基于断裂力学的浅埋工作面过沟谷地形上坡段切顶机理分析*

杨登峰1,李小双2,马天辉3,谢生荣4

(1.青岛理工大学理学院,山东青岛市 266520;
2.常州大学城市建设学院,江苏常州市 213164;
3.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁大连市 116024;
4.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083)

摘要:浅埋煤层工作面推进至沟谷地形上坡段时,易出现关 键层破断块体沿煤壁整体滑落失稳的大范围动载矿压灾害。 根据沟谷上坡段顶板破断特征,基于断裂力学分析方法构建 力学模型,探讨了顶板失稳的力学机理及基本顶破断失稳条 件,获得了顶板来压步距及支架工作阻力的计算公式,并对 各关键致灾因素进行了分析。研究结果表明:随着工作面推 进,基本顶损伤区裂纹尖端的集中应力和应力强度因子增 大,当应力强度因子增大到临界值时,悬臂梁破断工作面来 压;沟谷坡角大小对来压步距及支架工作阻力起主要作用, 损伤区裂纹长度、基本顶厚度、断裂韧性等因素也对其有较 大影响;通过在麻地梁煤矿 2103 工作面进行现场监测,对理 论分析结果进行了验证,进一步分析了支架阻力的合理值。 研究工作提高了工作面过沟谷地形上坡段顶板控制的准确 性,能够有效促进矿井的安全生产。

关键词:浅埋煤层;沟谷地形;上坡段;断裂力学;支架工作 阻力

中图分类号:TD323 文献标识码:A 文章编号:1005-2763(2024)04-0097-10

0 前言

我国煤炭资源开发的重心不断向西部转移,浅 埋煤层的开采规模及强度日益扩大,由此带来的安 全问题也越来越受重视^[1-3]。我国西部煤层主要为 厚及特厚煤层,埋藏浅且地表起伏较大,多为沟谷发 育地区,且坡体的产状变化较大^[4-7]。浅埋煤层开采 过程中易受到沟谷地形的影响,尤其是在经过上坡 段时,工作面来压迅猛、破坏力大,常会发生支架活 柱急剧下缩甚至支架"压死"等事故,严重影响煤矿 的安全生产[8]。

较多专家学者针对沟谷地形对矿压的影响进行 了深入研究,其中许家林、张志强等[9-12]指出顶板的 单一关键层结构是造成沟谷地形上坡段开采易发生 动载矿压事故的根本原因。赵杰等[13-14] 通过构建 力学模型,指出沟谷地形关键层破断方式分为滑落 失稳及回转失稳,并探讨了顶板破断方式与上坡角 度的关系。王旭锋等[15-16]指出冲沟坡体下开采时 基本顶初次破断具有不对称性,通过构建力学模型 得到了控制顶板结构滑落失稳的支护阻力计算公 式。张杰等[17-18]构建了沟谷地形关键层非均布载 荷梁结构力学模型,解释了工作面过沟谷底部时的 动载机理。李建伟等[19-20]指出过沟谷区域上坡开 采阶段,工作面易发生动载矿压事故。王双明等[21] 指出沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏形成双分层块体 结构,地表块体平均长度由坡底至坡顶逐渐增大。 孙学阳等[22] 探讨了双沟地形沟谷参数与地表裂缝 发育相对位置之间的关系。张志强等[23]指出沟谷 深度越大,矿压显现越剧烈,越容易发生失稳显现。 肖国刚等[24]分析指出沟谷地形条件下,冲沟切割系 数对支架阻力的影响大于沟谷坡脚。王方田等[25] 通过对比发现沟谷条件下煤层开采矿压显现强弱剧 烈程度依次为"背沟段、向沟段、沟底段、正常开采 段"。张广磊等[26]将沟谷地形下开采引起的地表径 流分布分为"稳定""衍生""转移""恶化"共4种类 型。路琦等[27] 通过模拟分析指出当工作面位于沟 谷区一侧斜坡下方时,斜坡首先在坡顶处发生破坏,

^{*} 收稿日期:2023-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51704173);山东省重点研发计划项目(2019GSF111029);山东省深部冲击地压灾害评估工程实验室 开放基金项目(LMYK2021007).

作者简介:杨登峰(1983—),男,山东菏泽人,博士,讲师,主要从事矿山压力与支架-围岩关系方面的研究工作,E-mail:yang_dengfeng @qut.edu.cn。

进而推动斜坡发生整体滑移。车晓阳等[28]将浅埋 煤层过沟开采时覆岩地表裂缝分为顺向坡推挤裂 缝、逆向坡拉张裂缝和沟底隆起3种类型。刘志辉 等^[29]指出浅埋煤层开采时沟谷两侧斜坡位移以竖 直方向为主,水平方向位移均指向采空区中心。冯 超越等[30]指出断层会降低采煤斜坡的稳定性,促进 其失稳破坏。秦喜文等[31]指出浅部原岩应力主要 受到黄土沟壑地貌的影响,而深部原岩应力主要与 岩层埋深有关。谢党虎[32]构建了"非均布载荷梁" 结构模型,确定了沟谷地形浅埋薄基岩覆岩基本顶 两端压力、剪力及跨距等参数的计算公式。侯恩科 等[33-35]总结得到黄土沟壑区极浅埋煤层开采地表 裂缝的变化特征为"先开-后合-再开"。高浩然 等[36]研究发现过沟谷地形上坡段过程中主关键层 未发生缺失条件下,工作面矿压显现正常。综合以 上研究成果,浅埋煤层过沟谷地形上坡段开采过程 中的覆岩切落失稳特征、矿压显现机理及关键致灾 因素等内容仍需要进一步深入研究。

过沟谷区域上坡段煤层工作面采高一般较大, 导致采空区垮落填充不充分,基本顶岩梁在上覆荷 载作用下破断回转,在此过程中顶板岩体内部的裂 纹发育、扩展、贯通,使顶板形成带裂纹的岩梁,在裂 纹未完全贯通顶板之前,可假定基本顶为带裂纹的 悬臂梁,在外荷载作用下裂纹扩展贯通的过程就是 顶板岩梁回转失稳的过程^[37-38]。因此,可以通过断 裂力学中研究裂纹的方法来研究过沟谷地形工作面 顶板岩梁的垮落及支护条件。

本文以麻地梁煤矿沟谷区域浅埋煤层地质条件 为基础,综合考虑沟谷形态、边坡倾角、覆岩关键层 厚度、物理力学性质等因素,通过断裂力学方法构建 分析模型,探讨关键层缺失情况下浅埋煤层过沟谷 上坡段开采时覆岩切落失稳的力学机理及关键致灾 因素。理论研究成果对浅埋煤层过沟谷地形上坡段 开采时工作面安全开采具有一定的指导意义。

1 工作面岩性及矿压观测

1.1 工作面岩性

麻地梁煤矿位于内蒙古准格尔旗南部,矿区内 沟谷纵横地形起伏较大,煤层倾角为3°~7°,平均厚 度为4.6 m,埋藏较浅,平均埋深为89.71 m,是典型 的沟谷区域浅埋煤层。目前矿区主采2⁻²上煤层, 直接顶由砂质泥岩、泥岩、细粒砂岩、薄层粉砂岩等 岩层组成,厚度一般为2.8~4.74 m。基本顶一般由 中、细粒砂岩及粉砂岩组成。2103 工作面选用 ZY11000/32/55 型液压支架,采用全部垮落法管理 顶板,工作面岩性见表1。

表 1 2103 号工作面岩性 Table 1 Lithology of 2103 working face

岩层名称	厚度/m	埋深/m	
砂层	47.03	47.03	
粉砂岩	5.32	52.35	
细砂岩	6.24	58.59	
粉砂岩	5.96	64.55	
砂岩	4.37	68.92	
细砂岩	4.55	73.47	
砂岩夹层	3.48	76.95	
粉砂岩	3.46	80.41	
细砂岩	4.56	84.97	
泥岩	4.74	89.71	
2^{-2} 上煤层	4.60	94.31	
粉砂岩	6.42	100.73	
细砂岩	4.51	105.24	
泥岩	5.44	110.68	
粉砂岩	4.34	115.02	
碳质泥岩	4.20	119.22	
砂质泥岩	2.80	122.02	
2 ⁻² 煤层	5.80	127.82	
细粉砂岩	6.50	134.32	

1.2 过沟谷地形动载矿压现象

2103 工作面在推进过程中共经过了 4 个沟谷 区段(见图 1),落差为 53.4~60.1 m,沿走向坡面倾 角为 37°~62°,开采方式为单一关键层条件下的浅 埋煤层开采,沟谷相对高差及坡脚变化较大,沟谷区 域缺失关键层。



图 1 工作面沟谷地形 Fig.1 Valley terrain of working face

表 2 为 2103 工作面过 4 个沟谷上坡段时顶板 初次来压及矿压特征统计。结合现场监测资料, 2103 工作面过沟谷区域上坡段过程中,都出现了支 架活柱急剧大幅下缩、端面漏冒等矿压显现现象。 在 4[#]沟谷的上坡段开采期间,其关键层初次破断造 成的动载显现现象比 1[#]、2[#]和 3[#]沟谷更为剧烈,且 顶板的破断步距降幅较大,工作面在经过 4[#]沟谷上 坡段时覆岩关键层沿煤壁发生剪切破坏,出现了顶 板大范围切落压架现象。 表 2 工作面过沟谷上坡段顶板破断形式及矿压显现特征 Table 2 Roof fracture forms and rock pressure behavior characteristics of the working face crossing the

uphill section of valley

沟谷矿压规律	坡角/ (°)	跨距/ m	支架工作 阻力/kN		破断	动载	主关键 层是否
	. /		来压前	来压时	10-1		缺失
1#沟谷初次来压	41	15.2	7122	10 720	拉断	1.44	是
1#沟谷周期来压	41	15.6	8100	$10\ 200$	拉断	1.26	是
2#沟谷初次来压	44	14.8	7544	$10 \ 900$	拉断	1.40	是
2#沟谷周期来压	44	14.6	7865	9500	拉断	1.22	是
3#沟谷初次来压	50	13.8	7720	$10 \ 610$	拉断	1.36	是
3 # 沟谷周期来压	50	13.4	7632	9833	拉断	1.25	是
4 # 沟谷初次来压	63	11.0	8130	$11\ 750$	剪断	1.56	是

图 2 为工作面过 4* 沟谷上坡段时关键层初次 破断各支架工作阻力分布直方图。由图 2 可知,工作 面初次来压期间中部的压力较大,一般能够达到 10 200 kN以上,最大时为11 750 kN,超出了支架的 额定工作阻力。其中 43~81 号支架间发生了严重的 端面冒落及台阶下沉,支架间片帮达 1.2~2.1 m,架 前漏顶高度达到 1.6~2.0 m,活柱最大下缩量约为 420 mm,支架安全阀开启频繁,平均动载系数为1.56, 支架出现前梁低头现象,部分支架出现了损毁(见图 3(a))。尤其是在过沟谷地形上坡段时发生动载矿压 的位置,井上下出现联动现象,采动裂缝将整个上坡 段山体贯穿,最大张开度达 1.3 m,台阶下沉量超过了 1.1 m。地表裂缝及支架损毁如图 3 所示。







(a) 支架被"压死"

(b) 地面台阶下沉

图 3 过沟谷地形工作面切顶压架及地表下沉 Fig.3 Roof cutting and support crushing and surface subsidence of working face crossing valley terrain 结合煤矿生产实践,由于 2103 工作面沟谷区域 上坡段主关键层缺失,来压时已破断岩体之间无水 平作用力,无法形成传统的"砌体梁"结构,出现切落 失稳现象。造成工作面矿压的剧烈显现,煤壁发生 片帮,严重影响了工作面的安全生产。因为关键层 完整时工作面过沟谷区域时矿压显现不剧烈,为此 本文主要针对关键层缺失情况下过沟谷地形上坡段 开采时覆岩关键层的动载矿压形成机理及关键致灾 因素进行研究。

2 过沟谷上坡段覆岩切落特征及力学模型

2.1 关键层结构及承载特征

浅埋煤层工作面推进至沟谷上坡段时,由于关 键层的缺失,致使顶板难以形成稳定的"砌体梁"结构,而是以"悬臂梁"的方式存在^[15]。工作面在过沟 谷区域上坡段时上覆岩层的厚度逐渐增大,使"悬臂 梁"受非均布载荷作用,岩体可能发生拉断破坏,也 可能发生剪断破坏,关键层对应的失稳形式为回转 失稳或滑落失稳。与回转失稳对比可以发现,顶板 滑落失稳时上覆岩层载荷形成对支架的直接作用 力,造成顶板切落的压架灾害。考虑基本顶在煤壁 前方切落这一最不利的情况,工作面过沟谷地形上 坡段时覆岩关键层初次来压的简化模型如图 4 所示。



图 4 沟谷地形上坡段工作面顶板切落失稳 Fig.4 Cutting instability of roof at the working face in the uphill section of the valley terrain

2.2 关键层破断力学模型

工作面关键层初次破断前为"悬臂梁"结构且受 线性载荷作用,其简化力学模型如图 5 所示。随着 工作面的推进,"悬臂梁"结构悬伸长度越来越大,顶 板在上覆荷载作用下最终滑落失稳破断,同时失去 了对上覆岩层的支撑作用,形成大规模顶板灾害。 "悬臂梁"结构失稳过程中,其自身的主控裂纹对损 伤区的发展起主要控制作用,并且因为"悬臂梁"结 构中的裂纹是受复杂荷载作用下的复合型裂纹,这 种裂纹通常是压剪裂纹,依据顶板破断特征,损伤裂 纹倾角 β 为 90°,即裂纹与岩梁垂直,悬臂梁长度为 a,宽度为h,支架作用力到煤壁的距离为c。"悬臂 梁"结构所受荷载包括覆岩载荷 R 和支架支撑力 Q_z 。图中 F_x 与 M_x 分别为"悬臂梁"固定端的剪力 和弯矩, θ 为沟谷区域上坡段坡角,q(x)为作用在关 键层上的覆岩载荷,可以表示为:

$$q(x) = x\rho g \tan\theta \tag{1}$$

式中, ρ为关键层上覆岩层的平均岩体密度。



图 5 覆岩关键层力学分析模型 Fig.5 Mechanical analysis model for key stratum of overburden

将"悬臂梁"结构视为带边裂纹的有限板模型,由 于关键层缺失,"悬臂梁"不受水平应力作用,在分析 裂缝受力时,只需考虑剪应力和弯矩的作用,因此,将 岩梁分别简化为剪应力及弯矩作用下的含边裂纹的 有限板应力强度因子计算模型如图 6 所示。模型中, 将上覆岩层荷载分解成集中力 q 和弯矩 M,R 与"悬 臂梁"自身重力 Q_x及下部支架的支撑作用力 Q_z的合 力共同形成对"悬臂梁"边裂纹的剪切作用力 p。



受线性荷载作用的"悬臂梁"结构,其固定端的 剪力 F_x和弯矩 M_x可以通过材料力学方法进行计 算[13],分别为:

$$(F_{x})_{x=l} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\tau_{xy})_{x=l} \,\mathrm{d}y = -\frac{\rho g l \tan \theta}{2} \quad (2)$$

$$(M_x)_{x=l} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x)_{x=l} dy = -\frac{\rho g l^2 \tan \theta}{6}$$
 (3)

式中,h, τ 分别为是臂梁岩块厚度和岩块长度,m; τ_{xy} 为岩梁xy平面的切应力; σ_x 为岩梁x方向正 应力。

两种荷载作用条件下的应力强度因子可以通过 如下公式进行计算^[39]。

(1) 剪应力引起的应力强度因子。由图 6(a)可 知,将顶板所受的上覆岩层集中荷载、"悬臂梁"重力 及支架支撑力对裂纹的剪切作用力,简化成含边裂 纹顶板在单轴压缩作用下的受力模型,则剪力的合 力为 $P = \frac{1}{2}F_s + Q_x - Q_z$,代入式(2),则剪应力作 用下的应力强度因子可以表示为:

$$K_{II} = 2PF_{\tau}(a/h)/\sqrt{\pi a} =$$
$$2F_{\tau}(\frac{\rho g l \tan \theta}{4} + Q_x - Q_z)(a/h)/\sqrt{\pi a} \qquad (4)$$

式中,
$$F_{\tau} = \frac{1.3 - 0.65 \frac{a}{h} + 0.37 \left(\frac{a}{h}\right)^2 + 0.28 \left(\frac{a}{h}\right)^3}{\sqrt{1 - a/h}}$$
。

(2) 弯矩引起的应力强度因子。由图 6(b)可 知,受弯矩影响的裂纹可简化为纯弯曲单边裂缝,其 中岩梁主要承受支架工作阻力 Q_z、自身重力 Q_x和 上坡段岩层的荷载 q(x),这 3 个力的合力构成岩梁 上的弯矩 M(c)效应,造成裂纹的扩展。参考材料 力学计算方法,则弯矩作用下的应力强度因子可以 表示为:

$$K_{\rm I} = F_M \frac{a\sqrt{\pi a}}{h^3} (\rho g l^2 \tan\theta + 3Q_x l - 6Q_z c) \quad (5)$$

式中, $F_M = 1.122 - 1.4 \frac{a}{h} + 7.33 \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 13.08$ $\left(\frac{a}{h}\right)^3 + 14 \left(\frac{a}{h}\right)^4$ 。

"悬臂梁"边裂纹尖端的应力强度因子是以上两种简单荷载作用下的应力强度因子的叠加,则"悬臂梁"边裂纹的应力强度因子可以表示为:

$$\begin{cases} K_{\rm I} = F_{\rm M} \frac{a \sqrt{\pi a}}{h^3} (\rho g l^2 \tan \theta + 3Q_x l - 6Q_z c) \\ K_{\rm I} = 2F_x (\frac{\rho g l \tan \theta}{4} + Q_x - Q_z) (a/h) / \sqrt{\pi a} \end{cases}$$
(6)
由式(6)可知,"悬臂梁"结构裂纹尖端的应力强

度因子不仅与裂纹长度和岩梁厚度直接相关,还和 上覆岩层荷载 q、上坡段坡角 θ 、岩梁破断步距 l 和 支承作用力Q。等因素相关。这些因素的综合作用 决定了岩梁中裂纹的活化、扩展和贯通,最终造成了 顶板的大范围切落。具体表现为:随着裂纹长度 a 的增大,K₁和K₁都随之增大,表明裂纹长度增大, 裂纹扩展路径变短,裂纹扩展所需应力减小,更容易 诱发顶板失稳。当岩梁厚度 h 增大时,K I 以负三 次幂函数形式递减,而K_I以负一次幂函数形式递 减,表明顶板厚度增加,不利于破断来压。随着上覆 岩层荷载 R 增大,K 和 K 均线性增大,表明上覆 岩层荷载增加裂纹更容易达到岩梁的断裂韧性,造 成裂纹的扩展,与裂纹长度 a 的分析结论相似。坡 角 θ 对 K_{I} 和 K_{I} 的影响与覆岩荷载类似,增大时应 力集中作用增大,会造成应力强度因子增大,更容易 诱发顶板切落。随着顶板悬伸长度增大,K₁以二 次幂函数形式增大,K 1线性增加,表明顶板悬伸长 度增加,有利于顶板的破断,与实际情况相符。随着 岩梁下覆支撑作用力 Q₂的增大,K₁和 K₁都随之 减小,岩梁稳定性增加,表明增大支撑作用力可以抵 消岩梁上方的作用力,裂纹不容易扩展,有利于顶板 稳定,保证工作面的稳定性。

结合大量试验及现场研究,岩石及混凝土材料 断裂情况下的判据^[40]可以表示为:

$$\lambda \sum K_{\mathrm{I}} + \left| \sum K_{\mathrm{II}} \right| = K_{c} \tag{7}$$

式中,λ为压剪比系数;K。为岩石的断裂韧性。

将式(6)代入式(7)可得沟谷地形上坡段"悬臂 梁"岩层的破断条件。

$$\lambda F_{M} \frac{a \sqrt{\pi a}}{h^{3}} (\rho g l^{2} \tan \theta + 3Q_{x} l - 6Q_{z} c) + \frac{2F_{\tau} a}{h \sqrt{\pi a}} (\frac{\rho g l \tan \theta}{4} + Q_{x} - Q_{z}) = K_{c} \qquad (8)$$

2.3 "悬臂梁"破断的极限跨距分析

通过式(8)可推导出工作面过沟谷上坡段顶板 初次破断的极限跨距为:

$$l = \frac{\left(\frac{2F_{\tau}a\rho g \tan\theta}{4h\sqrt{\pi a}} - \frac{3\lambda F_{M}aQ_{x}\sqrt{\pi a}}{h^{3}}\right)}{2\lambda F_{M}} + \frac{2\lambda F_{M}a\sqrt{\pi a}}{h^{3}}\rho g \tan\theta}$$

$$\frac{\lambda F_{M}aQ_{x}\sqrt{\pi a}}{h^{3}} - \frac{2F_{\tau}a\rho g \tan\theta}{4h\sqrt{\pi a}}\right)^{2} + \frac{4\lambda F_{M}a\rho g \tan\theta}{h^{3}}\left(\frac{6\lambda F_{M}Q_{z}a^{2}c\pi}{h^{3}} - \frac{2F_{\tau}aQ_{x}}{h} + \frac{2F_{\tau}aQ_{z}}{h} + K_{c}\sqrt{\pi a}\right)}{h^{3}}$$

$$(9)$$

$$2\lambda F_M \frac{a\sqrt{\pi a}}{h^3} \rho g \tan\theta$$

沟谷地形上坡段开采过程中,基本顶的来压步 距按照"悬臂梁"的破断来确定。由断裂力学理论 推导出的岩梁断裂步距表达式(式(9))比材料力学 推导得到的表达式更加复杂。因为断裂力学中考虑 了更多的影响因素,结合现场实际情况,多考虑了边 坡角度、主控裂纹倾角、裂纹长度 a 及支架的支撑力 Q_a等因素。而材料力学的推导只考虑了均布荷载 作用下岩梁的弯曲及拉伸断裂形式。因此,根据断 裂力学推导得到的来压步距计算公式更准确,也更 符合工程实际。

在浅埋煤层过沟谷地形上坡段开采过程中,边 坡角度、裂纹长度、"悬臂梁"厚度及断裂韧性对基本 顶破断步距的影响如图7所示。由图7的曲线变化 趋势可知,在其他条件一定的情况下,基本顶破断步 距与沟谷地形上坡段边坡角度成近似余切形式不断 減小,由图 7(a)可知,随着边坡角度增大,基本顶上 覆载荷增大,荷载集中程度增加,更容易使基本顶破 断失稳,造成切顶灾害;由图 7(b)可知,随着裂纹长 度增大,裂纹采动活化扩展,更容易贯穿基本顶,造 成岩梁破断;由图 7(c)可知,基本顶厚度越大,岩梁 越不容易发生破断,且采动损伤不容易贯穿基本顶, 因此,来压步距长度随岩梁厚度增大呈二次函数形式 增大;由图 7(d)可知,随着岩体断裂韧性的增大,岩层 破断难度增大,基本顶破断步距以幂函数形式不断增 大。对比 4 个参数对基本顶破断步距的影响可以发 现:边坡角度 θ 的影响最大,裂纹长度 a 次之,"悬臂 梁"岩层厚度 h 又次,岩石断裂韧性 K_c 最小。因为 "悬臂梁"岩层的重力可以表示为: $Q_x = \gamma l_i h_i$, γ 为岩 层容重。"悬臂梁"的来压步距还与岩层岩性相关,岩 体的物理力学性质是决定其破断的内在原因。







2.4 支架工作阻力分析

对式(8)进一步推导,可以得到过沟谷上坡段

"悬臂梁"失稳时,保障工作面稳定所需的支架工作 阻力计算公式。

$$Q_{z} = \frac{\lambda F_{M} \frac{a \sqrt{\pi a}}{h^{3}} (\rho g l^{2} \tan \theta + 3Q_{x} l) + \frac{2F_{\tau} a}{h \sqrt{\pi a}} (-\frac{\rho g l \tan \theta}{4} + Q_{x}) - K_{c}}{(\frac{2F_{\tau} a}{h \sqrt{\pi a}} + \lambda F_{M} \frac{a \sqrt{\pi a}}{h^{3}} 6c)}$$
(10)

为深入分析大采高条件下支架工作阻力影响因 素,结合麻地梁煤矿 2103 工作面工程地质条件,根 据式(10)分析了边坡角度、来压步距、裂纹长度及上 覆岩层荷载对支架工作阻力的影响,结果如图 8 所示。

由图 8 的曲线变化趋势可知,在其他条件一定 的情况下,支架工作阻力值与边坡角度成近似正切 形式不断增大,由图 8(a)可知,随着边坡角度的增 大,基本顶上覆载荷增大,荷载集中程度增加,基本 顶破断切落失稳时形成的荷载也随之增加,造成了 支架工作阻力的增大;由图 8(b)可知,支架工作阻 力与顶板的破断步距τ呈近似二次函数正相关关 系,"悬臂梁"破断步距τ增大时,作用在支架上的岩 层荷载值增加,需要更大的支护阻力才能平衡上覆 岩层荷载,使支架工作阻力增加;由图 8(c)可知,支 架工作阻力与裂纹长度 a 呈近似线性正相关,当裂 纹长度 a 增大时,"悬臂梁"回转失稳时裂纹的扩展 路径减小,更容易贯穿岩层,造成"悬臂梁"的失稳垮 落,使支架工作阻力增大,裂纹长度对支架工作阻力 的影响是通过"悬臂梁"顶板的破断失稳来实现的; 由图 8(d)可知,支架工作阻力与上覆岩层荷载呈线 性正相关,上覆岩层荷载增大,通过"悬臂梁"作用于 支架的荷载增大,支架需要提供更大的作用力才能 保证工作面稳定。这与实际情况相符合。



图 8 支架工作阻力影响因素

Fig.8 Factors affecting the working resistance of the support

3 工作面上坡阶段开采动压防治实践

提高支架工作阻力是降低工作面压架灾害强烈 程度的有效措施,但支架阻力需提升至何值仍需根 据压架灾害的发生机理进行确定,即应保证覆岩关 键层结构不发生失稳。因此,需要根据上述麻地梁 煤矿 2103 工作面 2[#]上煤层的开采条件,结合断裂 力学模型中支架工作阻力的计算公式,对工作面过 沟谷上坡段时支架的合理工作阻力进行计算。分析 当前所选液压支架的适应性,并验证理论分析的合 理性。根据工作面实际开采情况确定以下参数:边 坡角度 $\theta = 63^{\circ}$,上坡段基本顶岩层的平均容重 $\rho =$ 26.3 kN/m³, $\lambda = 1$, $Q_x = 3.2$ MPa, $K_c = 1.03$ MN/m^{3/2}, h = 5.2 m。实测麻地梁煤矿 2103 工作面总的平均 周期来压步距为 11.0 m,基本顶的裂纹平均长度为 2.4 m。

将各参数代入理论分析结果式(9)中进行计算, 可得上坡段"悬臂梁"破断步距为 10.58 m,对比式 (9)计算得到的结果可以发现,通过理论分析计算得 到的"悬臂梁"破断步距与 4* 沟谷基本顶初次来压 的实测值 11.0 m 较为接近。将各参数代入理论分析结果式(10)中进行计算,可得支架工作阻力为 11 703 kN,由理论计算结果可知,其与 4[#]沟谷现场 监测的最大值11 750 kN 较为接近,2103 工作面选 用的液压支架支护阻力低于理论计算结果,不能满 足对顶板支撑的要求。综合以上分析,并结合开采 实践可知,在保证生产任务及支护工程质量的基础 上,2103 工作面开采过程中需合理提高支架工作阻 力才能保证工作面的稳定性,保障工作面的安全高 效回采。

4 结论

本文结合过沟谷地形上坡段大范围动载矿压灾 害特征,建立了基于断裂力学的基本顶初次破断来 压力学机理的分析模型,分析了基本顶主控裂纹发 生扩展的力学条件,得到了基本顶初次破断及支架 工作阻力的计算式,对边坡角度、裂纹长度、基本顶 厚度等工作面稳定的主控因素进行分析。最后通过 工程实例对理论分析结果进行了验证,研究结论 如下。 (1)结合工作面过沟谷地形上坡段开采实践, 将基本顶简化为一个带边裂纹的"悬臂梁",构建了 由结构面控制的"悬臂梁"断裂力学模型,将裂纹尖 端的应力强度因子分解成剪应力和拉应力两个简单 的荷载模型进行综合分析,推导得到了沟谷地形上 坡段"悬臂梁"岩层的破断条件。

(2)通过断裂力学分析获得了基本顶初次破断步距及支架工作阻力的计算公式,并对边坡角度、裂纹长度、断裂韧性等主控因素进行了比较分析。

(3)利用理论分析结论对麻地梁煤矿 2103 工 作面稳定性进行了计算分析,结果表明,工作面满足 失稳条件,与监测结果一致,支护阻力应大于11 703 kN,才能保障工作面的稳定性,与实际监测的支架 工作阻力最大值11 750 kN 较接近。研究可知提高 支架工作阻力是降低工作面压架灾害强烈程度的有 效措施,但支架阻力需提升至何值仍需根据压架灾 害的发生机理进行确定,即应保证覆岩关键层结构 不发生失稳。

参考文献(References):

[1] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐 州:中国矿业大学出版社,2003.

> QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Theory of key stratum in ground control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.

[2] 钱鸣高,缪协兴,何富连.采场"砌体梁"结构的关键块分析 [J].煤炭学报,1994,19(6):557-563.

> QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block inthe structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.

[3] 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.

- [4] 黄庆享,胡火明,刘玉卫,等.浅埋煤层工作面液压支架工作 阻力的确定[J].采矿与安全工程学报,2009,26(3):304-307.
 HUANG Qingxiang, HU Huoming, LIU Yuwei, et al. Determination of proper support resistance in working face of shallowly buried coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2009,26(3):304-307.
- [5] 汪青仓,赵永飞.浅埋深工作面矿压观测[J].矿山压力与顶 板管理,2004,21(3):82-84.

WANG Qingcang, ZHAO Yongfei. Observation of shallow mining face pressure [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(3):82-84.

- [6] 张志强,许家林,王晓振,等. 沟谷地形下浅埋煤层工作面矿 压规律研究究[J].中国煤炭,2011,37(6):55-58.
 ZHANG Zhiqiang, XU Jialin, WANG Xiaozhen, et al.Study of the shallow coal seam face ground pressure laws under hilly and gully terrain[J]. China Coal,2011,37(6):55-58.
- [7] 刘建辉.综采工作面液压支架倒架原因分析及对策[J].中州 煤炭,2014(8):31-33.

LIU Jianhui. Support tilting cause analysis and countermeasures in longwall mining face [J]. Zhongzhou Coal,2014(8):31-33.

- [8] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.沟谷地形对浅埋煤层开采矿压显现的影响机理[J].煤炭学报,2012,37(2):179-185.
 XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, et al. Influencing mechanism of gully terrain on ground pressure behaviors in shallow seam longwall mining[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(2):179-185.
- [9] 许家林,朱卫兵,鞠金峰.浅埋煤层开采压架类型[J].煤炭学报,2014,39(8):1625-1634.
 XU Jialin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1625-1634.
- [10] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.浅埋煤层覆岩关键层结构分类
 [J].煤炭学报,2009,34(7):865-870.
 XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, et al. Classification of key strata structure of overlying strata inshallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2009, 34(7):865-870.
- [11] 张志强,许家林,朱卫兵,等.沟谷坡角对浅埋煤层开采矿压 的影响规律研究[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4): 560-565.

ZHANG Zhiqiang, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Influencing laws study of gully slope angle on dynamic strata pressure of working face in shallow coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 560-565.

- [12] ZHANG Zhiqiang, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Simulation research on the influence of eroded primary key stratum on dynamic strata pressure of shallow coal seams in gully terrain[J]. Mining Science and Technology, 2012, 22 (1):51-55.
- [13] 赵杰,刘长友,李建伟.沟谷区域浅埋煤层工作面覆岩破断及 矿压显现特征[J].煤炭科学技术,2017,45(1):34-40.
 ZHAO Jie, LIU Changyou, LI Jianwei. Overburden failure and strata pressure behavior characteristics under condition ofshallow coal seam in gully terrain[J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):34-40.
- [14] 赵杰,刘长友,李建伟.沟谷区域浅埋厚煤层开采应力场分布 及矿压显现特征[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4): 742-750.

ZHAO Jie, LIU Changyou, LI Jianwei. Stress field distribution and strata behavior characteristics in shallow thick coal seam mining in gully region[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4):742-750.

- [15] WANG Xufeng, ZHANG Dongsheng, FAN Gangwei, et al. Underground pressure characteristics analysis in back-gully mining of shallow coal seam under a bedrock gully slope[J]. Mining Science and Technology,2011,21(1):23-27.
- [16] 王旭锋,张东升,卢鑫,等.浅埋煤层沙土质冲沟坡体下开采 矿压显现特征[J].煤炭科学技术,2010,38(6):18-22.
 WANG Xufeng, ZHANG Dongsheng, Lu Xin, et al. Strata behavior features of shallow depth thin seam mining under sand-soil gully slope[J].Coal Science and Technology,2010,
- 38(6):18-22.
 [17] 张杰,龙晶晶,杨涛,等.浅埋煤层沟谷下开采动载机理研究
 [J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1222-1227.
 ZHANG Jie, LONG Jingjing, YANG Tao, et al. Study on dynamic loading mechanism of mining in gullyarea of shallow coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2019,36(6):1222-1227.
- [18] 张杰,李宏儒,杨森,等.极近距离沟谷地形下工作面矿压规律及支架适应性研究[J].矿业研究与开发,2021,41(12):48-51.
 ZHANG Jie, LI Hongru, YANG Sen, et al. Study on mine pressure law and support adaptability of working face underextermely-close walley terrain [J]. Mining Research and Development,2021,41(12):48-51.
- [19] 李建伟,刘长友,赵杰,等.沟谷区域浅埋煤层采动矿压发生 机理及控制研究[J].煤炭科学技术,2018,46(9):104-110.
 LI Jianwei, LIU Changyou, ZHAO Jie, et al. Study on occurrence mechanism and control technology of mininginduced stratapressure in shallow depth coal seams of valley region [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46 (9): 104-110.
- [20] LI Jianwei, LIU Changyou, ZHAO Tong. Effects of gully terrain on stress field distribution and ground pressure behavior in shallow seam mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(3):255-260.
- [21] 王双明,魏江波,宋世杰,等.黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩 破坏与地表损伤特征研究[J].煤炭科学技术,2022,50(5):
 1-9.

WANG Shuangming, WEI Jiangbo, SONG Shijie, et al. Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5):1-9.

- [22] 孙学阳,张慧萱,卢明皎,等.浅埋煤层过双沟地形开采地表裂缝发育规律[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):212-220.
 SUN Xueyang, ZHANG Huixuan, LU Mingjiao, et al. The development law of surface cracks in shallow coal seam mining through double gullies terrain[J]. Coal Geology &. Exploration,2021,49(6):212-220.
- [23] 张志强,许家林,刘洪林,等.沟深对浅埋煤层工作面矿压的影响规律研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):501-505.
 ZHANG Zhiqiang, XU Jialin, LIU Honglin, et al. Influencing laws study of depth of gully on dynamic strata pressure of working face in shallow coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2013,30(4):501-505.

- [24] 肖国刚,姚文博.麻地梁煤矿沟谷地形浅埋煤层矿压显现规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):043023.
 XIAO Guogang, YAO Wenbo. Mining-induced pressures caused by mining shallow buried coal seam in the gully terrain of Madiliang coal mine[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2021,3(4):043023.
- [25] 王方田,屠世浩,张艳伟,等.冲沟地貌下浅埋煤层开采矿压 规律及顶板控制技术[J].采矿与安全工程学报,2015,32
 (6):877-882.

WANG Fangtian, TU Shihao, ZHANG Yanwei, et al. The mining pressure law and roof control technology of shallow coal seam under gully geomorphology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6):877-882.

- [26] 张广磊,鞠金峰,许家林.沟谷地形下煤炭开采对地表径流的 影响[J].煤炭学报,2016,41(5):1219-1226.
 ZHANG Guanglei, JU Jinfeng, XU Jialin. Influence of longwall mining on surface runoffs in gully terrain area[J].
 Journal of China Coal Society,2016,41(5):1219-1226.
- [27] 路琦,吕义清,刘志辉.工作面布置方式对沟谷区采动斜坡变形 破坏特征的影响研究[J].煤矿安全,2021,52(12):214-218+228.
 LU Qi, LYU Yiqing, LIU Zhihui. Study on influence of working face layout on deformation and failure characteristics of mining-induced slope in gully area [J].
 Safety in Coal Mines,2021,52(12):214-218+228.
- [28] 车晓阳,侯恩科,孙学阳,等.沟谷区浅埋煤层覆岩破坏特征及地面裂缝发育规律[J].西安科技大学学报,2021,41(1):
 104-111+186.
 CHE Xiaoyang, HOU Enke, SUN Xueyang, et al. Research on overburden breaking characteristics and ground crack

formation mechanism of shallow coal seam under the gully [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021,41(1):104-111+186.

- [29] 刘志辉,吕义清.黄土沟谷区浅埋煤层开采斜坡变形破坏机 理[J].煤炭工程,2020,52(10):104-108.
 LIU Zhihui, LYU Yiqing. Slope deformation and failure mechanism of shallow coal seam mining in loess gully area
 [J]. Coalengineering,2020,52(10):104-108.
- [30] FENG Chaoyue, LYU Yiqing. Research on deformation, failure and stability of coal mining slope under influence of fault[J]. Coal Technology,2022,41(9):40-44.
- [31] 秦喜文,杨秀宇,巨文涛.黄土沟壑地貌下综放开采覆岩结构 稳定性研究[J].煤矿安全,2021,52(12):66-72.
 QIN Xiwen, YANG Xiuyu, JU Wentao. Study on stability of overlying rock structure in fully mechanized top coal caving mining under loess gully landform[J]. Safety in Coal Mines,2021,52(12):66-72.
- [32] 谢党虎.沟谷地形下开采覆岩裂隙发育特征研究[J].煤炭工程,2021,53(4):99-104.
 XIE Danghu. Fracture development characteristics of overlying strata under valley terrain[J]. Coal Engineering, 2021,53(4):99-104.
- [33] 侯恩科,陈育,车晓阳,等.浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及 裂隙演化规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):185-192.

HOU Enke, CHEN Yu, CHE Xiaoyang. Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10):185-192.

- [34] 侯恩科,车晓阳,龙天文,等.浅埋煤层地表沟道采动裂缝溃水量预测方法[J].煤炭学报,2020,45(12):4154-4162.
 HOU Enke, Che Xiaoyang, LONG Tianwen, et al. Prediction method of water inrush from ground cracks inx shallow buried seams[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(12):4154-4162.
- [35] 侯恩科,冯栋,谢晓深,等.浅埋煤层沟道采动裂缝发育特征 及治理方法研究[J].煤炭学报,2021,46(4):1297-1308.
 HOU Enke, FENG Dong, XIE Xiaoshen, et al. Study on development characteristics and treatment methods of mining surface cracks in shallow-buried coal seam gully[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(4):1297-1308.
- [36] 高浩然,朱卫兵,王路军,等.大柳塔煤矿 52304 综采面过沟谷地形矿压显现实测[J].煤炭工程,2013,45(10):80-82.
 GAO Haoran, ZHU Weibing, WANG Lujun, et al. Site observation on mine pressure behavior when No. 52304 fully mechanized coal mining face passing through valley terrain in Daliuta mine[J]. Coal Engineering,2013,45(10):80-82.

- [37] 陈忠辉,冯竞竞,肖彩彩,等.浅埋深厚煤层综放开采顶板断裂力学模型[J].煤炭学报,2007,32(5):449-452.
 CHEN Zhonghui, FENG Jingjing, XIAO Caicai, et al. Fracture mechanical model of key roof for fully-mechanized top-coal caving in shallow thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(5):449-452.
- [38] 陈忠辉,胡正平,李辉,等.煤矿隐伏断层突水的断裂力学模型及力学判据[J].中国矿业大学学报,2011,40(5):673-677.
 CHEN Zhonghui, HU Zhengping, LI Hui, et al. Fracture mechanical model and criteria of insidious fault water inrush in coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2011,40(5):673-677.
- [39] 中国航空研究院.应力强度因子手册(增订版)[M].北京:科学出版社,1993:320-321.
 Chinese Aeronautical Establishment. Handbook of stress intensity factors (Cupdated Edition)[M]. Beijing: Science Press,1993:320-321.
- [40] 于骁中,谯常忻,周群力.岩石和混凝土断裂力学[M].长沙: 中南工业大学出版社,1991:230-278.
 YU Xiaozhong, QIAO Changzhou, ZHOU Qunli. Rock and concrete fracture mechanics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press,1991:230-278.

Analysis on Fracture Mechanics Theory of Roof Cutting Mechanism of Shallow-Buried Working Face Crossing the Uphill Sections of Valley Terrains

YANG Dengfeng¹, LI Xiaoshuang², MA Tianhui³, XIE Shengrong⁴

(1.College of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

2. School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China;

3.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;4.School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: When a shallow-buried coal seam working face is advanced to the uphill section of a valley terrain, it is prone to largescale dynamic mining pressure disasters caused by the overall sliding and instability of key layer fracture blocks along the coal wall. According to the fracture characteristics of the roof in the uphill section of the valley terrain, a mechanical model was constructed based on the fracture mechanics analysis method, and the mechanical mechanism of roof instability and the basic roof fracture instability conditions were discussed. The calculation formulas for the roof weighting step and the working resistance of the support were obtained, and the key disaster causing factors were analyzed. The research results show that the concentrated stress and stress intensity factor at the crack tip of the basic roof in the damaged zone increase as the working face advances, and when the stress intensity factor increases to a critical value, the cantilever beam breaks and the working face is compressed. The size of the valley slope angle has a major impact on the weighting step and the working resistance of the support. Factors such as the crack length, the basic roof thickness, and fracture toughness in the damaged zone also have significant impacts. Through on-site monitoring at the 2103 working face of Madiliang Coal Mine, the theoretical analysis results were verified, and the reasonable value of support resistance was further analyzed. The research work has improved the accuracy of roof control of the working face crossing the uphill section of the valley terrain, which can effectively promote the safety production of the mine.

Key words: Shallow-buried coal seam, Valley terrain, Uphill section, Fracture mechanics, Working resistance of the support