

王宗明,衡献伟,钱国辉,等.低渗透性煤层CO₂相变致裂增透规律及应用[J].矿业安全与环保,2019,46(3):48-51.
文章编号:1008-4495(2019)03-0048-04

低渗透性煤层 CO₂ 相变致裂增透规律及应用

王宗明¹,衡献伟^{2,3},钱国辉¹,蒋欣恒¹,陈廷全¹

(1. 贵州永润煤业有限公司轿子山煤矿,贵州 安顺 561001; 2. 贵州省矿山安全科学研究院,贵州 贵阳 550025;
3. 贵州省煤矿瓦斯防治工程技术研究中心,贵州 贵阳 550025)

摘要:针对轿子山煤矿 M9 煤层采掘过程中,煤层瓦斯含量高、压力大、抽采效率低、瓦斯治理周期长等问题,应用具有“增透”和“置换”双重效应的 CO₂ 相变致裂增透技术,提高煤层透气性和瓦斯抽采效率。在轿子山煤矿 9807 运输巷进行 CO₂ 相变致裂增透试验,重点考察不同致裂方式、不同布孔方式的致裂孔瓦斯抽采效果。结果表明:致裂孔抽采瓦斯纯流量是普通抽采孔的 2.0~2.8 倍,抽采瓦斯浓度提高 1.7~2.4 倍。在煤层赋存及钻孔条件相似的情况下,延时起爆(二次)致裂方式的钻孔有利于裂隙延展,增大裂隙范围;在致裂孔两边施工辅助孔时,为高压 CO₂ 气体提供了自由面,减小了其向周边传播阻力,能够增大致裂孔影响范围,从而提高瓦斯抽采效率。

关键词: 瓦斯抽采;低渗透性煤层;CO₂ 相变;致裂;煤层增透

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A

Law and Application of Permeability Improvement in Low Permeability Coal Seam due to CO₂ Phase Transition Cracking

WANG Zongming¹, HENG Xianwei^{2,3}, QIAN Guohui¹, JIANG Xinheng¹, CHEN Tingquan¹

(1. Jiaozishan Coal Mine, Guizhou Yongrun Coal Industry Co., Ltd., Anshun 561001, China;

2. Guizhou Mine Safety Scientific Research Institute, Guiyang 550025, China;

3. Guizhou Province Engineering Technology Research Center for Coal Gas Prevention & Control, Guiyang 550025, China)

Abstract: In the process of M9 coal seam mining in Jiaozishan Coal Mine, the high gas content, high pressure, low extraction efficiency and long gas treatment cycle have been put forward, the permeability and gas extraction efficiency of coal seam can be improved by applying CO₂ phase transition cracking technology with the dual effect of “increasing penetration” and “displacement”. The CO₂ phase transition cracking test was carried out in 9807 transport lane of Jiaozishan Coal Mine, and the effect of gas extraction with different cracking mode and different way of distribution hole was emphatically investigated. The results show that compared with the pure flow rate of gas extraction, the cracking hole is 2.0 times to 2.8 times higher than that of the normal one, the gas extraction concentration is increased by 1.7 times to 2.4 times. Under the similar conditions of coal seam occurrence and drilling conditions, the drilling of delayed (two) cracking mode is beneficial to crack extension and increase the crack range; when the auxiliary holes are constructed on both sides of the cracking hole, it provides a free surface for high pressure CO₂ gas, reduces its propagation resistance to the periphery, and can increase the influence range of the cracking hole, thus improving gas extraction efficiency.

Keywords: gas extraction; low permeability coal seam; CO₂ phase transition; crack; permeability enhanced of coal seam

我国 90% 以上的矿井所采煤层属于低透气性煤

层,随着采深增加,瓦斯问题日益突出^[1]。贵州煤炭资源储量居全国第 5 位,相当于南方 12 省(区、市)总和,素有“江南煤海”之称^[2-3]。贵州煤田大多为煤层群,可采煤层一般 3~20 层,煤层透气性差,煤层渗透率为 10⁻⁶ 数量级,全国最低,较淮南低 2~3 个数量级^[4-5]。针对瓦斯抽采浓度低、衰减快、效果差等难题,国内外学者提出了诸如增加钻孔密度、深孔

收稿日期:2018-06-28;2018-09-03 修订

作者简介:王宗明(1970—),男,河南虞城人,高级工程师,主要从事煤矿瓦斯防治工作。

通讯作者:衡献伟(1983—),男,河南太康人,高级工程师,主要从事煤矿瓦斯灾害预测与防治工作。

预裂爆破、水力压裂、水力割缝^[6-9]等增透措施,但由于技术和工艺措施的不完善,未取得预期效果。随着CO₂相变致裂技术的发展,在CO₂相变致裂机理、致裂当量分析及致裂器关键部件几何参数等方面的研究已日趋成熟,有效克服了水力化措施、炸药爆破增透方法的缺陷,在低渗透煤层增透方面取得了显著成效,为煤层增透、工作面放顶煤及巷道开挖提供了一项新技术^[10-11]。但受煤层赋存条件的影响,针对某一煤层的CO₂相变致裂增透的布孔方式、致裂方式等参数优化缺少系统的研究,技术措施的针对性不强,应用效果也大打折扣。

为了实现精准瓦斯治理,有效利用CO₂相变致裂增透技术提高瓦斯抽采效果,通过考察不同致裂方式、不同布孔方式的致裂孔瓦斯抽采效果,提出适合煤层赋存条件的最佳致裂和布孔方式,为CO₂相变致裂技术的进一步推广应用和提高瓦斯抽采效果提供依据。

1 CO₂相变致裂促进瓦斯抽采机理

1.1 CO₂相变致裂增透机理分析

在常温常压状态下的CO₂以气态形式存在,密度为1.977 g/L(比空气略大),液态CO₂密度为1.177 kg/L,则气体状态相变Clausius-Clapeyron方程如下:

$$p_0 V = nRT \quad (1)$$

式中: p_0 为标准大气压,取101.3 kPa; V 为气体体积,m³; n 为气体物质的量,mol; R 为气体摩尔常数,8.314 J/(mol·K); T 为气体的热力学温度,K。

按照式(1)计算可得液态CO₂相变为气态CO₂过程中,1 m³液态CO₂可气化成体积为643 m³气态CO₂。

致裂时,预先在抽采孔内装入致裂器,通过装置启动致裂器发热片,致使管内液态CO₂受热体积瞬间膨胀,致裂器内CO₂聚集吸热发生气化反应,由液态转化为气态,气态CO₂在高压下直接冲破致裂器中的定压剪切片装置,由释放管排放孔瞬间喷发。高压、高能CO₂气体在煤层钻孔受限空间内,直接作用于煤体,一方面使煤体产生新的裂隙,另一方面促使原生裂隙扩展、发育,从而达到致裂增透的目的。

1.2 CO₂相变致裂置换瓦斯机理分析

瓦斯以游离和吸附2种状态赋存于煤体中,当压力降低或温度升高时,部分吸附态瓦斯转化为游离态,游离态瓦斯在煤体形成裂隙时易被抽出。

根据热力学相关理论可得,在相同平衡压力和环境温度条件下,不同气体分子表现的热运动剧烈

程度存在差异,气体分子的差异性以平均自由程 λ 表示:

$$\lambda = \frac{2\eta}{p} \sqrt{\frac{Rt}{8M}} \quad (2)$$

式中: η 为气体的动力黏度,Pa·s; p 为气体平衡压力,Pa; t 为分子分布空间环境温度,℃; M 为气体的分子质量,无量纲量。

由式(2)可以看出,气体分子的动力黏度与温度成正比;气体的分子质量越小,气体分子在煤体孔隙内表现的无规则运动越激烈。研究表明,气体分子之间的相互吸引作用力极小可以忽略,形成气体动力黏度的主要原因是气体分子在孔隙内做无规则的热运动时,气体分子在孔隙内不同流速层间进行动量交换形成的。在外界条件相同情况下,CH₄分子比CO₂分子的黏度大,所以CH₄分子热运动剧烈程度强于CO₂分子,引起煤体对CH₄吸附的可能性低于CO₂,发生脱附的可能性增强。即煤体对气体分子的吸附作用主要因素包括气体分子热运动剧烈程度、吸附势和各自分子的沸点。气体分子热运动越剧烈,则煤体对气体分子的吸附效应越弱,气体分子的沸点越低,则吸附势越小,宏观表现为气体的热运动越强,煤体对气体分子的吸附性越弱^[12-13]。

CO₂相变致裂装置启动后,CO₂由液态转化为气态的相变过程,吸收发热管释放的热量,同时也使致裂器及周边煤体的温度下降,温度降低有利于CH₄、CO₂等吸附质气体由游离态转化为吸附态。大量气体楔入煤体裂隙内部形成高浓度CO₂环境,CO₂压力随着裂缝的延伸及时间的推移逐渐减小,构成了置换效应发生的初始条件。即原煤体中的瓦斯处于吸附平衡状态,在爆破卸压作用下,有利于解吸出部分瓦斯。同时,高浓度CO₂的介入,打破了原先煤体对CH₄的吸附平衡状态。煤对CO₂分子的吸附能力高于CH₄分子,致使游离态的CH₄浓度不断上升。

CO₂相变致裂在煤体中的渗流、扩散、吸附—解吸与置换作用不是孤立的,而是相互作用、相互影响的,与CO₂相变致裂增透作用共同促使煤体中解吸出更多的瓦斯,提高瓦斯抽采效果。

2 工程试验概况

2.1 试验矿井及工作面概况

轿子山煤矿位于安顺市轿子山镇,由平桥井、斑鸠山井和新井3个独立的矿井组成,设计生产能力60万t/a。矿井可采煤层编号为M0、M8、M9。其中,平桥井矿井开采M9煤层,其最大瓦斯含量为

16.08 m³/t、最大瓦斯压力为 1.1 MPa, 钻孔瓦斯流量衰减系数为 0.092 0~0.715 5 d⁻¹, 属较难抽采煤层。

试验地点选择在平桥井二水平 9807 运输巷 200~500 m 区域, 共计 300 m。9807 运输巷开口位置位于二水平回风大巷内, 工作面以南为未采区, 以北为 9806 采煤工作面。9807 工作面走向长度为 1 061 m, 回风巷采用沿空留巷, 运输巷沿 M9 煤层煤顶板掘进。试验区段煤层埋藏深度为 270~320 m。

2.2 试验方案

在 9807 运输巷无构造和抽采钻孔影响的原始煤层中布置 2 组钻孔, 钻孔倾角与煤层倾角一致, 2 组钻孔间距不小于 15 m, 分别考察不同致裂方式和不同布孔方式的 CO₂ 相变致裂孔瓦斯抽采效果。其中, 第 1 组布置 2 个钻孔, 钻孔间距不小于 15 m, 主要考察不同致裂方式瓦斯抽采效果; 第 2 组布置 4 个钻孔, 主要考察不同布孔方式瓦斯抽采效果。试验钻孔布置方案见图 1。

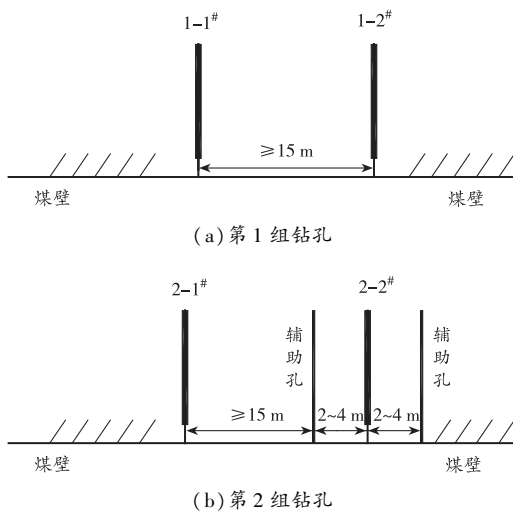


图 1 CO₂ 相变致裂试验钻孔布置方案示意图

1) 第 1 组, 1-1[#] 和 1-2[#] 钻孔施工完成后进行致裂, 致裂时每孔安装 12 根致裂器。其中 1-1[#] 钻孔致裂方式为一次起爆; 1-2[#] 钻孔采用延时致裂, 即先起爆 7 根致裂器, 再起爆 5 根致裂器。

2) 第 2 组, 在施工 2-2[#] 钻孔前, 先施工其两边的辅助孔。辅助孔施工完成后, 立即用抽采管封孔。2-1[#] 和 2-2[#] 钻孔致裂方式均采用一次起爆。

3) 钻孔致裂完成后, 对致裂孔立即进行封孔联抽, 并测试各钻孔瓦斯流量、浓度、负压等参数, 每日测试不少于 1 次。

2.3 CO₂ 相变致裂装备及工艺流程

CO₂ 相变致裂装备主要由 4 部分组成, 分别为充装系统、推送系统、致裂系统、启动和检验系统。

1) 充装系统。充装系统的主要功能是将液态

CO₂ 通过一定的压力充装入特制的金属储液管(致裂管)内, 如图 2 所示。

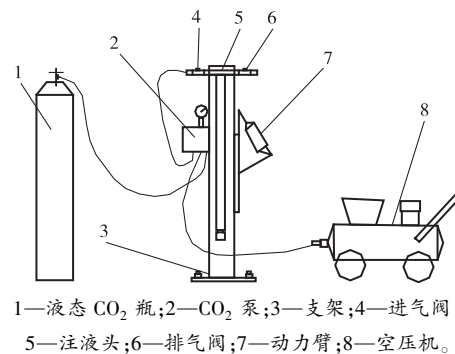


图 2 充装系统构成示意图

2) 推送系统。推送系统是将致裂器快速、安全地推送到预定致裂位置, 具有控制、固定的作用。

3) 致裂系统。致裂系统是液态 CO₂ 相变致裂技术装备的核心部件, 主要由释放管、储液管、加热管和定压泄能片等部件组成, 见图 3。

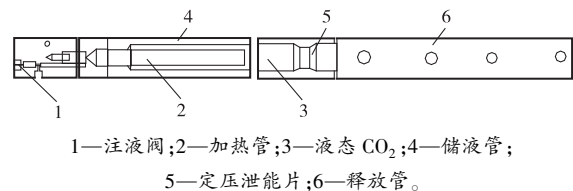


图 3 致裂系统构成示意图

4) 启动和检验系统。包含致裂启动装置和系统检验设备。其中, 致裂启动装置是用来在致裂时提供电流, 启动加热管进而引发整个致裂过程, 常用矿用低压起爆器作为致裂启动装置。

致裂孔施工完成后, 将致裂器推送至钻孔预定位置, 并封孔。致裂器启动后, 高压 CO₂ 气体通过释放管上的导流孔喷射出去, 从而实现煤体增透。

3 CO₂ 相变致裂效果分析

3.1 普通钻孔抽采效果分析

轿子山煤矿 M9 煤层普通抽采钻孔抽采瓦斯纯流量和浓度呈明显的规律性衰减。统计普通钻孔抽采瓦斯纯流量和瓦斯浓度(CH₄ 体积分数)变化曲线见图 4。

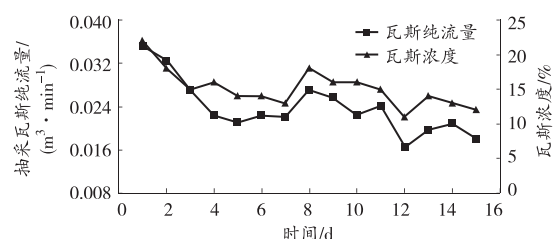


图 4 普通钻孔抽采瓦斯纯流量和瓦斯浓度变化曲线

由图4可以看出,普通抽采钻孔(抽采15 d)抽采瓦斯浓度最大为22%,平均为15.13%;抽采瓦斯纯流量最大为0.035 m³/min,平均为0.040 m³/min。

3.2 不同致裂方式的抽采效果分析

不同致裂方式主要包括一次起爆和延时起爆。延时起爆即采用2组致裂器并联方式,先起爆一组,间隔30 min左右再起爆另一组。试验过程中,在1-2#钻孔进行延时起爆试验,先起爆里段7根,再起爆外段5根,即第1次起爆里段7根,第2次起爆外段5根,起爆间隔时间为30 min;1-1#致裂孔安装传感器12根,一次起爆。致裂孔抽采瓦斯浓度、纯流量变化曲线见图5和图6。

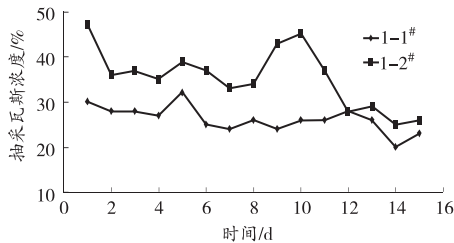


图5 第1组致裂孔抽采瓦斯浓度变化曲线

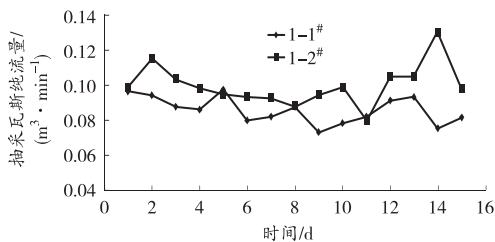


图6 第1组致裂孔抽采瓦斯纯流量变化曲线

由图5和图6可见,1-2#钻孔(抽采15 d)最大瓦斯浓度47.0%,平均35.4%;最大抽采瓦斯纯流量0.128 m³/min,平均0.10 m³/min。1-1#钻孔(抽采15 d)最大瓦斯浓度32.0%,平均26.2%;最大抽采瓦斯纯流量0.096 m³/min,平均0.079 m³/min。1-2#致裂孔的平均抽采瓦斯浓度和纯量均高于1-1#孔。结果表明,对于低渗透性煤层,采用延时起爆致裂时,第1次致裂在钻孔周围一定范围形成微小裂隙,第2次致裂时高压气体沿形成的裂隙向前传播,扩展裂隙的长度,在更大范围内形成新的裂隙网络。

3.3 不同布孔方式的抽采效果分析

不同布置方式主要包括致裂孔周边无辅助孔、有辅助孔的2种布置方式。对于有辅助孔的,致裂前未对辅助孔进行抽采,并采用阀门关闭辅助孔。其中,2-2#致裂孔两边布置有辅助孔。致裂孔抽采瓦斯浓度和纯流量变化曲线见图7和图8。

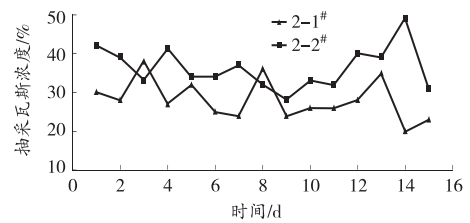


图7 第2组致裂孔抽采瓦斯浓度变化曲线

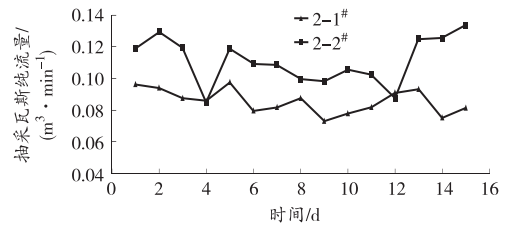


图8 第2组致裂孔抽采瓦斯纯流量变化曲线

由图7和图8可以看出,2-2#钻孔(抽采15 d)最大瓦斯浓度49.0%,平均36.3%;最大抽采瓦斯纯流量0.133 m³/min,平均0.111 m³/min。2-1#钻孔(抽采15 d)最大瓦斯浓度38.0%,平均28.1%;最大抽采瓦斯纯流量0.098 m³/min,平均0.086 m³/min。2-2#致裂孔(联抽15 d)平均抽采瓦斯浓度、纯流量均高于2-1#致裂孔。结果表明,2-2#钻孔致裂前在两边施工了辅助钻孔,致裂时周边辅助钻孔为高压CO₂气体提供了自由面,为高压气体向周边传播减小了阻力。

4 结论

1) CO₂相变致裂后钻孔抽采流量远高于未采取增透措施的普通抽采孔,致裂后抽采孔抽采瓦斯纯流量是普通抽采孔的2.0~2.8倍,抽采瓦斯浓度提高1.7~2.4倍。

2) 在煤层赋存稳定的情况下,CO₂致裂增透延时起爆钻孔有利于裂隙延展,增大裂隙范围,从而提高致裂孔瓦斯抽采效果。

3) 致裂前在距离致裂孔一定位置施工辅助孔,为高压CO₂气体提供了自由面,使其向周边传播减小了阻力,有利于增大钻孔的抽采范围,从而提高抽采效果。

参考文献:

[1] 洪紫杰,王成,熊祖强.高瓦斯低透气性煤层CO₂相变致裂增透技术研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(1):39-44.
[2] 衡献伟,李绍泉,李青松.贵州煤与瓦斯特征及影响因素研究[J].煤矿安全,2013,44(10):7-8.

(下转第56页)

159.0 mg/m³,降尘效率分别为 81.10% 和 76.90%,配合长压短抽通风除尘措施后可再将总粉尘和呼吸性粉尘降低至 63.4 mg/m³ 和 45.9 mg/m³,综合降尘效率分别为 97.85% 和 93.32%。相对于改造前 57.03% 和 51.83% 的单项降尘效率和 94.39% 和 91.03% 的综合降尘效率,均有了显著提高。

3) 根据王家岭煤矿综掘工作面条件,采用机载喷雾泵的配套方式,选用了 BP25/8J 型掘进机机载喷雾泵(电驱动)提供高压水,利用综掘机提供 1 140 V 电源,利用静压水提供水源,并通过加装精密过滤器避免管路堵塞,通过加装压力传感器实现泵站的缺水保护,再利用电源控制按钮提高司机对泵站的操作性,最终能够确保系统正常可靠、安全高效地运行。

参考文献:

[1] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40 a[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1815-1820.

[2] 杨胜强. 粉尘防治理论及技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.

[3] 陆新晓, 王德明, 任万新, 等. 掘进面产尘机理及粉尘迁移规律的研究分析[J]. 煤矿开采, 2012, 17(5): 19-22.

[4] 马威, 刘勇, 陈芳. 难湿润煤层快速综掘工作面粉尘防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 70-73.

[5] 马威. 综掘工作面分步立体式控降尘系统优化[J]. 煤矿安全, 2015, 46(2): 82-84.

[6] 张设计, 刘勇, 周润金, 等. 掘进工作面粉尘分布规律及

控降尘工艺技术试验[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(2): 30-33.

[7] 聂文, 程卫民, 周刚, 等. 掘进机外喷雾负压二次降尘装置的研制与应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2446-2452.

[8] 聂文, 程卫民, 周刚, 等. 掘进面喷雾雾化粒度受风流扰动影响实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 378-383.

[9] 常建兵, 刘涛, 胥奎, 等. 综掘工作面粉尘防治技术研究[J]. 煤炭工程, 2007(3): 53-55.

[10] 隋金君, 胥奎. 湿式旋流除尘中呼吸性粉尘除尘效率与风速关系的探讨[J]. 矿业安全与环保, 2004, 31(6): 34-35.

[11] 刘刚, 昝奎, 张仁贵. 综掘工作面除尘技术研究与应用[J]. 工业安全与环保, 2012, 33(2): 16-18.

[12] 程卫民, 张清涛, 刘中胜, 等. 综掘面粉尘场数值模拟及除尘系统研制与实践[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(10): 39-44.

[13] 郭振新, 刘守华, 汪春梅, 等. 综合控、除尘技术在综掘工作面的研究与应用[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(3): 47-49.

[14] 王晓珍, 蒋仲安, 王善文, 等. 煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 387-390.

[15] 周茂普. 综掘工作面通风除尘系统研发与应用[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(10): 1-3.

(责任编辑: 陈玉涛)

(上接第 51 页)

[3] 马帅, 李绍泉, 秦震东, 等. 贵州煤与瓦斯突出事故规律性研究[J]. 洁净煤技术, 2011(6): 89-91.

[4] 衡献伟, 张书金, 韩真理, 等. 贵州煤矿区煤层突出危险程度评价技术及保护层选择[J]. 煤炭技术, 2016, 35(8): 194-196.

[5] 韩真理, 张书金, 衡献伟, 等. 贵州煤矿煤与瓦斯突出防治技术体系研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11): 9-12.

[6] 王兆丰, 孙小明, 陆庭侃. 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): 2-5.

[7] 龚敏, 黄毅华, 王德胜, 等. 松软煤层深孔预裂爆破力学特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1674-1681.

[8] 徐幼平, 林柏泉, 翟成, 等. 定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2011,

21(7): 104-110.

[9] 胡国忠, 许家林, 王宏图, 等. 低渗透煤与瓦斯的固-气动态耦合模型及数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 1-6.

[10] 石亮, 殷卫锋, 王滨. 基于 CO₂ 爆破致裂透的瓦斯治理技术与实践[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 72-75.

[11] 白志鹏. 常村煤矿液态 CO₂ 循环爆破致裂增透技术研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(4): 184-187.

[12] 杜锋, 王公达, 蒋一峰, 等. 高压甲烷与二氧化碳吸附对煤体官能团特性的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(5): 1-4.

[13] 齐黎明, 赵嵘, 梁为, 等. 不同流场条件下的煤样瓦斯解吸规律实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(2): 5-8.

(责任编辑: 陈玉涛)