

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.008

二氧化碳相变致裂软岩实验研究*

王 燕^{①②} 孙伟博^{①②} 张丁丁^{①②}

①西安科技大学能源学院(陕西西安,710054)

②教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室(陕西西安,710054)

[摘 要] 为了研究二氧化碳相变产生的高压气体动态破岩的机理,通过建立设有分布式光纤传感器的物理模型结合数值模型的方法,研究了二氧化碳相变致裂煤体的内部效应,得到了二氧化碳相变高压气体动压破岩的机理及岩体裂隙、强度和二氧化碳相变气体压力等参数之间的关系。研究表明:气体准静压破坏煤体主要集中在煤体强度薄弱的区域,且气体压力要高于煤体破坏的最低极限值;原生裂隙会改变二氧化碳相变致裂煤体的空间范围和煤体的破坏程度,原生裂隙与炮孔之间的夹角越小、距离越近,越明显。

[关键词] 二氧化碳相变;分布式光纤传感器;岩石致裂;数值模拟

[分类号] TD235.3

Experimental Study on Fracture of Soft Rock Fracturing by Phase Change of Carbon Dioxide

WANG Yan^{①②}, SUN Weibo^{①②}, ZHANG Dingding^{①②}

① School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology (Shaanxi Xi'an, 710054)

② Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education (Shaanxi Xi'an, 710054)

[ABSTRACT] In order to study the mechanism of dynamic rock breaking by high pressure gas generated by carbon dioxide phase transition, internal effect of carbon dioxide phase change cracking in coal was studied by establishing a physical model with distributed optical fiber sensing and numerical model. The mechanism of high-pressure gas dynamic pressure rock breaking and the relationship between rock mass fissure, strength and gas pressure of carbon dioxide phase change were obtained. Results show that gas pressure damaged coal is mainly concentrated in the area where the strength of the coal is weak, and the gas pressure is higher than the minimum limit of coal body damage. Primary crack will change the spatial extent of the coal body and the degree of damage of the coal body. The smaller the angle between the crack and the blast hole is and the closer the distance is, the more obvious it is.

[KEYWORDS] carbon dioxide phase transition; distributed optical fiber sensing; rock fracture; numerical simulation

引言

煤炭是我国的主要能源^[1]。中国 95% 以上的高瓦斯和突出矿井煤层均属于低渗透煤层,随着开采深度的增加,煤层的透气性愈加降低^[2],需要有安全、高效的增透方法解决这一问题。二氧化碳相变致裂技术出现在 20 世纪 50 年代^[3-5],由于其经济性、安全性等方面高于传统火药,因此具有较高的研究价值^[6-7]。二氧化碳相变致裂技术是通过液态二

氧化碳在极短的时间内和有限的空间内急剧转化为气态二氧化碳,释放 100 ~ 200 MPa 的压力,对煤体造成冲击,增加煤层的裂隙,提高透气性。文虎等^[8]通过现场实验研究发现,液态二氧化碳压裂时,钻孔内的裂隙扩展形式为破碎区裂隙起裂→弱面扩展→微孔隙破坏,且压裂效果优于水压致裂。王兆丰等^[9]通过实验发现,二氧化碳相变致裂在软煤中也具有很好的增透效果。董庆祥等^[10]研究了二氧化碳致裂能量与 TNT 直接的关系。现有研究多着重于二氧化碳致裂的现场应用。

* 收稿日期:2019-05-23
第一作者:王燕(1978 -),女,博士,讲师,主要从事矿山绿色开采、采矿方法等方面的教学与科研工作。E-mail:wangyan1126@163.com
通信作者:孙伟博(1979 -),男,博士,讲师,主要从事数字化爆破、矿山爆破技术及爆破装备、爆破灾害防治、爆破块度预测及优化等方面的研究。E-mail:sweibo@163.com

由于二氧化碳致裂只有高压气体准静压作用于岩石上,其破碎岩石的内部效应与炸药爆破时的内部效应有所不同,研究二氧化碳相变产生的高压气体的破岩机理,掌握岩体裂隙对其破岩的影响规律,有利于更好地将该技术应用于工程实践。

1 物理实验

1.1 实验材料

采用相似实验的方法研究二氧化碳相变致裂影响区域,首先需配置相似材料。以某矿山煤体为研究对象,测得煤体抗压强度为 22 MPa。通过配比实验,得到平均抗压强度为 0. 106 MPa、相似比为 1 : 200 的相似材料,各组分质量比为 m (煤粉) : m (细砂) : m (大白粉) : m (石膏) = 7 : 7 : 1 : 1。

1.2 实验模型

炸药爆破产生的宏观裂隙区约为炮孔半径的 15 倍,由于二氧化碳相变产生的气体压力约为炸药爆炸时压力的几十分之一,且没有爆热和冲击波的存在,宏观裂隙的区域要小于炮孔半径的 15 倍^[11]。所以,按爆破钻孔半径的 15 倍设计模型可以满足实验要求。

设钻孔的半径为 10 mm,模型的外形尺寸为 300 mm × 300 mm × 300 mm,通过模型中心位置预制直径 20 mm、深度 100 mm 的圆柱形空腔来模拟。为了有效地测量三维实体模型内部裂隙变化,利用布里渊散射光^[12-13]在光纤中布里渊频移、散射光功率和外界的温度、应变有对应的关系的特性^[14-16],采用布里渊分布式光纤传感器来检测三维实体模型内部裂隙的变化情况。

在实验模型内装填混合好的相似材料,装填 100 mm 高后,将长 500 mm、直径 20 mm 的 PVC 管放置在试件中心;继续装填相似材料至 $H_1 = 120$ mm 高度,在此水平面布置半径为 $R_1 = 120$ mm 的光纤;之后相继在 $H_2 = 150$ mm、 $H_3 = 180$ mm 水平面布置半径分别为 $R_2 = 100$ mm、 $R_3 = 50$ mm 的光纤,如图 1 所示。图 1 中, L 表示光纤距离光纳仪的距离。三层光纤传感器布置完成后,继续装填实验模型至 300 mm 高。

利用压缩空气作为模拟二氧化碳致裂时的高压气体,利用光纳仪接收光纤传感器信号。实验系统如图 2 所示。

1.3 实验方法

实验时,将实验模型上的圆柱形空腔的上部

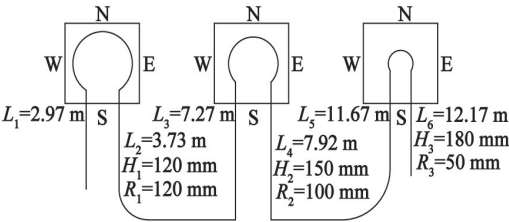


图 1 光纤传感器布置图
Fig. 1 Layout of optical fiber sensor



图 2 测试实验系统
Fig. 2 Experimental system

100 mm 用带孔的软木封闭,将气瓶输气管通过软木塞上的小孔插入到空腔中,用密封胶封闭管道周围的空隙,并在周围压上铁砖,按表 1 所示的实验测试条件,在设定时间内加压,完成测试后更换模型,重复进行 6 组实验。

表 1 实验测试条件
Tab. 1 Test conditions

序号	压力/MPa	时间/s
1 [#]	0.50	3
2 [#]	0.50	5
3 [#]	0.50	7
4 [#]	0.75	3
5 [#]	0.75	5
6 [#]	0.75	7

1.4 实验结果与分析

将各组实验得到的应变数据导入到 Origin 中,得到不同测量高度处的应变曲线,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,0.50 MPa 时,煤体的应变随压力作用时间的变化变动不大,煤体的应变量十分接近;当压力提高到 0.75 MPa 时,煤体的应变随作用时间的变化产生了明显的不同,应变量均高于 0.50 MPa 时煤体的应变量;作用 3 s 和 5 s 时,在 3 个测量平面均出现了明显的应变峰值,作用时间越

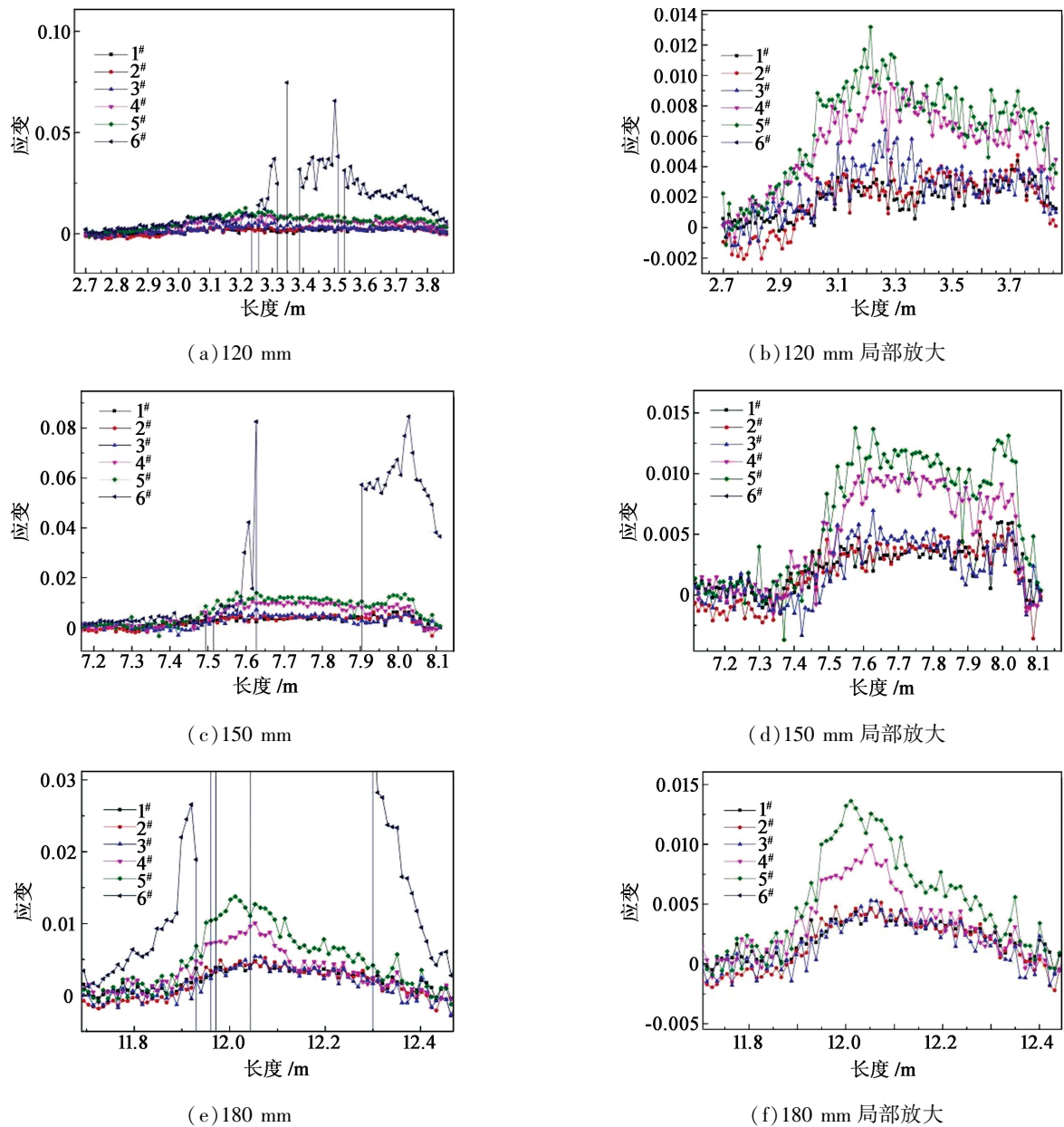


图 3 不同测量高度处的应变位移图

Fig. 3 Strain displacement at different measuring heights

长,应变量越大。这说明 0.50 MPa 时,气体压力对煤体的准静压作用仅能使煤体产生微量的应变,还不足以产生明显的微裂纹,应变量与气体压力作用时间基本无关。0.75 MPa 时,气体压力对煤体的准静压作用能够使煤体产生较大的应变,并伴随有微裂纹的产生;特别是在微裂纹处,应变量与气体压力作用时间有关,作用时间越长,应变量越大。

当 0.75 MPa 且作用时间达到 7 s 时,煤体发生了极大的应变,说明此时煤体产生了明显的裂纹。裂纹主要集中在光纤长度 3.35 ~ 3.52 m、7.65 ~ 7.90 m 和 11.95 ~ 12.05 m 区间内,以这些区间为弧长对应到爆破钻孔中心部分的煤体,均产生了较

大的裂隙。在破坏区域内,由于煤体被破坏,失去了自身的强度,导致原来与煤体连接的光纤与煤体脱离,在光纤上施加的原有应力消失,使光纤卸载松弛,从而产生了负应变。

2 数值模拟

在物理实验的基础上,通过数值模拟的方法,分析岩体内部存在节理构造时二氧化碳相变致裂破岩的情况。

2.1 微观参数标定

使用 PFC 软件构建数值模型。二氧化碳相变

致裂数值计算模型尺寸与室内实验试样保持一致,颗粒相互接触类型采用平行黏结模型。通过单轴抗压实验,得到一组微观力学参数的计算结果,与实验结果基本一致,如图 4 所示。将该微观参数载入计算模型。

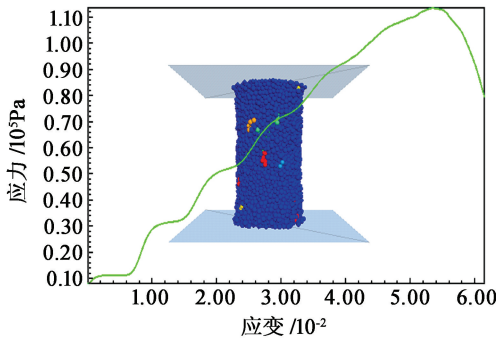


图 4 试样单轴压缩试验应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of uniaxial compression test

2.2 模拟计算

分两个部分,第一部分分析不同压力下煤体裂隙扩展情况,并与实验情况相比较,以验证数值模型的可靠性;第二部分分析煤体原生裂隙对二氧化碳相变致裂的影响。根据实验中使煤体致裂的压力以及模型中心模拟钻孔的表面积,可以推算出模拟钻孔内壁颗粒所受的力,通过 Fish 语言编程,将力施加到颗粒上。根据实验时压力加载时间,用 Solve Time 命令设定加载时间。

2.3 结果与分析

先对模型钻孔施加 0.50 MPa 压力,作用时间 7 s,得到的模拟结果如图 5(a) 所示;可以看出,在模拟钻孔周围出现了少量的裂隙,有少量的煤体破裂。然后,对模型钻孔施加 0.75 MPa 压力,作用时间 3 s,得到的模拟结果如图 5(b) 所示;可以看出,在模拟钻孔周围出现了大量的裂隙,有大量煤体破裂。不同强度的煤体有一个最低破坏压力值,在此值以下,即使作用时间较长,对煤体的破坏也是有限的;当超过这一限定值后,煤体能够在较短的时间产生破坏。这一结论与实验结论一致。

第二部分数值计算共分 7 组,分析煤体内原生裂隙受到二氧化碳相变致裂时内部裂纹的扩展,对应的煤体原生裂隙的角度分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°。7 组计算的边界条件一致,结果如图 6 所示。

图 6(a) 表示无原生裂隙时煤体裂隙扩展和破裂情况。将图 6(a) 与后面各组计算结果对比,可以看出,在相同受压条件下,存在原生裂隙的煤体比无

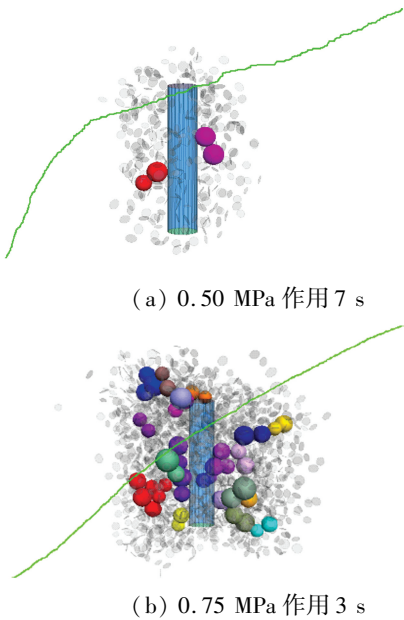


图 5 不同压力和作用时间时的模拟结果

Fig. 5 Simulation results at different pressures and action times

裂隙煤体的裂隙扩展的范围更广,分离下的煤体的数量更多。因为原生裂隙的存在,裂隙处煤体的强度降低,在同样载荷条件下,煤体更容易被破坏。

对比图 6(b) ~ 图 6(h),原生裂隙角度不同时,煤体破坏的趋势也不相同。裂隙倾角为 0°时,模型受压后裂隙向原生裂隙的方向扩展较多,其他方向的裂隙与没有裂隙的煤体扩展的区域相接近。这说明当原生裂隙与压力作用方向平行时,裂纹将优先从原生裂隙方向发展。因为一方面,原生裂隙处强度较低,容易出现滑移破坏;另一方面,当高压气体进入原生裂隙后会在裂隙端部产生应力集中,加剧裂纹的扩展。同样的现象出现在原生裂隙倾角为 15°和 30°时。

在原生裂隙为 45°时,在有原生裂隙的一端,裂隙向 45°~90°方向扩展较多,在 45°~90°之间的裂隙量相对较少,并且在原生裂隙外侧的裂隙增加量还要小于无原生裂隙煤体。这是因为,原生裂隙的存在改变了原有压力传递的方向,使压力在裂隙面上产生了一个卸载,所以使得裂隙面的另一侧的破坏降低。同时,在裂隙的端部产生应力集中,使得裂隙的扩展更多地限定在了 45°~90°范围内。

原生裂隙倾角为 90°时,在有原生裂隙的一端,裂隙主要集中在原生裂隙与模拟钻孔之间,在其他区域相对较少。原生裂隙的存在使压力范围集中在原生裂隙与模拟钻孔之间,在同样的作用时间下,这一区域的煤体的破坏程度更高。裂隙距离模拟钻孔越近,在相同时间内,煤体的破裂程度越高;距离越

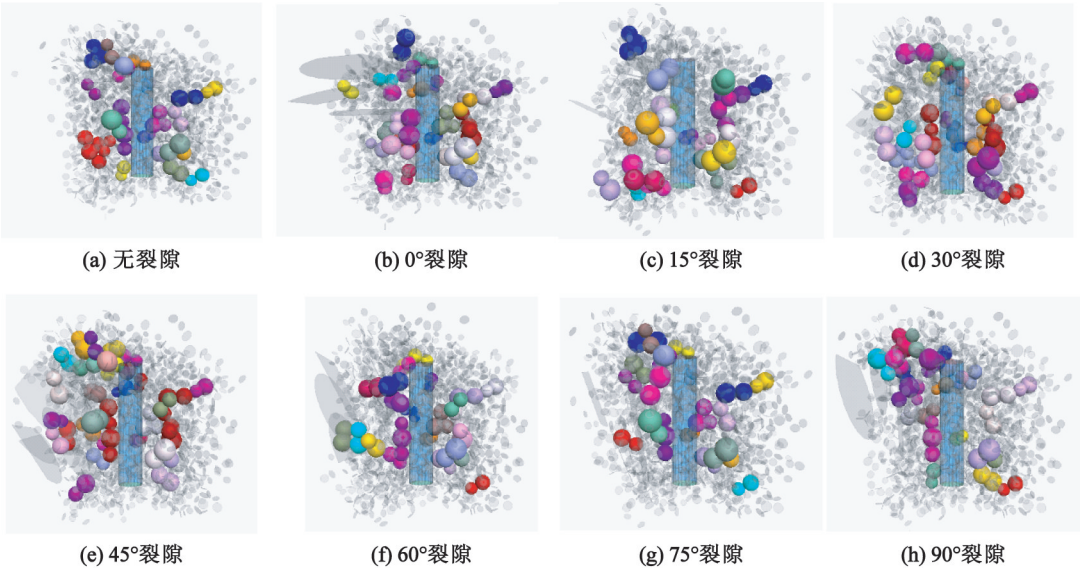


图 6 不同角度原生裂隙煤体的破坏情况

Fig. 6 Failures of coal mass with different primary fracture

远,影响越小。

3 结论

1) 气体准静压破坏煤体主要集中在某一煤体强度薄弱的区域,对煤体强度较高的区域破坏得较弱。所以,在利用二氧化碳相变进行煤体致裂时,二氧化碳相变后的压力要根据煤体的强度进行调整,要高于煤体破坏的最低极限值。同时,在有结构面、节理、裂隙的煤体中应用二氧化碳相变进行致裂的效果要优于完整煤体。

2) 原生裂隙会改变二氧化碳相变致裂煤体的空间范围和煤体的破坏程度,原生裂隙与爆破钻孔之间的夹角越小、距离越近,越明显。

3) 在利用二氧化碳相变进行煤体致裂时,二氧化碳相变后的压力要根据煤体的强度进行调整,通过实验确定压力最低极限值;在有裂隙的煤体中应用二氧化碳相变进行致裂时,爆破钻孔要根据需要调整与裂隙之间的角度。

参 考 文 献

[1] 杜泽生,范迎春,薛宇飞,等. 二氧化碳爆破采掘装备及技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9):36-42.
DU Z S, FAN Y C, XUE Y F, et al. Study on carbon dioxide blasting mining and driving equipment and technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 36-42.

[2] 周西华,门金龙,宋东平,等. 煤层液态 CO₂ 爆破增透促抽瓦斯技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(2):60-65.
ZHOU X H, MEN J L, SONG D P, et al. Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO₂ blasting [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2):60-65.

[3] ZHANG Y B, LI E Q, LIU J W, et al. Applications of carbon dioxide cannon blasting on the problem of triangular flap top in coal mine handling mechanized mining face [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256/257/258/259:71-74.

[4] 孙建中. 基于不同爆破致裂方式的液态二氧化碳相变增透应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
SUN J Z. Applied research on permeability increasing by liquid carbon dioxide phase transition blasting based on different initiating condition[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[5] 聂政. 二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8):62-63.
NIE Z. Application of carbon dioxide blasting technique in coal mines [J]. Coal Technology, 2007, 26(8):62-63.

[6] 李付涛. 二氧化碳爆破增透技术的试验应用[J]. 煤, 2016, 25(1):16-18.
LI F T. The trial application of carbon dioxide blasting anti-reflection technology [J]. Coal, 2016, 25(1):16-18.

[7] 霍中刚. 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2):80-83.
HUO Z G. New technology of carbon dioxide fracture ap-

plied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2):80-83.

[8] 文虎,李珍宝,王振平,等. 煤层注液态 CO₂ 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11):2793-2799.

WEN H, LI Z B, WANG Z P, et al. Experiment on the liquid CO₂ fracturing process for increasing permeability and the characteristics of crack propagation in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11):2793-2799.

[9] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等. 液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(1):1-5.

WANG Z F, SUN X M, LU T K, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(1):1-5.

[10] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等. 液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11):84-88.

DONG Q X, WANG Z F, HAN Y B, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11):84-88.

[11] 崔峰,来兴平,曹建涛,等. 急倾斜综放破碎顶煤流动规律数值模拟[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(3):255-259,270.

CUI F, LAI X P, CAO J T, et al. Numerical simulation of broken top coal flow law by mechanized caving in steep seam [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(3):255-259,270.

[12] 毛江鸿,何勇,金伟良,等. 分布式光纤传感器应变传递性能分析及试验研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(10):1406-1411.

MAO J H, HE Y, JIN W L, et al. Theoretical and experimental analyses on strain transferring of distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(10):1406-1411.

[13] 张勇,高鹏,王惠敏,等. 复杂变形条件下分布式光纤传感器应变传递特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5):566-572.

ZHANG Y, GAO P, WANG H M, et al. Study on strain transfer characteristics of distributed optical fiber sensor under complex deformation condition[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5):566-572.

[14] 单一男,武湛君,徐新生,等. 分布式光纤传感器的应变测量方法及其应用[J]. 压电与声光, 2015, 37(3):485-488.

SHAN Y N, WU Z J, XU X S, et al. The strain measurement method and application of distributed optical fiber sensors [J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2015, 37(3):485-488.

[15] 柴敬,袁强,汪志力,等. 物理模型试验方法的应用分析[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(5):505-511.

CHAI J, YUAN Q, WANG Z L, et al. Application analysis of physical model simulation method[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(5):505-511.

[16] 张炜,张东升,马立强,等. 一种氦气地表探测覆岩采动裂隙综合试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12):2531-2539.

ZHANG W, ZHANG D S, MA L Q, et al. Development of a comprehensive test system for detecting mining-induced fractures in overlying strata on surface with radon and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12):2531-2539.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部