

文章编号:0253-9993(2011)12-2058-06

高压水射流割缝及其对煤体透气性的影响

沈春明^{1,2},林柏泉^{1,2},吴海进^{1,2}

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221008;2. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221008)

摘 要:基于高压水射流割缝卸压增透技术,对割缝后瓦斯抽采和煤体透气性的变化进行了研究;分析了地应力和瓦斯压力对煤体透气性的影响;根据现场实际割缝工艺建立模型,采用FLAC软件模拟计算了割缝煤体卸压影响范围的变化特性;采用相似物理模拟实验的方法建立相似模型,测定煤体在割缝卸压变化过程中透气性的变化规律;并进行了现场试验验证与应用。研究表明:高压水射流割缝后煤体周围会产生卸压,煤体透气性随割缝卸压影响而增大;现场试验结果显示,割缝后煤体透气性增大至原来的113倍,抽采有效影响半径扩大1倍。

关键词:高压水射流;割缝;透气性;卸压

中图分类号:TD712.62 **文献标志码:**A

High-pressure water jet slotting and influence on permeability of coal seams

SHEN Chun-ming^{1,2}, LIN Bai-quan^{1,2}, Wu Hai-jin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221008, China; 2. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on pressure relief and permeability increase technology used by high-pressure water jet slotting, researched the changes of slotted coal seam permeability. Analyzed the effect of stress and pressure on gas permeability of coal. According to the actual slotted process to set model, using FLAC simulation software, simulated the change characteristics of the relief effect scope of slotted coal. Adopted a similar method of physical modeling experiments and established similar model to measure permeability variation when the process of slotted coal seam pressure relief changes; and conducted field trials. The results show that the pressure relief around coal after slotting, coal permeability increases with the impact of pressure relief after slotting. Field test results show that after slotting, coal seam permeability increases to 113 times of the original, effective influence on extraction expands to 2 times of the original radius.

Key words: high-pressure water jet; slotted; permeability; relief

在不具备保护层开采条件下,高瓦斯低透气性煤层的瓦斯预抽是矿井瓦斯治理的难点,主要表现在抽采效率低,措施工程量大。随着矿井开采深度的进一步增加,开采条件和自然环境也在发生巨大的变化,瓦斯预抽效果差越显突出,严重影响矿井的安全和生产接替^[1-5]。利用高压水射流进行钻孔内切割缝槽,可以破除钻孔周围瓶颈效应^[6],卸除煤体应力,降低煤体瓦斯内能,扩大钻孔周围煤体裂隙网,有效提高煤体的透气性,对于提高低透气性煤层的采前预抽效

果十分显著。因此,研究高压水射流割缝及其对煤体透气性变化的影响具有重要的理论价值和现实意义。

1 煤体透气性的影响因素

煤体透气性是衡量瓦斯在煤层中流动难易程度的重要指标,直接影响煤层瓦斯的抽采效果^[7-8]。煤体透气性的影响因素较复杂,除煤体本身结构因素外,还与地应力、吸附性、瓦斯压力等有关,其中煤体地应力和瓦斯压力对透气性影响显著^[9]。

收稿日期:2011-08-17 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201205);国家自然科学基金资助项目(51074161);煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLCRSM08X03)

作者简介:沈春明(1985—),男,江苏徐州人,博士研究生。Tel:0516-83884401, E-mail:scmcumt@163.com

1.1 地应力对煤体透气性的影响

实验表明:在瓦斯压力不变时,随着地应力 σ 的增加,渗透率 K 开始下降很快,当地应力增大到一定值时, K 值下降变缓;而在卸载过程中,煤样的渗透率 K 并不是随地应力 σ 的降低而逐渐增加,当地应力下降至某一定值后,渗透率 K 骤然增加(图 1)。因此,地应力是煤体透气性的关键影响因素,进行煤层卸压是提高瓦斯抽采效率的有效措施^[9-10]。

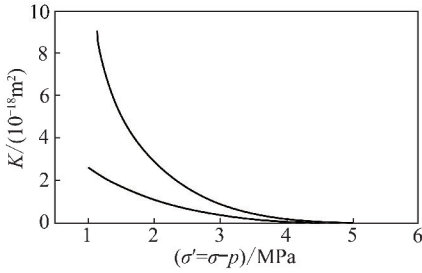


图 1 加卸载时渗透率与有效应力的关系曲线

Fig. 1 The relationship of permeability and effective stress while loading and unloading

1.2 瓦斯压力对煤体透气性的影响

实验表明:在地应力 σ 不变的条件下,随着瓦斯

压力的增大,煤体透气性逐渐降低,除克林伯格效应影响外,瓦斯压力的增大降低了煤体的渗透容积,导致透气性降低^[9-10]。因此,降低煤体瓦斯内能可以有效地提高煤体的透气性。

目前,我国煤矿现场实测煤层透气性广泛应用中国矿业大学的测定方法,该方法是在煤层瓦斯向钻孔的流动状态为径向不稳定流动之基础上建立的,其计算公式与测定方法^[9]见表 1。

2 煤体割缝透气性变化模拟实验

2.1 割缝煤体区域卸压影响

煤层卸压是增大煤层透气性和提高瓦斯抽采效率的有效措施,高压水射流割缝能够对煤体造成卸压,其最佳效果是通过割缝卸压效果的叠加或相互影响,形成区域式整体卸压,从而提高整体范围内煤体的透气性^[11]。为研究卸压影响效果,运用 FLAC 软件建立模型,以现场应用技术工艺为指导,设计建立排距和列距均 5 m,钻孔数每排 5 个、共 3 排的进行模拟,模拟计算结果如图 2、3 所示。

表 1 实测煤层透气性系数公式

Table 1 The formulas of measured coal seam's gas permeability coefficient

流量准数 Y	时间准数 $F_0 = B\lambda$	系数 a	指数 b	煤层透气性系数 λ	常数 A	常数 B
$Y = \alpha F_0^b = \frac{A}{\lambda}$	$10^{-2} \sim 1$	1	-0.38	$\lambda = A^{1.161} B^{\frac{1}{1.64}}$	$A = \frac{qr_1}{p_0^2 - p_1^2}$	$B = \frac{4tp_0^{1.5}}{\alpha r_1^2}$
	$1 \sim 10$	1	-0.28	$\lambda = A^{1.39} B^{\frac{1}{2.56}}$		
	$10 \sim 10^2$	0.93	-0.20	$\lambda = 1.1A^{1.25} B^{\frac{1}{4}}$		
	$10^2 \sim 10^3$	0.588 8	-0.12	$\lambda = 1.83A^{1.14} B^{\frac{1}{7.3}}$		
	$10^3 \sim 10^5$	0.512	-0.10	$\lambda = 2.1A^{1.11} B^{\frac{1}{9}}$		
	$10^5 \sim 10^7$	0.344	-0.065	$\lambda = 3.14A^{1.07} B^{\frac{1}{14.4}}$		

注: p_0 为煤层原始绝对压力,MPa; p_1 为钻孔排瓦斯时的瓦斯压力,一般为 0.1 MPa; r_1 为钻孔半径,m; λ 为煤层透气性系数, $m^2/(MPa^2 \cdot d)$; q 为在排放瓦斯为 t 时钻孔煤壁单位面积的瓦斯流量, $m^3/(m^2 \cdot d)$ 。

对图 2、3 的模拟结果分析可知,割缝后可在煤体内不同方向上产生卸压,缝槽上部煤体卸压效果较显著,缝槽间卸压影响相互叠加扩展,形成区域整体卸压。通过不同间距缝槽模型模拟对比可知,卸压程度和范围与缝槽参数和设计间距有关。实际现场应用中,由于煤体内部瓦斯流动场和应力场的作用,煤体割缝形成缝槽的同时其周围煤体会发生运移变形,扩大了裂隙发育,促使周围煤体卸压范围和程度增强,更有利于煤体透气性的提高。

2.2 割缝煤体透气性变化相似实验

煤样试件在空气中的渗透率测试可按式(1)计算^[12],即

$$K = 10 \frac{2pQH\mu}{(2p\Delta p + \Delta p^2)A} \quad (1)$$

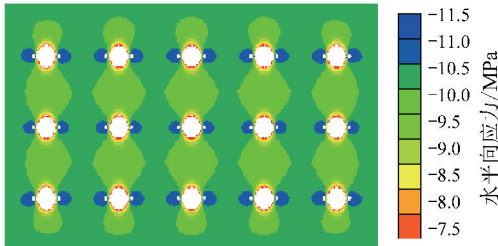
式中, K 为渗透率, cm^2 ; p 为出口端气体压力(大气压),Pa; Q 为渗流量, mL/s ; H 为试件高度, mm ; μ 为空气动力黏度, $Pa \cdot s$; Δp 为渗透压力,Pa; A 为试件横截面积, mm^2 。

根据渗透率与透气性系数之间的关系,即可求出煤岩的透气性系数,即

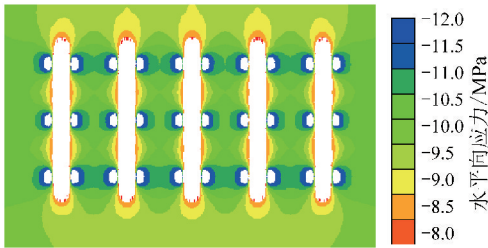
$$\lambda = \frac{K}{2\mu p_0} \quad (2)$$

煤样渗透性变化规律相似模型实验考察系统如图 4 所示,主要由压缩空气钢瓶、压力表、流量计、高

压胶管、阀门以及透气性测试球等组成。



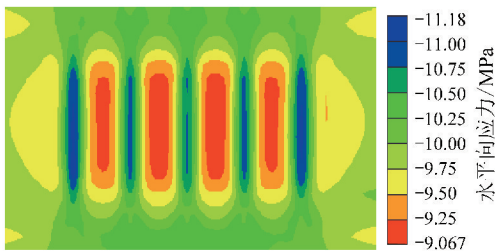
(a) 平行缝槽水平向应力分布



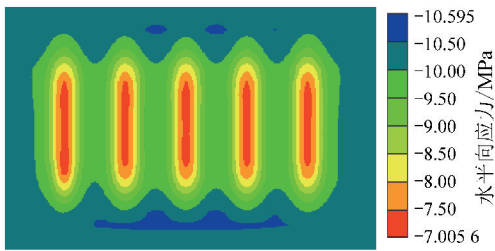
(b) 垂直缝槽水平向应力分布

图 2 缝槽截面应力分布

Fig. 2 The stress scattergram of the slot section



(a) 平行缝槽水平向应力分布



(b) 垂直缝槽水平向应力分布

图 3 中间位置切面应力分布

Fig. 3 The stress scattergram of profiles in the middle

装置测定原理和方法:测试球表面分布有一定数量的小孔,形成测试球的出气端,采用外径为 10 mm

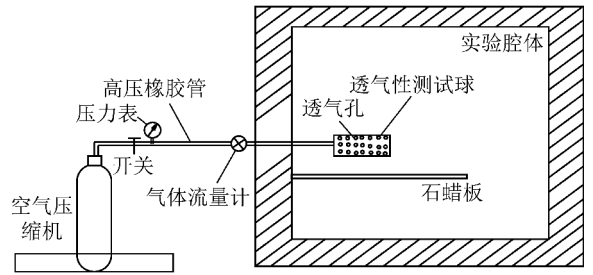


图 4 煤层透气性变化规律测试示意

Fig. 4 The test diagram of the changing discipline of the permeability of coal seam

的高压橡胶管将测试球的进气孔与压缩空气钢瓶相连接,通过调节减压阀,可向测试球提供一定流量与压力的空气,通过气体流量的变化即可计算出试样位置透气性变化规律。根据布置方案将透气性测试球安装在预定位置,系统加载完成后,打开阀门,记录初始时刻的气体流量;在缝槽形成过程中,试样应力的动态卸压导致煤体的透气性发生变化,通过测定不同时刻气体流量即可得到设计位置的透气性的变化,进而研究煤层割缝导致裂隙场动态变化条件下的透气性变化规律。

实验中,保持在相同的气体压差条件下,通过埋设在煤体中的 6 个透气性测试球,测出煤体内部的气体流量,分析在不同规格缝槽形成时煤体透气性的变化。6 个测试气体装置分别埋设在两组石蜡板上方,在 6 个时刻进行测试,模拟割缝前(0 时刻),熔化 1 号板 I 区域(1 时刻),熔化 1 号板 II 区域(2 时刻),熔化 1 号板 III 区域(3 时刻),熔化 2 号板(4 时刻),熔化 3 号板(5 时刻),测定结果见表 2,流量变化曲线如图 5 所示。

根据式(1)可知,在其它各影响因素不变的条件下,气体流量的变化趋势即是煤体透气性变化的趋势。由图 5 可知模拟割缝产生煤体卸压对其上部煤体透气性的影响变化规律。

在 0 时刻,即煤体尚未开挖,测定的气体流量是煤层未被破坏的气体流量;在 1 时刻,煤体内部形成

表 2 不同时刻流量参数

Table 2 The flow rate parameters at different time

位置时刻	(0,10)	(0,25)	(0,35)	(15,10)	(10,40)	(0,50)	(25,15)	(30,20)
0	180	180	185	180	190	190	170	170
1	450	200	185	180	190	190	170	170
2	540	370	180	160	200	200	180	180
3	580	410	220	350	210	190	170	180
4	580	420	330	390	250	210	190	170
5	570	420	360	400	250	210	190	180

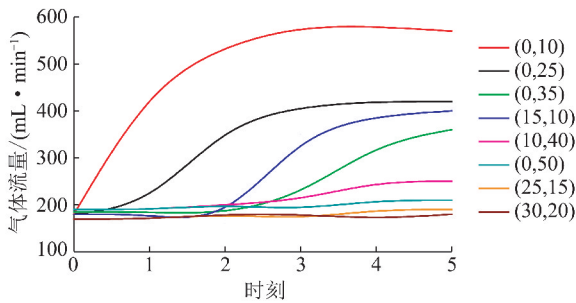


图 5 不同时刻流量变化曲线

Fig. 5 The changing flow rate at different time

宽 1 m、高 3 cm 的扁平缝槽,煤体内部应力分布发生变化,测点(0,10)处于卸压区域内,该测点透气性增加较大,是原始煤层透气性的 2.5 倍,其它测点在卸压区域外部,透气性基本不变;2 时刻,煤体内部形成宽 2 m、高 3 cm 的扁平缝槽,煤体内部卸压区进一步扩大,测点(0,25)也进入卸压区,透气性增大,是原煤层的 2.1 倍,测点(0,10)透气性进一步增大,变为原煤层透气性的 3 倍,测点(15,10)所在区域处于应力重新分布后的应力集中区,造成了该区域煤层透气性的降低,其他较远的测点透气性变化较小;3 时刻,第 1 块石蜡板完全熔化,煤体内部形成宽 3 m、高 3 cm 的扁平缝槽,原卸压区内各点进一步卸压,测点(0,10)、(0,25)所处区域均有小幅增加,同时卸压区扩大,测点(15,10)所在区域由应力集中区变成卸压增透区域,透气性迅速增大,为原煤层透气性的 1.94 倍,测点(0,35)轻微受煤层开挖的影响,变化不大,其中测点(0,10)已充分卸压;4 时刻,第 2 块石蜡板熔化以后,缝槽宽 3 m、高 6 cm,测点(0,10)透气性不变,达到了最佳的卸压增透效果,测点(0,25)、(15,10)进一步卸压,测点(0,35)处在卸压区内,透气性变化较大,变为原煤层的 1.78 倍。最后一块石蜡板熔化后,煤体内部形成宽 3 m、高 9 cm 的缝槽,此时(0,10)处区域透气性有所变化,由于煤体的重新压实,其透气性略有降低,测点(15,10)、(0,25)、(0,35)卸压已经趋于稳定,透气性略有增大,其余各测点透气性基本不受缝槽影响。

从模拟实验可知,随着缝槽的形成和扩展,卸压影响逐渐增强,受影响煤体的透气性逐渐增大,缝槽完成后煤体透气性达到最大,由于煤体次应力的再次作用,受影响煤体透气性达到最大后会略微降低。由于实验条件的限制,实验采用模拟间接测定法,测定气体流量反算煤体的透气性系数,定性演化了煤体割缝过程中透气性的变化规律,反映了割缝可有效提高煤体透气性,且割缝卸压影响越大,透气性变化越明显。

3 现场试验与应用

淮北矿业集团芦岭煤矿是煤与瓦斯突出矿井,主采的煤层 8、9 煤均为突出煤层,各煤层瓦斯含量和压力随着埋藏深度的增加而增大,-400 ~ -590 m 标高范围(二水平)8、9 煤层瓦斯压力为 2.59 ~ 4.43 MPa,煤层瓦斯含量为 18.95 ~ 22.67 m³/t,煤层透气性系数为 0.028 m²/(MPa² · d),瓦斯预抽主要难题是抽采效率低、钻孔施工量大。针对芦岭矿二水平特点,在矿井 II8211 底抽巷设计穿层钻孔进行高压水射流割缝卸压增透技术措施,穿层割缝钻孔设计如图 6 和表 3 所示。

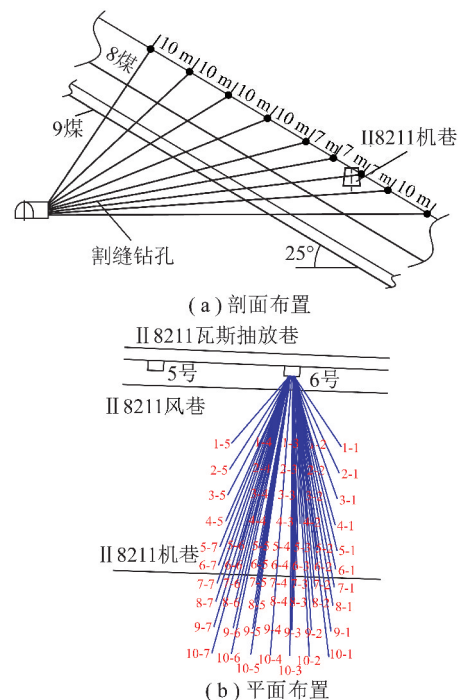


图 6 II8211 底抽巷穿层钻孔布置

Fig. 6 The layout of slotted drillings through beds in bed plate tunnel of II8211

3.1 瓦斯抽采流量和浓度分析

对 II8211 底抽巷 6 号钻场的普通钻孔 6-1、6-7,割缝钻孔 2-2、3-3 的瓦斯抽采纯量变化和抽采浓度变化进行考察,考察时间 42 d,每间隔 1 d 测试 1 次,得到单孔瓦斯抽采纯量和抽采浓度变化(图 7)。由图 7 可知,割缝孔的瓦斯抽采总流量远远大于未割缝孔,割缝孔的稳定瓦斯抽采纯流量可达 96 L/min,未割缝孔的瓦斯稳定抽采流量为 20 L/min,割缝孔抽采流量是未割缝孔的 4.5 倍;割缝孔的瓦斯抽采浓度很稳定,平均可达 85%,未割缝孔的瓦斯抽采浓度变幅较大,随着抽采时间的推延而变小,稳定浓度为 28%,割缝孔抽采浓度是未割缝孔的 3 倍,因此,采用高压水射流割缝可有效提高煤体瓦斯抽采效率。

表 3 部分考察钻孔设计参数

Table 3 The design parameters of a part of the investigated drillings

孔号	开孔距底板/mm	孔距钻场中线/mm	偏角/(°)	仰角/(°)	孔深/m	岩孔深/m	备注
1-3	2 860	0	0	49.5	36.8	15.5	割缝孔
2-2	2 580	300	-11.5	35.4	41.4	18.8	割缝孔
3-3	2 300	0	0	25.6	46.6	20.0	割缝孔
6-1	1 460	900	-11.5	9.7	71.6	36.2	普通孔
6-7	1 460	900	11.9	8.0	68.8	35.4	普通孔

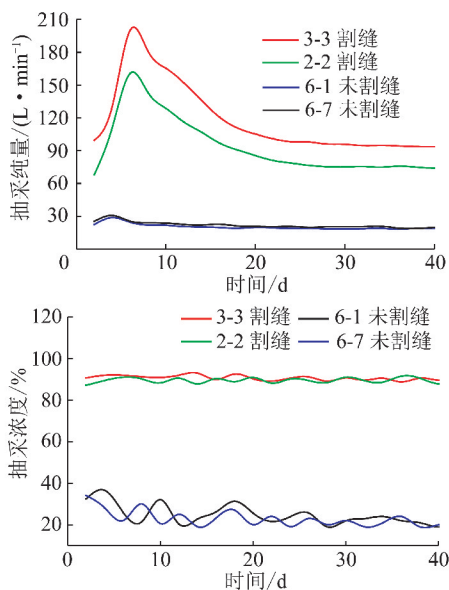


图 7 割缝与未割缝煤体瓦斯抽采变化的对比
Fig. 7 The contrast of gas extraction flow with and without slotted drilling

3.2 瓦斯抽采影响半径分析

本次试验采用观测孔流量影响法测定抽采钻孔的影响半径。如图 8(a) 所示,在待测割缝抽采孔一边按照图示间距施工 4 个观测孔。同时,现场施工 1 个单独的观测孔,不受观测孔等的影响,将 1~4 号及单独观测孔密封并入同一抽采管路,负压抽采并观察瓦斯流量变化,为了避免 5 号孔对 1~4 号孔瓦斯流量的过度影响,5 号孔仅密封不连入抽采管路。在一定的测试周期内,对比 1~4 号钻孔与单独观测孔的瓦斯流量变化,如观测孔的流量比单独观测孔流量提高 10% 以上,则该观测孔处于抽采孔的影响范围内。

图 9(a) 为在 26 d 测试周期内各钻孔的瓦斯流量变化曲线,由图可知,2、3、4 号孔的流量曲线均在红色 10% 标准线上方,即:3 个孔均在 5 号孔的影响范围内;而 1 号孔的流量曲线与红色 10% 标准线相吻合,不在 5 号孔的影响范围内。因此,5 号待测割缝抽采孔的影响半径为 2.5~3.0 m。同理,如图 8(b)、9(b) 所示,普通抽采钻孔的影响半径为 1.0~1.5 m。可知割缝钻孔抽采影响半径是普通钻孔的 2

倍以上,有利于减少钻孔工程量。

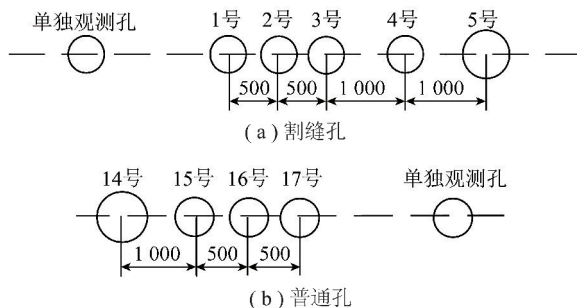


图 8 单孔瓦斯抽采影响半径考察设计示意
Fig. 8 The design of single hole influence radius of gas extraction

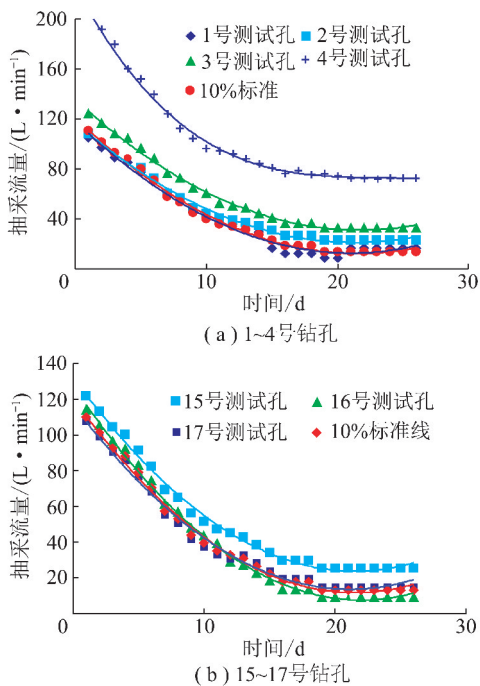


图 9 测试周期内不同测试孔瓦斯抽采流量变化
Fig. 9 The gas flow changes with different test holes in a test cycle

3.3 煤体透气性变化

基于以上煤体割缝瓦斯抽采量数据,根据中国矿业大学透气性系数现场实测法,对割缝后煤体透气性系数进行换算,由于煤体透气性是变化的,由模拟试验可知,通常情况透气性系数先变大后减小,故选取

瓦斯抽采纯量最大值作为瓦斯抽采流量值,瓦斯含量系数 $\alpha = 12 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{1/2})$,煤层厚度 $L = 9 \text{ m}$,钻孔半径 $r_1 = 0.054 \text{ m}$,卸压至测定钻孔瓦斯流量的时间 $t = 50 \text{ d}$,钻孔瓦斯流量 $Q = 288 \text{ m}^3/\text{d}$,卸压后钻孔瓦斯压力 $p_1 = 0.003 \text{ MPa}$,原始煤层瓦斯压力为 4.2 MPa 。

(1) 求 q 。

$$q = \frac{Q}{2\pi r_1 L} = 94.36 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$$

(2) 求 A 和 B 。

$$A = \frac{qr_1}{p_0^2 - p_1^2} = 0.498, B = \frac{4tp_0^{1.5}}{\alpha r_1^2} = 49.196$$

(3) 求 λ 。

选用 $F_0 = 10^5 \sim 10^7$ 范围的公式计算,即

$$\lambda = 3.14A^{1.07}B^{\frac{1}{4}} = 3.17 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$$

经校核, F_0 在 $10^5 \sim 10^7$ 范围内,公式选用合理,计算结果正确。

原始煤层在该水平处的透气性系数为 $0.028 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,采用高压水射流割缝整体卸压后,煤体透气性系数增大到 $3.17 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,是原始的煤体透气性的 113 倍,大大提高了煤体的透气性,增大了煤体的抽采效率。现场试验发现,割缝过程中,高压水射流破坏煤并将其排除孔外的同时,对煤体造成了诱导式喷孔卸压,降低了煤体内部瓦斯压力,有利于煤体透气性的提高。

4 结 论

(1) 高压水射流割缝对其周围煤体各方向产生卸压,缝槽上部煤体卸压效果较显著,缝槽间卸压影响相互叠加,扩大卸压范围,形成区域整体卸压。

(2) 相似模拟实验表明:割缝卸压区内煤体透气性随着卸压的影响而增大,割缝形成后透气性增至最大,是原来煤体透气性的 3 倍,卸压完成后煤体由于受次应力的影响,煤体透气性会略微降低。

(3) 现场试验表明:高压水射流割缝对煤体造成诱导式喷孔卸压,降低煤体内部瓦斯压力;割缝后钻孔瓦斯抽采流量和浓度明显提高,煤体透气性提高至原来的 113 倍,与相似试验的结果一致;割缝钻孔抽采影响半径扩大了 1 倍,大大提高了瓦斯抽采效率,减少了抽采钻孔工程量。

参考文献:

[1] 林柏泉,孟凡伟,张海滨.基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术研究及应用[J].煤炭学报,2011,36(1):75-80.

Lin Baiquan, Meng Fanwei, Zhang Haibin. Regional gas control based on drilling-slotting-extracting integration technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 75-80.

[2] 俞启香,程远平,蒋承林,等.高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采原理及实践[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):127-131.

Yu Qixiang, Cheng Yuanping, Jiang Chenglin, et al. Principles and applications of exploitation of coal and pressure relief gas in thick and high-gas seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 127-131.

[3] 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.

[4] 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,2007,32(5):499-503.

Cai Feng, Liu Zegong, Zhang Chaoju, et al. Numerical simulation of improving permeability by deep-hole presplitting explosion in loose-soft and low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 499-503.

[5] 程远平,俞启香.煤层群与瓦斯安全高效共采体系及应用[J].中国矿业大学学报,2003,32(5):471-475.

Cheng Yuanping, Yu Qixiang. Application of safe and high-efficient exploitation system of coal and gas in coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(5): 471-475.

[6] 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.

Lin Baiquan, Yang Wei, Wu Haijin, et al. A numeric analysis of the effects different factors have on slotted drilling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(2): 153-157.

[7] 杨宁波,李兆丰.钻孔周围煤体中透气性的变化规律研究[J].煤炭技术,2008,27(12):67-69.

Yang Ningbo, Li Zhaofeng. Research on change law of permeability in coal seam around boreholes[J]. Coal Technology, 2008, 27(12): 67-69.

[8] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992:62-97.

[9] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1997:36-39,149-155.

[10] 林柏泉,何学秋.煤体透气性及其对煤和瓦斯突出的影响[J].煤炭科学技术,1991,19(4):50-53.

Lin Baiquan, He Xueqiu. Permeability of coal and its impact on coal and gas outburst[J]. Coal Science and Technology, 1991, 19(4): 50-53.

[11] 张萌博,张海滨,林柏泉,等.穿层钻割一体化卸压增透技术数值模拟分析及应用[J].煤炭工程,2010(10):66-68.

Zhang Mengbo, Zhang Haibin, Lin Baiquan, et al. Analysis and application of numerical simulation on pressure releasing and permeability improvement integrated technology with drilling and slotting through seam[J]. Coal Engineering, 2010(10): 66-68.

[12] 吴海进.高瓦斯低透气性煤层卸压增透理论与技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.