



张兆一. 松软煤层水力压裂有效半径影响范围主控因素分析[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 99-103.
ZHANG Zhaoyi. Analysis of main controlling factors of effective radius of fracture in soft coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(4): 99-103.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2021.04.018

扫码阅读下载

松软煤层水力压裂有效半径影响范围主控因素分析

张兆一^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037;

2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:水力压裂是提高煤层透气性系数的有效途径之一。为了确定松软低透气性煤层压裂水量、压裂时间与其有效半径三者之间的关系,通过数值模拟、现场试验发现:当压裂水量为固定值时,有效半径随着压裂时间的增加而稳定增大,二者呈非线性正比例关系;当压裂时间为固定值时,有效半径随着压裂水量的增加呈非线性增大,二者正相关。通过回归分析建立了压裂水量、压裂时间与有效半径的数学关系,得到新景矿3号煤层水力压裂水量与有效半径的拟合关系式,采用试验区域的煤层含水率、瓦斯含量参数进行了考察验证;当压裂水量为 73.79 m^3 时,水力压裂有效半径为51 m左右,压裂时间相对最优。

关键词:松软低透气性煤层;水力压裂;压裂水量;压裂时间;有效半径

中图分类号:TD712⁺.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-4495(2021)04-0099-05

Analysis of main controlling factors of effective radius of fracture in soft coal seam

ZHANG Zhaoyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: Hydraulic fracturing is one of the effective ways to improve coal seam permeability coefficient, in order to determine the relationship among fracturing water volume, fracturing time and effective radius of soft and low permeability coal seam. Through numerical simulation and field test, it is found that when the fracturing water volume is a fixed value, the effective radius increases steadily with the increase of fracturing time, the direct proportion relationship between the two is nonlinear; when the fracturing time is fixed, the effective radius increases non-linearly with the increase of fracturing water volume, and the two are positively correlated. The mathematical relationship between fracturing water volume, fracturing time and effective radius is established through regression analysis. The fitting relationship between hydraulic fracturing water volume and effective radius of No. 3 coal seam in Xinjing Coal Mine is obtained, the parameters of coal seam water content and gas content in the test area are investigated and verified; when the fracturing water volume is 73.79 m^3 , the effective radius of hydraulic fracturing is about 51 m, and the fracturing time is relatively optimal.

Keywords: soft and low permeability coal seam; hydraulic fracturing; fracturing water volume; fracturing time; effective radius

突出矿井的消突工作是目前各大生产矿井急需

解决的难题之一。随着近年来水力压裂增透技术的应用,在一定程度上缩短了抽采时间、提高了抽采效率,进而提高了掘进生产速度^[1-4]。但在实际压裂过程中不同压力、不同注水量与水力压裂有效半径之间的关系存在诸多差异。

水力压裂的基本原理是利用超高压或高压压裂泵组将压裂液注入煤岩体内,当注入的外界压力超

收稿日期:2020-08-09;2021-02-02 修订

基金项目:山西省重大专项课题(20201101001)

作者简介:张兆一(1991—),男,山东枣庄人,硕士研究生,工程师,主要从事防治煤与瓦斯突出、矿山压力方面的研究工作。E-mail:281817122@qq.com。

过煤岩体自身的耐压强度与地应力时,会在压裂孔附近开始产生裂隙。虽然目前井下各种水力压裂设备与配套工艺相对成熟,但在不同的地质条件下,对于水力压裂效果完全不同,主要因其不同地质条件下压裂基本参数的考察不够精准,尤其在松软低透气性煤层中的压裂往往达不到预期的效果,或因松软低透气性煤层中压裂时间、压裂水量与有效半径关系的不确定性,导致压裂效率低、压裂效果差。在进行松软低透气性煤层的水力压裂工程实践过程中,压裂泵组的注水压力、压裂时间、压裂水量是较为关键的参数,注水压力、压裂水量不能无限地增大,压裂时间不能无限地延长。

因此,在松软低透气性煤层水力压裂的施工中,在保证安全高效的前提下,合理地确定压裂时间、压裂水量与有效半径之间的关系是松软低透气性煤层水力压裂增透急需解决的问题之一。通过数值模拟分析压裂时间、压裂水量与有效半径的关系,结合现场工程实践应用,最终确定出三者之间的关系。对于提高松软低透气性煤层压裂效率,节省压裂时间,以及压裂技术在相同条件下的煤矿中应用具有较强的指导作用。

笔者以工程实践为基础,运用颗粒离散元程序模拟各流量下水力压裂有效半径与压裂水量、压裂时间的关系^[5],结合现场试验注水压力在17~33 MPa内,考察在一定注水压力条件下松软低透气性煤层的水力压裂水量、压裂时间与有效半径之间的相对关系,进而优化压裂时间、提高压裂效率。

1 松软煤层水力压裂增透机理分析

松软煤层水力压裂增透的基本原理是通过高压泵组将压裂液(高压水或加入其他介质的液体)注入煤岩体内,伴随压力持续增大,当超过地应力和煤体自身强度时压裂孔处便由近及远地产生裂缝,同时在煤体中原有裂隙的基础上进一步进行扩展和延伸,使煤层中大量的裂缝相互贯通,增加了煤层中瓦斯运移的微观通道;促使吸附状态的瓦斯向游离状态转化,进而提高压裂煤层的透气性。与此同时,高压水渗透到煤体的微观孔隙之中,因煤体对水分的吸附能力高于对瓦斯的吸附能力,煤体在水分的包围下,吸附在煤体孔隙中的游离瓦斯因吸附能力较弱而会被水分排挤到大量的裂隙之中;在抽采钻孔的负压作用下,大量的游离瓦斯通过贯通的裂隙,运移至瓦斯抽采孔中,提升了抽采管中瓦斯浓度,进而

提高瓦斯的抽采效率。

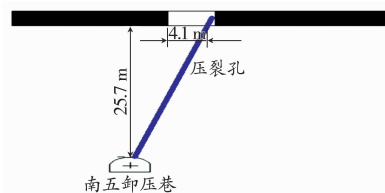
对煤层进行水力压裂时,在高压水体冲击作用下,由于煤体的原始强度被破坏,使煤体由弹性区转为塑性区,无法承受工作面前方的超前支撑压力,应力增高区会向煤体深部转移。减弱了工作面附近的支撑压力,压裂改变了工作面前方的应力分布,在某种程度上降低了煤与瓦斯突出的概率。当压裂停止后,煤体中存在大量的瓦斯运移通道,极大缩短瓦斯的抽采时间,减少了工作面的瓦斯涌出量。

水力压裂主要有3个阶段:

- 1) 压裂液对煤体进行宏观湿润,在压力升高的过程中对煤体进行起裂;
- 2) 破坏煤层的弹性状态,迫使煤体产生大量的微观裂隙;
- 3) 煤体在大量水的微观浸润下,由于煤体与瓦斯和水的吸附能力不同,水分逐步取代游离态瓦斯,最终提高煤层的透气性。

2 水力压裂工程概况

新景矿保安分区3107进、回风巷(南五正、副巷)位于井下+420 m水平,其全长为1 601 m;煤层平均厚度2.26 m,坚固性系数最小值为0.38,3号煤层为松软低透气性煤层,瓦斯压力最高可达2.26 MPa。为了提高3号煤层透气性、降低瓦斯含量、平衡煤体瓦斯压力,提高煤巷的掘进效率,在3107底抽巷布置穿层钻孔进行水力压裂作业。设计半径为40 m,间距为70 m,共7个压裂孔(1#~7#)。底抽巷压裂区域钻孔布置及压裂泵组示意图如图1所示。



(a) 南五底抽巷压裂区域钻孔布置



(b) 压裂泵组

图1 3107底抽巷水力压裂区域钻孔布置及压裂泵组示意图

根据压裂现场泵组的施工记录,压裂水量和最大注水压力参数如表1所示。压裂泵组的额定参数

如表 2 所示。

表 1 压裂水量和最大注水压力

压裂孔号	最大注水压力/MPa	压裂水量/m ³
1#	23.0	40
2#	17.0	28
3#	21.0	95
4#	22.0	107
5#	33.0	70
6#	23.9	25
7#	26.5	122

表 2 压裂泵组输出参数

档位	传动比	转速/ (r · min ⁻¹)	理论流量/ (m ³ · h ⁻¹)	最高压力/ MPa
I	4.00	82.0	9.2	70
II	2.68	124.0	13.8	70
III	2.01	164.6	18.4	60
IV	1.35	245.0	27.3	40

注:表中数据是基于泵 90% 的机械效率和 100% 的容积效率的。

3 数值模拟分析

3.1 模型的建立

在压裂现场取得煤岩样品,在实验室测定其抗压强度、抗拉强度等基础数据参数,同时在经过交叉对比、分析试验的基础上^[6-7],确定对应的微观颗粒离散元计算参数,如表 3、表 4 所示。

表 3 煤岩物理力学基本参数

抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	摩擦系数	密度/ (kg · m ⁻³)
10.2	2.2	2.63	0.31	34.27	0.722 6	1 270

表 4 煤岩微观物理力学参数

颗粒 最小 粒径/ m	粒径 比	密度/ (kg · m ⁻³)	摩擦 系数	颗粒 弹性 模量/ GPa	平行连 接弹性 模量/ GPa	平行连 接切向 强度/ MPa	平行连 接法向 强度/ MPa
0.41	1.55	1 495	0.722 6	2.5	2.5	7	7

在确定微观物理力学参数及地质参数情况下^[8],建立不同条件下压裂水量、压裂时间的数值计算模型,最后利用颗粒离散元程序进行不同条件参数的注水压裂数值模拟试验。具体方案如下:

1) 探讨不同压裂水流量的有效半径与压裂时间

之间的关系,设置 4 组不同的流量,分别为 5.076、10.476、14.076、17.676 m³/h。

2) 探讨不同压裂时间条件下有效半径与压裂水流量之间的关系,设置 4 组不同的压裂时间,分别为 400、500、600、700 s。

设计截取 50 m×50 m 的平面为模拟压裂区域,压裂孔布设在中部。通过模拟设置预定的最大水平应力 σ_1 和最小水平应力 σ_3 ,建立如图 2(a) 所示的数值模型,模拟的压裂孔如图 2(b) 所示,图中 l_u 为压裂过程中裂隙的扩展长度,采用控制流量的注水加压方式。

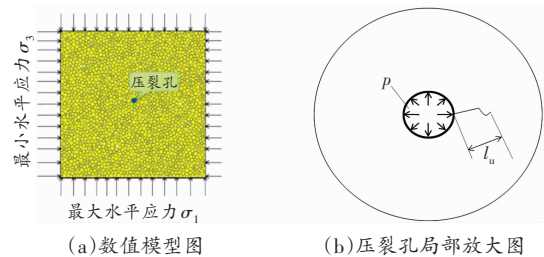
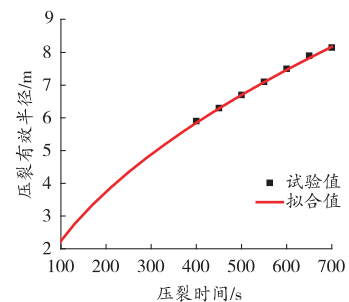


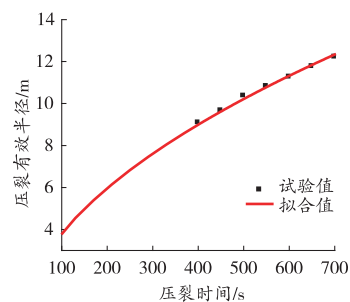
图 2 水力压裂数值模拟模型示意图

3.2 各压裂水流量下对比分析有效半径与压裂时间的关系

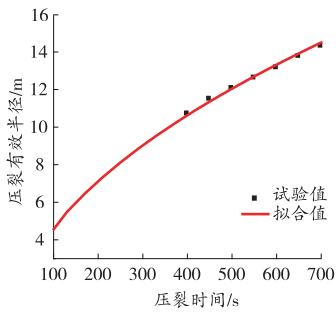
通过设定压裂水流量来模拟有效半径与压裂时间之间的关系,结果如图 3 所示。由图 3 可知,当压裂水流量一定时,松软低渗煤岩压裂有效半径随压裂时间的增加而增大。在相同的压裂时间下,流量越大,有效半径相对越大。但现场压裂泵组流量不可能无限大,当流量在 9.2 ~ 27.3 m³/h 内,某个压裂时间,存在有效半径最优。



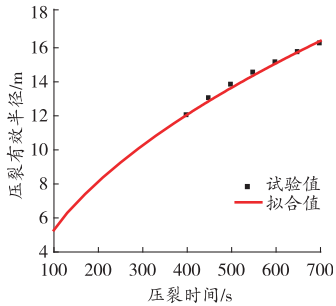
(a) 压裂水流量 5.076 m³/h



(b) 压裂水流量 10.476 m³/h



(c) 压裂水流量 14.076 m³/h

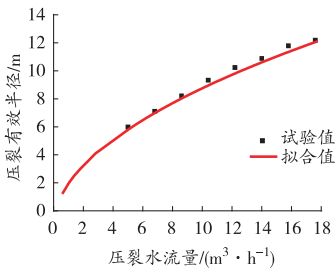


(d) 压裂水流量 17.676 m³/h

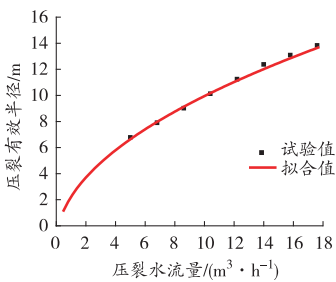
图3 各压裂水流量下压裂有效半径与压裂时间关系拟合曲线

3.3 各压裂时间下对比分析有效半径与压裂水流量的关系

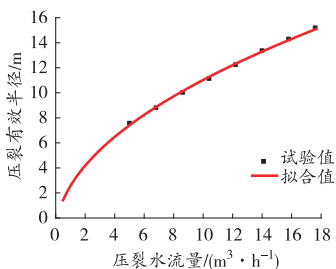
各压裂时间下的松软低渗煤体有效半径与压裂水流量之间的关系拟合曲线如图4所示。



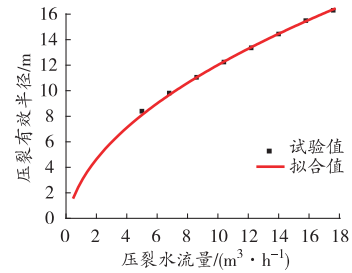
(a) 压裂时间 400 s



(b) 压裂时间 500 s



(c) 压裂时间 600 s



(d) 压裂时间 700 s

图4 各压裂时间下有效半径随压裂水流量变化拟合曲线

由图4可知,当压裂时间一定时,松软低渗煤岩压裂有效半径与压裂水流量呈正比例关系;在保持压裂水流量一定的情况下,压裂时间是保证压裂有效半径的另一关键因素。

然而,压裂水流量越大对泵组的要求也越高,注水时间不可能无限长。以下通过建立二者的回归分析来进一步确定最优关系。

3.4 压裂有效半径回归分析

基于压裂有效半径与压裂时间、压裂水量呈非线性正比例关系,运用数理统计方法拟合三者之间的关系,如式(1)所示,其相关系数为0.95。

$$L = a \sqrt{Qt} - b \quad (1)$$

式中: L 为压裂有效半径,m; Q 为压裂水流量,m³/h; t 为注水压裂时间,h;系数 $a=9.582, b=1.348$ 。

根据公式(1)和现场压裂参数分别计算理论压裂有效半径,结果见表5。

表5 不同压裂水流量下理论压裂有效半径计算结果

压裂孔号	压裂水流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	压裂水量/ m ³	时间/ h	有效半径/ m
1#	13.8	40	2.9	59.2
2#	9.2	28	3.0	48.9
3#	27.3	95	3.5	92.2
4#	27.3	107	4.0	98.2
5#	18.4	70	2.8	67.6
6#	13.8	25	1.8	47.4
7#	18.4	88	4.7	87.7

4 现场压裂试验数据分析

对于现场的水力压裂有效半径考察,通过钻孔施工效果检验孔、顶板渗水情况、钻孔的瓦斯含量、含水率等参数来判定该处是否处在压裂影响范围内^[9]。压裂试验期间没有出现顶板掉落现象,压裂孔周边围岩存在渗水现象,具体情况见表6。

表6 压裂孔周边围岩渗水情况统计

压裂钻孔编号	渗水点与压裂孔间距/m	渗水情况
2#	20	注水 28 m ³ 左右时,距 2# 压裂孔 20 m 处有 4 根锚索出现明显的滴水现象
3#	5	注水 40 m ³ 左右时,发现压裂孔以北 5 m 处锚索滴水
5#	55	注水 40 m ³ 左右,距离 5# 孔以北约 55 m 处的帮部及顶部锚索出现漏水
6#	30	注水 20 m ³ 左右,距离 6# 孔以北约 30 m 处的测压钻孔发生漏水

使用 DGC 型瓦斯含量直接测定装置测试煤样的瓦斯含量,使用烘干法测试煤层含水率^[10],测试结果见表 7。

表7 压裂区域检验孔参数测试结果

取样地点	取样深度/m	瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)	煤层含水率/%	与压裂孔距离/m
3#压裂孔	34	6.849 3		24.3
3#压裂孔	41	11.237 6		37.2
3#压裂孔	54	13.891 8	2.91	52.3
4#压裂孔	29	8.562 1		8.7
4#压裂孔	30	8.121 2		18.6
4#压裂孔	35	7.366 8		25.1
7#压裂孔	29	7.571 7	3.78	23.5
7#压裂孔	32			39.1
7#压裂孔	38	9.975 7	3.30	47.7

通过对压裂钻孔周围渗水情况、煤体含水率观测分析可知:2#压裂孔注水量在 28 m³ 左右时,压裂有效半径在 20 m 以上;3#压裂钻孔注水量在 95 m³ 左右时,压裂有效半径在 52 m 以上;4#压裂孔注水量在 107 m³ 左右时,压裂有效半径在 35 m 以上;5#压裂孔注水量在 70 m³ 左右时,压裂有效半径在 50 m 以上;6#压裂孔注水量在 25 m³ 左右时,压裂有效半径在 30 m 以上;7#压裂钻孔注水量在 88 m³ 左右时,压裂有效半径在 47 m 以上。绘制的拟合曲线如图 5 所示。

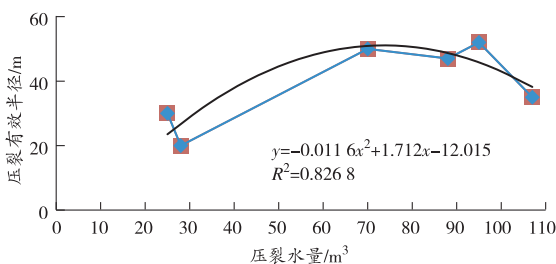


图5 压裂有效半径与压裂水量的拟合曲线

综合压裂水量与有效半径现场考察数据,建立新景矿 3 号煤层水力压裂水量与有效半径的拟合关系式为 $y = -0.0116x^2 + 1.712x - 12.015$, $R^2 = 0.8268$ 。当压裂水量为 73.79 m³ 时,有效半径为 51 m。

对比表 5 中 5# 孔中数值模拟理论计算值,压裂泵组输出档位为 III,流量为 18.4 m³/h 时,压裂水量为 70 m³,有效半径为 67.6 m,压裂时间相对最优。

现场实测压裂有效半径与理论有效半径对比发现^[10-13],理论值一般大于实测值,根据现场实际分析认为主要有以下 2 个因素:井下地质构造的复杂性与煤自身各向异性有关;井下压裂现场出现的漏水状况,与模拟压裂的匹配条件存在一定的差异。

5 结论

1) 建立新景矿松软煤层水力压裂水量与有效半径的拟合关系式为 $y = -0.0116x^2 + 1.712x - 12.015$, $R^2 = 0.8268$ 。当压裂水量为 73.79 m³ 时,有效半径为 51 m,压裂时间相对最优。

2) 当压裂时间控制在某特定值时,松软低渗煤岩压裂有效半径随着压裂水量增加呈非线性增大;当压裂水量控制在某特定值时,松软低渗煤岩压裂有效半径随着压裂时间的增加而增大,二者呈非线性正比例关系。

3) 对于压裂有效半径检验参数,瓦斯含量、含水率等参数相对可靠,现场验证水力压裂对瓦斯含量具有一定的驱散作用,压裂区的瓦斯含量普遍小于未压裂区域。

参考文献:

- [1] 李磊. 综合水力化增透措施在豫西“三软”煤层的工程应用探讨[J]. 中国煤炭, 2019, 45(1): 137-142.
- [2] 甘林堂, 刘吉祥. 松软突出煤层采煤工作面水力压裂增透技术应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(7): 70-73.
- [3] 郑凯歌. 碎软低透煤层底板梳状长钻孔分段水力压裂增透技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 272-281.
- [4] 赵旭生, 刘延保, 申凯, 等. 煤层瓦斯抽采效果影响因素分析及技术对策[J]. 煤矿安全, 2019, 50(1): 179-183.
- [5] 刘世通. 辛置煤矿水力压裂卸压增透影响半径数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(2): 44-48.
- [6] 李树刚, 马瑞峰, 许满贵, 等. 煤层水力压裂增透影响半径试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(3): 9-11.
- [7] 雷毅. 松软煤层井下水力压裂致裂机理及应用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.

(下转第 108 页)

制减少或避免瓦斯超限,实现安全可控条件下的连续生产,切实发挥安全措施服务生产的作用。

4 结论

1) 根据煤矿安全监控系统升级改造的要求,监控系统升级改造大幅提高了系统的抗干扰、准确传输、多系统融合和自诊断等能力。

2) 结合煤矿实际发展需求和最新的《煤矿安全监控系统通用技术要求》,指明了系统智能化发展方向为:传感器智能化并实现全覆盖,支持多网、多系统融合,增加自诊断、自评估功能,加强数据应用分析。

3) 重点介绍了煤矿安全监控系统智能化发展的技术趋势,通过新型传感技术、传感器智能化技术、分布式供电及共缆透传技术、一体化采集平台、监测数据深度挖掘与分析利用、生产协同管控等技术研究,引领监控系统的智能化发展。

参考文献:

[1] 孙继平. AQ 6201《煤矿安全监控系统通用技术要求》修订意见[J]. 工矿自动化,2016,42(2):1-7.

[2] 孙继平. 煤矿信息化自动化新技术与发展[J]. 煤炭科学技术,2016,44(1):19-23.

[3] 孙继平. AQ 1029—2017《煤矿安全监控系统及检测仪器使用管理规范》(报批稿)[J]. 工矿自动化,2017,43(6):87-94.

[4] 郭江涛. 煤矿安全监控系统现状及发展趋势[J]. 煤矿机械,2017,38(3):1-3.

[5] 孙继平,钱晓红. 煤矿重特大事故应急救援技术及装备[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):112-116.

[6] 国家煤矿安监局关于印发《煤矿安全监控系统升级改造技术方案》的通知(煤安监函[2016]5号)[A].

[7] 徐闯,何青松. 基于多网融合及联动的煤矿安全监控系统设计[J]. 矿业安全与环保,2018,45(6):66-68.

[8] 汪丛笑. 煤矿安全监控系统升级改造及关键技术研究[J]. 工矿自动化,2017,43(2):1-6.

[9] 王国法,刘峰,孟祥军,等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.

[10] 张翼. 煤矿安全监控多系统融合与联动交互方案[J]. 煤矿安全,2019,50(6):100-103.

[11] 郭江涛. 基于物联网的区域协同控制器研究[J]. 煤矿机械,2016,37(7):176-178.

[12] 朱前伟. 煤矿安全监控系统及组成设备抗干扰设计[J]. 工矿自动化,2017(6):18-20.

[13] 郭清华,于庆,苟怡. 基于激光自稳频技术的分布式多点甲烷检测系统研究[J]. 煤炭学报,2018(2):371-376.

[14] 汪丛笑. 煤矿安全监控系统智能化现状及发展对策[J]. 工矿自动化,2017,43(11):5-10.

[15] 唐杰,周洋,杨萌,等. 采用颜色混合模型和特征组合的视频烟雾检测[J]. 光电子·激光,2017,28(7):751-758.

[16] PREMACE E, VINSLEY S S, SURESH S. Multifeature analysis of smoke in YUV colorspace for early forest fire detection[J]. Fire Technology, 2016, 52(5):1219-1342.

[17] 刘鹏亮. 胶结充填体水化温度场特征及对煤自燃特性的影响[J]. 煤炭科学技术,2017(11):13-16.

[18] 石记斌,石记红. 关联分析数据挖掘在煤矿瓦斯安全监测预警中的应用[J]. 能源与环保,2017,39(8):1-5.

[19] 孟海东,孙搏,司子稳,等. 基于时间序列的矿井瓦斯涌出量预测方法[J]. 工矿自动化,2010,36(12):24-27.

[20] 陈圣磊,梁建林,王思慈. 气体分析法早期预测预报煤炭自然发火技术研究[J]. 山东煤炭科技,2017(2):93-95.

(责任编辑:陈玉涛)

(上接第103页)

[8] 刘延保. 极松软煤体高压吸附过程中变形特性试验研究[J]. 矿业安全与环保,2016,43(5):1-4.

[9] 唐建平,孙东玲,武文宾,等. 水驱气理论在煤层水力压裂工程实践中的应用[J]. 矿业安全与环保,2019,46(5):51-55.

[10] 裴秋艳,王骏辉,王毅. 水分对瓦斯运移负效应的分析与实验研究[J]. 中国矿业,2017,26(3):161-165.

[11] 李磊,李中军,武文宾. 松软低透气性煤层井下水力压

裂工艺技术研究[J]. 矿业安全与环保,2015,42(6):5-9.

[12] 张志刚,胡千庭. 基于考虑吸附作用影响的含瓦斯煤渗透特性分析方法[J]. 矿业安全与环保,2015,42(3):98-100.

[13] 赵东. 水—热耦合作用下煤体瓦斯的吸附解吸机理研究[D]. 太原:太原理工大学,2012.

(责任编辑:李琴)