 分别在岩层下方 10、20 及 30 m 处预制裂缝进行数值分析。如图 9(a) 所示, 当工作面推进至 65 m 时, 岩层中部出现张拉破坏区; 随着工作面推进至 70 m 时, 张拉破坏区向上发展, 预制裂缝位置处因剪切破坏而离层, 岩层两侧也出现张拉破坏区, 下分层先行破断, 出现了分层非协调运动现象; 如图 9(b) 所示, 下分层与上分层均为 20 m, 工作面推进至 80 m 时, 上下分层位置出现剪切破坏同时弯曲下沉, 端部位置出现拉剪破坏, 上下分层出现联动运动; 如图 9(c) 所示, 下分层为 30 m, 上分层为 10 m, 工作面推进至 60 m 时, 上下分层位置出现剪切破坏, 推进至 85 m 时发生弯曲下沉, 端部位置出现拉剪破坏, 上下分层出现联动运动; 由此可见, 厚岩层的拉剪破坏也有可能出现分层的现象, 其运动模式有分层联动运动和分层非协调运动。

图 8(b) 所示为关键层不同夹层位置的工作面前方压力柱状图。结合图 9 的分析结果可知, 关键层不分层的情况下, 工作面推进至 80 m 左右发生初次来压, 此时对工作面前方煤体造成的压力约为 6.45 MPa。关键层下分层为 10 m 的情况下, 推进至 70 m 左右时, 下分层断裂, 下分层初次来压约为 4.9 MPa。推进至 100 m 左右时, 下分层随着上分层的断裂而断裂, 此时工作面前方压力约为 5.3 MPa。关键层下分层为 20 m 的情况下, 推进至 80 m 左右时, 上、下分层发生联动运动而同时断裂, 此时工作面前方压力约为 5.65 MPa。关键层下分层为 30 m 的情况下, 推进至 85 m 左右时, 上、下分层发生联动运动而同时断裂, 此时工作面前方压力约为 5.9 MPa。由此可见, 随着下分层厚度的增加, 岩层的运动模式由分层非协调运动 (图 9(a)) 演化为分层联动运动 (图 9(b)、(c))。且图 8(b) 显示, 岩层出现分层非协调运动时可能会出现大小周期来压现象, 小周期来压为下分层的断裂诱发, 大周期来压为上、下分层同时断裂诱发; 与完整岩层造成的压力相比, 岩层的分层运动降低了工作面前方的压力, 在本文的研究中, 分层非协调运动所引起的压力是最小的。

4 讨 论

结合数据统计、理论分析及数值模拟结果, 将不同厚度岩层可能发生的破断模式进行统一分类, 见表 4。若岩层在拉应力主导作用下中部发生回转下沉,

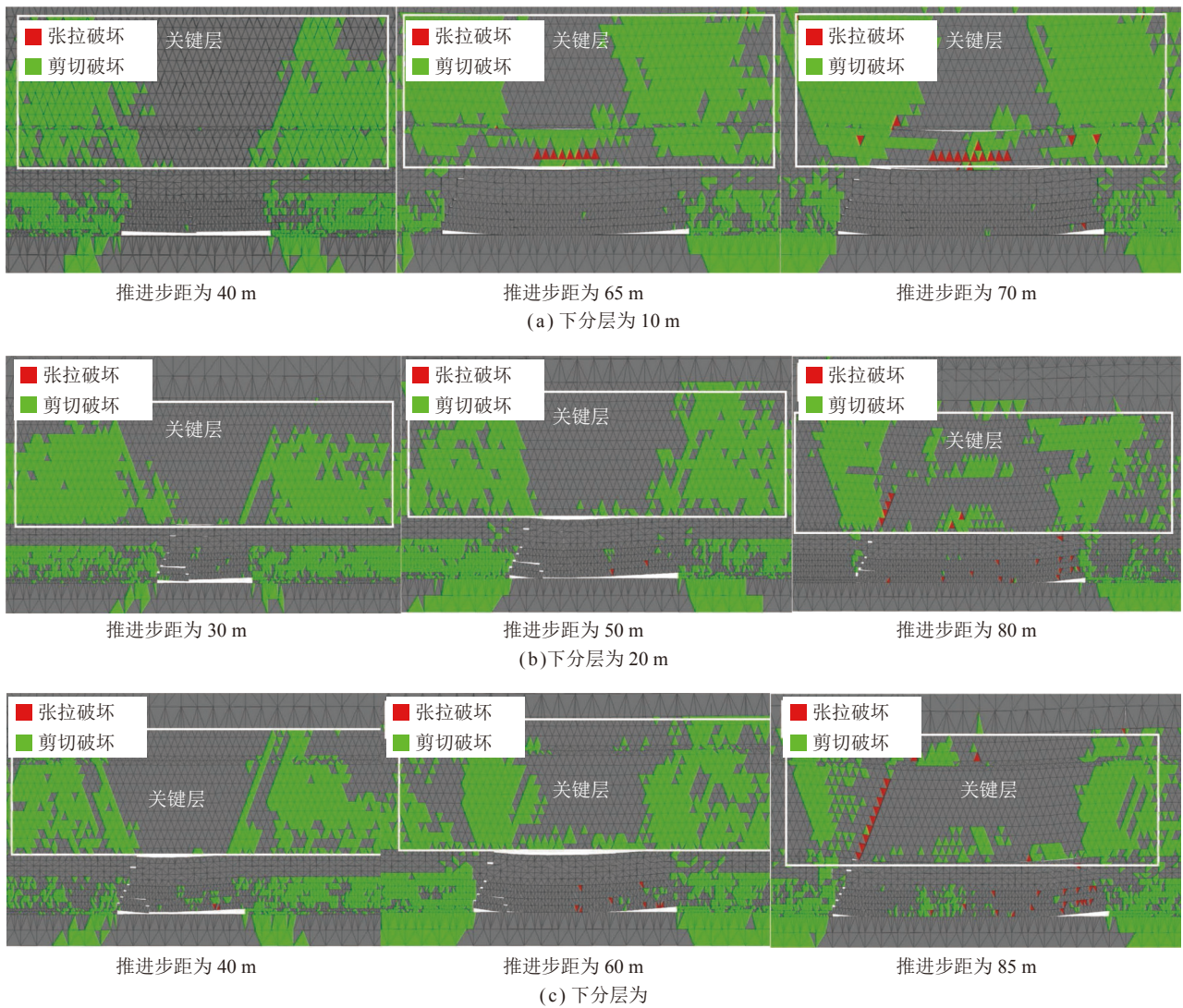


图 9 厚岩层混合破断分层运动模式

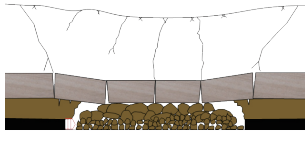

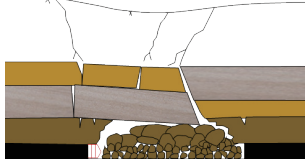



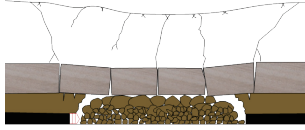

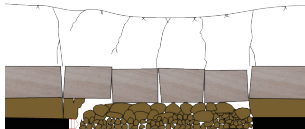

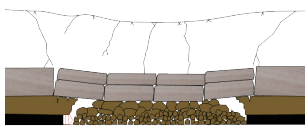
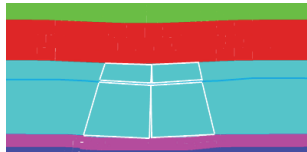
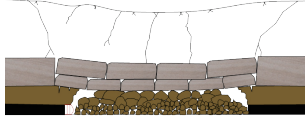

Fig.9 Layered fracture plastic zone of thick rock stratum

易形成稳定的砌体梁结构,如表 4 中①和③所示,判定方程为式 (8) 中 σ_y , 对应的数值模拟结果如图 7(a) 和 (b); 随着岩层厚度增加,剪应力作用增强,在岩层端部位置易形成拉剪混合破断,判定方程为式 (8) 中 σ_y 和式 (9) 中 τ_{yz} , 此时岩层的运动结构需要进行“S-R”稳定性分析,确认破断后形成砌体梁还是台阶岩梁结构,如表 4 中④所示,端部受拉剪破坏所形成的岩块回转角要小于拉破坏,对应的数值模拟结果如图 7(c); 当岩层厚度达到一定程度时,岩层也有可能发生剪破断,如表 4 中⑤,出现全厚度切落现象,形成台阶岩梁,判定方程为式 (9) 中 τ_{yz} , 最好进行“S-R”判定,对应的数值模拟结果如图 7(d); 若工作面前方存在断层时,薄岩层也可能发生剪破断,如表 4 中②; 另外随着岩层厚度的增加,岩层可能存在大量的弱夹层或原始损伤裂隙,在横向剪应力的作用下发生分层,形成拉剪分层混合破断,分层之后的岩层厚度减小,易形成砌体

梁结构,其运动模式可能出现分层联动运动(表 4 中⑥)和分层非协调运动(表 4 中⑦),判定方程为式 (9) 中 τ_{yz} 、式 (8) 中 σ_y 及“S-R”判定方程,分层联动运动的数值模拟结果为图 9(b)、(c),分层非协调运动的数值模拟结果为图 9(a)。综上所述,基于中厚板理论和数值模拟,将岩层随厚度变化而出现的破断机制和破断模式进行了分类,薄岩层常见的拉破断及遇断层引起的剪破断,厚岩层出现的拉破断、拉剪破断及剪切破断,其中厚岩层的拉剪混合破断分为端部拉剪混合破断、分层联动运动及分层非协调运动。需要说明的是,岩层结构的稳定性与采高和直接顶对采空区的充填条件息息相关,若关键层下部直接顶较厚,碎胀后可充满采空区,则难以形成台阶岩梁,因此本研究主要针对的是西部矿区^[30]和大同矿区^[13]等厚岩层覆盖下的厚煤层工作面可能出现的岩块结构进行讨论和分析。

表 4 不同厚度岩层破断模式分类及判据

Table 4 Classification and criterion of fracture modes of rock strata with different thickness

分类	编号	破断力学因素	破断模式	示意图	对应的数值结果	判据
薄岩层 ($h/L \leq 0.125$)	①	拉应力	拉破断			式(8) σ_y
	②	剪应力	剪破断			式(9) τ_{yz}
厚岩层 ($h/L > 0.125$)	③	拉应力	拉破断			式(8) σ_y
	④	拉应力 剪应力	端部拉剪混合破断			式(8) σ_y 式(9) τ_{yz}
	⑤	剪应力	剪破断			式(9) τ_{yz} “S-R”判定方程
	⑥	拉应力 横向剪应力	拉剪分层混合破断			式(9) τ_{xy} 式(8) σ_y “S-R”判定方程
	⑦	拉应力 横向剪应力	拉剪分层混合破断			式(9) τ_{xy} 式(8) σ_y “S-R”判定方程

5 结 论

(1) 统计分析了 23 个典型工作面岩层采动破断行为,发现厚跨比是岩层破断模式转变的一个重要影响因素:当厚跨比小于 0.5 时,岩层破断会形成砌体梁结构;当厚跨比大于 0.5 时,岩层破断会形成台阶岩梁;厚跨比 0.5 是岩层破断模式转变的临界点。

(2) 通过中厚板理论分析了不同厚度岩层破断力学机理发现,随着岩层厚度的增加,岩层所受剪应力也在不断增加,诱发岩层破断的力学因素具有拉破坏、拉剪破坏、剪破坏的演化规律。

(3) 理论及数值分析表明,随着岩层厚度的增加,岩层的破断模式呈现出拉破断形成的砌体梁、拉剪破断形成的分层断裂、端部拉剪破断形成的砌体梁以及剪切破断形成的台阶岩梁。

(4) 数值分析显示,厚松散层条件下煤层开采过程中,覆岩整体移动规律符合“类双曲线”模型,且随着关键层的厚度增加,“类双曲线”下半段的基岩破断迹线曲率逐渐降低。

(5) 通过理论分析和数值模拟对岩层破断机理进行了讨论,基于“砌体梁”理论,采用断裂力学的思想

提出了采动覆岩混合破断模式。通过混合破断模式得到了3种破断机制、7类破断模式:薄岩层常见的拉破断及遇断层引起的剪破断;厚岩层出现的拉破断、拉剪破断及剪切破断,其中拉剪破断分为端部拉剪混合破断、分层联动运动及分层非协调运动。

参考文献(References):

- [1] 黄庆享,钱鸣高,石平五.浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析[J].*煤炭学报*,1999,24(6):581-585.
HUANG Qingxiang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in longwall face[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(6): 581-585.
- [2] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [3] 许家林,鞠金峰.特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(8):1547-1556.
XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behavior in fully mechanized face with super large height[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(8): 1547-1556.
- [4] DOU Linming, HE Xueqiu, HE Hu, et al. Spatial structure evolution of overlying strata and inducing mechanism of rockburst in coal mine[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(4): 1255-1261.
- [5] CHLEBOWSKI Dariusz, ZORYCHTA Andrzej, BURTAN Zbigniew, et al. Location of opening-out cross-cuts in relation to rockburst hazard conditions along the face in the light of model testing[J]. *Archives of Mining Sciences*, 2017, 62(1): 121-130.
- [6] 潘一山.煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J].*煤炭学报*,2018,43(8):2091-2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [7] 钱鸣高,许家林.煤炭开采与岩层运动[J].*煤炭学报*,2019,44(4):973-984.
QIAN Minggao, XU Jialing. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 973-984.
- [8] SUN Y, ZUO J, KARAKUS M, et al. Investigation of movement and damage of integral overburden during shallow coal seam mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 117: 63-75.
- [9] SUN Yunjiang, ZUO Jianping, KARAKUS Murat, et al. A new theoretical method to predict strata movement and surface subsidence due to inclined coal seam mining[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(6): 2723-2740.
- [10] 左建平,吴根水,孙运江,等.岩层移动内外“类双曲线”整体模型研究[J].*煤炭学报*,2021,46(2):333-343.
ZUO Jianping, WU Genshui, SUN Yunjiang, et al. Investigation on the inner and outer analogous hyperbola model(AHM) of strata movement[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 333-343.
- [11] 史红,姜福兴.采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析[J].*岩石力学与工程学报*,2004,23(18):3066-3069.
SHI Hong, JIANG Fuxing. Mechanical analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of longwall face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(18): 3066-3069.
- [12] CHEN Junchao, ZHOU Lei, XIA Binwei, et al. Numerical investigation of 3D distribution of mining-induced fractures in response to longwall mining[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(1): 889-916.
- [13] 朱卫兵,于斌.大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响[J].*煤炭科学技术*,2018,46(1):99-104.
ZHU Weibing, YU Bin. Breakage form and its effect on strata behavior of far field key stlarge space stope[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(1): 99-104.
- [14] 于斌,高瑞,夏彬伟,等.大空间坚硬顶板地面压裂技术与应用[J].*煤炭学报*,2021,46(3):800-811.
YU Bin, GAO Rui, XIA Binwei, et al. Ground fracturing technology and application of hard roof in large space[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 800-811.
- [15] ZUO Jianping, YU Meilu, LI Chunyuan, 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*, 2020, 30(1): 657-680.
- [16] 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. Analysis of 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.
- [17] JU Yang, WANG Yongliang, SU Chuanshang, 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.
- [18] 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.
- [19] GAO Fuqiang, STEAD Doug, COGGAN John. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 55: 448-460.
- [20] MAJDI Abbas, HASSANI Ferri P., NASIRI Mehdi Yousef. Prediction of the height of destressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 98: 62-72.
- [21] KELLY M, LUO X, CRAIG S. Integrating tools for longwall geomechanics assessment[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(5): 661-676.
- [22] 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.
- [23] 杨科, 刘文杰, 焦彪, 等. 深部厚硬顶板综放开采覆岩运移三维物理模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 85-93.
- YANG Ke, LIU Wenjie, JIAO Biao, et al. Three-dimensional physical simulation of over-burden migration in deep thick hard roof fully-mechanized caving mining[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 85-93.
- [24] 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.
- [25] NING Jianguo, WANG Jun, TAN Yunliang, 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.
- [26] 王树仁, 贾会会, 武崇福. 动荷载作用下采空区顶板安全厚度确定方法及其工程应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1263-1268.
- WANG Shuren, JIA Huihui, WU Chongfu. Determination method of roof safety thickness in the mined-out regions under dynamic loading and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(8): 1263-1268.
- [27] YU Meilu, ZUO Jianping, SUN Yunjiang, 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.
- [28] 祝方才, 曹平, 万文. 基于轴对称厚板模型的浅埋空区顶板安全厚度[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 115-118.
- ZHU Fangcai, CAO Ping, WAN Wen. Determination of safe roof thickness of underground shallow openings based on axisymmetric thick plate model[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(1): 115-118.
- [29] 侯忠杰. 厚砂下煤层覆岩破坏机理探讨[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995(1): 37-40.
- HOU Zhongjie. Discussion on overlying strata failure mechanism of coal seam under thick sand stratum[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1995(1): 37-40.
- [30] 尹希文. 浅埋超大采高工作面覆岩“切落体”结构模型及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1961-1970.
- YIN Xiwen. Cutting block structure model of overburden with shallow buried coal seam and ultra-large mining height working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 1961-1970.
- [31] 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.
- [32] 王金安, 刘红, 纪洪广. 地下开采上覆巨厚岩层断裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2815-2823.
- WANG Jin'an, LIU Hong, JI Hongguang. Study on fracture mechanism of overlying super-thick rock stratum in underground mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S1): 2815-2823.
- [33] 王庆雄, 鞠金峰. 450 m超长综采工作面矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 125-128.
- WANG Qingxiong, JU Jinfeng. Study on Mine strata pressure behavior law of 450 m ultra long fully-mechanized coal mining face[J]. *Coal Science & Technology*, 2014, 42(3): 125-128.
- [34] 崔峰, 杨彦斌, 来兴平, 等. 基于微震监测关键层破断诱发冲击地压的物理相似材料模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 803-814.
- CUI Feng, YANG Yanbin, LAI Xingping, et al. Similar material simulation experimental study on rockbursts induced by key stratum breaking based on microseismic monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 803-814.
- [35] 何祥, 杨科, 袁亮, 等. 双关键层跨煤组远程卸压增透效应试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 238-246.
- HE Xiang, YANG Ke, YUAN Liang, et al. experimental study of pressure relief and permeability improvement effect of the remote protected layer crossing coal groups with double key strata[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(2): 238-246.
- [36] 刘建伟. 塔山矿大采高综放开采坚硬顶板矿压特征与控制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- LIU Jianwei. Study on characteristics and control of rock pressure of hard roof in fully mechanized top coal caving mining with large mining height in Tashan Mine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [37] 丁斌, 邢士军, 马俊鹏, 等. 超长综放面矿压规律与支架适应性分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(4): 99-101.
- DING Bin, XING Shijun, MA Junpeng, et al. Analysis of ground pressure law and support adaptability in super long fully mechanized top coal caving face[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 2005(4): 99-101.
- [38] 任新龙. 南屯煤矿采空区下薄煤层工作面开采矿压活动规律[J]. 煤矿安全, 2017, 48(3): 212-215.
- REN Xinlong. Laws of mining strata pressure of thin coal seam working face under goaf in Nantun Coal Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(3): 212-215.
- [39] 刘金海, 姜福兴, 孙广京, 等. 深井综放面沿空顺槽超前液压支架选型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2232-2239.
- LIU Jinhai, JIANG Fuxing, SUN Guangjing, et al. Selection of advanced hydraulic support in gob-side entry of fully mechanized caving face of deep mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2232-2239.
- [40] 黄庆享, 田小明, 杨俊哲, 等. 浅埋煤层高产工作面矿压分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999(Z1): 53-56,238.
- HUANG Qingxiang, TIAN Xiaoming, YANG Junzhe, et al. Study on ground pressure of coal face with high productivity under shallow bury condition[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1999(Z1): 53-56,238.

- [41] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(8): 1174–1177.
HUANG Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2002, 21(8): 1174–1177.
- [42] 杨治林, 余学义, 郭何明, 等. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(12): 1763–1766.
YANG Zhilin, YU Xueyi, GUO Heming, et al. Study on catastrophe mechanism for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1763–1766.
- [43] 杨俊哲, 尹希文, 李正杰, 等. 浅埋煤层覆岩运移规律与围岩控制[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 301.
- [44] 王国旺. 活鸡兔井工作面矿压规律及安全措施[J]. *陕西煤炭*, 2007(1): 53–54.
WANG Guowang. Ground pressure law and safety measures in working face of Huojitu Mine[J]. *Shaanxi Coal*, 2007(1): 53–54.
- [45] 任艳芳. 浅埋煤层长壁开采覆岩结构特征研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
REN Yanfang. Study on structure characteristics of overlying strata in shallow coal seam under longwall mining [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2008.
- [46] 李康华. 浅埋近距离煤层采空区下工作面顶板结构与支护阻力研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
LI Kanghua. Research on the roof structure and support resistance of the working face under close coal seam goaf in shallow buried[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [47] 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.
- [48] LEI Bo, ZUO Jianping, LIU Haiyan, et al. Experimental and numerical investigation on shale fracture behavior with different bedding properties[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 247: 107639.
- [49] ZUO Jianping, SHEN Jiayi. The Hoek-Brown Failure criterion —From theory to application[M]. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [50] JI Songtao, WANG Zeng, KARLOVŠEK Jurij. 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.
- [51] 胡成栋. 矩形弹性中厚板的短梁函数解法[J]. *工程力学*, 1986(4): 14–26.
HU Chengdong. The solution of short beam functions for rectangular elastic middle-thick plates[J]. *Engineering Mechanics*, 1986(4): 14–26.
- [52] 李淑军. 柠条塔矿近距离煤层群开采覆岩破坏及裂隙带发育高度研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
LI Shujun. Study on overburden failure and development height of fracture zone in close distance coal seams group mining in Ningtiaota coal mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [53] 高玉兵. 柠条塔煤矿厚煤层110工法关键问题研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
GAO Yubing. Study on key issues of 110 mining method used in a thick coal seam – A case study in Ningtiaota coal mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2018.
- [54] 左建平, 孙运江, 钱鸣高. 厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1372–1379.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, QIAN Minggao. Movement mechanism and analogous hyperbola model of overlying strata with thick alluvium[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1372–1379.
- [55] 左建平, 孙运江, 王金涛, 等. 充分采动覆岩“类双曲线”破坏移动机理及模拟分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(1): 71–77.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WANG Jintao, et al. Mechanical and numerical analysis of “analogous hyperbola” movement of overlying strata after full mining extraction[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(1): 71–77.
- [56] 左建平, 于美鲁, 孙运江, 等. 采矿岩层破断力学及内外类双曲线整体移动模型[J]. *中国科学基金*, 2022, 36(1): 128–136.
ZUO Jianping, YU Meilu, SUN Yunjiang, et al. Mining strata fracture mechanics and inner and outer analogous hyperbola integramovement mode[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(1): 128–136.