

·试验研究·

# 二氧化碳气相压裂增透技术在兴峪煤业的应用

李晓瑞,李忠,郭有慧,李峰,张靖昊,刘英博

(晋能控股集团兴峪煤业有限责任公司,山西 阳泉 045100)

**摘要** 兴峪煤业为高瓦斯矿井,15504工作面存在煤层松软、透气性低和瓦斯抽采效果差等问题,提出采用二氧化碳气相压裂技术来改善煤层透气性。采用数值模拟和现场试验相结合的方法研究二氧化碳气相压裂技术对瓦斯抽采效果的影响。结果表明:相较于普通钻孔,相同抽采时间下气相压裂钻孔的瓦斯抽采压力下降更快,有效抽采半径更大;气相压裂孔的瓦斯抽采浓度始终高于普通钻孔,压裂孔最高瓦斯抽采浓度可以达到82%,抽采25 d后瓦斯抽采浓度仍能达到68%,压裂后并网集气瓦斯纯量提升84%,且气相压裂孔周边孔的瓦斯抽采浓度也显著提升,压裂后周边单孔瓦斯抽采浓度最高提升28%,有效改善了煤层透气性,提高低透煤层瓦斯抽采效率。

**关键词** 低透煤层;二氧化碳气相压裂;煤层增透;瓦斯抽采

**中图分类号**:TD712.6 **文献标识码**:B **文章编号**:1672-0652-(2025)03-0022-04

近年来,由于煤矿开采深度不断加大,所开采的煤层具有强吸附、低渗透、瓦斯含量大等特征,瓦斯抽采效率低已成为影响我国矿井安全生产的主要问题<sup>[1-2]</sup>。针对如何改善煤层透气性提高瓦斯抽采效率,相关学者们研发了水力压裂、二氧化碳气相压裂、深孔预裂爆破等一系列致裂增透技术<sup>[3-5]</sup>。其中水力压裂技术在较硬煤层增透工程中获得一定成效,但对于易发生塑性变形的松软煤层,效果并不理想;深孔预裂爆破在实际应用过程中危险性较高,如果操作不当会对巷道造成损坏,甚至会导致煤与瓦斯突出事故发生。二氧化碳气相压裂技术可以通过调整液态二氧化碳充装量、剪切片厚度和布孔方式来针对不同的井下条件进行致裂。而且二氧化碳相变的过程属于物理变化,相较于传统的炸药爆破更加安全可靠<sup>[6]</sup>。兴峪煤业15504工作面受地应力、瓦斯运移等多重动态因素影响,在瓦斯治理过程中存在瓦斯含量大、煤层透气性低和瓦斯抽采效果差等问题,因此,拟引进二氧化碳气相压裂技术对煤层致裂增透,以改善煤层透气性,提高抽采效率。

## 1 二氧化碳气相压裂原理

二氧化碳气相压裂技术是一种非炸药破岩技术<sup>[7]</sup>。二氧化碳气相压裂装置由充气头、药卷、储液管、剪切片和释放头等核心部分组成,见图1,该技术是通过向压裂杆中充入一定质量的液态二氧化碳,当需要起爆时通过起爆器使药卷发生化学反应,使压裂杆中温度快速上升,液态的二氧化碳受热迅速转变为气态,杆内瞬间产生巨大的膨胀能量,当压裂杆内由于液态二氧化碳汽化产生的气体压力超过剪切片的最大可承受压力时,剪切片破裂,气体通过释放头迅速释放<sup>[8]</sup>。二氧化碳气体作用于煤壁会产生动态应力波,使气相压裂孔的孔壁上产生大量初始裂隙,随后高压气体进入这些初始裂隙中使其进一步扩展,达到致裂煤岩体的效果<sup>[9]</sup>。

## 2 试验过程

### 2.1 工程概况

兴峪煤矿为高瓦斯矿井,目前主采15#煤层,总体为一北高南低的褶皱构造,煤层有波状起伏,倾角2°~7°,局部煤层倾角大于15°。该煤层的原始瓦斯

含量为  $8.46 \sim 10.89 \text{ m}^3/\text{t}$ , 回采工作面绝对瓦斯涌出量为  $23.6 \text{ m}^3/\text{min}$ , 具有瓦斯含量高、渗透率低的特点。所采的 15504 工作面布置示意图见图 2, 该工作面标高  $720 \sim 800 \text{ m}$ , 埋深  $321 \sim 444 \text{ m}$ , 煤层瓦斯含量为  $8.46 \text{ m}^3/\text{t}$ , 绝对瓦斯压力为  $0.23 \text{ MPa}$ 。

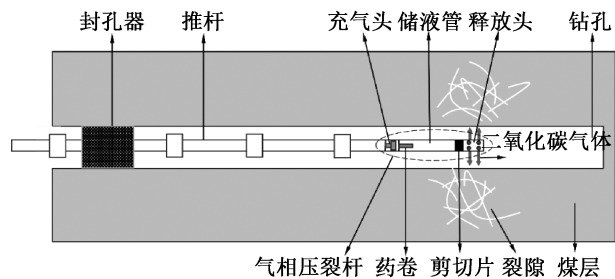


图 1 二氧化碳气相压裂装置结构示意图

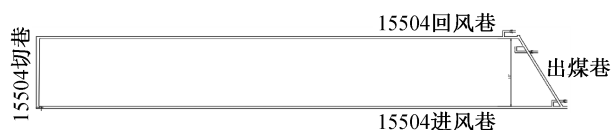


图 2 15504 工作面布置示意

## 2.2 试验流程

试验地点位于 15504 工作面回风巷, 15504 回风巷本煤层共布置顺层钻孔 18 个, 其中气相压裂孔 1 个, 其余 17 个钻孔为普通抽采孔, 孔间距为  $3 \text{ m}$ , 钻孔孔径为  $115 \text{ mm}$ , 施工倾角为  $-3^\circ$ , 布孔方案见图 3。

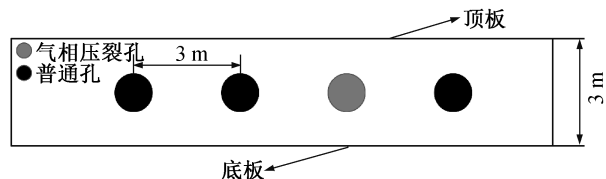


图 3 布孔方案

气相压裂孔为  $192^\#$  钻孔, 设计压裂方案: 压裂区段为孔内  $15 \sim 75 \text{ m}$ , 前方预留  $25 \text{ m}$  的缓冲区, 封孔深度为  $15 \text{ m}$ 。压裂杆共 40 根, 每根长度为  $1.5 \text{ m}$ , 每根压裂杆充装的液态二氧化碳质量为  $1 \text{ kg}$ 。剪切片耐压强度为  $190 \text{ MPa}$ , 封孔器注水压力  $8 \text{ MPa}$ 。

具体试验流程如下:

1) 采用钻头开孔钻进至  $100 \text{ m}$ 。为保证气相压裂设备能够顺利送入压裂孔中, 钻进完成后马上进行洗孔。

2) 使用钻机将气相压裂杆逐根送入钻孔内。

3) 压裂杆全部送入后, 将注水封孔胶囊与压裂杆连接, 推入钻孔深度  $15 \text{ m}$  处, 使用手压泵给封孔器注水, 注水压力达到  $8 \text{ MPa}$  时停止注水。

4) 准备工作完成后使用起爆器起爆, 起爆  $30 \text{ min}$  后撤出孔内压裂设备。

## 3 数值模拟

二氧化碳气相压裂的致裂压力与气相压裂孔的钻孔直径是影响致裂增透效果的重要因素。为了验证气相压裂参数的有效性, 运用 COMSOL 软件模拟对比气相压裂孔与普通孔的抽采效果, 预计气相压裂增透效果。

### 3.1 模型建立与参数设置

基于兴峪煤业 15504 工作面设计的模型长  $100 \text{ m}$ , 宽  $20 \text{ m}$ , 高度  $6 \text{ m}$ , 在该模型的中心位置布置钻孔, 钻孔的开孔直径为  $115 \text{ mm}$ 。该模型瓦斯渗流场的边界条件设定为: 模型外表面均为无流动边界, 瓦斯流动在该模型内部进行, 钻孔的抽采负压为  $15 \text{ kPa}$ 。该模型应力场的边界条件设定为: 模型上方施加  $15 \text{ MPa}$  的应力边界条件, 煤层底部为固定约束, 钻孔开孔平面为自由边界, 其余为辊支撑。为了更好地分析瓦斯压力变化数据, 在该模型中添加一分析截线, 位置见图 4, 距离开孔平面距离为  $10 \text{ m}$ 。模型的主要物理参数见表 1。

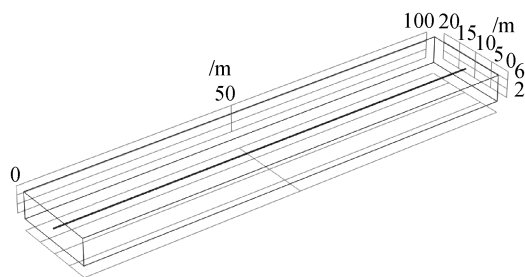


图 4 分析截线位置

表 1 模型参数

名称	取值	名称	取值
煤体密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 470	煤体泊松比	0.33
煤体初始孔隙率	0.031 8	煤体杨氏模量/MPa	2 713
煤体初始渗透率/ $\text{m}^2$	$0.95 \times 10^{-16}$	标准大气压/Pa	$1.01 \times 10^5$
煤体瓦斯初始压力/MPa	0.23	Biot-willis 系数	0.801

### 3.2 模拟结果分析

图 5 是普通钻孔以  $15 \text{ kPa}$  的抽采负压抽采  $180 \text{ d}$  煤层瓦斯压力变化模拟结果。从图 5 可以看出, 随着抽采时间的变化, 钻孔周围瓦斯压力开始下降, 且距离钻孔越近瓦斯压力下降越快, 瓦斯压力越小。随着抽采时间的增加瓦斯压力下降范围增大, 但是瓦斯压力下降速度较慢。随着距压裂钻孔位置的

不断增加,瓦斯压力逐步增大,煤层瓦斯压力与距钻孔中心的距离呈正相关关系。

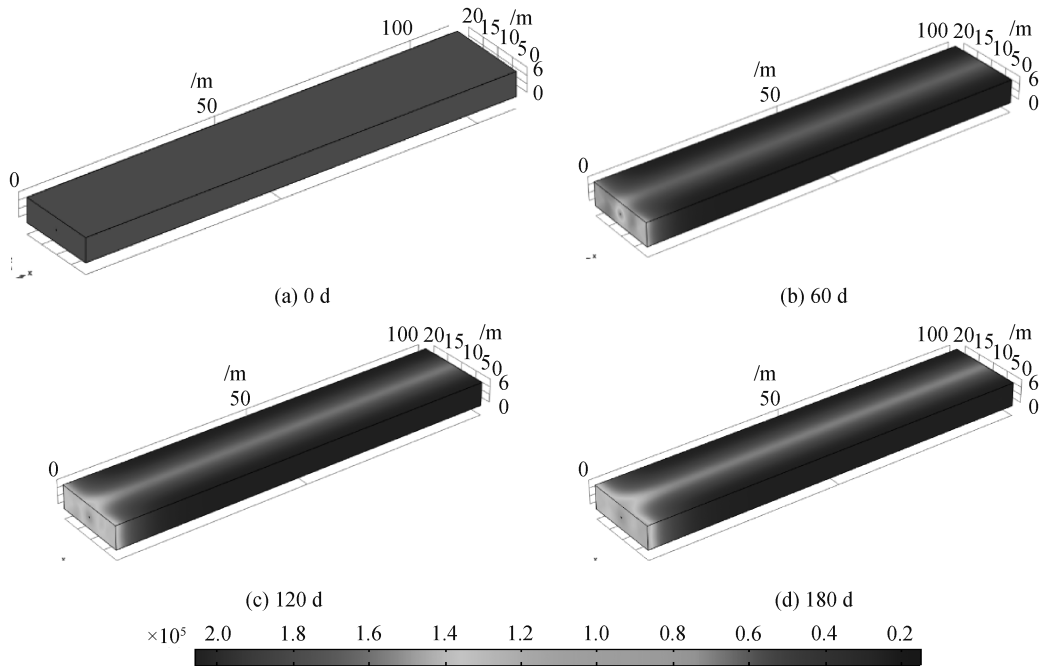


图 5 普通钻孔周围不同时刻的瓦斯压力分布

图 6 是经 190 MPa 的压力压裂后,以 15 kPa 的抽采负压进行抽采的煤层瓦斯压力变化模拟结果。瓦斯在抽采负压作用下进入钻孔中,在钻孔附近形成瓦斯低压区,随着抽采时间的延长,钻孔周围瓦斯压力不断降低,瓦斯低压区域范围逐渐增加。从图 6 可以看出,相较于正常抽采的钻孔,经过气相压裂后钻孔周围的瓦斯压力下降速度明显加快,钻孔周围瓦斯压力下降范围显著增大。图 7 为抽采 180 d 后分析截线上的瓦斯压力分布。从图 7 可以看出,与普通钻孔相比,压裂

钻孔的瓦斯压力始终更低,煤层瓦斯压力与距钻孔中心的距离呈正相关关系。主要是因为经气相压裂后煤层透气性显著提高,煤体裂隙增加,为瓦斯运移提供了有利通道,瓦斯抽采效率提高。通过对比两种模拟结果可以发现,以 190 MPa 的气体压力,115 mm 钻孔直径的条件下进行气相压裂可以有效实现对煤体致裂增透,强化煤层瓦斯抽采效果,增大抽采半径。所以开展现场试验时气相压裂孔的钻孔直径设定为 115 mm,二氧化碳压裂杆的释放压力设定为 190 MPa.

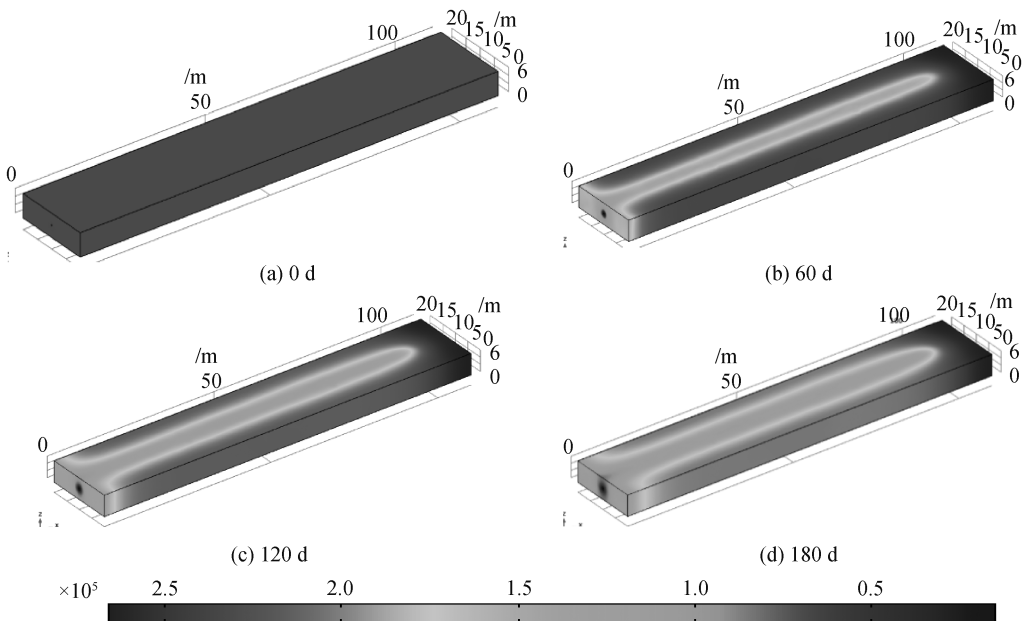


图 6 气相压裂钻孔周围不同时刻的瓦斯压力分布

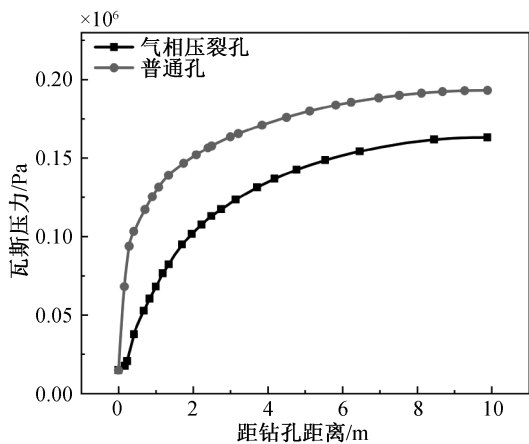


图 7 抽采 180 d 后分析截线瓦斯压力分布

### 4 现场应用效果分析

#### 4.1 气相压裂钻孔提浓效果考察

为考察二氧化碳气相压裂技术对瓦斯抽采效果的影响,对气相压裂孔和普通钻孔的瓦斯抽采浓度和并网后的集气瓦斯纯量进行检测,数据分别见图 8, 9. 由图 8 可知,经过二氧化碳气相压裂后本煤层压裂钻孔单孔抽采浓度始终高于普通钻孔,在抽采第 3 天后达到最大瓦斯抽采浓度 82%. 抽采过程中气相压裂孔的瓦斯抽采浓度出现了小幅衰减,最大衰减浓度达到 8%,但是瓦斯抽采浓度会很快回升,后趋于稳定,整个监测过程中气相压裂孔的瓦斯抽采浓度始终处于较高水平. 由图 9 可知,集气瓦斯纯量由  $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$  增长到  $0.11 \text{ m}^3/\text{min}$  增涨了 84%,且纯量长期维持在  $0.09 \sim 0.14 \text{ m}^3/\text{min}$ .

抽采浓度与集气瓦斯纯量增加的内在机理主要是在高压二氧化碳气体作用下煤体宏观裂隙增加,为煤体瓦斯运移提供了有利通道,提高了煤层瓦斯运移速度;气相压裂后造成煤层应力重新分布,形成煤层卸压带,促使煤体内的原生闭合裂隙再次打开,使得煤体内甲烷吸附解析动态平衡条件破坏,甲烷大量脱

附解析及扩散,在压差作用下向煤体裂隙通道运移,使瓦斯抽采浓度提高.

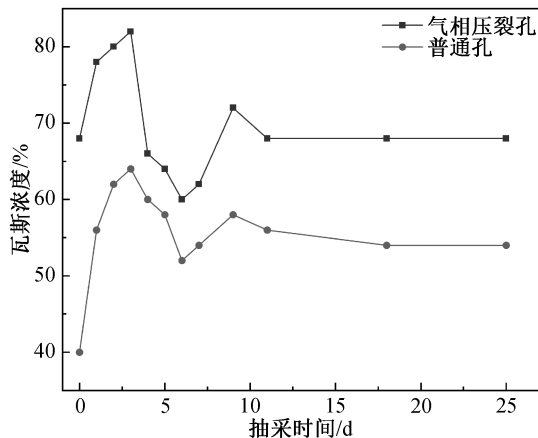


图 8 压裂钻孔和普通钻孔瓦斯抽采浓度对比

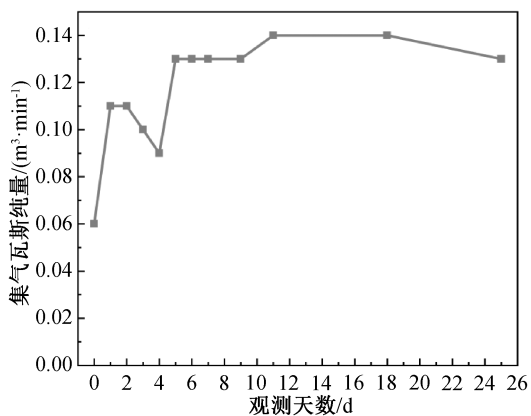
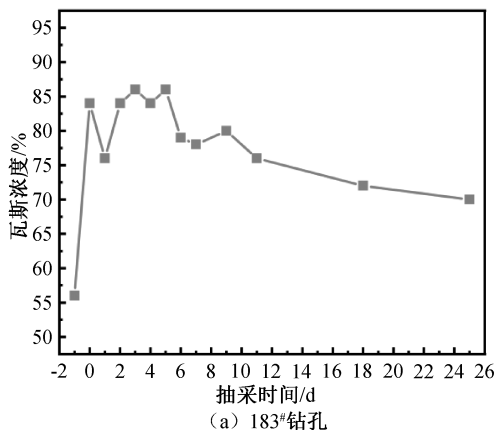


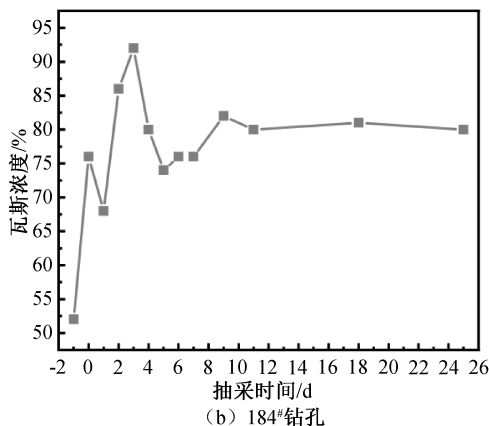
图 9 集气瓦斯纯量

#### 4.2 周边钻孔提浓效果考察

对气相压裂孔周边孔 183# 和 184# 的瓦斯抽采数据进行统计分析,结果见图 10. 其中 183# 的瓦斯浓度由 56% 增长到 84%, 相对提升量可以达到 50%; 184# 压裂后瓦斯抽采浓度提升 22%, 瓦斯浓度相对提升量为 46.15%. 对周边钻孔的瓦斯抽采浓度进行 25 d 的观测,两个钻孔的瓦斯抽采浓度均高于 65%.



(a) 183# 钻孔



(b) 184# 钻孔

图 10 周边钻孔瓦斯抽采浓度随时间变化曲线

(下转第 30 页)

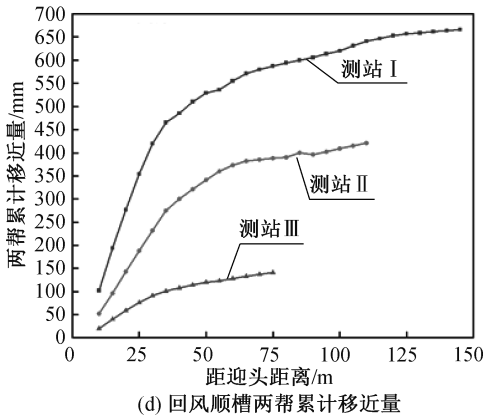


图 7 现场实测数据

### 5 结 论

通过分析五举煤矿 13207 工作面回采巷道变形破坏模式和影响因素,揭示了深埋三软倾斜煤层回采巷道围岩变形机理,提出了深埋三软倾斜煤层回采巷道围岩控制技术思路:“锚网索喷+底角锚杆联合支护”,实现了首采 13207 工作面回采巷道围岩稳定性的有效控制,实现了两顺槽支护施工、支护材料的规范化、标准化,减少了巷道返修次数及材料消耗,降本增效。

### 参 考 文 献

[1] 孙俊彦. 深部软岩巷道围岩稳定性控制技术[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(6): 21-25.  
 [2] 王 健, 甄 文. 煤矿软岩治理技术研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44(3): 115-117.

(上接第 25 页)

原因主要是二氧化碳气相压裂过程中会产生高压冲击波导致煤层产生主裂缝和次生裂缝,这些裂缝不仅限于压裂孔附近,还会扩展到周边区域,裂缝的形成使得煤层内部原本孤立的孔裂隙相互连通,形成更加复杂的裂隙网络,增加了煤层透气性,使得瓦斯更容易通过这些裂缝向周边钻孔迁移,提高了周边钻孔瓦斯抽采的效率和浓度。

### 5 结 语

1) 二氧化碳气相压裂增透抽采技术增透效果好、安全性高、可通过调整设备参数应用于不同地质条件。

2) COMSOL 数值模拟结果表明,设计压裂参数可以实现对煤层的有效致裂增透,经过 180 d 抽采后,气相压裂钻孔周围瓦斯压力明显低于普通钻孔。

3) 二氧化碳气相压裂钻孔与周边钻孔的瓦斯抽采浓度明显高于普通钻孔,压裂孔最大抽采浓度可以达到 82%,且压裂后并网瓦斯纯量提升 84%。周边孔最大浓度可以达到 92%,且可以保持长时间的高效抽采,瓦斯浓度相对提升量最大可达 50%,说明二氧化碳气相压裂技术可以有效提高压裂钻孔和周边钻孔的瓦斯抽采浓度,降低瓦斯抽采浓度衰减速率。

### 参 考 文 献

[1] 谢和平,张 茹,张泽天,等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959-3978.  
 [2] 王恩元,张国锐,张超林,等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297-322.  
 [3] 汪隆靖. 水力压裂增透技术治理瓦斯的研究与应用[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(8): 105-108, 112.  
 [4] 郭育东. 深孔预裂爆破在工作面瓦斯抽采中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2022(4): 183-184, 191.  
 [5] 杨希培,邵文琦,杨百舸,等. 难抽煤层 CO<sub>2</sub> 气相压裂瓦斯高效抽采技术研究[J]. 山西焦煤科技, 2024, 48(1): 1-4, 10.  
 [6] 邹永洛. 基于水力割缝与二氧化碳致裂的煤层增透技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 226-230.  
 [7] 周盛涛,罗学东,蒋 楠,等. 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 883-893.  
 [8] 袁 永,陈忠顺,梁小康,等. 二氧化碳相变爆破致裂机理与应用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 63-78.  
 [9] 孙可明,辛利伟,吴 迪,等. 初应力条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律研究[J]. 固体力学学报, 2017, 38(5): 473-482.