

doi:10.13301/j.cnki.ct.2021.02.031

寺家庄高瓦斯工作面液态 CO₂ 预裂增透研究

周建斌

(阳泉煤业(集团)有限责任公司, 山西 阳泉 045000)

摘要: 寺家庄煤矿是阳煤集团的主力矿井,但煤层瓦斯含量高,透气性差。为提高煤层的透气性,增大煤层间瓦斯抽放效率,开发液态 CO₂ 预裂增透技术,阐述了在寺家庄矿井进行的3次试验。试验结果显示,液态 CO₂ 增透技术对长时间抽采区域的煤层增透和瓦斯置换有明显增强效果;在保证瓦斯开采效率与最少工程量的前提下,抽采钻孔和预裂钻孔的间距应在10~15 m;CO₂ 预裂增透对减轻煤与瓦斯突出现象亦是明显。

关键词: 液态 CO₂ 预裂爆破; 预裂半径; 区域消突

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008 - 8725(2021)02 - 112 - 05

Study on Pre-cracking and Anti-reflection of Liquid CO₂ in Sijiazhuang High Gas Working Face

ZHOU Jian-bin

(Yangquan Coal Industry (Group) Co., Ltd., Yangquan 045000, China)

Abstract: Sijiazhuang coal mine is the main mine of Yangmei group, but the coal seam has high gas content and poor air permeability. In order to improve the gas permeability of coal seams, increase the efficiency of gas drainage between coal seams, and develop liquid CO₂ pre-cracking anti-reflection technology, describes three tests conducted in Sijiazhuang mine. The test results show that the liquid CO₂ anti-reflection technology has a significant effect on coal seam anti-reflection and gas replacement in long-term drainage areas; under the premise of ensuring the efficiency of gas mining and the minimum engineering volume, the drilling and pre-cracking drilling, the spacing should be between 10 and 15 meters; CO₂ pre-cracking and anti-reflection is also obvious for reducing coal and gas outbursts.

Key words: liquid CO₂ pre-splitting blasting; pre-splitting radius; area elimination

0 引言

我国是一个煤炭资源大国和煤层气资源大国,煤炭是国家的第一能源,在未来相当长的时期内,以煤炭为主的能源供应格局依然不会改变。同时煤层气(矿井瓦斯)又是一种优质的清洁能源,但绝大部分的煤层气都随着煤炭开采被排放到大气中去,不仅浪费资源、污染环境而且在煤层开采时会导致煤与瓦斯突出现象发生。煤与瓦斯突出是矿井下最严重的灾害之一,当含有瓦斯的煤层被揭露时,煤体向巷道喷出大量瓦斯及碎煤,喷出的瓦斯和粉煤流会带有暴风般的性质,对人员及开采工作都有严重的危害。我国95%以上的高瓦斯和突出矿井煤层属于低渗透煤层,且2/3的煤炭资源处于千米以下,随着开采深度的增加,煤层的透气性大大降低,煤与瓦斯突出现象愈加严重。高效开发与利用煤层气既能解决我国能源不足,又能从根本上消除煤炭开采造成的瓦斯灾害和大量瓦斯排放造成的环境污染问题,对加速传统能源系统向环境无害化可持续发

展模式的转化进程,具有重大的经济和社会效益。

传统瓦斯抽采是利用水力对煤层进行压裂后再抽采,但水力压裂容易出现糊孔、水体排出困难等问题。CO₂ 预裂增透利用物理变化,将 CO₂ 作为增透和驱替介质,爆破过程中不会产生水和有害气体,同时还可以提高瓦斯的抽采效率、降低抽采成本,是一种高效、经济、适用范围广的增透新方法。在碳基吸附剂中,CO₂ 具有更强的吸附能力,且比甲烷、氮气扩散得更快,因此 CO₂ 适用于甲烷回收。2002年美国 AMOCO 公司采用五点注气法开发煤层气取得了良好的采收效果。国内学者依据传统的 CO₂/CH₄ 吸附解吸试验,建立了煤层甲烷运移耦合模型和系统的注气增产机理,吴世跃等人从理论上研究了注气开采煤层增产机制的可行性;唐书恒等人在 N₂ 和 CO₂ 等温附和试验中证实了 CO₂ 更高效的驱替和置换效果;煤层气驱替数值模拟发现合理安排注气钻孔可获得较高的采收率,王兆丰等通过试验阐述了液态 CO₂ 相变致裂的优势,并对试验现场的布孔参数进行了优化;

Hui Huang Fang 等通过数值模拟,分析了驱替压力、CO₂ 浓度及有效半径等因素对抽采效率的影响,为后续实践提供参考依据;霍中刚等在矿井中开展了规模不等的试验,发现采用二氧化碳致裂器在煤层中进行深孔预裂爆破,可促进煤层孔隙系统发育,提高煤层的透气性,达到强化抽采瓦斯的目的。

此次阳泉煤业联合山西瑞气临科贸有限公司共同开展 CO₂ 预裂增透抽采瓦斯快速掘进技术试验研究,旨在研究 CO₂ 预裂增透及置换驱替瓦斯的效果以及检验 CO₂ 预裂的消突效果,探明预裂的影响范围和试验矿井的预裂半径,制定适合试验矿井的预裂钻孔、抽采钻孔的布孔方式,为矿井消突以及快速掘进工作提供技术支持。

1 CO₂ 预裂增透抽采瓦斯技术机理

CO₂ 预裂增透是一种利用 CO₂ 作为增透介质,基于瓦斯抽采的一种煤层预裂方法,其技术原理:(1)通过液态 CO₂ 在超过 31 °C 的温度下,100~300 ms 内汽化,释放 60~200 MPa 的压力对煤体造成“爆轰”冲击,增大煤层的裂隙,提高煤层的透气性;(2)煤对 CO₂ 的吸附力比对 CH₄ 的吸附力强,通过高压注入 CO₂ 可部分挤占 CH₄ 的吸附位,从而将煤体中的 CH₄ 置换出来,从而提高瓦斯的抽采效率。

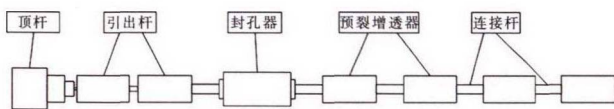


图 1 预裂增透装备组

CO₂ 预裂装置组件由可调式顶杆、引出杆、水压封口器、连接件、预裂装置组成,如图 1 所示。本次所采用的预裂装置的释压时间为 30~50 ms,释放的初始压力是 60~200 MPa,其工作原理:预裂装置管腔内预先安设并固定化学发热材料装置,然后将液

态的 CO₂ 注入管腔内,通过矿用发炮器激活装置内的化学发热材料,对腔内的液态 CO₂ 进行加热,使其受热汽化膨胀,待达到预设压力后,卸压片自动打开,高压 CO₂ 气体瞬间释放,产生的高压波对煤体产生预裂作用,最终达到增透目的。

2 矿井概况

寺家庄矿区是阳泉煤业下属矿区之一,本次试验在寺家庄矿区 15# 煤层进行。15# 煤层全区稳定可采,最大厚度达 7.65 m,平均厚度 5.48 m,煤层透气系数为 0.175 m²/(MPa²·d),钻孔百米流量衰减系数为 0.041 7 d⁻¹,属于可抽放、不易自燃(Ⅲ类)、弱煤尘爆炸性煤层。2013 年度矿井瓦斯等级鉴定结果显示,寺家庄矿井绝对瓦斯涌出量 305.01 m³/min,抽放量 256.63 m³/min,矿井风排瓦斯量 48.38 m³/min,矿井抽放率 84.1%。回采工作面瓦斯涌出量 181.5 m³/min,抽放量 166.41 m³/min,回采工作面瓦斯抽采率 91.7%。

矿井在建期间曾发生过 2 次压出型煤与瓦斯突出事件,经鉴定,寺家庄煤矿为煤与瓦斯突出矿井,15# 煤层为煤与瓦斯突出煤层。煤层透气性差,瓦斯抽采效率低,对钻孔要求难度高。钻孔密度小,会导致抽采量无法达到要求;钻孔密度大,钻孔松动,相邻钻孔易打穿,导致漏气更加严重。CO₂ 预裂增透技术作为一种操作简单、安全性高、冷爆破能量释放技术,可有效提高瓦斯抽采效率。

3 试验方案

本次试验根据 15# 煤层的实际情况设置 3 个试验,试验安排见表 1。试验要根据收集的瓦斯抽采浓度、瓦斯含量、压力等参数,考察 CO₂ 预裂对煤层的增透效果以及 15# 煤层的预裂增透开采参数,为煤层的高效、安全开采提供参考依据。

表 1 试验目的及钻孔数量表

试验名称	试验目的	钻孔数量	数据收集
增透试验	检验 CO ₂ 预裂对长时间抽采区域的增透效果	2 个预裂钻孔/45 个抽采钻孔	瓦斯浓度、瓦斯流量、抽采负压
钻孔布置试验	确定预裂孔与抽采孔的合理布置、考察煤层预裂半径	2 个预裂钻孔/24 个抽采钻孔	瓦斯浓度、瓦斯流量、抽采负压
消突及掘进效率检验试验	区域消突效果检验、掘进效率分析	11 个预裂钻孔	瓦斯含量、瓦斯压力

3.1 增透试验

一次试验场地原有 45 个钻孔,且已经抽采了近 100 d,瓦斯浓度和流量基本趋于稳定。试验在原有基础上再施工 1#、2# 2 个预裂钻孔,孔深 90 m,孔直径约 φ100 mm,两孔相距 7 m。1# 孔先安装预裂器,进行封孔打压,预裂后查看试验结果并拆除 1# 孔的预裂装置。2# 孔同样处理。记录预裂前后 11 d 的瓦斯浓度、瓦斯流量及抽采负压数据。通过试验可以检验 CO₂ 预裂能否在长时间抽采区域提高瓦斯抽

采量,如图 2 所示。

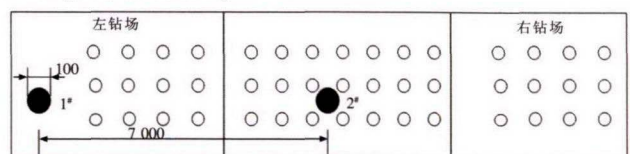


图 2 增透检验试验工作面预裂、抽采钻孔布置图

3.2 钻孔布置试验

在左右钻场分别施工 3#、4# 预裂孔,孔深 60 m。试验前同时安装 2 个钻孔预裂器,先对 3# 钻孔进行

打压,预裂后查看预裂情况,拆除预裂装置。4#孔同理。预裂后施工抽采钻孔,左钻场施工 11 个,右钻场施工 2 个,预裂孔和抽采孔位置如图 3 所示。收集预裂前后 11 d 左、右钻场抽采钻孔的瓦斯浓度、流量及抽采负压。试验通过对预裂钻孔与抽采钻孔不同布置方式的考察,确定预裂孔与抽采孔的合理位置布置以及考察 15# 煤层的预裂半径。

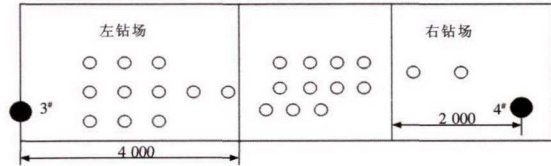


图 3 钻孔布置试验工作面预裂、抽采钻孔布置

3.3 消突及掘进效率检验试验

检验 CO₂ 预裂增透的消突效果,需测试巷道内瓦斯浓度、压力等参数。试验设置 11 个预裂钻孔(中心钻场设置 1 个,左、右钻场各布置 5 个),预裂孔分布如图 4 所示,钻孔设计深度为 90 m。先施工左、右场钻孔,再施工中心场钻孔。每施工完成一个钻孔都要将其封孔,并及时连接抽放。11 个钻孔分别预裂,预裂后立即进行消突检验,记录瓦斯含量、瓦斯压力数据。

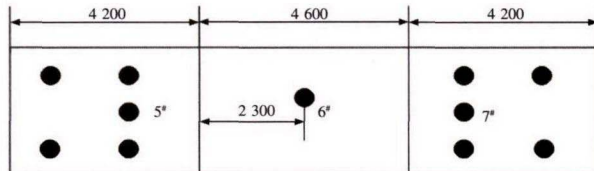


图 4 消突试验工作面预裂钻孔布置图

打孔人员需严格按照施工要求进行施工,为防止塌孔,每打成一个预裂钻孔,都要及时进行埋管预裂,预裂后要卸压处理,确认安全后才可取出增透器。随后要及时对钻孔进行封孔,观测人员定期测量相应参数。

4 试验结果分析

4.1 增透试验结果

在试验之前,第 1 次试验的工作面已施工了 45 个钻孔,且已经预抽近 100 d,钻场瓦斯抽采浓度、流量趋于稳定,并维持在一个较低水平,说明瓦斯浓度和流量已衰减至最低值,如图 5 所示。CO₂ 预裂后,瓦斯平均浓度为 17.4%,比预裂前的 3.2%提高了 4.4 倍(见图 5);瓦斯平均流量由预裂前的 0.042 m³/min,提高到了 0.14 m³/min,是预裂前的 2.3 倍,见图 6;预裂前后的抽采负压相比,没有明显变化,见图 7,说明在瓦斯已抽采区内实施 CO₂ 预裂增透,仍然会有较好的增透效果。在对 2# 孔进行预裂时,预裂震动

将 1# 孔相邻瓦斯抽采孔联通,影响了预裂效果。尽管如此,通过现场试验证明,CO₂ 预裂增透在煤层已充分抽采的情况下增透和置换煤层瓦斯效果明显。

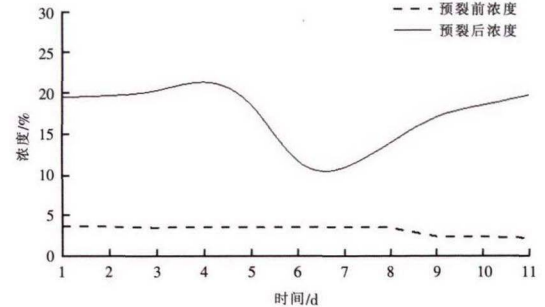


图 5 预裂前后瓦斯浓度对比

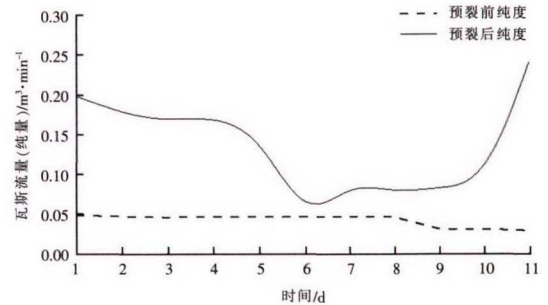


图 6 预裂前后流量对比

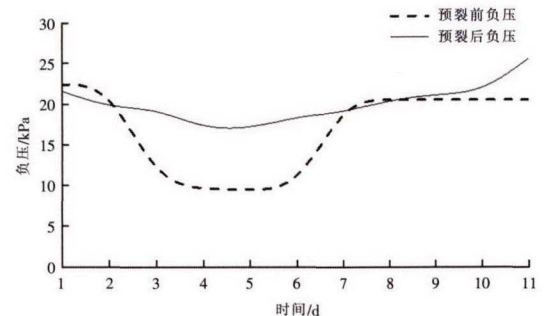


图 7 预裂前后负压对比

4.2 钻孔布置试验结果

试验收集左、右钻场的钻孔预裂前后各 11 d 的数据。左钻场的瓦斯流量 0.78 m³/min,右钻场的瓦斯流量 0.20 m³/min,平均 0.49 m³/min,是一次试验预裂后的瓦斯流量 0.14 m³/min 的 3.5 倍。说明先施工预裂孔,后施工抽采孔,比抽采一段时间后,再施工预裂孔效果要好。

6# 预裂孔的终孔位置与巷道左钻场轮廓线间距 40 m,左钻场 11 个抽采钻孔瓦斯平均浓度 11.4%,平均瓦斯流量 0.78 m³/min;7# 预裂孔终孔位置与巷道右钻场轮廓线间距 20 m,右钻场 2 个抽采钻孔平均瓦斯浓度 13.71%,瓦斯流量 0.21 m³/min。说明预裂孔与抽采孔间距越近瓦斯驱替效果越好,浓度越高,而钻孔截流面积越大(3# 孔有 11 个抽采钻孔,4# 孔有 2 个抽采钻孔)瓦斯流量越大,如图 8、图 9 所示。

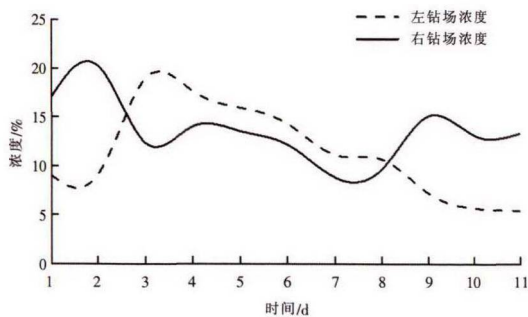


图8 试验区两帮瓦斯浓度

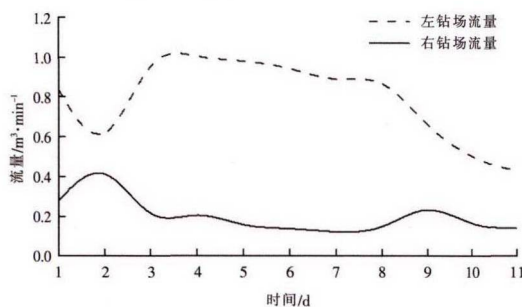


图9 试验区两帮瓦斯流量

试验区瓦斯平均浓度 12.53%比第1次试验区的瓦斯平均浓度 17.38%，低 30%。这个现象与瓦斯的抽采负压相关，说明瓦斯抽采负压应在一个合理范围内，负压越高，抽采浓度反而会下降，见图 10，抽采负压应在 13 kPa 左右为宜。

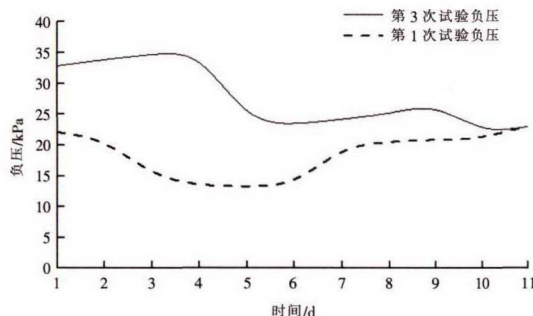


图10 第1次试验与第3次试验抽采负压对比

试验证明寺家庄 15# 煤的预裂半径能够达到 30~50 m。以预裂钻孔中间点为基线，预裂钻孔与抽采钻孔的间距应保持在 10~15 m，且在平面上不要交叉，可确保预裂压力不被迅速释放。预裂后，保证适当的抽采钻孔，可以提高瓦斯抽采浓度和流量，同时可以减少钻孔工程量。

4.3 消突试验结果

(1) 区域消突效果检验

选取预裂前 3 个钻孔、不同深度的所采集的 9 组数据，如表 2 所示，其中，最大瓦斯含量 12.2 m³/t，最小含量 7.63 m³/t，平均含量 9.46 m³/t。试验后进行区域消突效果检验，选取 3 个钻孔、不同深度采集的 11 组数据，最大瓦斯含量 6.92 m³/t，最小含量 6.05 m³/t，

平均含量 6.53 m³/t，下降了 30.1%。钻孔中最大瓦斯压力由 0.35 MPa 下降到 0.18 MPa，下降了 48.6%。表 3 列出了预裂孔中瓦斯含量最高的钻孔预裂前后瓦斯含量、瓦斯压力、风排瓦斯量对比，数值变化的主要原因还是 CO₂ 预裂驱替 CH₄，说明 CO₂ 驱替消突效果明显。

表2 取样钻孔预裂前后瓦斯含量

取样孔号	取样深度/m	预裂前含量/m ³ ·t ⁻¹	取样孔号	取样深度/m	预裂后含量/m ³ ·t ⁻¹
5#	30	8.14	5#	20	6.1
	60	10.4		40	6.66
	90	10.45		6#	25
6#	30	9.37	6#	35	6.19
	60	8.21		60	6.05
	90	7.71		7#	20
7#	30	7.63	7#	40	6.60
	60	11.04		50	6.30
	90	12.2		60	6.58
				70	6.71
平均		9.46	85	6.92	6.53

表3 预裂试验前、后最高瓦斯含量、瓦斯压力、风排瓦斯量对比

试验前					试验前				
深/m	瓦斯含量/m ³ ·t ⁻¹	瓦斯压力/MPa	瓦斯浓度/%	风排瓦斯量/m ³ ·min ⁻¹	深/m	瓦斯含量/m ³ ·t ⁻¹	瓦斯压力/MPa	瓦斯浓度/%	风排瓦斯量/m ³ ·min ⁻¹
90	12.20	0.335	0.22	1.38	85	6.92	0.193	0.21	1.61

(2) 掘进效率分析

① 钻孔工程量 常规区域预抽每一个循环施工预抽孔 45 个，设计平均每个钻孔 90 m，共计 4 050 m，施工时间 65 d；CO₂ 预裂钻孔 1 个，抽采钻孔 10 个，平均每个钻孔 90 m，共计 990 m。施工时间 15 d。

② 预抽时间 常规区域预抽每一个循环预抽时间 108 d；CO₂ 预裂预抽时间为 15 d。

③ 局部措施 常规区域预抽平均每一循环需采取的局部措施时间为 2 d；CO₂ 预裂局部措施平均每一循环也为 2 d。

④ 掘进效率对比 常规区域预抽钻孔施工时间 65 d，预抽时间 108 d，局部措施时间 12 d，掘进 21 d，掘进进尺 70 m，月掘进 10.1 m；CO₂ 预裂钻孔施工时间 15 d，预抽时间 15 d，局部措施时间 6 d，掘进 10 d，掘进进尺 40 m，月掘进 26.1 m。

CO₂ 预裂与常规区域预抽措施钻、抽、局部措施及掘进效率进行对比如表 4 所示，相比于常规措施 CO₂ 预裂掘进效率提高了 1.6 倍。

表4 CO₂ 预裂与常规措施区域预抽钻、抽、局部措施、掘进效率对比表

防突措施	孔深/m	钻孔数/个	钻孔施工/d	抽采时间/d	局部措施/d	掘进/d	掘进进尺/m
常规区域	90	45	65	108	12	21	70
CO ₂ 预裂	90	11	15	15	6	10	40

5 结语

(1) CO₂ 通过“冲击、驱替、置换”作用,对长时间抽采的煤层增透效果明显,可以提高瓦斯的抽采率。

(2) 预裂钻孔与抽采钻孔的间距保持在 10~15 m,且在平面上不交叉,是合理的布置方式,这样布置可以保证预裂压力不被迅速地释放。

(3) 寺家庄 15# 煤层预裂和抽采钻孔的间距在 10~15 m,可保证预裂压力合理释放,抽采负压在 13 kPa 左右可保证合理的抽采效率。开采后适当保证抽采钻孔,既可以减少钻孔工程量,也能提高瓦斯抽采效率。

(4) 钻孔集中预裂后,钻孔瓦斯最大含量由 12.2 m³/t 降到 6.92 m³/t, 瓦斯平均含量由 9.46 m³/t 降到 6.53 m³/t, 最大瓦斯压力由 0.35 MPa 下降到 0.18 MPa,这都是 CO₂ 对瓦斯驱替置换的结果,可见 CO₂ 驱替瓦斯对减轻煤与瓦斯突出现象有明显效果。

(5) 与常规掘进方式相比,CO₂ 预裂钻孔大大减少了工程量,同时还提高掘进效率。

参考文献:

- [1] 胡莉娜. 能源革命背景下山西煤层气产业现状及发展对策研究[J]. 商业经济,2020(3):49-50.
- [2] 蔺金太,郭勇义,吴世跃. 煤层气注气开采中煤对不同气体的吸附作用[J]. 太原理工大学学报,2001(1):18-20.

- [3] 吴世跃,郭勇义. 关于注气开发煤层气机理的探讨[J]. 太原理工大学学报,2000(4):361-363.
- [4] 马志宏,郭勇义,吴世跃. 注入二氧化碳及氮气驱替煤层气机理的实验研究[J]. 太原理工大学学报,2001(4):335-338.
- [5] 唐书恒,杨起,汤达祯,等. 注气提高煤层甲烷采收率机理及实验研究[J]. 石油实验地质,2002(6):545-549.
- [6] 唐书恒,汤达祯,杨起. 二元气体等温吸附-解吸中气分的变化规律[J]. 中国矿业大学学报,2004(4):86-90.
- [7] 吴建光,叶建平,唐书恒. 注入 CO₂ 提高煤层气产能的可行性研究[J]. 高校地质学报,2004(3):463-467.
- [8] 张遂安,霍永忠,叶建平,等. 煤层气的置换解吸实验及机理探索[J]. 科学通报,2005(S1):143-146.
- [9] 王兆丰,周大超,李豪君,等. 液态 CO₂ 相变致裂二次增透技术[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2016,35(5):597-600.
- [10] 赵龙,王兆丰,孙矩正,等. 液态 CO₂ 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J]. 煤炭科学技术,2016,44(3):75-79.
- [11] 李豪君,王兆丰,陈喜恩,等. 液态 CO₂ 相变致裂技术在布孔参数优化中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2017,45(4):31-37,43.
- [12] 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.
- [13] 范迎春,霍中刚,姚永辉. 复杂条件下二氧化碳深孔预裂爆破增透技术[J]. 煤矿安全,2014,45(11):74-77.

作者简介:周建斌(1964-),山西平定人,高级工程师,硕士,从事煤矿开采、矿井瓦斯治理和安全等方面的研究,电子信箱:961837753@qq.com.

责任编辑:李富文 收稿日期:2020-08-12