

金刚石串珠绳锯切割煤层卸压渗流规律分析

杨党震^{1,3}, 李树清^{1,2,3*}, 杨凤玲^{1,3}, 李波^{1,3}, 段蓉^{1,3}

(1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制国家安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
2. 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;
3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 金刚石串珠绳锯切割煤层可以实现连续性大面积煤层割缝, 为了获得割缝后煤层内部的卸压渗流规律, 通过煤体瓦斯渗流试验, 得出不同损伤煤样的应力-渗透率拟合公式, 并在此基础上采用 FLAC^{3D} 数值模拟方法, 分析割缝后煤层的应力及渗透率分布规律。模拟结果表明: 煤层割缝后, 缝槽上方和下方的煤岩体应力得到释放, 形成卸压区, 且卸压效果与缝槽的垂直距离成反比, 缝槽左右两侧出现应力集中现象; 随着割缝工作面的推进, 卸压区与渗透率升高区的范围逐渐扩大; 随着缝槽数量的增多, 煤层应力降低值和渗透率升高值越大, 即增加缝槽数量可以获得更好的卸压增透效果。该研究成果对金刚石串珠绳锯切割煤层的工程实践具有一定指导意义。

关键词: 金刚石串珠; 煤层割缝; 瓦斯渗流; 卸压增透

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2022)01-0008-07

Analysis of Pressure Relief and Seepage Law of Diamond Wire Saw Cutting Coal Seam

YANG Dangzhen^{1,3}, LI Shuqing^{1,2,3*}, YANG Fengling^{1,3}, LI Bo^{1,3}, DUAN Rong^{1,3}

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Continuous large-area seam cutting can be realized by diamond wire saw. In order to obtain the pressure relief and seepage law of the coal seam after slitting, the stress-permeability fitting formula of different damaged coal samples are obtained by gas seepage test. On this basis, the FLAC^{3D} numerical simulation method is used to analyze the stress and permeability distribution law of the coal seam after slitting. The simulation results show that stress concentration zones appear on the left and right sides of seam after slitting, the pressure relief effect is inversely proportional to the vertical distance of the slot. With the advance of the working face, the range of pressure relief area and permeability increasing zone of the coal seam gradually expands. As the seam slots increases, the stress reduction value and the permeability increase value of coal seam increase, that is, the increase of the number of seam slots can obtain better effect of pressure relief and reflection improvement. The research results have guiding significance for the engineering practice of diamond wire saw cutting coal seam.

Keywords: diamond wire saw; coal seam cutting; gas seepage; pressure relief and permeability increase

收稿日期: 2021-10-03

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); 博士后面上基金资助项目(2020M682563); 湖南省教育厅一般资助项目(19C0743)

* 通信作者, Email: lsq_hnust@163.com

随着煤炭资源开采逐渐由浅部进入深部,煤层的低透气性越发成为制约瓦斯高效抽采的关键因素,而煤层卸压增透技术是提高瓦斯抽采效率的重要手段.鉴于此,国内外专家提出水力冲孔、水力压裂、深孔预裂爆破和二氧化碳致裂等造缝卸压增透技术,并进行了大量研究^[1-8].林柏泉等^[9-10]研究了煤层割缝后缝槽如何卸压和防突的机理,研究发现割缝后在其工作面前方形成了卸压区,缝槽的卸压效果主要与缝槽的形状与长度相关;刘厅等^[11]研究了水力割缝预抽后煤体的孔隙结构特征,提出将液氮吸附和压汞相结合的方法表征煤体孔隙结构,从而揭示了割缝预抽煤层卸压增透技术的微观机理;赵阳升等^[12]研究了煤层不同埋藏深度、不同割缝宽度缝槽附近的卸压范围和卸压效应.这些研究成果进一步证实割缝卸压技术可以改善瓦斯抽采效果,提高瓦斯抽采效率.而这些割缝技术均只是断续造缝,很难进行连续的大面积煤层割缝,如果增加割缝的扰动范围又将会加大瓦斯处理工作量和投资.为此笔者课题组通过前期调研,提出了一种可在煤层内部连续割缝、实现煤层大面积卸压增透的新技术——金刚石串珠绳锯切割煤层卸压增透技术.本文拟通过煤体瓦斯渗流试验得出不同损伤煤样的应力-渗透率拟合公式,并在此基础上采用FLAC^{3D}数值模拟方法,分析割缝后煤层的应力及渗透率分布规律.论文研究成果对于金刚石串珠绳锯切割煤层的工程实践具有一定指导意义.

1 金刚石串珠绳锯割缝工艺

将金刚石串珠绳锯机应用到煤矿井下作业时,需要综合考虑巷道布置、支护方式、切割煤层厚度、切割煤层面积等因素.金刚石串珠绳锯切割煤层的工艺布置如图1所示.首先在煤层中钻孔,然后将绳锯穿过钻孔形成闭合的输送回路,导向轮用来固定绳锯位置及控制绳锯切割行进方向,绳锯机作为驱动系统,推动串珠绳高速运动进行切割,切割过程中在串珠绳的入绳口设有喷口以进行降尘减热.根据所切割煤层的具体工况依次在煤层中间切割相应数量的缝槽(图1中割缝数量为3条).从2012年开始,笔者项目组对金刚石串珠绳锯切割煤层这一工艺进行了大量的前期研究工作,并在煤矿井下试验,绳锯机在高地应力环境下的切割速率达到70~80 m²/h,实现了有效围割煤层面积达1 500 m²,割缝效果良好.其现场作业情景如图2所示.

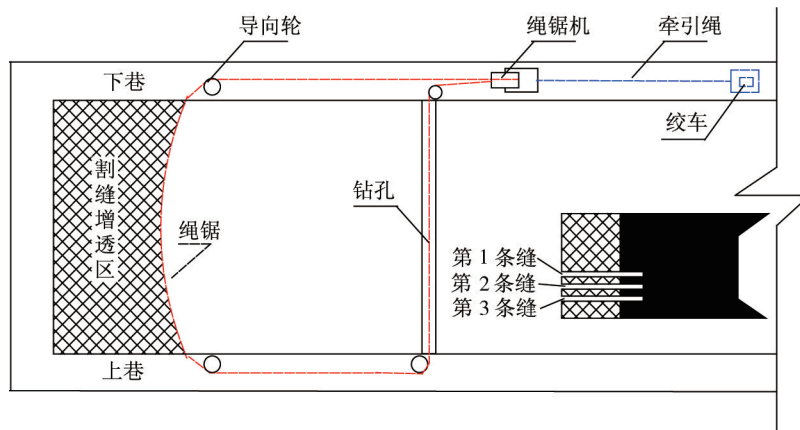
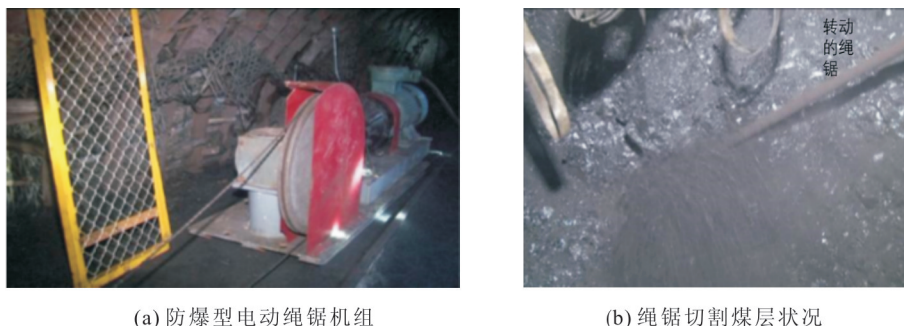


图1 金刚石串珠绳锯切割煤层工艺布置



(a) 防爆型电动绳锯机组

(b) 绳锯切割煤层状况

图2 金刚石串珠绳锯切割煤层现场

2 绳锯切割煤层后不同损伤程度煤样瓦斯渗流试验

本次试验煤样取自开滦矿区某矿5#煤层,采用岩芯钻机制取标准煤样 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,包括3个弹性煤样和3个裂隙煤样.不同损伤程度的煤样制备方法:弹性煤样是由岩芯钻机直接制取后磨平两端获得;裂隙煤样是将制得的弹性煤样通过RMT-150C设备进行单轴压缩,直至出现贯穿裂隙时立即停止压缩操作,即获得裂隙煤样.将制备完成的煤样进行尺寸、质量等基本参数测量并编号.煤样基本信息如表1和表2所示.

表1 弹性煤样的基本参数

煤样类型	煤样编号	煤样长度/mm	煤样直径/mm	质量/g
弹性煤样	T1	100.18	49.39	247
弹性煤样	T2	100.16	49.45	264
弹性煤样	T3	100.23	49.37	255

表2 裂隙煤样的基本参数

煤样类型	煤样编号	煤样长度/mm	煤样直径/mm	质量/g
裂隙煤样	L1	100.13	49.35	246
裂隙煤样	L2	100.16	49.40	260
裂隙煤样	L3	100.16	49.32	253

为了得出不同损伤煤样的应力-渗透率关系,对其进行瓦斯渗流试验.此次试验使用装置为RLW-500G煤岩三轴蠕变-渗流-吸附解吸渗流系统,如图3所示,其主要技术指标如表3所示.该渗流试验系统与一般瓦斯渗流装置相比,其优点在于该装置综合考虑了温度的控制,具有一定自动化程度,并且操作简单,测量精度较高,还可以进行长时间的蠕变加载.



图3 RLW-500G煤岩三轴蠕变-渗流-吸附解吸渗流系统

表3 试验设备的主要技术指标

技术参数	指标值
实验力加载速度	0.02~10 kN/s,精度 $\pm 1\%$
轴压控制范围	0~500 kN
围压控制范围	0~50 MPa
温度控制范围	0~90 $^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
试样尺寸	$\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$, $\Phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$
试验机总体刚度	$\geq 5\text{ }000\text{ kN/mm}$

根据绳锯切割工艺煤体的受力特征,渗流试验应力路径采用3次等压循环加卸载方式,其最大加载峰值为16 MPa,如图4所示.

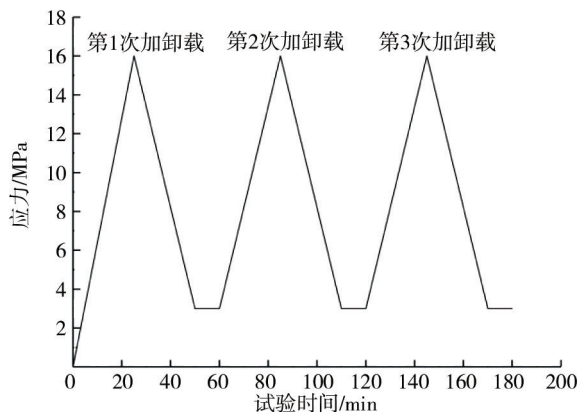


图4 3次等压循环加卸载

对不同损伤煤样做 3 次循环加卸载的瓦斯渗流试验,确定弹性煤样与裂隙煤样的渗透性.再通过对各煤样的应力-渗透率的拟合,得出各煤样在 3 次循环加卸载下的应力-渗透率拟合公式,如表 4 所示.

表 4 各煤样 3 次循环加卸载应力-渗透率拟合公式

煤样的类型	加卸载的阶段	应力-渗透率拟合公式	公式编号
弹性煤样	第 1 次加载	$k = 4.713 5e^{-7.317 1(1-e^{-0.221 7\sigma})}$	(1)
	第 1 次卸载	$k = 3.326 2e^{-5.581 3(1-e^{-0.400 7\sigma})}$	(2)
	第 2 次加载	$k = 3.163 1e^{-9.661 4(1-e^{-0.198 4\sigma})}$	(3)
	第 2 次卸载	$k = 3.198 7e^{-7.044 3(1-e^{-0.292 7\sigma})}$	(4)
	第 3 次加载	$k = 3.113 3e^{-23.572 9(1-e^{-0.198 0\sigma})}$	(5)
	第 3 次卸载	$k = 2.967 4e^{-6.915 0(1-e^{-0.331 6\sigma})}$	(6)
裂隙煤样	第 1 次加载	$k = 176.936 7e^{-6.065 9(1-e^{-0.141 5\sigma})}$	(7)
	第 1 次卸载	$k = 26.762 2e^{-3.880 2(1-e^{-0.264 6\sigma})}$	(8)
	第 2 次加载	$k = 17.669 4e^{-3.328 8(1-e^{-0.124 8\sigma})}$	(9)
	第 2 次卸载	$k = 22.471 0e^{-3.122 2(1-e^{-0.245 4\sigma})}$	(10)
	第 3 次加载	$k = 15.090 9e^{-3.338 0(1-e^{-0.136 0\sigma})}$	(11)
	第 3 次卸载	$k = 18.017 7e^{-3.143 7(1-e^{-0.217 6\sigma})}$	(12)

注: k 为渗透率; σ 为有效应力.

3 绳锯切割煤层数值模拟分析

3.1 建立模型及参数

根据煤层绳锯割缝工程实际,采用 FLAC^{3D} 软件建立长宽高为 200 m×136 m×18 m 的数值模型,如图 5 所示.设置数值模拟模型的边界条件:前后左右边界为辊支撑边界条件,下边界为固定约束边界条件,上边界施加 10 MPa 垂直应力.

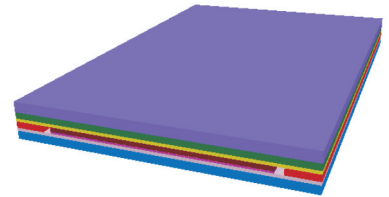


图 5 数值模拟模型

模型岩层分布如图 6 所示,各岩层力学参数如表 5 所示.

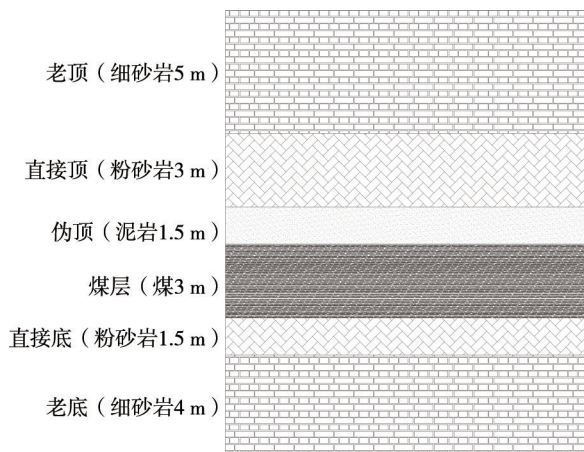


图 6 模型岩层分布情况

表 5 数值模拟各岩层力学参数

岩层位置	岩性	密度/(kg/m ³)	体积模量 K /GPa	剪切模量 G /GPa	黏聚力 c /MPa	摩擦角/(°)	抗拉强度 t /MPa
老顶	细砂岩	2 977	6.67	5.00	3.20	41	3.70
直接顶	粉砂岩	2 630	5.00	3.80	2.80	35	2.50
伪顶	泥岩	2 550	2.78	1.59	1.18	32	1.50
煤层	煤	1 400	1.67	0.56	1.12	20	0.64
直接底	粉砂岩	2 630	5.00	3.80	2.80	35	2.50
老底	细砂岩	2 977	6.67	5.00	3.20	41	3.70

3.2 计算煤层渗透率

将表4中获得的应力-渗透率拟合公式导入FLAC^{3D}数值模拟软件,在软件中建立如图7所示的渗透率更新程序,由软件根据煤体损伤状态去判断加载和卸载的过程,确定其相应区域使用的应力-渗透率拟合公式。

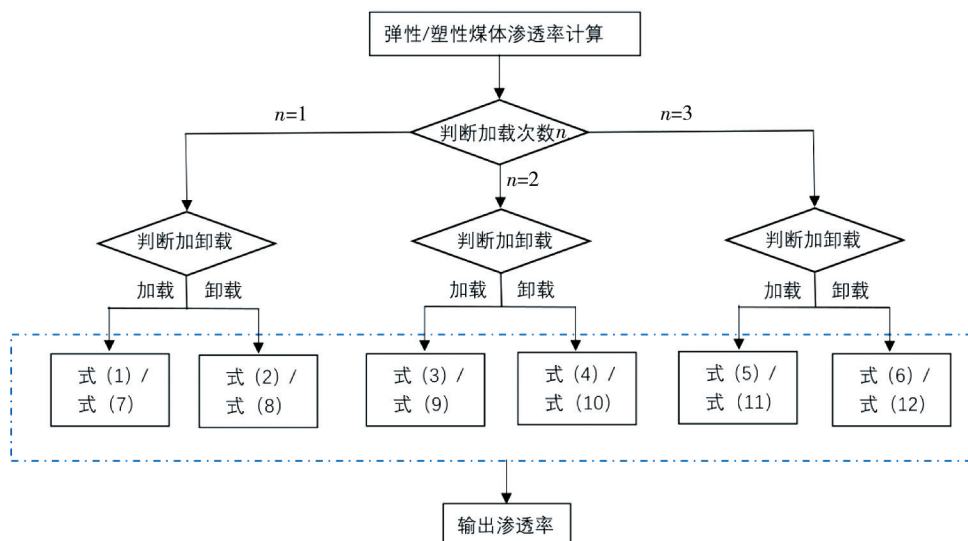


图7 煤体渗透率更新程序

3.3 金刚石串珠绳锯切割煤层模拟结果分析

3.3.1 金刚石串珠绳锯切割煤层覆岩应力变化规律

为了掌握金刚石串珠绳锯切割煤层过程中垂直应力和渗透率分布情况,在数值模型中沿绳锯割煤工作面推进方向设置一条应力和渗透率监测线,监测割煤工作面推进至30,60,90 m时缝槽上方0.5 m处的应力和渗透率状态.图8为垂直应力数值监测结果。

从图8可以看出:绳锯切割煤层过程中,缝槽周边煤岩体的应力平衡状态被破坏,应力重新分布;缝槽两侧外部出现应力集中现象,应力值最高升至14.5 MPa,缝槽内部出现应力降低现象,其应力最低降至7.1 MPa;随着工作面依次推进至30,60,90 m的过程中,应力减小的区域越来越大,卸压范围增大。

由于串珠绳锯的切割厚度非常小(国内生产的绳锯最大直径为30 mm),切割时对煤层应力场的影响范围较为有限。为了增大卸压范围,在绳锯切割完1条缝槽之后,在其下方再进行多次切割,获得了多条割缝的垂直应力分布曲线,如图9所示。

从图9中发现:切割1条缝时应力值最大降低到7.1 MPa,切割2条缝时应力值可以降到4.9 MPa,切割3条缝时应力值最大可以降到2.9 MPa。与此同时,卸压范围也随着缝槽数量的增多而扩大,切割1,2,3条缝时卸压影响范围分别为11,15,20 m。也就是说,随着对煤层切割次数的增多,卸压程度提高,卸压范围扩大。

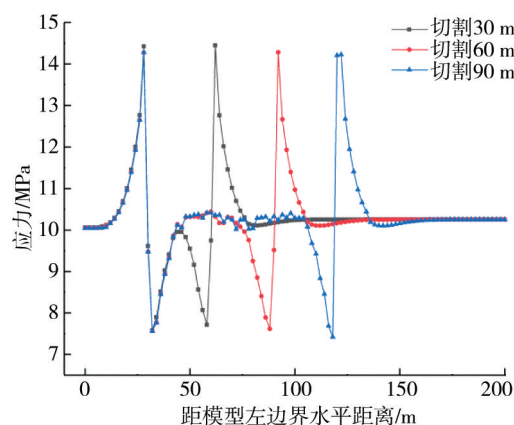


图8 缝槽上部煤岩体垂直应力随绳锯割煤工作面推进变化情况

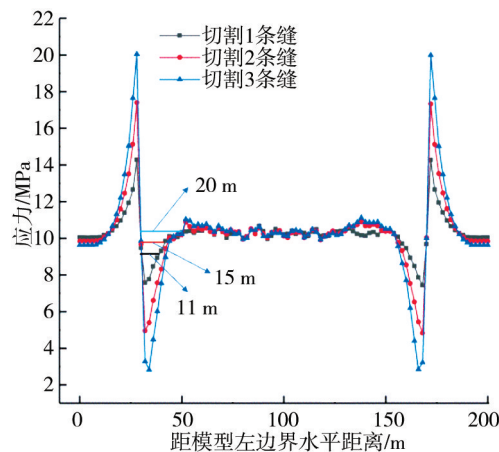


图9 切割多条缝时垂直应力的分布

3.3.2 切割 1 条缝时煤岩体渗透率变化规律

对仿真结果进行后处理分析,获得绳锯切割 1 条缝过程中不同推进距离、缝槽不同高度位置处的煤层渗透率分布规律,分别如图 10 和图 11 所示。

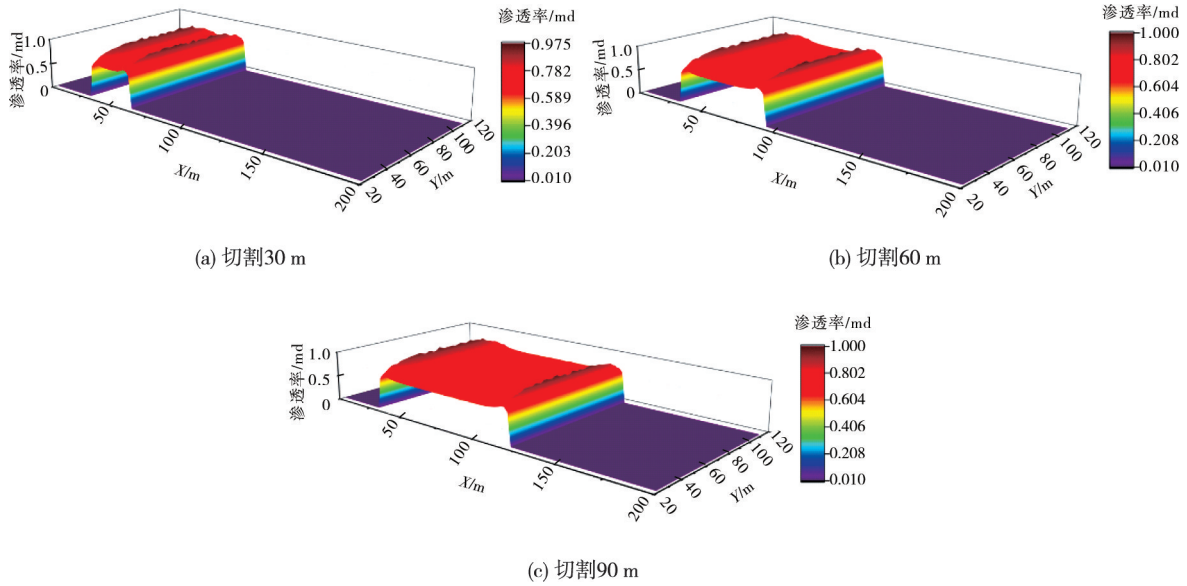


图 10 不同推进距离渗透率的分布特征

根据图 10 可以看出:当金刚石串珠绳锯切割煤层后,煤层的渗透率得到了提高.煤层切割 30 m 时,起割位置及止割位置的渗透率接近 1 md,割缝工作面上方区域渗透率也发生了变化,从 0.1 md 升高到 0.7 md 左右.从渗透率的数值变化可以看出,随着工作面向前推进,割缝对渗透率的影响范围也逐渐增大,即渗透率值增加的范围逐渐扩大.但绳锯切割工作面中间部分的渗透率值出现了小范围的减小,结合前述垂直应力演化规律分析此现象原因,主要是由于缝槽中间部分应力恢复造成的,但较未进行金刚石串珠绳锯割缝操作的区域,其渗透率的值仍然升高了 0.6 md 左右。

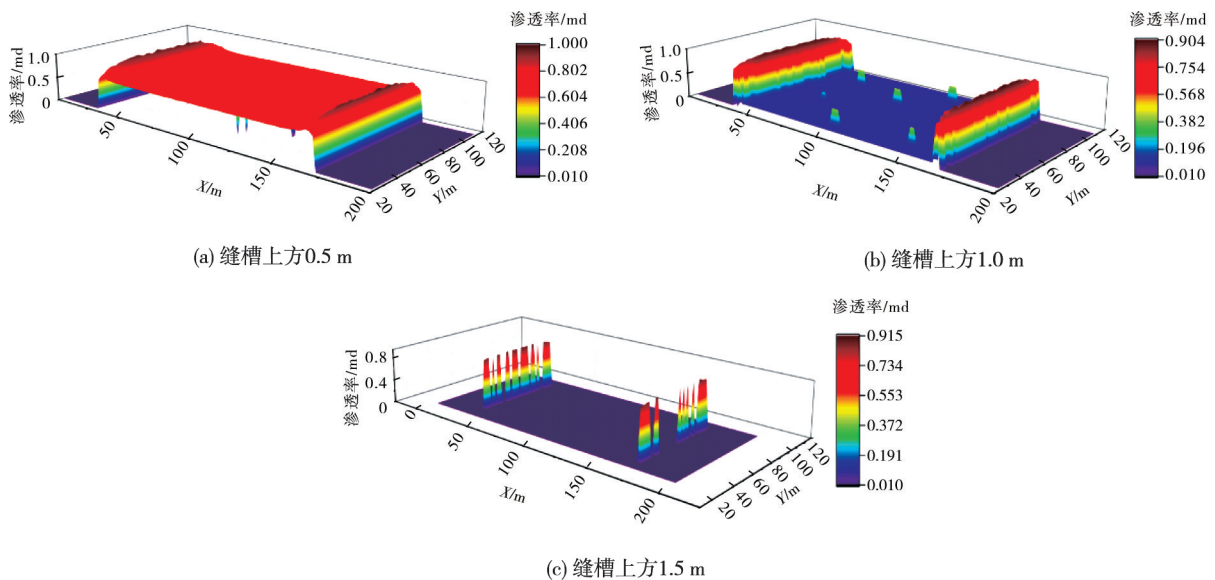


图 11 缝槽上方不同高度渗透率的分布特征

分析图 11 可得:割缝后在距离缝槽上方 0.5 m 处,煤岩体形成了较大的增透范围,该范围内的渗透率均大于 0.7 md;在距离缝槽上方 1 m 处,煤岩体渗透率大于 0.7 md 的区域仅在缝槽两侧的小范围内,而大部分区域的煤岩体渗透率为 0.3 md;在距离缝槽上方 1.5 m 处,缝槽两侧以外区域渗透率几乎无明显变化.由此分析可知,距离缝槽越远,煤岩体渗透率变化值越小,割缝后煤层渗透率大小与缝槽的垂直距离成反比。

3.3.3 不同缝槽数量煤岩体渗透率分布对比

为了更直观地对比缝槽数量对煤层渗透率的影响效果,提取不同缝槽数量下缝槽上方 0.5 m 处煤岩体的渗透率,得到其分布情况如图 12 所示。

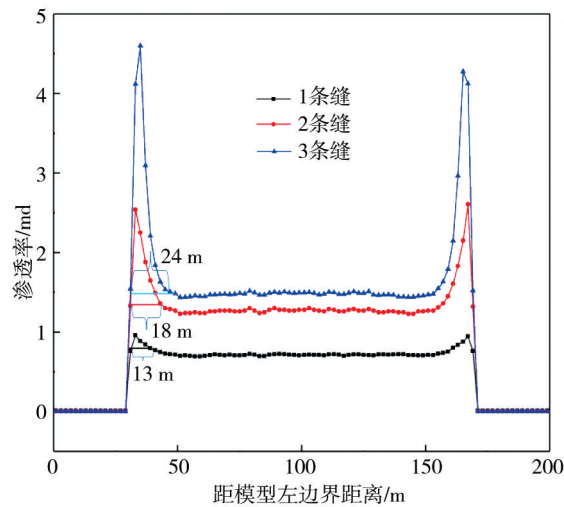


图 12 缝槽上方 0.5 m 处渗透率分布

从图 12 可以发现:绳锯切割煤层后,煤岩体渗透率增加峰值出现在起割位置和止割位置,峰值附近形成倒“V”的增透范围,该增透范围随着缝槽数量增加而扩大,切割 1,2,3 条缝时该增透范围分别为 13,18,24 m.随着对煤层切割次数的增多,卸压范围得到了扩大,渗透率也相应提高。

4 结论

1) 绳锯切割破坏煤岩体原始应力平衡,在缝槽周边一定范围内形成卸压区,且卸压效果与缝槽的垂直距离成反比,同时在缝槽左右两侧出现应力集中现象。

2) 随着割缝工作面推进,煤岩体增透范围逐渐扩大,随着缝槽长度增加,在缝槽中部出现渗透率提升幅度减小的现象。

3) 切割缝槽数量越多,煤层应力降低值和渗透率升高值越大,即增加割缝次数可以提高卸压程度,扩大卸压增透范围。

参考文献:

- [1] 蔡峰,刘泽功,张朝举,等.高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透数值模拟[J].煤炭学报,2007(5):499-503.
- [2] 王凯,李波,魏建平,等.水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):779-784.
- [3] 范超军,李胜,兰天伟,等.不同因素对水力压裂促抽煤层瓦斯的影响[J].中国安全科学学报,2017,27(12):97-102.
- [4] 王兆丰,王林,陈向军.深孔预裂爆破在高瓦斯特厚煤层回采中的应用[J].煤炭科学技术,2008(8):31-33.
- [5] 段康廉,冯增朝,赵阳升,等.低渗透煤层钻孔与水力割缝瓦斯排放的实验研究[J].煤炭学报,2002(1):50-53.
- [6] 贺超.基于二氧化碳深孔致裂增透技术的低透煤层瓦斯治理[J].煤炭科学技术,2017,45(6):67-72.
- [7] 石必明,俞启香,周世宁.保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J].中国矿业大学学报,2004(3):25-29.
- [8] 程远平,俞启香,袁亮.上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽采技术[J].辽宁工程技术大学学报,2003,22(4):483-486.
- [9] 林柏泉,周世宁.煤巷卸压槽及其防突作用机理的初步研究[J].岩土工程学报,1995(3):32-38.
- [10] 林柏泉,杨威,吴海进,等.影响割缝钻孔卸压效果因素的数值分析[J].中国矿业大学学报,2010,39(2):153-157.
- [11] 刘厅,林柏泉,邹全乐,等.杨柳煤矿割缝预抽后煤体孔隙结构变化特征[J].天然气地球科学,2015,26(10):1999-2008.
- [12] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001(5):455-458.