

金刚石串珠绳锯切割煤层卸压增透效应研究

李树清¹, 吕晨辉¹, 黄飞^{1,2,3}, 钱运来¹, 黄向韬¹, 赵天哲¹, 汤铸⁴, 杨凤玲¹, 王晨¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 3. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 4. 六盘水师范学院 矿业与土木工程学院, 贵州 六盘水 553004)

摘要:为探讨金刚石串珠绳锯割缝对缝槽周围煤层的卸压增透效应, 首先建立基于缝槽顶板受力的两端固支梁力学模型, 分析顶板梁的受力特征及缝槽顶板下沉接触底板(简称触底)特性, 然后采用自行设计的物理相似模拟试验平台开展相似模拟试验, 分析不同工艺参数绳锯割缝后缝槽上下方煤岩层应力、位移变化规律, 基于FLAC^{3D}数值模拟和开发的煤层瓦斯渗透率计算程序, 分析随割煤工作面推进缝槽周围煤岩体的应力和渗透率分布特征和周期演化规律。研究表明: 绳锯割缝使缝槽周围应力重新分布, 缝槽顶板随着割缝工作面的推进经过顶板暴露、顶板触底, 连续缓沉3种演化形态; 顶板未触底时, 缝槽上下方形成“U”形卸压区, 最大挠度在顶板中心位置, 也是最先触底部位, 顶板触底之后, 缝槽中间位置出现应力恢复, 减弱绳锯割缝的卸压增透效果; 串珠绳锯的直径越大, 顶板发生触底的极限跨度越大, 缝槽触底越晚, 卸压效果越好; 相同割缝直径增加第2条割缝, 两缝槽卸压区连成一起, 卸压效果相互促进, 减弱两缝作用下的应力恢复现象, 增大了卸压范围; 缝槽推进距离足够长时, 由于顶板触底, 缝槽两边的卸压增透效果更好, 割缝卸压的影响范围从左到右划分为应力集中区、卸压区、应力恢复区、卸压区、应力集中区, 对应的卸压区和应力恢复区都有较好的增透效果。

关键词: 绳锯割缝; 顶板触底; 金刚石串珠; 渗透率; 卸压增透

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)02-0785-16

Study on pressure relief and permeability enhancement effect of cutting coal seam with diamond-bead wire saw

LI Shuqing¹, LÜ Chenhui¹, HUANG Fei^{1,2,3}, QIAN Yunlai¹, HUANG Xiangtao¹, ZHAO Tianzhe¹, TANG Zhu⁴, YANG Fengling¹, WANG Chen¹

(1. School of Resources & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Safe Production Key Laboratory for Southern Coal Mine Gas and Roof Disaster Prevention and Control, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Hunan Key Laboratory of Coal Mine Safety and Mining Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 4. School of Mining and Civil Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China)

Abstract: In order to explore the pressure relief and permeability enhancement effect around coal seam slot cut by diamond-bead wire saw, firstly, the mechanical model of a doubly clamped roof beam based on the stress of the slot roof was established to analyze the force characteristics of the roof beam and the characteristics of the sinking contact bottom of slot roof (referred to as the contact bottom). Besides, the self-designed physical similarity simulation test platform was used to

收稿日期: 2023-10-19 修回日期: 2023-11-17 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1321

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974121, 51804115); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40083)

作者简介: 李树清(1970—), 男, 湖南湘阴人, 教授, 博士生导师。E-mail: lsq_hnust@163.com

通讯作者: 吕晨辉(1997—), 男, 河南周口人, 博士研究生。E-mail: 248808531@qq.com

引用格式: 李树清, 吕晨辉, 黄飞, 等. 金刚石串珠绳锯切割煤层卸压增透效应研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 785-800.

LI Shuqing, LÜ Chenhui, HUANG Fei, et al. Study on pressure relief and permeability enhancement effect of cutting coal seam with diamond-bead wire saw[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 785-800.



移动阅读

carry out various similar simulation tests to analyze the stress and displacement changes of coal and rock strata above and below the slot after cutting the seam using wire saw with different process parameters. Finally, based on the FLAC^{3D} numerical simulation and the development of a coal seam gas permeability calculation program, the distribution characteristics and periodic evolution laws of stress and permeability of coal and rock mass around the advancing slot of the coal working face were analyzed. The research shows that the wire saw cuts seams, which makes the stress around the slot redistribute, and the slot roof passes through three evolution forms of roof hanging, roof contact with the bottom, and continuous sinking with the advancement of the working face. When the roof does not touch the bottom, the upper and lower parts of the slot form a 'U'-type pressure relief zone. The maximum deflection is at the center of the roof, which is also the first part to contact the bottom. After the roof contacts the bottom, the stress recovery occurs in the middle of the slot, which weakens the pressure relief and permeability enhancement effect of the slot. The larger the diameter of the diamond-bead wire saw is, the larger the ultimate span of the roof bottom is, the later the slot contacts the bottom, and the better the pressure relief effect is. With the same slot diameter, the second slot is added, and the pressure relief zone of the two slots is connected. The pressure relief effects promote each other, which weakens the stress recovery under the action of the two slots and increases the pressure relief range. When the slot advancing distance is long enough, due to the roof contacting the bottom, the pressure relief and permeability enhancement effect on both sides of the slot is better. The influence range of pressure relief is divided into stress concentration zone, pressure relief zone, stress recovery zone, pressure relief zone and stress concentration zone from left to right. The corresponding pressure relief zone and stress recovery zone have a better permeability enhancement effect.

Key words: diamond beaded wire saw; roof contact bottom; diamond-bead; permeability; pressure relief and permeability enhancement

煤炭资源在我国能源安全中具有兜底保障的重要作用。随着近年来煤矿开采深度的增加,深部矿井所面临的煤层构造复杂、瓦斯压力大、渗透率低等问题日趋严重,导致煤与瓦斯突出灾害防治难度增加,严重威胁煤矿安全生产^[1-3]。因此开展新的煤储层的卸压增透技术以强化瓦斯抽采对瓦斯动力灾害的防治具有重要意义。

保护层开采作为广泛使用的区域防突技术,多数学者对其进行了研究,俞启香、石必明等^[4-5]研究了保护层开采上覆岩层变化破坏特征,以及随保护层工作面推进,被保护层煤体的应力分布和变形规律,提出了卸压瓦斯抽采的方法。程远平等^[6]研究了保护层开采上覆远距离煤岩体变形移动与裂隙分布特征,提出了远程卸压瓦斯抽采方法。涂敏等^[7]分析了被保护层的膨胀变形规律,研究了远程保护层开采卸压增透规律。刘洪永等^[8]定义了保护层的分类并给出了判定方法,将下保护层分为3类,上保护层分为2类。王伟等^[9]研究了深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯的时效性,解决了下方被保护层卸压瓦斯通过底板裂隙涌向首层采煤工作面造成瓦斯超限的问题。胡国忠等^[10-11]依托工程实际,研究了俯伪斜上保护层开采被保护层的应力和变形规律,并优化设计了俯伪斜上保护层开采的卸压瓦斯抽采参数。高峰等^[12]研究了保护层开采过程中煤岩损伤与瓦斯渗透性的变

化,给出了被保护层损伤程度和渗透性系数的变化规律。马占国等^[13]分析了远距离下保护层开采的煤岩体变形特征。薛东杰等^[14]研究了采动条件下被保护层瓦斯卸压增透机理,建立体积应变与渗透率的耦合关系方程。王宏图等^[15]认为关键层破断能够提升保护层的保护效果,提高瓦斯的释放效率。程详等^[16]研究了软岩保护层开采上覆被保护层的卸压瓦斯治理问题。柴敬等^[17]结合现场光纤监测技术,研究了上保护层开采后被保护层应力释放率及其变化特性,确定了被保护层卸压角和底板破坏深度。

水力(磨料)割缝技术作为煤层卸压增透的关键技术,学术界为了提高煤层割缝效率,获得较好的卸压增透效果,对其开展了大量研究。林柏泉等^[18]开发了高压磨料射流割缝防突技术并且在煤层巷道掘进工作面取得了较好的应用。卢义玉等^[19]提出了利用高压脉冲水射流钻孔、切缝以提高松软煤层透气性和瓦斯抽采率的新思想,结合实践开发出地面定向井+水力割缝卸压方法对深部煤层气进行高效开采。李晓红等^[20]采用理论与实验测试相结合的方法,对自行研发的不同结构水力割缝系统压-流量特性进行了分析和测试,总结了过渡过程中系统能量特性与耗散规律。唐巨鹏等^[21]通过对不同水力割缝布局的煤层卸压效果进行了分析,并获得了较好的卸压效果。葛兆龙等^[22]对钻孔开采的影响半径进行了分析,研究得出

割缝钻孔抽采影响半径与缝槽圆盘、渗透率、抽采时间、瓦斯压力等因素均呈幂函数关系, 渗透率对钻孔抽采半径的影响最大。赵善坤等^[23]研究预割缝倾角影响坚硬顶板在定向切槽诱导下水压致裂过程中的断裂特性。邓广哲等^[24]通过建立超高压水力割缝钻孔裂隙扩展-渗流模型, 分析了水力割缝钻孔塑性区宽度及高压水的渗流范围。唐永志等^[25]应用超高压水力割缝技术原理, 研制了一种穿层钻孔超高压水力割缝装置, 可应用于低透气性中硬煤层中瓦斯增透。杨慧明等^[26]指出了液压割缝工艺的不足, 并提出了在设备研发、工艺改进等方面应进一步强化。

综上所述, 国内外学者对于保护层开采和水力(磨料)割缝技术已经形成了一套较为完善的理论技术体系。但对于开采保护层前提是必须有相应的保护层可采, 而水力割缝、水力冲孔、水力压裂等局部卸压增透措施影响范围受限, 因此, 亟待寻求一种可在煤层内部连续割缝, 实现大面积卸压增透的方法。金刚石串珠绳锯切割技术作为一种先进的切割方法, 目前已广泛应用于矿山开采、石材加工与切割等领域^[27-29]。关于金刚石串珠绳锯的研究, 国内外学者已经在绳锯的切割机理、切割技术和装备等方面开展了大量的工作, 发现绳锯切割有以下特点: 金刚石颗粒是切割破裂岩体的“刀刃”, 绳锯切割线速度高, 但单颗粒金刚石施加在石材上的压力很小, 不足以使石材产生体积破碎, 金刚石串珠绳锯切割石材的主要破岩方式是赫兹破碎, 即绳锯在反复高速磨削刮屑下, 对石材进行破碎和去除^[30-34]。

笔者前期已经对绳锯割缝卸压增透机理作了初步探索^[35]。笔者基于理论分析、实验室试验、数值模拟等方法, 分析绳锯切割煤层缝槽顶板的受力和运动特征, 进一步对比不同工艺绳锯切割对煤层卸压效果和渗透率的影响, 探究金刚石串珠绳锯切割煤层的卸压增透效应。

1 缝槽顶板力学分析

煤层绳锯割缝可在煤层内切割 1~3 cm 的缝槽, 类似于在煤层内部开采极薄保护层。为便于分析, 将缝槽顶板界定为单缝工艺下缝槽上方一定范围煤岩层或者多缝工艺下缝槽之间的煤层。考虑金刚石串珠绳锯割缝工作时, 缝槽顶板在重力作用下弯曲, 发展直到与缝槽底板接触, 并且随着缝槽工作面的持续推进, 缝槽顶板会从触底点连续缓慢下沉, 因此将缝槽顶板的运动形式分为缝槽顶板暴露阶段、顶板触底阶段、缝槽连续缓沉阶段, 如图 1 所示 (图 1 中 K_1 、 K'_1 、

K_2 、 K'_2 、 K_3 、 K'_3 分别为缝槽顶板不同阶段起割位置侧和止割位置侧煤壁内的应力集中系数; γ 为上覆岩层容重; H 为上覆岩层厚度)

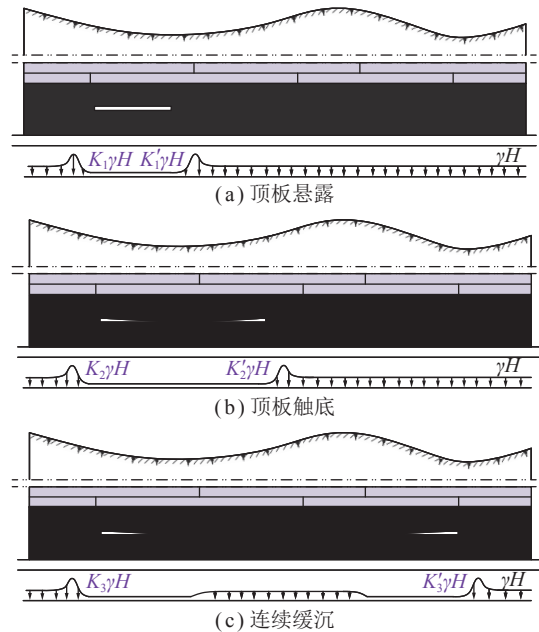


图 1 绳锯切割煤层缝槽演化形态

Fig.1 Evolution form of seam slot in rope sawing coal seam

基于上述分析, 结合缝槽顶板在绳锯割缝过程中的受载特征和演化特性, 在割缝前段缝槽未触底之前, 缝槽顶板受到上覆岩层的压力, 顶板弯曲而不垮落, 因此以缝槽顶板为研究对象, 建立了两端固支梁力学模型。为了便于分析计算假设煤层和岩层为水平或近水平, 煤岩均质且各向同性, 煤岩无蠕变或黏性行为, 不考虑煤岩水平方向的受力, 梁在弯曲变形时不会明显改变载荷条件。模型将总缝槽长度设为 l_0 , 顶板所受载荷近似简化为均布载荷 q_0 , 建立如图 2 所示力学模型, 为了得到梁各位置的弯矩和挠度。根据材料力学和平衡原理求得缝槽顶板未触底时梁的弯矩方程 M_0 和挠度方程 y_0 的表达式:

$$\begin{cases} M_0 = \frac{q_0}{12}(6x_0^2 - 6l_0x_0 + l_0^2) \\ y_0 = \frac{q_0}{24EI}(x_0^4 - 2l_0x_0^3 - l_0^2x_0^2) \end{cases} \quad (1)$$

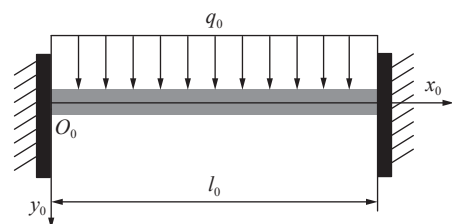


图 2 缝槽顶板未触底顶板梁模型

Fig.2 Slot roof untouched bottom roof beam model

式中, x_0 为 l_0 段内任一点到 O_0 的距离; E 为弹性模量; I 为横截面惯性矩。

该力学模型中, 最大弯矩发生在顶板两侧位置, 顶板中部 $\frac{l_0}{2}$ 处为最大向下挠度 $\frac{q_0 l_0^4}{384EI}$ 。

随着绳锯工作面的推进, 顶板发生触底时的极限跨度:

$$l_{\max} = \sqrt[4]{\frac{384EIh}{q_0}} \quad (2)$$

式中, h 为金刚石串珠绳锯直径即缝槽高度。

当割缝长度超过 l_{\max} , 缝槽中部出现触底, 考虑单/多缝工艺下缝槽顶板受力特性, 此时建立如图 3 所示的顶板连续触底力学模型, 简化顶板上方始割未触底 l_1 区段所受载荷为均匀载荷 q_1 , 触底 l_2 区段受均布载荷 q_2 , 止割未触底 l_3 区段受均布载荷 q_3 。由于缝槽触底 l_2 区段同时受来自缝槽底板的支撑力 q_4 。

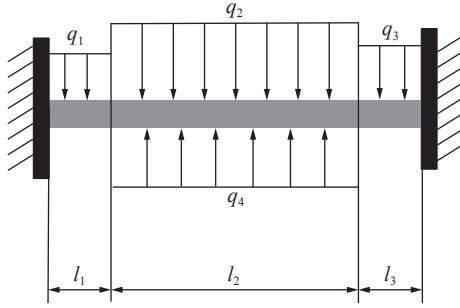


图 3 缝槽顶板触底顶板梁模型

Fig.3 Slot roof bottom contact roof beam model

为了得到缝槽顶板各位置的弯矩和挠度, 将触底之后的缝槽顶板力学模型分解为 3 部分计算, 将各个区段受到的内力即剪力与弯矩视为各自区段梁的外载荷, 其中相邻两区段梁之间的内力大小相等方向相反。

(1) 第 1 区段梁上方受均布载荷 q_1 作用, 右端受到剪力 F_a 和弯矩 M_a 作用 (图 4)。求得第 1 区段梁的弯矩方程 M_1 和挠度方程 y_1 (x_1 为第 1 区段横坐标) 的表达式。

$$\begin{cases} M_1 = F_a(l_1 - x_1) - M_a + \frac{q_1}{2}(x_1^2 - 2l_1x_1 + l_1^2) \\ y_1 = \frac{F_ax_1^2}{6EI}(3l_1 - x_1) - \frac{M_ax_1^2}{2EI} + \frac{q_1x_1^2}{24EI}(x_1^2 - 4l_1x_1 + 6l_1^2) \end{cases} \quad (3)$$

(2) 第 2 区段梁不仅两端受剪力 F_a 和 F_b 以及弯矩 M_a 和 M_b 作用, 还受到上下方均布载荷的作用 (图 5)。根据梁平衡原理求得弯矩方程 M_2 , 积分得挠度方程 y_2 (x_2 为第 2 区段横坐标), 积分常数可根据边界条件求出。

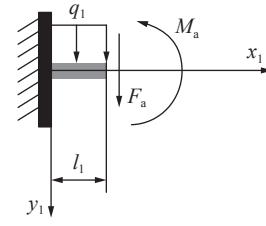


图 4 l_1 区段梁模型

Fig.4 Model drawing of l_1 section beam

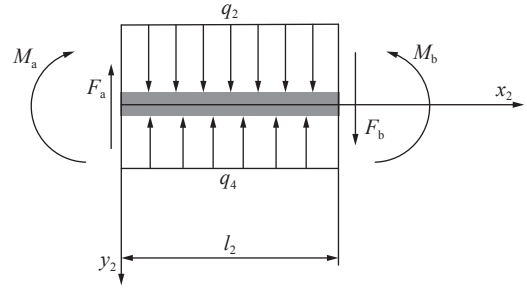


图 5 l_2 区段梁模型

Fig.5 Model drawing of l_2 section beam

$$\begin{cases} M_2 = -(F_ax_2 + M_a) + \frac{q_2x_2^2}{2EI} - \frac{q_4x_2^2}{2EI} \\ y_2 = \iint \left(\frac{M_2}{EI} dx_2 \right) dx_2 + C_1x_2 + C_2 \\ F_a + q_4l_2 = F_b + q_2l_2 \\ M_b = M_a + F_al_2 + \frac{q_4l_2^2}{2} - \frac{q_2l_2^2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

其边界条件分别为

$$\begin{cases} \theta_2|_{x_2=0} = \theta_1|_{x_1=l_1} \\ y_2|_{x_2=0} = y_1|_{x_1=l_1} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 第 3 区段梁左端受到剪力 F_b 和弯矩 M_b , 右端为固定端, 均布载荷 q_3 作用模型如图 6 所示, 依据同样计算方法求出梁的弯矩方程 M_3 和挠度方程 y_3 (x_3 为第 3 区段横坐标) 的表达式。

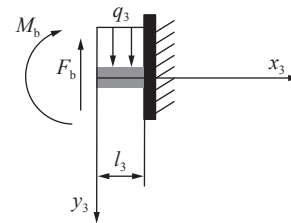


图 6 l_3 区段梁模型

Fig.6 Model drawing of l_3 section beam

$$\begin{cases} M_3 = \frac{q_3x_3^2}{2} - (F_bx_3 + M_b) \\ y_3 = \iint \left(\frac{M_3}{EI} dx_3 \right) dx_3 + C_3x_3 + C_4 \end{cases} \quad (6)$$

其边界条件分别为

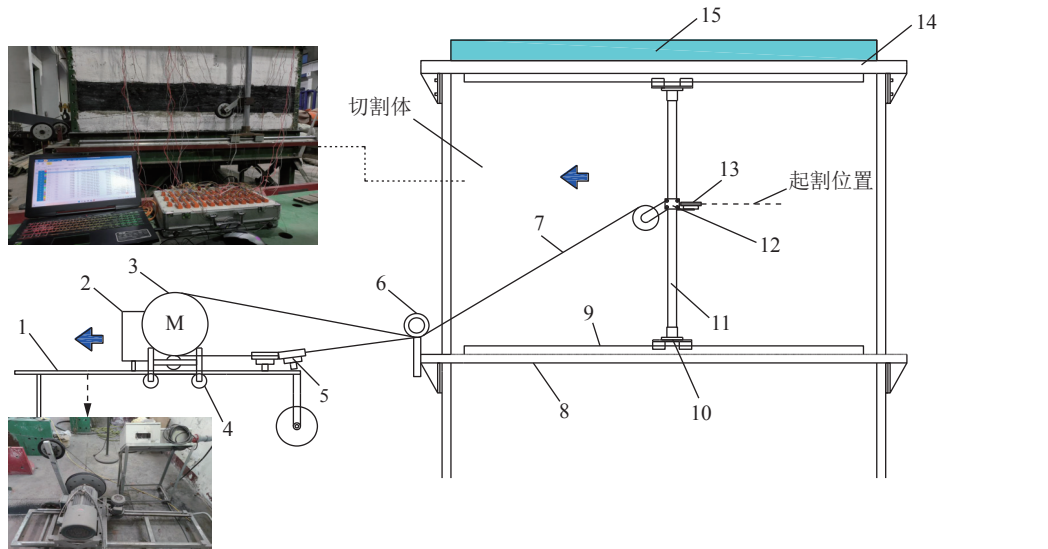
$$\begin{cases} \theta_3|_{x_3=0} = \theta_2|_{x_2=l_2} \\ y_3|_{x_3=0} = y_2|_{x_2=l_2} \\ \theta_3|_{x_3=l_3} = 0 \\ y_3|_{x_3=l_3} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

上述推导过程中 $C_1 \sim C_4$ 为系数, 可根据每一段梁的边界条件求得。

2 绳锯切割煤层相似模拟试验

2.1 绳锯切割煤层相似模拟试验装置

根据绳锯切割煤层现场实际, 设计并改装了绳锯割缝煤层相似模拟试验装置^[36]。试验装置由二维相似试验台架、绳锯切割系统、试验数据采集系统组成。



1—行走导轨; 2—行走电机; 3—主动轮; 4—行走齿轮; 5—水平变向轮; 6—垂直变向轮; 7—串珠绳; 8—下部金属框架; 9—水平进给支撑导轨; 10—固定基座; 11—垂向滑轨; 12—锁扣装置; 13—万向轮组; 14—上部金属框架; 15—加载系统

图7 绳锯切割煤层平面相似模拟试验装置

Fig.7 Wire saw cutting coal seam plane similarity simulation test device

2.2 模型搭建

为研究绳锯割缝煤层卸压效应, 分析绳锯割缝煤层的有效卸压范围和缝槽上覆煤岩变形移动规律, 探究单/双缝切割工艺下使用不同串珠绳锯直径对绳锯切割煤层应力场、位移场的影响, 拟利用现有金刚石串珠绳锯切割煤层相似模拟试验装置, 开展绳锯连续切割煤层的相似模拟试验。

根据试验平台的尺寸大小 (2.5 m×0.1 m×1.8 m), 确定几何相似比 1 : 10, 模型上部采用杠杆加载系统进行加载, 可实现 0~1 MPa 的静载加载。选择石英砂为岩层骨料, 煤粉作为煤层骨料, 石灰、石膏为胶结物, 云母粉为各层间隔物, 配制主要力学性质同模拟原型相似的材料。相似模拟试验岩层力学参数见表 1, 搭建物理相似模型试验平台如图 8 所示。

其中, 二维相似试验台架和绳锯切割系统试验装置, 如图 7 所示。在相似模拟试验架底座上部和杠杆加载装置下部, 采用 100 mm×50 mm 槽钢搭建了 2 个尺寸为 1 064 mm×2 760 mm 的平行金属框架, 下部框架上方和上部框架下方加装了长度为 2 400 mm 的绳锯切割水平进给支撑导轨, 上下水平滑轨间安装了直径 80 mm×1 540 mm 钢质垂向滑轨以及固定基座, 垂向滑轨上装置了可调节绳锯切割位置的锁扣装置及万向轮组 (垂直导向轮+水平导向轮), 下部外框端头安装有定向轮。绳锯切割系统中主动轮的动力由绳锯机主电机提供, 绳锯机在轨道上的进给动力由辅助电机提供, 设计采用 2 套无极调速器分别独立控制主动轮的转速和绳锯的进给速度。

2.3 模拟方案

金刚石串珠绳锯的直径、切割区域的地质条件、切割工艺等因素会对绳锯切割煤层卸压增透产生影响, 为使研究具有一般性, 本次相似模拟试验模拟了绳锯走向切割低透气性煤层。同时, 为对比不同金刚石串珠绳锯直径不同切割工艺下的卸压效果, 选取直径为 2 mm/4 mm 橡胶套金刚石串珠绳先后上下 2 次切割煤层, 模拟试验原型中直径 2 cm/4 cm 的串珠绳切割 3 m 厚度煤层。

在进行切割试验时, 模型两边各留出 550 mm 不进行切割, 割缝长度 1 400 mm, 两缝槽垂直距离 140 mm。利用全桥电阻应变式土压力盒与动静态电阻应变仪采集仪对绳锯切割过程中缝槽周围煤岩体中的应力进行监测收集, 应力监测点的高度坐标为

表 1 试验各岩层力学参数

Table 1 Test mechanical parameters of each rock stratum

岩层	岩性	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	黏聚力 C/MPa	抗拉强度 T/MPa	内摩擦角 $\Phi/(\text{°})$							
基本顶	灰色细砂岩	2 800	16.04	12.02	3.47	4.96	43							
直接顶	深灰粉砂岩	2 560	10.83	8.14	2.75	2.50	30							
伪顶	砂质泥岩	2 500	4.90	3.20	1.18	1.80	15							
煤层	煤	1 400	2.08	0.54	1.20	0.64	30							
直接底	深灰粉砂岩	2 560	10.83	8.14	2.75	2.50 </tr <tr> <td>基本底</td> <td>灰色细砂岩</td> <td>2 800</td> <td>16.04</td> <td>12.02</td> <td>3.47</td> <td>4.96</td> <td>40</td> </tr>	基本底	灰色细砂岩	2 800	16.04	12.02	3.47	4.96	40
基本底	灰色细砂岩	2 800	16.04	12.02	3.47	4.96	40							

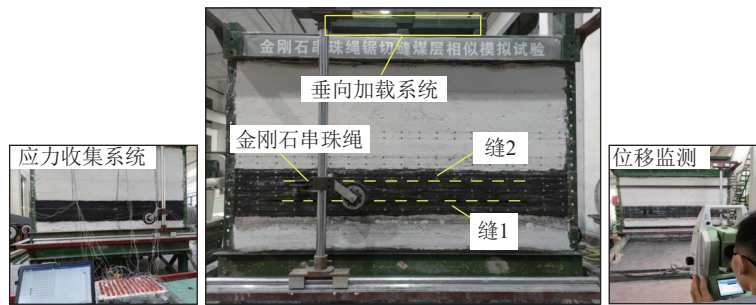


图 8 相似模拟试验平台

Fig.8 Physical similarity simulation test platform

$P_1 \sim P_7 (Y=630 \text{ mm})$ 、 $P_8 \sim P_{14} (Y=730 \text{ mm})$ 、 $P_{15} \sim P_{21} (Y=770 \text{ mm})$ 、 $P_{22} \sim P_{28} (Y=870 \text{ mm})$, 相邻两监测点水平距离为 200 mm, 具体布置如图 9 所示。同时为监测绳锯切割煤层过程中缝槽周围运动情况, 模型铺设和养护完毕后, 表面涂刷石灰水, 在模型正面缝槽上下方的煤层中布置了 4 排位移监测点, 高度坐标和应力监测点布置相同, 相邻两监测点水平距离为 100 mm, 采用全站仪对煤层割缝后各监测点的位移变化进行

跟踪测量, 布置如图 10 所示。

2.4 试验结果及分析

绳锯每次切割结束, 充分平衡使应力和位移维持相对稳定后再分别测量垂直应力和垂直位移。分析中所使用的参数均为试验原型参数。

2.4.1 绳锯切割煤层垂直应力分布

图 11 为 2 cm/4 cm 两种直径串珠绳单/双缝切割完成后各测线垂直应力分布情况。由图 11 可知, 当

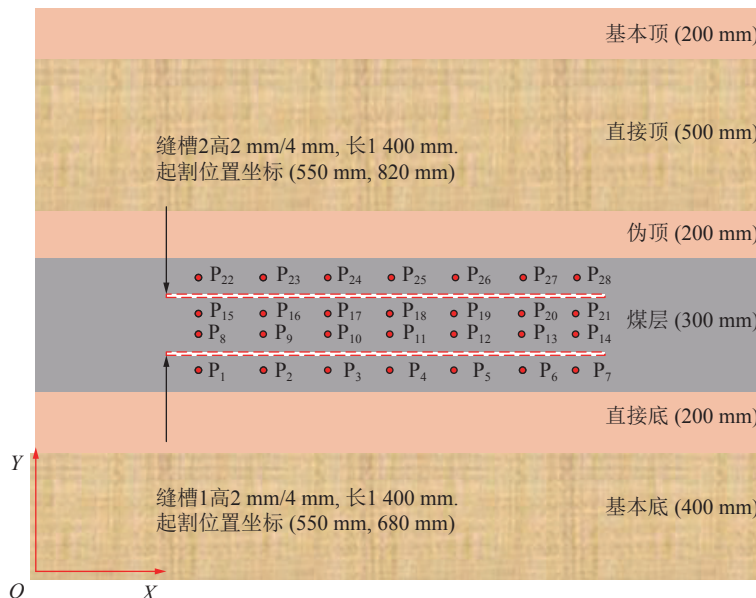


图 9 模型铺设及应力监测点

Fig.9 Laying of model and stress monitoring points

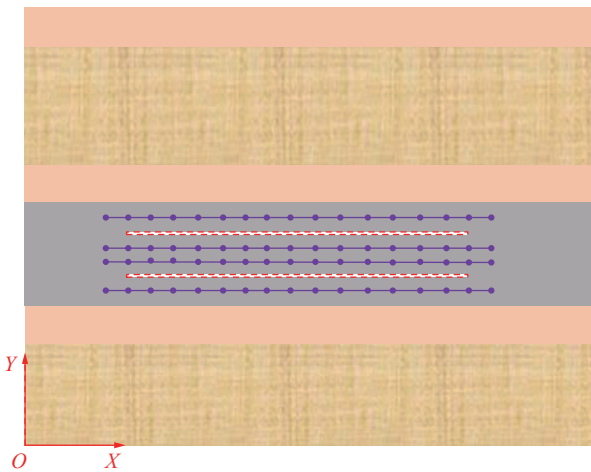


图10 位移监测点布置

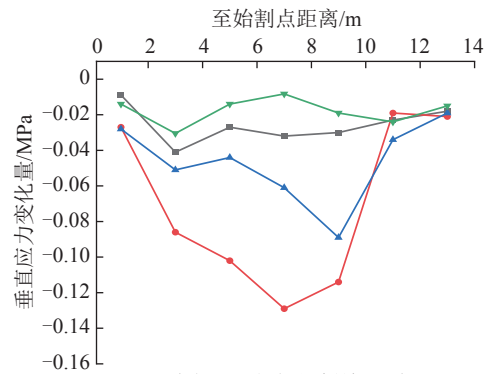
Fig.10 Displacement monitoring point layout

使用直径 2 cm 串珠绳单缝切割完缝 1 之后, 缝 1 上方 0.5 m 的应力变化平均值为 0.071 MPa, 缝 1 下方 0.5 m 的应力变化平均值为 0.026 MPa, 缝 2 下方 0.5 m (即缝 1 上方 0.9 m) 的应力变化平均值为 0.046 MPa, 缝 2 上方 0.5 m (即缝 1 上方 1.9 m) 的应力变化平均值为 0.018 MPa, 不难看出, 割缝对于缝槽周围煤岩体的垂直应力均有不同程度的减小, 在缝槽中部垂直应力变化量最大, 上方垂直应力变化值普遍大于下方, 且越靠近缝槽的垂直应力变化量越大; 当使用直径 4 cm 串珠绳锯单缝切割完缝 1 之后, 缝 1 上方 0.5 m 的应力变化平均值为 0.136 MPa, 缝 1 下方 0.5 m 的应力变化为 0.035 MPa, 缝 2 下方 0.5 m 的应力变化平均值为 0.075 MPa, 缝 2 上方 0.5 m 的应力变化平均值为 0.030 MPa, 可以看出, 直径 4 cm 绳锯割缝后各监测点的应力变化量要大于 2 cm。

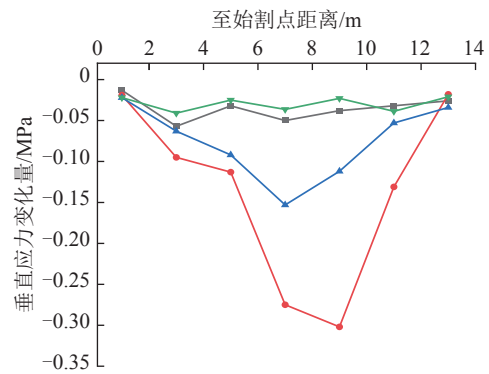
当使用直径 2 cm 串珠绳锯增加第 2 条割缝后, 缝 1 下方 0.5 m 应力变化平均值为 0.026 MPa, 缝 1 上方 0.5 m 应力变化平均值为 0.079 MPa, 缝 2 下方 0.5 m 应力变化平均值为 0.050 MPa, 缝 2 上方 0.5 m 应力变化平均值为 0.068 MPa; 当使用直径 4 cm 串珠绳双缝切割后, 缝 1 下方 0.5 m 应力变化平均值为 0.035 MPa, 缝 1 上方 0.5 m 应力变化平均值为 0.151 MPa, 缝 2 下方 0.5 m 应力变化平均值为 0.072 MPa, 缝 2 上方 0.5 m 应力变化平均值为 0.162 MPa。由此可知, 双缝切割工艺相较于单缝切割, 缝槽上下方同位置监测点应力变化量提升明显, 增加第 2 条割缝有利于提升卸压效果, 并主要以提升第 2 条割缝上方的卸压程度来增强总体卸压效果; 4 cm 直径绳锯割缝的卸压效果大于 2 cm。

2.4.2 绳锯切割煤层垂直位移变化量

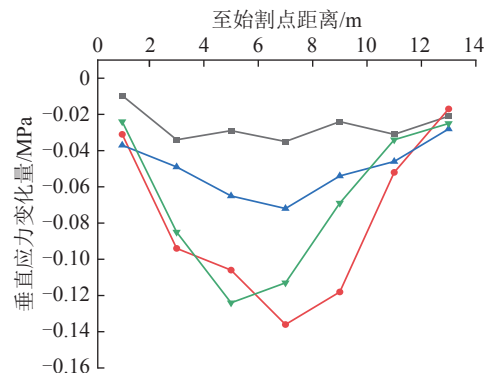
由于相似模拟试验平台尺寸的限制以及位移监



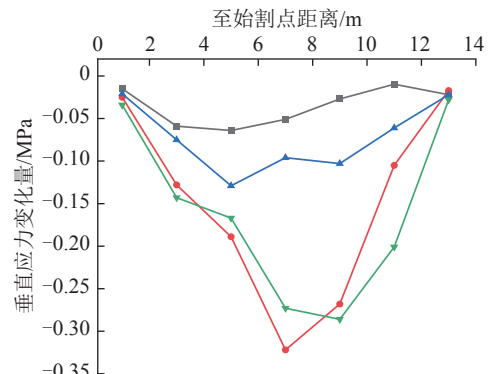
(a) 直径2 cm绳锯切割缝1平衡后



(b) 直径2 cm绳锯切割缝2平衡后



(c) 直径4 cm绳锯切割缝1平衡后



(d) 直径4 cm绳锯切割缝2平衡后

—■— 缝1下方0.5 m —●— 缝1上方0.5 m
—▲— 缝2下方0.5 m —▼— 缝2上方0.5 m

图11 各监测点垂直应力变化情况

Fig.11 Variation of vertical stress at each monitoring point. The precision of the measuring instrument is limited, leading to significant fluctuations in the measurement data. Analysis of Figure 12 data shows that after cutting with a 2 cm diameter rope saw, the stress

下方 0.5 m 平均垂直位移为 0.004 1 m, 缝 1 上方 0.5 m 平均垂直位移为 0.009 5 m, 缝 2 下方 0.5 m (即缝 1 上方 0.9 m) 平均垂直位移为 0.007 6 m, 缝 2 上方 0.5 m (即缝 1 上方 1.9 m) 平均垂直位移为 0.005 2 m, 当直径 2 cm 绳锯双缝切割后, 缝 1 下方 0.5 m 平均垂直位

移为 0.006 1 m, 缝 1 上方 0.5 m 平均垂直位移为 0.016 2 m, 缝 2 下方 0.5 m 平均垂直位移为 0.012 0 m, 缝 2 上方 0.5 m 平均垂直位移为 0.005 4 m。可以发现, 割缝产生的垂直位移变化在缝槽中间处波动较大, 两端的垂直位移变化较小; 单缝切割时, 缝槽上方各测线距离缝槽越近, 垂直位移变化量越大; 4 cm 直径绳锯切割后缝槽上下方垂直位移变化量大于 2 cm; 直径 4 cm 绳锯单缝切割后, 缝 2 下方 0.5 m 平均垂直位移为 0.014 8 m, 缝 2 上方 0.5 m 平均垂直位移为 0.010 2 m, 直径 4 cm 绳锯双缝切割后, 缝 2 下方 0.5 m 平均垂直位移为 0.023 5 m, 缝 2 上方 0.5 m 平均垂直位移为 0.015 3 m, 不难看出, 当增大绳锯切割直径后, 缝槽上下方垂直位移变化量明显提升。

结合缝槽顶板触底机理, 初步分析位移的变化规律, 可知试验中缝槽顶板位移虽然波动较大, 但是最大垂直位移变化量仍出现在中部位置; 结合工程现场计算出绳锯直径 2 cm/4 cm 单缝切割时的触底极限跨度分别为 6.91 m 和 8.20 m, 此时缝槽顶板都已触底, 但是由于相似模拟试验平台尺寸的限制, 无法克服边界效应的影响, 顶板虽然触底但并未出现明显的应力恢复。缝槽上方只形成了小范围的裂隙带和弯曲下沉带。

3 绳锯切割煤层数值模拟

相似模拟揭示了二维空间下, 不同直径绳锯割缝垂直方向的应力和位移变化情况, 模拟可以揭示绳锯煤层工作面沿走向推进的卸压增透效应, 但未能考虑倾向方面的影响, 鉴于试验条件的限制, 开展三维空间下的切割试验不太现实, 因此采用 FLAC^{3D} 软件模拟三维条件下不同工艺绳锯切割煤层。

3.1 数值计算模型的建立

结合煤层绳锯割缝工程实际, 采用 FLAC^{3D} 软件中的 ratio 功能和区域分解法, 构建了一个由致密网格区、过渡网格区、疏松网格区组成的三维立体模型, 模型的长宽高 $X \times Y \times Z = 100 \text{ m} \times 120 \text{ m} \times 23 \text{ m}$ 。设定割缝工作面距边界 25 m 以减小边界效应对模拟结果的影响。

模型顶部施加垂直向下 7 MPa 荷载以模拟上覆岩层重力, 垂直方向施加渐变应力, 模型前后、左右边界采用滚动边界条件, 本构模型采用摩尔-库伦模型, 各岩层厚度从上到下依次为细砂岩 2 m、粉砂岩 5 m、泥岩 2 m、煤 3 m、细砂岩 2 m、粉砂岩 5 m、细砂岩 3 m, 数值计算模型及缝槽布置如图 13 所示, 各岩层的力学参数见表 1。采用单/双缝割缝工艺, 切割所用串珠绳锯直径分别为 2 cm 和 4 cm, 缝 1 位置中心位于 $Z=11 \text{ m}$, 缝 2 位置中心位于 $Z=12 \text{ m}$, 具体模拟方案见

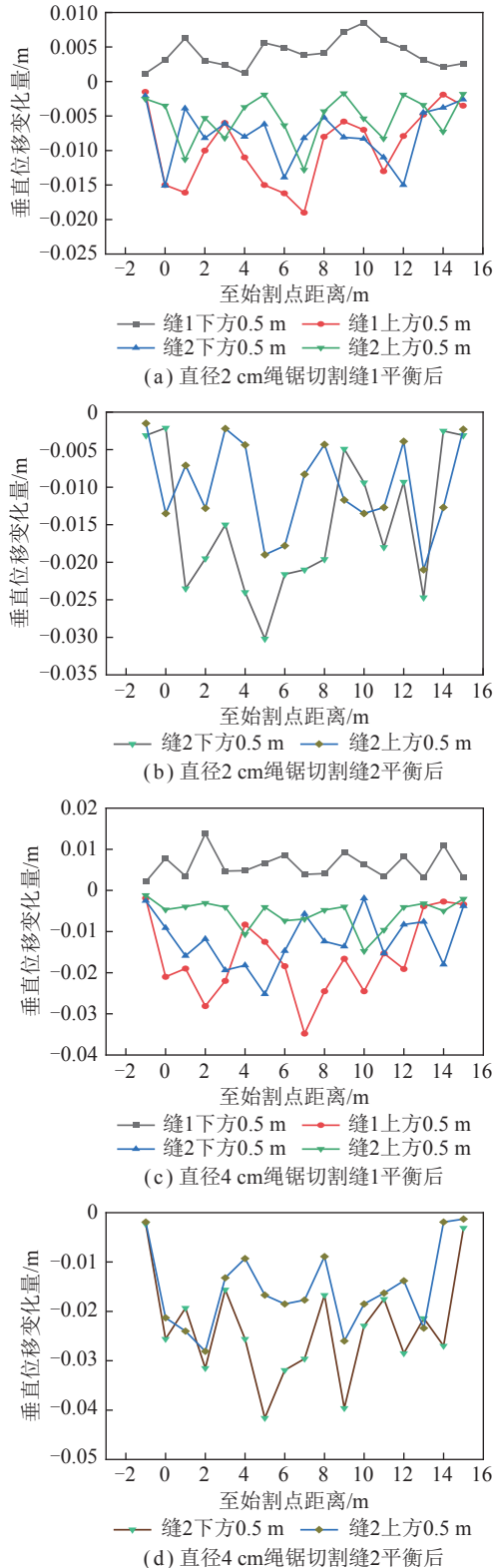


图 12 各监测点垂直位移变化情况

Fig.12 Vertical displacement changes of each monitoring point

表 2。绳锯割煤时通过逐步推进的方式, 共切割长度 50 m, 每步长 2 m。

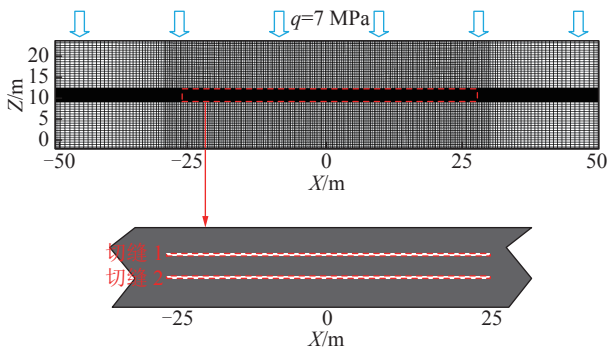


图 13 数值模拟模型及缝槽布置

Fig.13 Numerical simulation model and slot arrangement

表 2 模拟方案
Table 2 Simulation scheme

对比方案	切割缝高/cm	切割选择
方案 1	2	切割缝 1
方案 2	4	切割缝 1
方案 3	4	先切割缝 1 后切割缝 2

3.2 数值模拟结果及分析

3.2.1 单缝绳锯切割煤层垂直应力演化规律

绳锯切割煤层后, 以应力集中系数 (开采后煤岩体的垂直应力和开采前的原岩应力的比值) 来定量描述采动过程中顶底板应力的动态变化规律, 将应力集中系数小于 0.3 作为绳锯煤层充分卸压的判定标准^[37-38]。如图 14 所示, 此时缝槽顶板未触底, 缝槽上下方煤岩层应力均有不同程度的降低, 缝槽起割位置后方和工作面前方形成了小范围的应力集中区, 割缝影响区域从左到右依次形成了应力集中区—卸压区—应力集中区。对比缝槽不同高度处的应力集中系数, 发现缝槽上下方煤岩层卸压效果基本一致, 越靠近缝槽卸压效果越好。

缝槽顶板连续缓沉之后, 应力演化规律基本保持不变, 为便于分析, 在此选择煤层走向中间位置垂直应力和割缝推进 16 m 的应力演化规律进行比较研究。

图 15 为直径 2 cm 绳锯割缝工作推进缝槽周围应力变化情况, 不难发现, 随着割缝的进行, 缝槽顶板的运动形式是: 缝槽顶板暴露→顶板触底→连续缓沉; 割缝使缝槽周边煤岩体应力重新分布, 缝槽上下方出现卸压, 在缝槽始割点后方和止割点前方产生应力集中; 随着增加缝槽推进距离, 缝槽上下方的卸压程度也逐渐增大, 两端的应力集中区范围也大幅提升; 当缝槽推进 8 m 时, 缝槽顶板产生触底, 缝槽中间位置

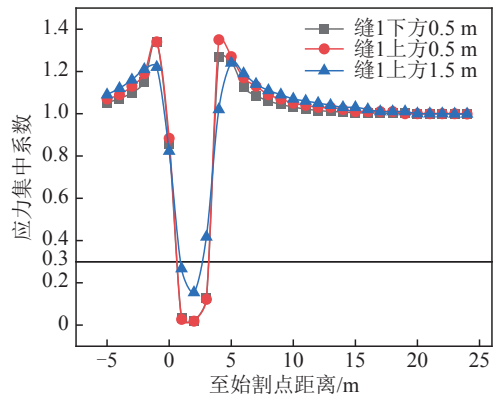


图 14 直径 4 cm 单缝推进 4 m 不同高度应力集中系数曲线
Fig.14 Stress concentration factor curves of single seam with diameter of 4 cm advancing 4 m at different heights

出现应力恢复区, 卸压区由“U”形变成“直立心形”, 心形尖角朝向煤壁; 随着割缝的持续推进, 顶板连续缓沉, 卸压范围虽然不断增大, 但由于应力恢复导致缝槽中间部分卸压效果减弱, 并且应力恢复区域在触底之后随着工作面的推进逐渐扩大, 缝槽上下方煤层卸压效果两边大于中间。

由图 16 对比可知: 在割缝工作面推进 4 m 时, 煤层垂直应力最大达到 0.829 MPa, 远小于原始应力, 始割位置前方和工作面前方煤体应力小幅度升高, 最大垂直应力分别为 9.77 MPa 和 10.13 MPa; 当割缝工作

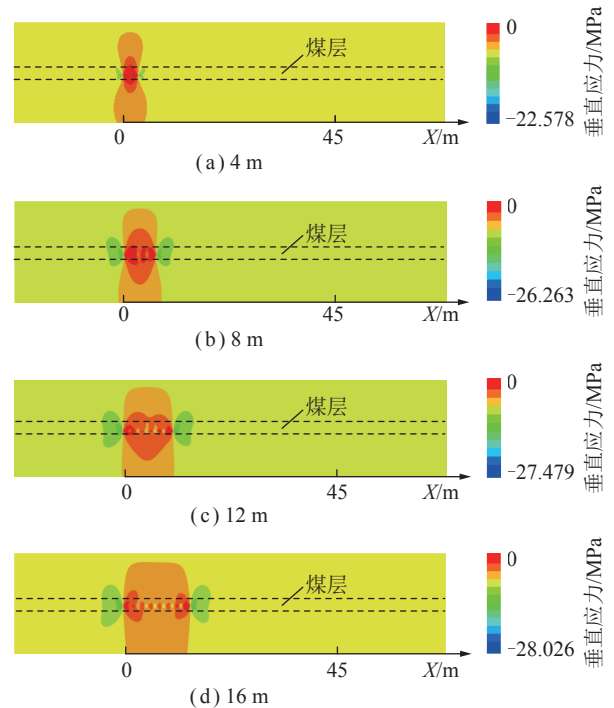


图 15 直径 2 cm 单缝推进不同距离缝槽周围垂直应力演化云图

Fig.15 Vertical stress evolution cloud diagram around the slot with different distances of single-slit propulsion with diameter of 2 cm

面推进到 8 m 时,此时顶板触底,垂直应力曲线出现小范围凸起,即出现应力恢复,缝槽卸压区垂直应力最大为 2.37 MPa;并且随着割缝工作面的推进,卸压区的最大应力逐渐增大,在工作面推进 12 m 时卸压区最大应力为 4.71 MPa,工作面推进 16 m 时卸压区最大应力为 5.68 MPa,说明顶板触底之后随着工作面的推进,应力恢复程度慢慢增大但仍小于原始应力,此时未充分卸压;以上 4 种工况缝槽始割点后方应力集中区最大垂直应力分别为 9.73、11.72、12.41、12.64 MPa,止割点前方应力集中区最大垂直应力分别为 10.12、11.64、11.73、12.31 MPa,说明缝槽两边的应力集中区最大垂直应力随着割缝工作面的推进出现小幅度的增大,缝槽顶板发生触底之后基本保持不变。

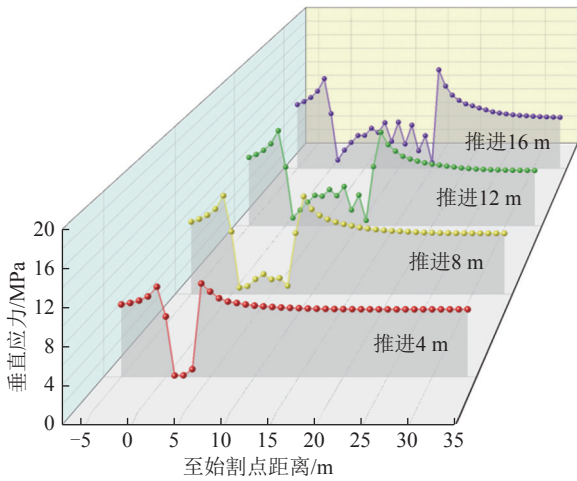


图 16 直径 2 cm 单缝推进不同距离煤层垂直应力曲线
Fig.16 Vertical stress curves of coal seams with different distances advanced by single seam with diameter of 2 cm

如图 17 所示,在割缝前期缝槽顶板暴露阶段,其云图变化形态与直径 2 cm 时类似,但卸压范围较直径 2 cm 明显增大,随着缝槽工作面的推进,顶板并未在 8 cm 之前触底,即缝槽顶板的挠度小于 4 cm 缝高,结合图 18 应力曲线可知,工作面推进到 12 cm 时缝槽顶板触底,缝槽中间位置出现小范围的应力恢复现象,说明缝高 4 cm 产生应力恢复现象要晚于缝高 2 cm;工作面推进 4 m 和工作面推进 8 m 时卸压区的最大垂直应力分别为 0.886、0.567 MPa,缝槽在顶板触底之前卸压效果普遍较好;工作面推进 12 m 和 16 m 时卸压区的最大垂直应力分别为 1.07 MPa 和 3.96 MPa,说明缝槽顶板触底之后也进入连续缓沉阶段,4 cm 缝高应力恢复程度小于 2 cm。此时 4 种工况缝槽始割点后方应力集中区最大垂直应力分别为 9.72、12.85、15.82、17.23 MPa,缝槽止割点前方应力集中区最大垂直应力分别为 9.84、12.75、15.87、17.21 MPa,缝高 4 cm 比 2 cm 缝槽两边应力集中区的

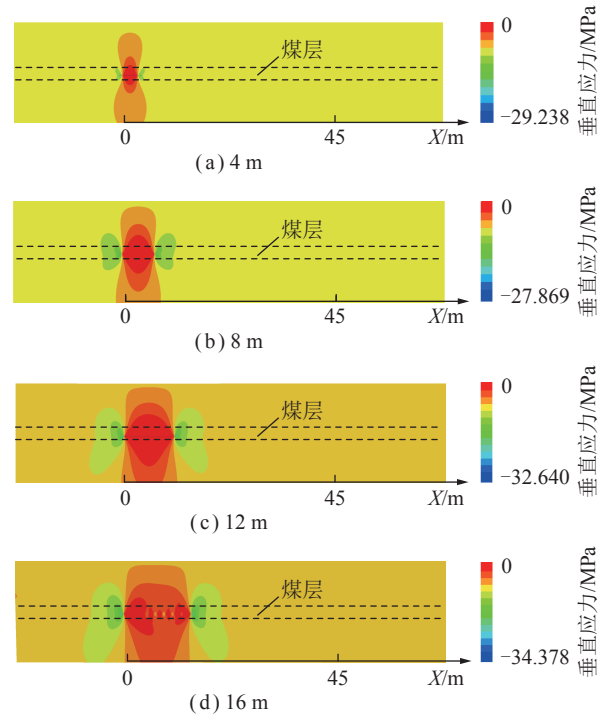


图 17 直径 4 cm 单缝推进不同距离缝槽周围垂直应力演化云图

Fig.17 Vertical stress evolution cloud diagram around the slot with different distances of single-slit propulsion with diameter of 4 cm

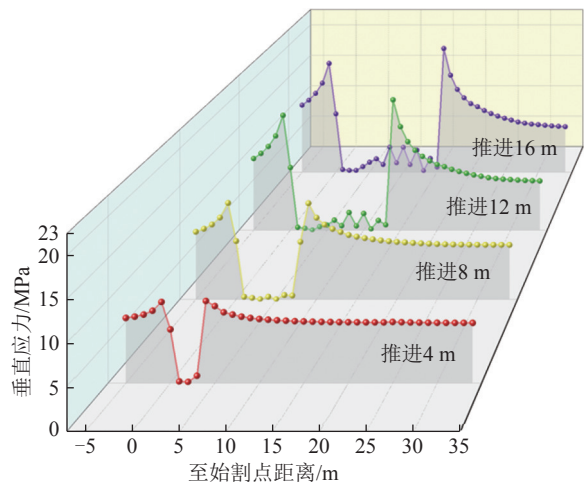


图 18 直径 4 cm 单缝推进不同距离煤层垂直应力曲线
Fig.18 Vertical stress curves of coal seam with 4 cm diameter single seam advancing at different distances

应力集中程度更大。

3.2.2 双缝绳锯切割煤层垂直应力演化规律

由图 19 可知,在第 1 条缝切割之后,缝槽始割点沿走向形成的卸压区类似于在煤层内开采了一个狭小的“保护层”形成的卸压效果。在此基础上增加第 2 条割缝,两缝槽形成的卸压区形成一个整体,明显增大卸压范围,提升了卸压效果;并且由于第 1 条割缝

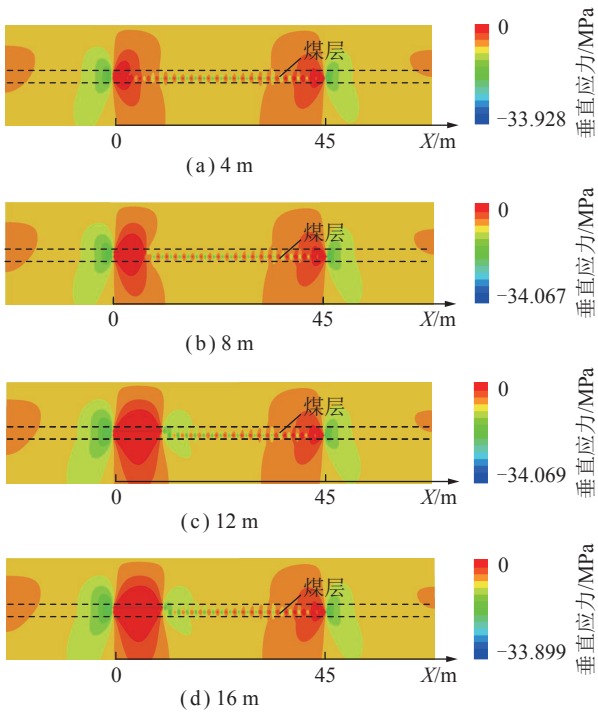


图19 直径4 cm 双缝推进不同距离缝槽周围垂直应力演化云图

Fig.19 Vertical stress evolution cloud diagram around the slot at different distances of double-slit propulsion with diameter of 4 cm 卸压的影响,当第2条割缝推进距离较短时,并未在第2条割缝工作面前方形成应力集中区,直到工作面推进12 m时,缝槽前方才出现应力集中现象,第2条缝槽短距离推进形成的垂直应力云图与割第1条缝类似,卸压影响范围从左到右依次为应力集中区—卸压区—应力集中区。不同的是,缝槽止割点前方的应力集中程度明显小于缝槽始割点后方;当工作面推进到16 m时,第2条缝顶板触底,出现应力恢复现象,不同于单缝切割的是,同样的推进距离,双缝切割发生顶板触底更晚,应力恢复程度更小。结合图20可知,缝槽工作面推进4、8、12 m,顶板均未触底,此时3种工况下卸压区最大垂直应力分别为0.150、0.115、0.297 MPa,都远小于原始应力;当工作面推进到16 m时,卸压区垂直应力最大为2.96 MPa,此时顶板刚触底应力恢复不完全,4种工况下第2条缝始割点后方应力集中区最大垂直应力分别为20.91、18.42、20.56、24.12 MPa,止割点前方最大垂直应力3.05、9.19、11.23、20.21 MPa,总体来看,缝槽始割点后方应力集中区最大垂直应力均大于单缝切割相同推进长度时的应力,止割点前方由于第1条缝卸压的影响,在推进12 m前均小于单缝切割相同推进长度时的应力。

3.2.3 不同工艺绳锯切割煤层垂直应力分布

金刚石串珠绳在3种方案下完成切割(缝槽工作

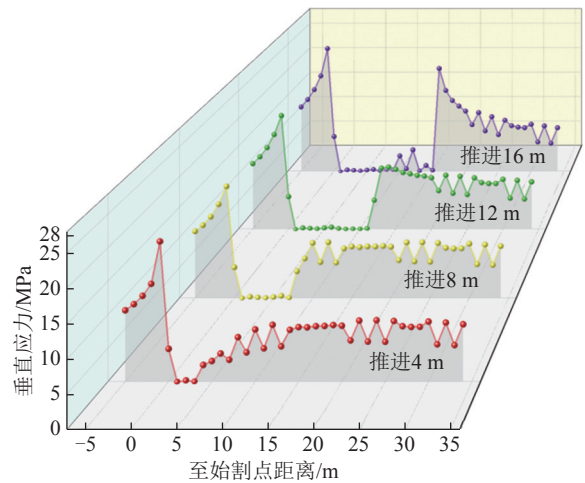


图20 直径4 cm 双缝推进不同距离煤层垂直应力曲线
Fig.20 Vertical stress curves of coal seams with different distances advanced by 4 cm diameter double seams

面推进50 m),由图21对比可知,当切割工作面切割足够的距离之后,割缝卸压影响范围都有类似规律,从左到右依次形成了应力集中区—卸压区—应力恢复区—卸压区—应力集中区的分布特征,割缝形成的卸压区主要集中在始割点前方和止割点后方一段区域;显而易见,缝高4 cm的卸压区大于2 cm,双缝切割工艺大于单缝切割,与之对应的缝槽两边的应力集中程度也是缝高4 cm大于2 cm,双缝切割工艺大于单缝切割。

由图22可知,3种方案绳锯割缝,缝高4 cm时应力恢复产生晚于2 cm,双缝切割工艺应力恢复产生晚于单缝切割;3种方案应力恢复区最大垂直应力分别为7.48、7.65、7.82 MPa,始割点前方10 m内卸压区平均垂直应力分别为4.75、3.00、0.924 MPa,止割点

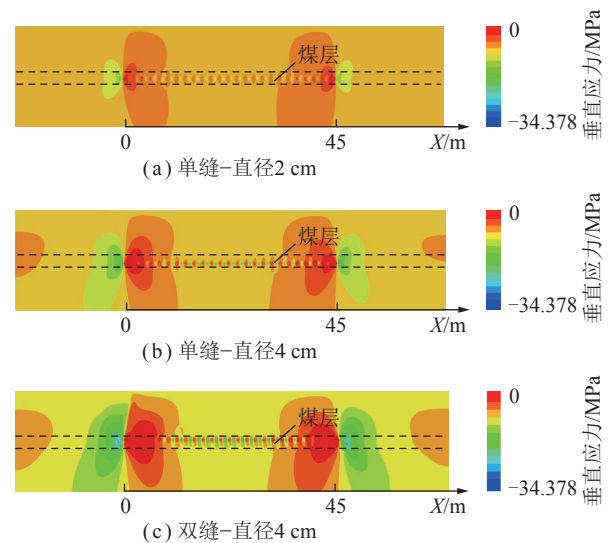


图21 不同切割工艺下缝槽周围垂直应力演化云图

Fig.21 Vertical stress evolution cloud diagram around the slot under different cutting processes

后方 10 m 处卸压区平均垂直应力分别为 4.93、3.03、2.00 MPa, 缝槽始割点后方应力集中区最大垂直应力分别为 16.15、20.82、24.54 MPa, 缝槽止割点前方应力集中区最大垂直应力分别为 13.12、17.8、20.61 MPa; 表明 3 种方案下, 当割缝工作面推进足够的距离, 缝槽中间位置顶板连续缓沉, 重新压实, 应力恢复程度较大; 缝槽两边卸压区卸压效果随着绳锯直径的增加、割缝数量的增多而增大; 相应地, 缝槽两边应力集中区也是缝槽越高、割缝条数越多, 最大垂直应力越大, 并且由于切割时止割点前方没有始割点后方平衡时间充分, 相对应力集中程度较小。

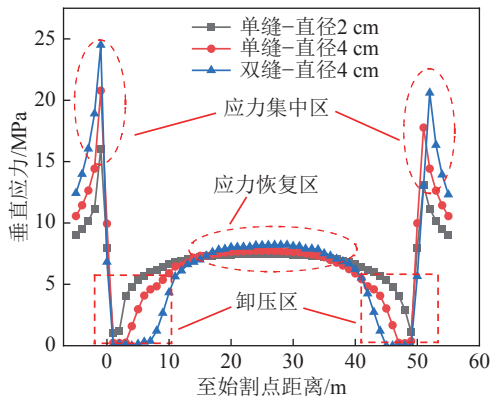


图 22 不同割缝工艺下垂直应力曲线对比

Fig.22 Comparison of vertical stress curves under different slotting processes

4 绳锯割缝煤层渗透率变化特征分析

4.1 渗透率计算方法

基于前期开展弹性煤样和裂隙煤样 3 次等压循环加卸载渗流试验, 获得 3 次等压循环加卸载渗流试验结果, 参考应力-渗透率理想模型^[39-41], 建立煤岩样的应力-渗透率公式, 见表 3。

在此基础上对 FLAC^{3D} 数值模拟中的渗流模块进行二次开发, 首先判断割缝煤层煤体的弹塑性状态, 弹性状态的网格单元体, 采用弹性煤样应力-渗透率公式, 塑

表 3 煤岩样不同加卸载条件下应力-渗透率公式^[35]

Table 3 Stress-permeability formula of coal rock samples under different loading and unloading conditions^[35]

煤样	加卸载阶段	应力-渗透率公式	公式
弹性煤样	第1次加载	$k = 4.713 5e^{-7.317 1(1-e^{-0.221 7\sigma})}$	(8)
	第1次卸载	$k = 3.326 2e^{-5.581 3(1-e^{-0.400 7\sigma})}$	(9)
	第2次加载	$k = 3.163 1e^{-9.661 4(1-e^{-0.198 4\sigma})}$	(10)
	第2次卸载	$k = 3.198 7e^{-7.004 3(1-e^{-0.292 7\sigma})}$	(11)
	第3次加载	$k = 3.113 3e^{-23.572 9(1-e^{-0.198 0\sigma})}$	(12)
	第3次卸载	$k = 2.967 4e^{-6.915 0(1-e^{-0.331 6\sigma})}$	(13)
裂隙煤样	第1次加载	$k = 178.936 7e^{-6.065 9(1-e^{-0.141 5\sigma})}$	(14)
	第1次卸载	$k = 26.762 2e^{-3.880 2(1-e^{-0.264 6\sigma})}$	(15)
	第2次加载	$k = 17.669 4e^{-3.328 8(1-e^{-0.124 8\sigma})}$	(16)
	第2次卸载	$k = 22.471 0e^{-3.122 2(1-e^{-0.245 4\sigma})}$	(17)
	第3次加载	$k = 15.090 9e^{-3.338 0(1-e^{-0.136 0\sigma})}$	(18)
	第3次卸载	$k = 18.017 7e^{-3.143 7(1-e^{-0.217 6\sigma})}$	(19)

注: k 为渗透率; σ 为有效应力。

性状态的网格单元体, 则采用裂隙煤样应力-渗透率公式; 根据数值模拟中缝槽周围煤岩体应力变化判断加卸载次数, 即煤体的弹塑性状态和加卸载次数共同确定渗透率表达式。对渗透率的计算过程如图 23 所示。

4.2 渗透率计算结果及分析

根据上述计算方法, 将绳锯割缝工作面每次推进后缝槽周边渗透率更新, 将输出渗透率导入 Origin 软件进行后期处理, 得到绳锯切割煤层中煤层渗透率分布特征。

4.2.1 绳锯煤层沿水平层面渗透率演化特征

当缝槽工作面不断推进时, 缝槽 1 上方 0.5 m 处的渗透率如图 24 所示。显而易见, 割缝提高了缝槽上方煤层的渗透率。结合前文的试验和模拟可知, 绳锯割缝后, 煤层应力得到了释放, 煤层内部产生裂隙,

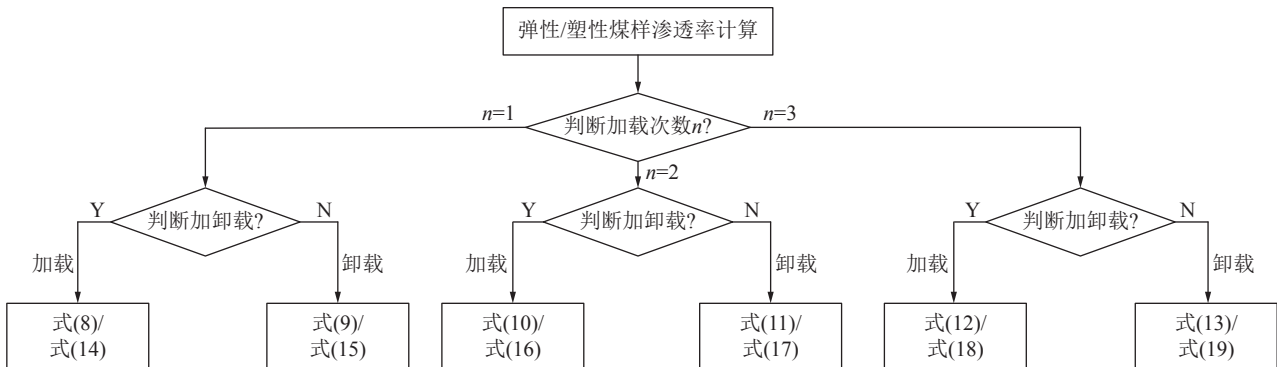


图 23 煤层渗透率更新程序

Fig.23 Coal seam permeability update program

提高了煤层的渗透率。由于缝槽始割点后方和止割点前方形成了应力集中区, 渗透率较缝槽范围内减小。当缝槽中间顶板触底之后, 随着割缝工作面的推进, 缝槽两边卸压区的渗透率基本保持在 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 应力恢复区煤层渗透率从 $0.782 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 左右提高到 $0.802 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 左右, 之后此区域渗透率随着割缝工作面的推进基本保持不变。可以看出, 增大割缝长度增大了缝槽卸压增透程度, 随着顶板的触底, 缝槽中间位置应力逐渐恢复, 煤层裂隙闭合, 但对比煤体未切割区域, 整体渗透率提升仍在 $0.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 左右。

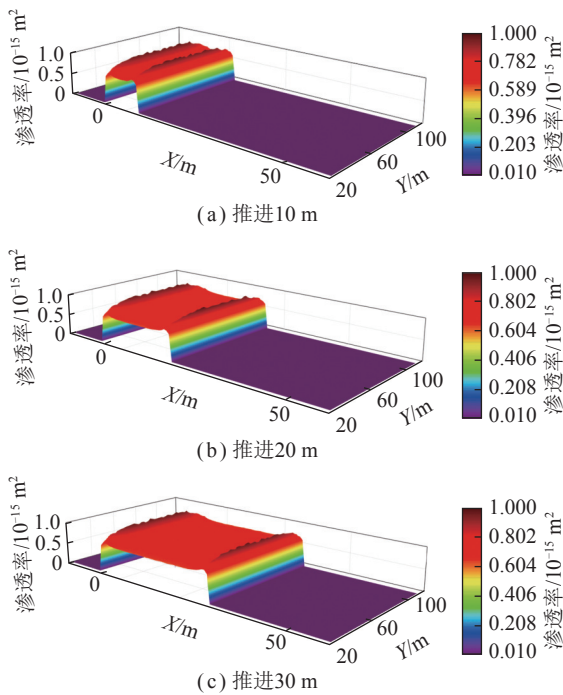


图 24 缝 1 上方 0.5 m 煤层渗透率分布特征

Fig.24 Permeability distribution characteristics of 0.5 m coal seam above slot 1

4.2.2 单缝切割缝 1 不同高度煤层渗透率分布

由图 25 可知, 当缝槽工作面推进 50 m, 缝 1 上方 0.5 m 两端卸压区的煤层渗透率从 $0.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 提高到 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 缝槽中部应力恢复区的煤层渗透率为 $0.802 \times 10^{-15} \text{ m}^2$; 缝 1 上方 1 m 处两端卸压区煤层渗透率最大约为 $0.94 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 缝槽中间位置应力恢复区煤层渗透率为 $0.196 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 左右, 缝槽卸压区的煤层渗透率降低了 6%, 应力恢复区的煤层渗透率降低了 75.56%; 缝 1 上方 1.5 m 处两端卸压区的煤层渗透率最大约为 $0.915 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 缝槽中间位置的应力恢复区煤层渗透率相较于原始煤层渗透率基本没有提升。由此可知, 绳锯单缝切割煤层时, 煤体距离缝槽越近, 渗透率的提升程度越大, 随着距离缝槽的距离增加, 绳锯切割煤层增透效果减弱。

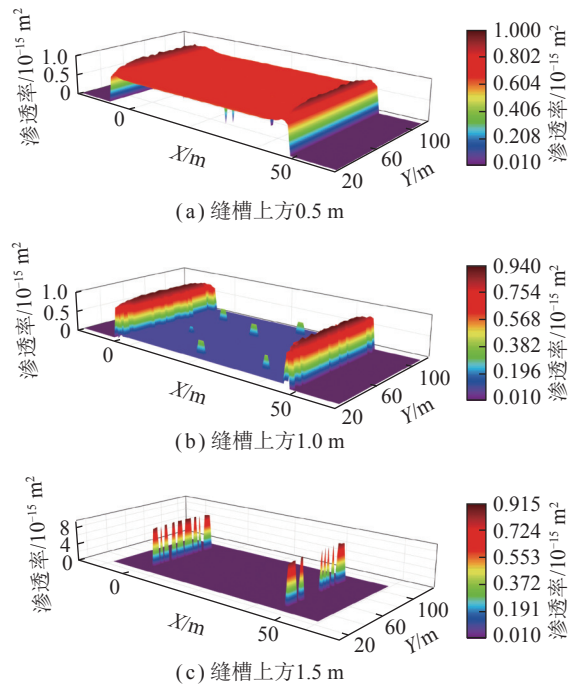


图 25 绳锯单缝切割不同高度位置渗透率分布

Fig.25 Permeability distribution at different heights of wire saw single slit cutting

4.2.3 双缝切割缝 2 不同高度煤层渗透率分布

当使用双缝工艺切割, 缝 2 切割完成之后, 得到图 26 缝 2 上方不同高度位置煤层渗透率分布, 缝 2 上方 0.5 m 处两端卸压区煤层渗透率从 $0.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 提高到 $2.78 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 缝槽中部应力恢复区的煤层渗透率大约为 $1.4 \times 10^{-15} \text{ m}^2$; 缝 2 上方 1 m 处两端卸压

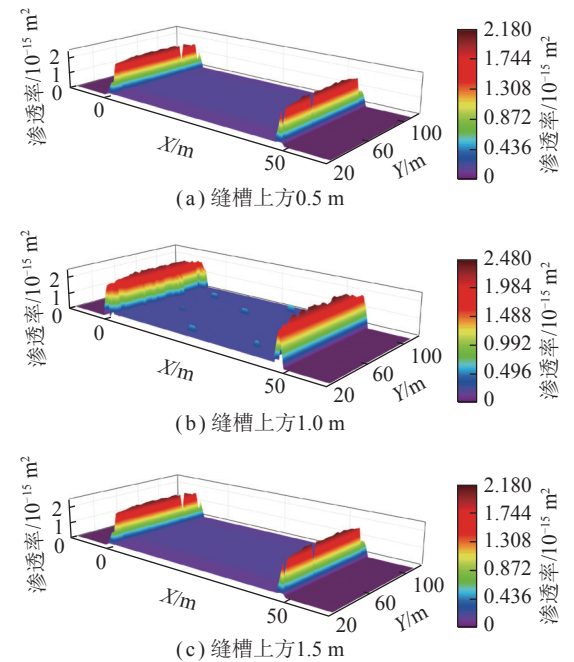


图 26 绳锯双缝切割不同高度位置渗透率分布

Fig.26 Permeability distribution at different heights of wire saw double-slit cutting

区煤层渗透率最大约为 $2.48 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 中间位置应力恢复区煤层渗透率约为 $0.494 \times 10^{-15} \text{ m}^2$; 缝 2 上方 1.5 m 处两端卸压区煤层渗透率为 $2.18 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 左右, 缝槽中间位置的应力恢复区煤层渗透率相较于原始煤层渗透率同样没有提升。对比图 25 可知, 双缝工艺下缝槽上方 0.5、1.0、1.5 m 处两端卸压区煤层渗透率相较于单缝工艺提高了 178%、163.8%、138.3%, 上方 0.5、1.0 m 处应力恢复区煤层渗透率提高 74.56%、153%。因此, 双缝工艺切割下, 对相同厚度煤层的增透效果大于单缝工艺。

5 结 论

(1) 建立了缝槽顶板触底前后的两端固支梁力学模型, 结合模型试验分析出, 当割缝工作面推进较短时, 缝槽顶板未触底, 割缝卸压效果较好, 缝槽上下方卸压范围对称, 越靠近缝槽卸压效果越好; 当割缝工作面推进一定的距离, 缝槽顶板触底, 触底区域卸压程度逐渐降低。

(2) 通过自研的金刚石串珠绳锯切割煤层相似模拟试验发现: 绳锯切割成缝后, 缝槽上方只存在小范围裂隙带和弯曲下沉带, 无常规“三带”形成, 试验中顶板虽然触底, 但缝槽上下方煤岩中应力恢复现象不明显, 缝槽上下方一定范围内有较好的卸压增透效果。

(3) 绳锯割缝工作面推进相同的距离, 绳锯直径越大, 卸压区内煤层垂直应力降低程度和应力集中区升高程度越大, 缝槽顶板触底出现越晚, 触底之后触底区应力恢复程度也越小; 增加第 2 条割缝, 在提升整体卸压效果的同时, 减弱了第 1 条缝槽的应力恢复程度, 相应地, 由于第 1 条缝槽卸压的影响, 第 2 条缝触底现象出现较第 1 条割缝更晚, 应力恢复程度也更小, 两缝相互促进, 共同形成良好的卸压区。

(4) 绳锯割缝形成了一定范围的增透区, 距离缝槽越近, 增透效果越好, 双缝切割工艺增透效果明显好于单缝切割, 割缝卸压影响范围特征可以大致划分为应力集中区—卸压区—应力恢复区—卸压区—应力集中区, 对应的卸压区有较好的增透效果, 中间触底部位由于应力恢复, 渗透率提高较小; 增大绳锯直径和增加割缝条数能够有效增大卸压区范围, 但要考虑绳锯割缝空间布局。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [2] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- [3] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189-3211.
LU Yiyu, HUANG Shan, GE Zhaolong, et al. Progress and strategic thinking of coal mine water jet pressure relief and permeability enhancement technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189-3211.
- [4] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [5] 石必明, 俞启香, 周世宁. 保护层开采远距煤岩破裂变形数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 25-29.
SHI Biming, YU Qixiang, ZHOU Shining. Numerical simulation of far-distance rock strata failure and deformation caused by mining protecting stratum[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 25-29.
- [6] 程远平, 周德永, 俞启香, 等. 保护层卸压瓦斯抽采及涌出规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 12-18.
CHENG Yuanping, ZHOU Deyong, YU Qixiang, et al. Research on extraction and emission laws of gas for pressure-relief in protecting coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 12-18.
- [7] 涂敏, 缪协兴, 黄乃斌. 远程下保护层开采被保护煤层变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 253-257.
TU Min, MIAO Xiexing, HUANG Naibin. Deformation rule of protected coal seam exploited by using the long-distance-lower protective seam method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(3): 253-257.
- [8] 刘洪永, 程远平, 赵长春, 等. 保护层的分类及判定方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 468-474.
LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHAO Changchun, et al. Classification and judgment method of the protective layers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 468-474.
- [9] 王伟, 程远平, 袁亮, 等. 深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯抽采时效性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 138-148.
WANG Wei, CHENG Yuanping, YUAN Liang, et al. Floor fracture evolution and relief gas drainage timeliness in deeper underground short-distance upper protective coal seam extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 138-148.
- [10] 胡国忠, 王宏图, 李晓红, 等. 急倾斜俯斜上保护层开采的卸压瓦斯抽采优化设计[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 9-14.
HU Guozhong, WANG Hongtu, LI Xiaohong, et al. Optimization design on extracting pressure-relief gas of steep-inclined up-protective layer with pitching oblique mining[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 9-14.
- [11] 胡国忠, 王宏图, 范晓刚, 等. 急倾斜俯斜上保护层保护范围的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2845-2852.
HU Guozhong, WANG Hongtu, FAN Xiaogang, et al. Three-dimen-

- sional numerical simulation for protection scope of steep inclined upper-protective layer of pitching oblique mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2845–2852.
- [12] 高峰, 许爱斌, 周福宝. 保护层开采过程中煤岩损伤与瓦斯渗透性的变化研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1979–1984.
GAO Feng, XU Aibin, ZHOU Fubao. Research on the coal and rock damage and gas permeability in the protective seams mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1979–1984.
- [13] 马占国, 涂敏, 马继刚, 等. 远距离下保护层开采煤岩体变形特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 253–257.
MA Zhanguo, TU Min, MA Jigang, et al. Rock mass deformation characteristics for coal mining at remote lower protective seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 253–257.
- [14] 薛东杰, 周宏伟, 孔琳, 等. 采动条件下被保护层瓦斯卸压增透机理研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1910–1916.
XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, KONG Lin, et al. Mechanism of unloading-induced permeability increment of protected coal seam under mining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1910–1916.
- [15] 王宏图, 范晓刚, 贾剑青, 等. 关键层对急斜下保护层开采保护作用的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 23–28.
WANG Hongtu, FAN Xiaogang, JIA Jianqing, et al. Effects of key strata on protection when exploiting a steep-incline underlying a protecting stratum[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 23–28.
- [16] 程详, 赵光明, 李英明, 等. 软岩保护层开采覆岩采动裂隙带演化及卸压瓦斯抽采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 533–542.
CHENG Xiang, ZHAO Guangming, LI Yingming, et al. Evolution of overburden mining-induced fractured zone and pressure-relief gas drainage in soft rock protective seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 533–542.
- [17] 柴敬, 刘永亮, 王梓旭, 等. 保护层开采下伏煤岩卸压效应及其光纤监测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2896–2906.
CHAI Jing, LIU Yongliang, WANG Zixu, et al. Pressure relief effect of protective layer mining and its optical fiber monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2896–2906.
- [18] 林柏泉, 吕有厂, 李宝玉, 等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 959–963.
LIN Baiquan, LÜ Youchang, LI Baoyu, et al. High-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology and its application in outbursts prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 959–963.
- [19] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55–58, 69.
LU Yiyu, GE Zhaolong, LI Xiaohong, et al. Investigation of a self-excited pulsed water jet for rock cross-cutting to uncover coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 55–58, 69.
- [20] 李晓红, 王晓川, 康勇, 等. 煤层水力割缝系统过渡过程能量特性与耗散[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1404–1408.
LI Xiaohong, WANG Xiaochuan, KANG Yong, et al. Energy characteristic and dissipation in transient process of hydraulic cutting seams system in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1404–1408.
- [21] 唐巨鹏, 杨森林, 李利萍. 不同水力割缝布置方式对卸压防突效果影响数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 61–66.
TANG Jupeng, YANG Senlin, LI Liping. Numerical simulation of effects of different hydraulic cutting arrangement on pressure relief and gas outburst prevention[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(1): 61–66.
- [22] 葛兆龙, 梅绪东, 贾亚杰, 等. 高压水射流割缝钻孔抽采影响半径研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 1(4): 657–664.
GE Zhaolong, MEI Xudong, JIA Yajie, et al. Influence radius of slotted borehole drainage by high pressure water jet[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 1(4): 657–664.
- [23] 赵善坤, 李英杰, 柴海涛, 等. 陕蒙地区厚硬砂岩顶板定向水力压裂预割缝倾角优化及防冲实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 150–160.
ZHAO Shankun, LI Yingjie, CHAI Haitao, et al. Pre-existing crack angle optimization of thick sandstone roof during directional hydraulic fracturing and its application to anti-rockburst in Shanxi and Inner Mongolia areas[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 150–160.
- [24] 邓广哲, 刘文静, 李刚, 等. 低渗煤层水力割缝钻孔抽采影响半径[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(4): 619–628.
DENG Guangzhe, LIU Wenjing, LI Gang, et al. Influence radius of hydraulic slotted hole drainage in low permeability coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(4): 619–628.
- [25] 唐永志, 李平, 朱贵旺, 等. 超高压水力割缝技术在中等硬度低透气性煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 43–49.
TANG Yongzhi, LI Ping, ZHU Guiwang, et al. Application of ultra-high pressure hydraulic slotting technology in medium hardness and low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 43–49.
- [26] 杨慧明. 深部低透煤层水力割缝卸压增透技术研究现状及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2018, 49(6): 147–151.
YANG Huiming. Research status and development tendency of hydraulic cutting technology for pressure relief and permeability increasing of deep coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(6): 147–151.
- [27] 黄国钦, 黄辉, 郭桦, 等. 串珠绳锯切花岗岩过程中锯切参数对锯切力和能耗的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 234–239.
HUANG Guoqin, HUANG Hui, GUO Hua, et al. Influences of sawing parameters on forces and energy in wire sawing of granite[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 234–239.
- [28] WANG Jianjian, ZHANG Chenglong, FENG Pingfa, et al. A model for prediction of subsurface damage in rotary ultrasonic face milling of optical K9 glass[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1-4): 347–355.
- [29] CHEN Jianbin, FANG Qihong, LI Ping. Effect of grinding wheel spindle vibration on surface roughness and subsurface damage in brittle material grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 91: 12–23.
- [30] LU Yuanxin, LI Yan, HUANG Hui. Study on sawing forces of dia-

- mond wire saw in concrete cutting[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2011, 31(6): 47–50.
- [31] WANG Haibo, ZHANG Lan, MENG Qingxin, et al. Study on characteristic parameters of underwater diamond wire saw cutting pipe[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2018, 46(11): 115–118.
- [32] ALMASI S N, BAGHERPOUR R, MIKAEIL R, et al. Developing a new rock classification based on the abrasiveness, hardness, and toughness of rocks and PA for the prediction of hard dimension stone saw ability in quarrying[J]. *Geosystem Engineering*, 2017, 20(6): 295–310.
- [33] POLINI W, TURCHETTA S. Force and specific energy in stone cutting by diamond mill[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(11): 1189–1196.
- [34] RAJPUROHir S S, SINHA R K, SEN P, et al. Influence of physico-mechanical properties of Indian dimension stones on cutting rate of diamond wire saw[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(18): 138–143.
- [35] 李树清, 汤铸, 黄飞, 等. 低渗透煤层金刚石串珠绳锯切割卸压增透机理及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 83–90.
- LI Shuqing, TANG Zhu, HUANG Fei, et al. Application and mechanism on pressure relief and permeability enhancement of diamond beaded wire saw cutting in low-permeability coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 83–90.
- [36] 汤铸, 李树清, 黄飞, 等. 金刚石串珠绳锯切缝煤层实验装置的研究[J]. *矿业工程研究*, 2021, 36(3): 34–39.
- TANG Zhu, LI Shuqing, HUANG Fei, et al. Development of experimental device for slitting coal seam with diamond wire saw[J]. *Mineral Engineering Research*, 2021, 36(3): 34–39.
- [37] 齐峰. 保护层区段煤柱宽度对被保护层卸压效果的影响[J]. *矿业安全与环保*, 2016, 43(4): 10–13, 18.
- QI Feng. Influence of sectional coal pillar width of protective seam on pressure relief effect of protected seam[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2016, 43(4): 10–13, 18.
- [38] 徐连满, 潘一山, 李忠华, 等. 深部开采覆岩应力变化规律模拟实验研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22(3): 61–66.
- XU Lianman, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Similarity simulation experiment of deformation of deep mining-induced overburden stress[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22(3): 61–66.
- [39] SEIDLE J P, JEANSONNE M W, Erickson D J, et al. Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals[C]//SPE rocky mountain regional meeting. United States: Society of Petroleum Engineers, 1992: 433–444.
- [40] CHEN D, PAN Z, YE Z. Dependence of gas shale fracture permeability on effective stress and reservoir pressure: Model match and insights[J]. *Fuel*, 2015(139): 383–392.
- [41] CHEN D, PAN Z, YE Z, et al. A unified permeability and effective stress relationship for porous and fractured reservoir rocks[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016(29): 401–412.