

煤层水力致裂对采场围岩应力扰动的影响

付军辉¹, 黄炳香², 林府进¹, 武文宾¹

(1. 中煤科工集团 重庆研究院, 重庆 400037; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:采用分析岩石损伤破裂过程的 RFPA^{2D}-Flow 数值计算软件, 研究了大阳煤矿 3401 综放面煤壁前方煤层水力致裂对采场矿压的应力扰动过程。结果表明:随着水压力的增大, 围岩应力会不断经历集中、转移、再集中的过程, 受水力致裂的影响顶板压力释放, 高应力值不再出现, 低应力值出现得较为密集, 弱化了顶板(煤), 围岩被湿润弱化, 湿润弱化范围逐渐向四周扩展。现场试验验证了煤层水力致裂对卸除覆岩高应力、弱化坚硬顶板和提高放顶煤采出率的积极作用。

关键词:煤层水力致裂; 采场矿压; 应力扰动; 弱化顶板

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)03-0059-07

Effect of Hydraulic Fracturing of Coal Seam on the Stress Disturbances in Surrounding Rocks of Working Face

FU Junhui¹, HUANG Bingxiang², LIN Fujin¹, WU Wenbin¹

(1. Chongqing Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Chongqing 400037, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of

Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The stress disturbing processes of face rock pressures, which were induced in coal seam by hydraulic fracturing at the front of fully mechanized sublevel caving face 3401 in Daiyang Coalmine, were studied by means of the numerical simulation software RFPA2D-Flow. The results showed that with the increase of water pressure, the stress in surrounding rock experienced continuously the processes of the concentration, transfer and re-concentration; the roof pressure was released by the effect of hydraulic fracturing of coal seam; there was no occurrence of the high stress, but low stress appeared more often; the roof (or coal) was wetted and weakened and the range of roof weakening gradually expanded to all around. The test of face practice verified that the hydraulic fracturing of coal seams played a positive role in removing high overburden stress, weakening the strong roof and raising the recovery rate of caved top coal.

Key words: hydraulic fracturing of coal seam; rock pressure in working face; stress disturbance; roof weakening

煤层水力致裂原理是利用钻孔水压力的作用, 改变孔边煤层的应力状态, 导致孔边起裂和裂缝扩展, 进而利用裂隙水压力, 控制水压裂缝的扩展, 弱化煤层的整体力学特性; 同时改善煤层的渗透性能, 使煤层充分吸水湿润, 进一步软化煤层^[1]。

在放顶煤开采过程中, 若煤层为坚硬煤层或者放顶煤工作面上覆岩层的矿山压力比较缓和, 矿山压力不能及时地实现顶煤体充分的预破碎, 难以达到合适的破碎块度, 顶煤体不能在支架上方及时冒落并顺利从支架后部放顶煤窗口放出, 顶煤放出率就会偏低^[2-3]。研究^[4]表明: 顶板岩层结构, 特别是煤层上方坚硬的厚层

收稿日期: 2011-11-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB201203); 国家科技重大专项(2011ZX05041-003); 国家自然科学基金项目(50904034)

作者简介: 付军辉(1987—), 男, 江西南丰人, 工程师, 主要从事采矿工程方面的研究. E-mail: fuphy@163.com

砂岩顶板是影响冲击矿压发生的主要因素之一。为解决上述问题,有些矿区采用了煤层水力致裂技术以弱化顶煤(板),取得了一定效果,但对在矿山压力和动态孔隙压力的共同作用下,煤层水力致裂对采场围岩的影响鲜有研究。掌握煤层水力致裂对顶板破断失稳的影响规律,避免现场施工的盲目性,对控制坚硬顶板、预防冲击矿压和优化放顶煤技术都具有重要的工程实践意义。

1 煤岩体的物理力学性质

1.1 物理性质

研究选用的6块实验煤样取自晋城兰花集团大阳煤矿3#煤层,其中2块圆截自然煤样,1块天然煤样,3块烘干天然煤样。将煤样分别放至装有水的量筒中,用天平称其总质量,然后用预先系好的细绳提起煤样称水与量筒的质量,总质量减去水与量筒的质量,再减去干煤样的质量,就得到煤样的吸水量。为研究吸水量与时间的关系,先将煤样在水中浸泡1 min,将煤样提起,待不再滴水,称水与量筒的质量;然后浸泡2 min,同样提起煤样,待不滴水,称水与量筒的质量。然后将煤样分别浸泡3,5,7,11,15,20,30 min,之后间隔时间为前面浸泡时间的1.5倍,即45 min,67.5 min,……,一直到48 h,最后至96 h后浸泡称量一次,每次达到浸泡设定的时间后提起煤样,待煤样不再滴水,再称水与量筒质量,如此便可得煤样吸水量与时间的关系。根据实验标准认为吸水时间达48 h后,该煤样为饱水煤样。

图1为自然煤样(加工成圆柱体)、天然煤样(未进行过任何加工)、烘干煤样吸水率与时间的关系。从图中可以看出,煤样吸水率随煤样吸水时间的延长逐渐升高,煤样吸水速率逐渐减小。图中显示的自然圆截煤样、天然煤样吸水率相对烘干煤样吸水率要小,自然煤样吸水率约为1.8%,烘干煤样吸水率约为5.1%,烘干煤样吸水率大致为自然煤样吸水率的3倍。

吸水量(湿度)增加使膨胀煤岩体的水化膜增厚和分子之间的结合力降低,从而引起体积和物性变化。主要表现为膨胀岩全浸水作用,湿度的变化引起煤岩体体积膨胀和物性软化(煤岩体弱化),进而引起应力场和位移场的变化。

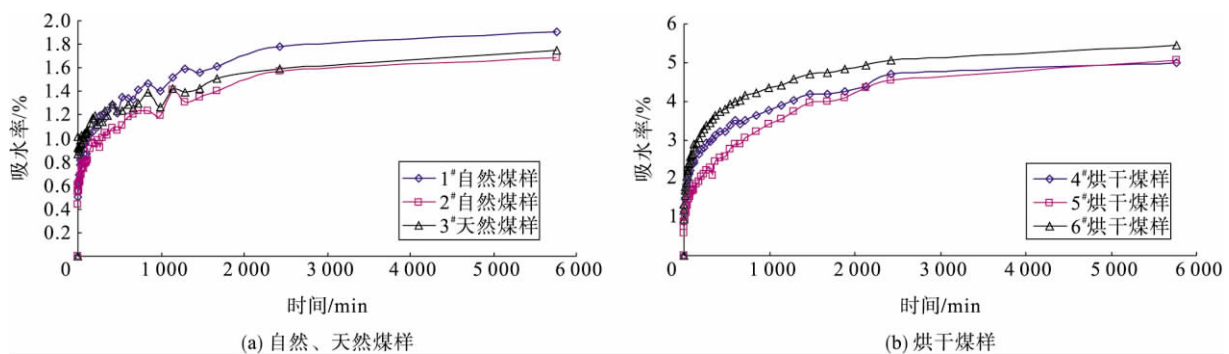


图1 煤样吸水率与时间的关系图

Fig. 1 The relationship between water absorption rate of coal sample and time

1.2 力学性质

晋城大阳煤矿3#煤层的力学参数测试结果如表1和表2所示。与一般岩石材料相比,煤是一种高泊松比、低弹性模量的岩石,压拉比大(达12.015)。根据吸水量实验所得的饱水煤样进行的抗拉实验看出,煤体饱水后抗压强度降低,抗拉强度有所增大(增大11.72%)。

表1 自然煤样抗压强度表

Tab. 1 The compressive strengths of natural coal samples

煤样编号	1#	2#	3#	平均
抗压强度/MPa	17.32	8.91	12.20	12.82
弹性模量/GPa	1.96	1.28	1.63	1.62

表2 自然与饱水煤样的抗拉强度表

Tab. 2 The tensile strengths of natural and water-saturated coal samples

煤样编号	1#	2#	3#	平均
自然煤样抗拉强度/MPa	1.163	1.082	0.953	1.067
饱水煤样抗拉强度/MPa	1.250	1.179	1.146	1.192

由于煤层水力致裂起裂、扩展及失稳的过程主要是克服煤体的抗拉强度^[5],而声发射是研究脆性材料失稳破裂演化过程的有效手段,因此对晋城大阳煤矿 3# 煤层煤样进行了声发射试验,以便更好地分析煤层水力致裂引起的应力分布特征及煤体破坏特征。如图 2 所示,声发射事件伴随整个劈裂过程,在不同的加载阶段有不同的声发射特征:在压密阶段,表现为煤块内部微裂纹压密闭合,刚开始受载时煤块声发射能量率有小幅度的提高,压密阶段后期声发射能量率较低,进入弹性阶段时声发射能量率短暂的升高,弹性阶段前期声发射能量率不明显,弹性阶段后期声发射能量率和频数呈现从高至低的变化趋势,当煤试样加载至强度峰值的 85% 时进入塑性阶段,该阶段声发射能量率和频数有较大的波动,为加载导致的煤块割理相互错动产生的;自然煤样破坏前,声发射事件会回落,许多学者称此时为“平静”期^[6],预示着煤块即将破坏。破坏时,自然煤块与煤块声发射能量率和频数急剧上升,达到整个加载过程的峰值,随后应力降为 0,声发射事件也急速下降,煤块完全裂开。

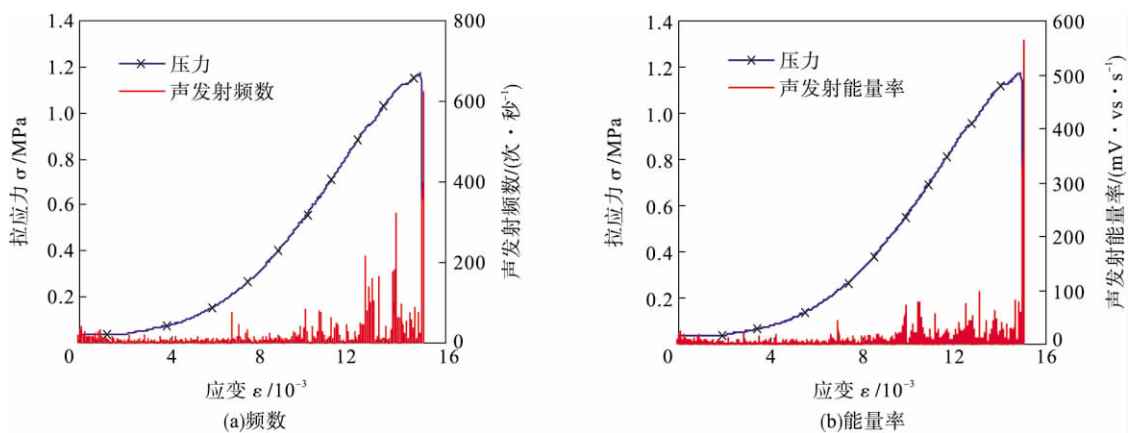


图 2 巴西劈裂声发射特征图

Fig. 2 The stress-strain and AE characteristics of the coal under Brazilian test

通过大量的煤层气抽采与井下水力致裂实验,认识到煤层与石油储层有很大的差异。煤岩层的特点是:煤层的天然裂缝发育,气水共存,瓦斯处于动态的吸附与解析平衡;会含有夹矸,为多层组合,结构复杂;弹性模量低、泊松比高、压缩系数高,气层易损害。相对而言,一般岩层的弹性模量高、泊松比低,岩层单一,结构简单。煤岩体与围岩物理力学性质差异大,易受井下采动影响。

2 数值模拟

2.1 模拟软件

由于采动覆岩介质的非均匀性和分层性,同时还要分析其失稳变形—破裂—垮落的全过程,尤其需要分析煤层水力致裂引起采场围岩应力的扰动,一般的数值模拟软件很难较好地实现这些要求。因此,采用一种能分析岩石介质破裂过程的 RFPA^{2D}-Flow 软件系统,较全面地分析煤层水力致裂对采场围岩的影响。

岩石损伤破裂过程渗流-应力耦合分析系统(RFPA^{2D}-Flow)是由东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发研制的非连续体变形与破裂渗流耦合分析软件,能够对裂纹的萌生、扩展过程中渗透率演化规律及其渗流-应力耦合机制进行模拟分析。在水压致裂、岩石破裂过程渗透性演化规律、矿山底板突水分析中把流-固耦合问题的研究从应力状态分析深入到破坏过程分析之中,拓展了程序的应用领域^[5,7-8]。

RFPA^{2D}-Flow 是基于以下基本假设:①岩石材料介质中的流体遵循 Biot 渗流理论;②岩石介质为带有残余强度的弹脆性材料,其加载和卸载过程的力学行为符合弹性损伤理论;③最大拉伸强度准则和 Mohr-Coulomb 准则作为损伤阈值对单元进行损伤判断;④在弹性状态下,材料的应力-渗透系数关系按负指数方程描述,材料破坏后,渗透系数明显增大;⑤材料细观结构的力学参数,按 Weibull 分布进行赋值,以引入材

料的非均匀性^[9]。

2.2 模拟方案

数值模拟采用 RFPA^{2D}-Flow 岩石破裂渗流过程分析软件,以兰花集团大阳煤矿 3401 综放工作面条件为原型,数值计算时原型条件作了合理的简化,模拟的各岩层的物理力学参数如表 3 所示。

表 3 模型煤岩层的物理力学参数表

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of coal seam and strata in model

岩层	厚度 /m	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	泊松比	容重 /($10^6 \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦角 /($^\circ$)	渗透系数 /($\mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	空隙率 /%	孔隙水压力系数
中砂岩	30	25	50.00	0.25	2.30	27	1	3.00	0.4
细砂岩	20	40	80.00	0.30	2.70	24	1	4.00	0.3
中砂岩	10	25	50.00	0.25	2.30	27	1	3.00	0.4
砂质泥岩	6	10	17.00	0.25	2.10	30	1	3.50	0.5
煤层	6	2	14.32	0.20	1.44	35	2	4.69	0.5
砂质泥岩	28	16	24.00	0.25	1.60	28	1	6.00	0.6

本模型水平方向取 200 m, 竖直方向取 100 m, 采厚为 6 m, 工作面面长为 160 m, 模型左右及下边界采用位移约束, 左右边界 x 方向速度为零, 底边界 x 、 y 方向速度均为零; 上边界施加覆岩为 4.5 MPa 自重载荷, 模型左侧留有 46 m 边界, 右侧留有 84 m 边界, 以便消除边界影响, 建立平面应变模型如图 3 所示。

模拟实际工作面的开挖步骤, 第一步开挖 10 m, 之后每步 5 m, 开挖了 6 步, 自左向右共开挖 35 m。第 7 步在超前煤壁 30 m 处开挖一个水力致裂孔, 然后向孔内注压力水, 以每步 0.5 MPa, 一直加水压至 9.5 MPa。

试验模拟了工作面回采结束后, 在检修期间用乳化液泵对超前煤壁 30 m 处进行本煤层水力致裂的过程。该模拟试验与兰花集团大阳煤矿 3401 工作面回采与致裂顺序一致。

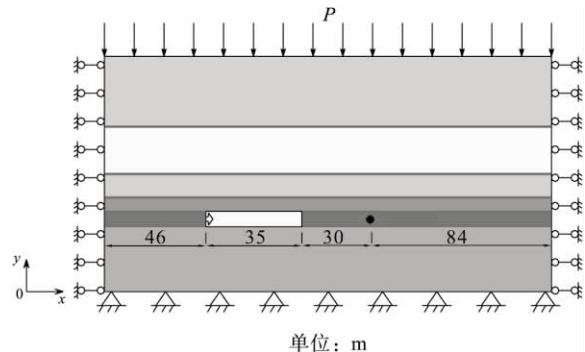


图 3 数值计算模型单位: m

Fig. 3 Model of numerical calculation

3 数值模拟结果

3.1 煤层水力致裂前的应力扰动分析

图 4 分别给出了开挖 10, 20, 30 及 35 m 的竖直应力等值线分布图, 等值线数值的单位为 MPa, 图中矩形代表开挖范围。从图中可以看出, 随开挖步距的加大, 煤层上覆岩支承应力等值线分布呈现为逐渐升高的“马鞍”形态。在开挖的四个尖角处, 应力较集中, 且应力密度也较大。

从图 4(a)中可以看出, 在刚开挖时(10 m), 开挖跨距垂直上方覆岩 30 m 范围内有从 0 到 4.5 MPa 逐渐增大的应力影响, 而在开挖跨距左右有较高的超前支承压力和残余支承压力。由图 4(b)中可以看出, 随开挖步距的增大, 开挖的影响范围逐渐加大, 在开挖跨距垂直上方覆岩影响范围扩大至 50 m, 开挖段底板应力影响范围也在不断扩大, 并且在开挖跨距的前后两上端尖角处产生了强烈的应力集中, 结合图 4(a)可知, 超前煤壁支承压力的峰值达 8 MPa, 峰值点大致在煤壁前方 2~5 m 的位置, 峰值之外应力有略微的降低, 超前煤壁的动压影响范围大致为 65 m。如图 4(c)所示, 当开挖步距扩大至 30 m 时, 动压影响范围进一步扩大, 超前煤壁支承压力的峰值升为 9.35 MPa。随开挖步距的继续加大, 影响深度进一步加大, 覆岩和底板走向(x 轴方向)相应扩大, 但也可以看出底板走向影响范围较覆岩走向影响范围大。

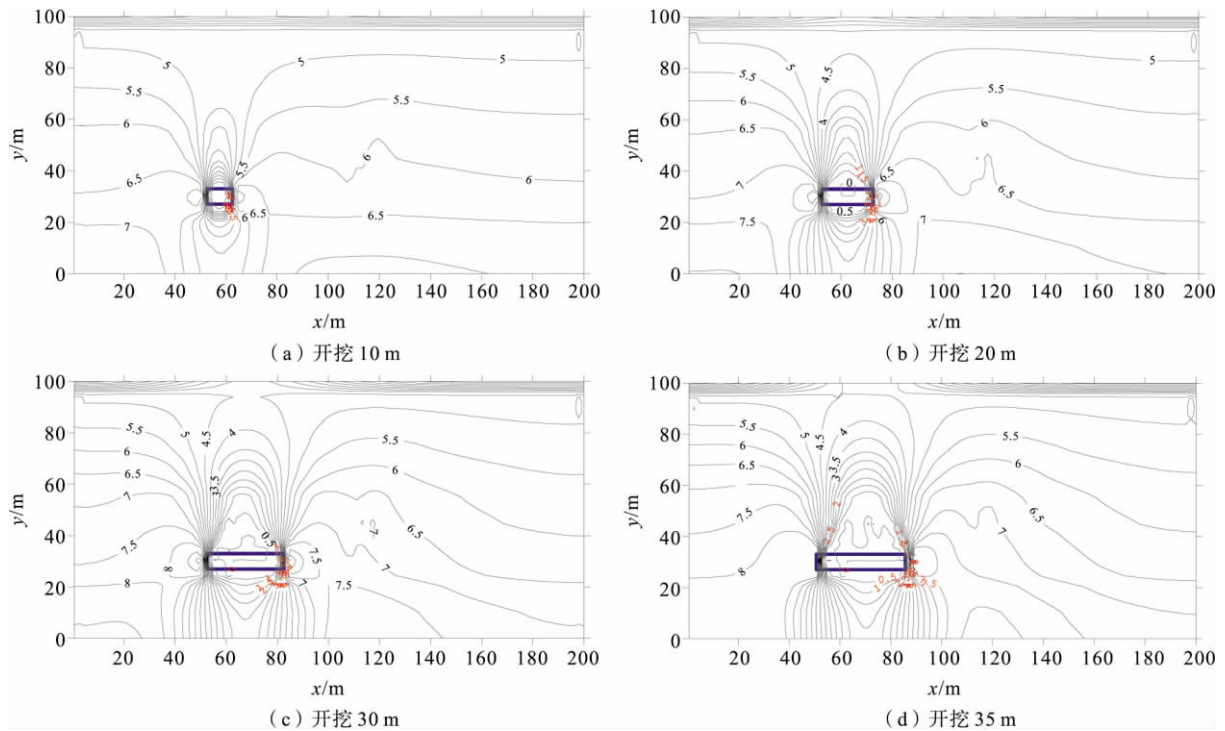


图 4 开挖过程中竖直应力等值线分布图

Fig. 4 The isoline distribution of vertical stress in mining process

3.2 煤层水力致裂后的应力扰动分析

图 5 为水压力的增加对采场围岩的支承应力分布图。如图 5(a) 所示,当加水压至 0.5 MPa 时,水力致裂孔小范围内产生应力集中,水压力的作用还不明显,应力已传递到回采处,但对已开挖段覆岩影响不大。随着水压力的逐渐增大,水力致裂孔小范围内应力集中逐渐加剧,在水力致裂孔较远处应力经历了集中、转移及再集中的过程。当水压力增至 3 MPa 时,在超前煤壁段形似“勺子”状的超前支承压力已完全打乱,而开挖处覆岩“马鞍”形态的支承应力继续向上扩展,此时的覆岩 1 MPa 及 4 MPa 竖直应力等值线与煤层水力致裂前(图 4(d))比较,竖直应力向上多扩展了 7.5 m,在水力致裂孔的垂直上下位置都形成了等值应力圈,在上面产生了 6 MPa 和 5.5 MPa 的等值应力圈,在下面形成了 7.5 MPa 的等值应力圈,在工作面后方支承压力峰值向下移动,并且也形成了 8 MPa 的等值应力圈,如图 5(b) 所示。

当水压力增至 7 MPa 时,直接顶与老顶已经开始垮落(图 6)。从图 5(c) 可以看出,直接顶与老顶垮落后,开挖段四周的应力得以释放,上端部 35 m 范围内应力值较小,说明在水力致裂的影响下岩顶板压力释放,应力集中减弱,起到弱化顶板(煤)的作用,从而防止了冲击矿压。水力致裂孔从 3 MPa 的垂直应力圈变成了 7 MPa 时的水平应力圈。在下部应力集中现象较为显著,水压致裂孔上部又出现一个等值应力圈,此时已看不到工作面后方支承压力及“勺子”状超前煤壁支承压力曲线,底板应力继续向下延伸。

如图 5(d) 所示,当水压力增至 9.5 MPa 时,直接顶和老顶完全垮落,开挖段覆岩没有高应力出现,低应力值出现得较为密集,整体围岩被湿润弱化,湿润弱化范围逐渐向四周扩展,其中超前支承压力影响范围最小(115 m)。

4 工程应用

在兰花集团大阳煤矿 3401 工作面进行了超前煤壁煤层水力致裂试验,大阳煤矿采用综合机械化放顶煤采煤法,工作面面长 160 m,顶板以中砂岩、细砂岩为主,属于较为坚硬的顶板,有冲击矿压的威胁,且放顶效果一直较差,顶煤放出率较低,另外,采煤工作面粉尘非常大。

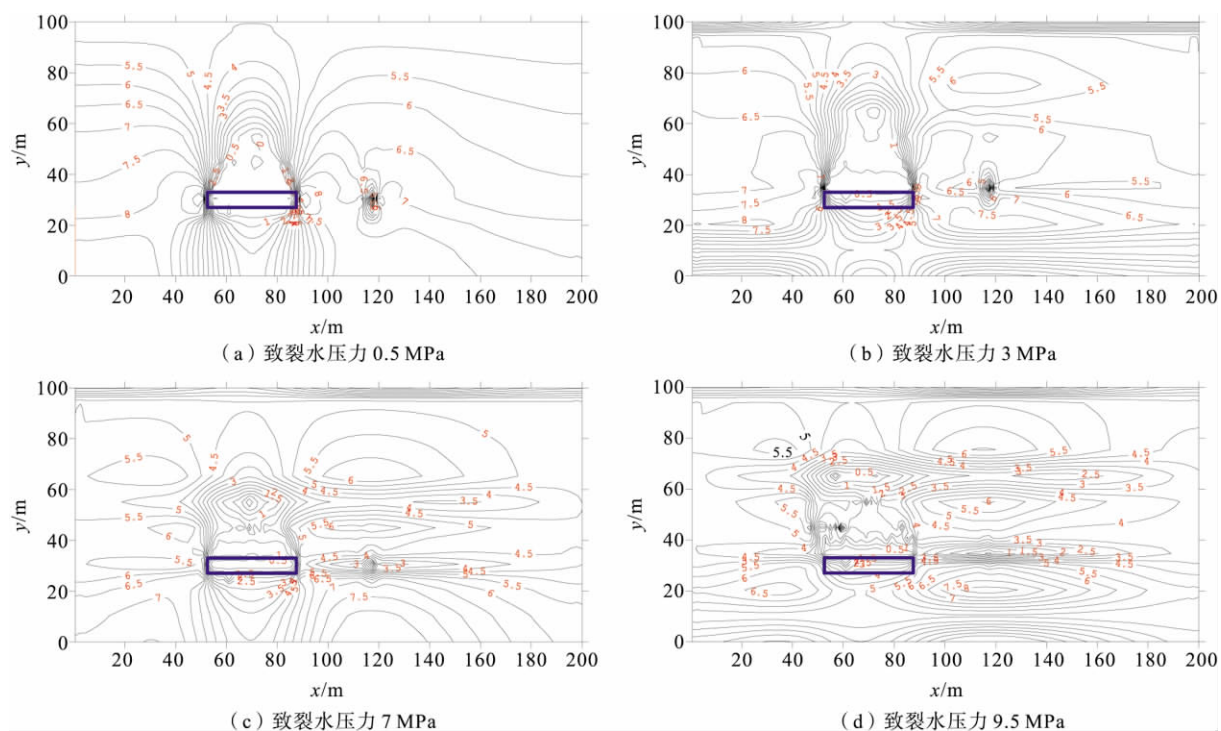


图 5 采场围岩支承应力分布图 (单位:MPa)

Fig. 5 The abutment stress isoline distribution in surrounding rock of working face

在距煤壁 30 m 处回风巷内顺煤层打 $\Phi 75$ mm、长 125 m 的钻孔, 钻孔距底板 1.5 m, 之后每隔 15 m 打同样尺寸的钻孔, 采用矿用备用乳化液泵, 该泵最大压力 31.5 MPa, 煤层水力致裂采用 23~26 MPa 的压力, 注水流量为 1.4~2 m³/h, 煤层水力致裂时间 20 h, 中间有 1 h 采用脉冲致裂。在致裂过程中, 时刻观察巷壁及工作面情况, 巷壁出现渗水或噼啪响声则停止致裂, 采用专用封孔器封孔, 封孔深度为 7 m, 封孔长度为 2 m。

通过 13 个孔的煤层水力致裂试验, 提取在煤层水力致裂过程时的矿压数据进行分析, 支架末

阻力动载系数降低了 6.32%, 时间加权平均阻力动载系数降低了 4.45%。可知, 煤层水力致裂对缓减顶板来压有较为明显的效果, 顶煤放出率略有提高, 粉尘浓度降低了 41%。

分析表明, 通过煤层水力致裂对采场围岩应力的扰动, 弱化了顶板的强度, 有助于降低顶板的来压强度, 有利于顶煤的放出。

5 结论

1) 随煤层水力致裂水压力的增大, 水力致裂孔小范围内应力集中加剧, 围岩应力会不断经历集中、转移、再集中的过程。水力致裂孔周边的竖直应力逐渐下降, 且超前支承压力峰值逐渐降低。

2) 煤层水力致裂对采场围岩应力的扰动是相当复杂的过程, 煤层水力致裂压力达一定程度后覆岩应力的“马鞍”形态不复存在, 岩顶板压力释放, 高应力值不再出现, 低应力值出现的较为密集, 起到弱化顶板(煤)的作用, 围岩被湿润弱化, 且湿润弱化范围逐渐向四周扩展。

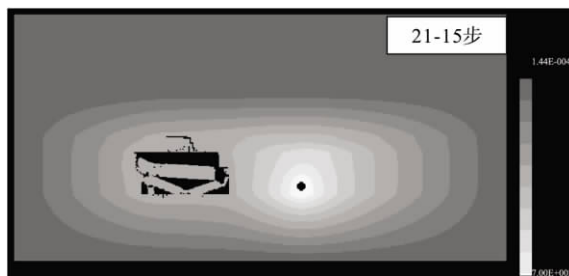


图 6 7 MPa 时煤层水力致裂对顶板破断失稳的影响模拟图

Fig. 6 The simulated picture of effect of hydraulic fracturing of coal seam on roof rupture and instability at 7 MPa

3)通过在大阳煤矿进行的煤层水力致裂试验,验证了煤层水力致裂对采场围岩应力的扰动,有助于降低顶板的来压强度,有利于顶煤的放出。

参考文献:

- [1]黄炳香. 煤岩体水力致裂弱化的理论与应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.
- [2]付军辉. 煤层水力致裂增透和弱化对采场矿压的影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.
- [3]黄炳香,邓广哲,刘长友. 煤岩体水力致裂弱化技术及其进展[J]. 中国工程科学,2007,9(4):83-88.
HUANG Bingxiang,DENG Guangzhe,LIU Changyou. Technology of coal-rock mass hydraulic fracture weakening and its development[J]. Engineering Science,2007,9(4):83-88.
- [4]吴兴荣,窦林名. 坚硬煤岩组合条件下冲击矿压发生机理[J]. 煤炭开采,2006,11(4):70-71.
WU Xingrong,DOU Linming. Occurrence mechanism of impulsion pressure under the compound of hard coal and rock[J]. Coal Mining,2006,11(4):70-71.
- [5]冷雪峰,唐春安,杨天鸿,等. 岩石水力压裂过程的数值模拟分析[J]. 东北大学学报:自然科学版,2002,23(11):1104-1107.
LENG Xuefeng,TANG Chunan,YANG Tianhong,et al. Numerical simulation and analysis on heterogeneous and permeable rocks under hydraulic fracturing[J]. Journal of Northeastern University:Natural Science,2002,23(11):1104-1107.
- [6]尹贤刚,李庶林. 岩石受载破坏前兆特征声发射平静研究[J]. 金属矿山,2008,38(5):124-128.
YIN Xiangang,LI Shulin. Study on acoustic emission quietude:Omen characteristic of failure of compressed rock[J]. Metal Mine,2008,38(5):124-128.
- [7]杨天鸿,唐春安,朱万成,等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):489-493.
YANG Tianhong,Tang Chunan,ZHU Wancheng,et al. Coupling analysis of seepage and stresses in rock failure process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(4):489-493.
- [8]LI Y C. Finite element simulation of hydraulic fracturing in porous media[D]. Indiana:University of Notre Dame,1991.
- [9]杨天鸿,唐春安,徐涛,等. 岩石破裂过程的渗流特性[M]. 北京:科学出版社,2004.

“矿山灾害预防与控制”研究专栏征稿

征稿范围:

- | | |
|-------------|------------------|
| ◇ 矿山岩层控制 | ◇ 煤炭科学开采理论、方法与技术 |
| ◇ 采动岩体力学 | ◇ 安全监测监控与信息化 |
| ◇ 资源规划与绿色开采 | ◇ 井下充填开采 |
| ◇ 矿井瓦斯与火灾治理 | ◇ 现代化矿井生产技术 |
| ◇ 矿山震动与冲击地压 | ◇ 瓦斯的抽采与利用 |

欢迎相关领域专家学者和工程技术人员踊跃投稿,来稿请注明“矿山灾害预防与控制”专栏。稿件通过专家评审后优先发表,并实行优稿优酬。

投稿平台:http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱:zkchem@sdust.edu.cn; sdustzkb@163.com

联系电话:0532-86057859

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部