

低透气性高瓦斯煤层 CO₂ 相变致裂强化增透技术

王文林¹, 王方田^{2*}, 耿继业²

(1. 陕西华彬煤业股份有限公司, 陕西 咸阳 713500; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 如何提高煤层透气性是低透气性高瓦斯矿井煤与瓦斯安全高效共采的关键。本文基于液态 CO₂ 相变致裂工作原理, 分析了爆破煤岩致裂与增透机理。结合陕西蒋家河煤矿 ZF201 工作面低透气性高瓦斯煤层地质生产条件, 进行了爆破钻孔设计, 确定了合理爆破有效影响半径等工艺参数。现场试验结果表明, 采用液态 CO₂ 爆破致裂增透技术后, 提高瓦斯抽采纯量 1.71 倍, 共抽采瓦斯 105.4 万 m³, 瓦斯抽采率提高到 38.9%, 促进了低透气性高瓦斯煤层工作面煤与瓦斯安全高效共采。

关键词: 高瓦斯煤层; CO₂ 相变; 致裂增透; 瓦斯抽采; 煤与瓦斯共采

中图分类号: TD82 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2019)03-0001-06

CO₂ Phase-Transition Fracturing Technology for Enhanced Permeability in Low Gas Permeability and High Gas Coal Seams

Wang Wenlin¹, Wang Fangtian², Geng Jiye²

(1. Shaanxi Huabin Coal Limited by Share Co., Ltd., Xianyang 713500, China;

2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: How to improve the coal seam permeability is the key to safe and efficient co-production of coal and gas resources for low permeability and high gas coal seams. Based on the liquid CO₂ phase-transition fracturing operating principle, this paper analyzes the blasting coal rock fracturing and enhanced permeability mechanism. Combined with the geological and production conditions of low permeability and high gas coal seam in ZF201 working face of Jiangjiahe Coal Mine in Shaanxi Province, the blasting drilling boreholes design is carried out, and the process parameters such as the effective influence radius of blasting boreholes are reasonably determined. The field test results show that after the application of liquid CO₂ phase-transition fracturing and enhanced permeability technology, the gas extraction is increased by 1.71 times, the total gas extraction is 1.054×10⁴ m³, and the gas drainage rate is increased to 38.9%, hence the safe and efficient co-production of coal and gas is achieved in the conditions of low gas permeability and high gas coal seams.

Keywords: high gas coal seam; CO₂ phase-transition; fracturing and enhanced permeability; gas drainage; co-production of coal and gas

中国 90% 以上的矿井属于低透气性高瓦斯矿井, 煤层透气性系数仅 0.004~0.040 m²/(MPa²·d), 瓦斯抽采难度大, 严重制约了矿井安全高效生产^[1]。为提高低透气性煤层的瓦斯预抽效果, 除增加钻孔密度、延长抽采时间外, 还应采用多种形式煤层增透技术, 增大煤体裂隙密度和范围, 以增加煤层透气性, 达到提高抽采效

收稿日期: 2019-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0604701); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019XKQYMS50)

* 通信作者, E-mail: wangfangtian111@163.com

果的目的^[2,3].现阶段主要增透措施有水力冲孔、水力压裂、水力割缝、高压水射流、深孔预裂爆破等^[4-7].

为解决单一低透气性高瓦斯煤层的预抽难题,王兆丰等^[8]研究了 CO₂ 相变致裂增透技术,在河南九里山矿 16051 底抽巷进行了试验并取得了较好效果.董庆祥等^[9]为确定液态 CO₂ 相变致裂爆破影响半径、合理装药量和布孔参数,结合物理实验与数值模拟分析了液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量.洪紫杰等^[10]优化设计了液态 CO₂ 致裂释放管喷嘴结构和几何参数,提出了单孔一点致裂技术方案并取得了显著的增透效果.周西华等^[11]为提高低透气性煤层瓦斯抽采效率,在七台河矿区进行了液态 CO₂ 相变爆破增透试验,煤层透气系数提升高达 22.76 倍.罗朝义等^[12]为提高喀斯特地质条件下松软低透气性高瓦斯煤层的抽采效果,在贵州绿塘煤矿试验了煤层 CO₂ 相变致裂顺层钻孔卸压增透技术,整体抽采效率提高了 6 倍.邹永洛^[13]针对车集煤矿煤层瓦斯压力高、透气性差、瓦斯预抽难度大等问题,设计了 CO₂ 相变致裂增透影响半径试验方案,试验效果良好.

本文在分析液态 CO₂ 相变致裂工作原理的基础上,阐明爆破煤岩致裂与增透机理,并结合陕西蒋家河煤矿 ZF201 工作面地质生产条件,进行爆破钻孔设计与试验,通过监测统计瓦斯抽采浓度与流量评价 CO₂ 相变致裂增透实施效果.

1 液态 CO₂ 爆破致裂和增透机理

液态二氧化碳的温压环境为低于 31℃ 且压力大于 7.35 MPa,当温度超过 31℃ 时开始汽化,且压力也随温度的变化而不断变化.利用二氧化碳的温压特点,在爆破器主管内充装液态 CO₂,使用发爆器快速激发加热装置,在 40 ms 内液态 CO₂ 迅速气化,体积膨胀 600 余倍,产生大量高压 CO₂ 气体,达到泄能片极限压力后,泄能片在 0.1~0.5 s 内破断,高压气体由泄能头两侧的出气孔急速冲出,接触空气介质产生应力波,冲击使目标体开裂,达到爆破的效果^[14].液态 CO₂ 爆破器工作原理见图 1.

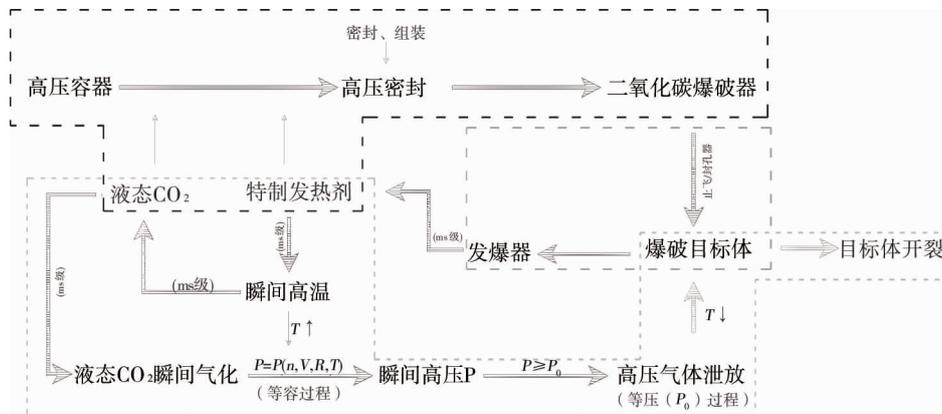


图1 二氧化碳爆破器工作原理

液态 CO₂ 相变爆破煤层主要产生 3 个破裂区:①粉碎区,首先由冲击波在爆破孔周围产生粉碎区;②裂隙近区,在爆破孔法向的初始导向裂隙;③裂隙中远区,随着冲击波转变为应力波继续传播,后续大量高压气体在初始导向裂隙中尖劈扩展,形成二次裂隙发育区.

煤层是由孔裂隙组成的各向异性介质系统,流体在煤层中的扩散和渗流是在压力差和浓度差下进行的.煤层渗透率是影响瓦斯流动的主要原因,这也是判断煤层是否容易抽采的关键.从孔径和成因考虑,孔隙分为宏观孔隙、显微孔隙和分子孔隙.孔隙对瓦斯渗透的影响见表 1.

表 1 煤体孔隙分类与瓦斯流动状态

孔径/ μm	0.01~0.1	0.1~1	1~100	>100
瓦斯流动状态	扩散	缓慢层流	快速层流	层流与紊流混合

裂隙的发育程度决定了煤层瓦斯的运移和产出,裂隙宽度几微米到几毫米不等,延伸长度可从几厘米

至数十米,裂隙的分布与大小决定了煤层渗透率的大小.裂隙主要有内生裂隙和外生裂隙两种,这两类裂隙的大小决定了其穿越不同分层,并连通不同级别孔裂隙,为煤体瓦斯顺利运移提供良好通道,从根本上决定了煤层渗透率的大小.

煤层中孔裂隙的发育程度决定了比表面积的大小,进而决定煤基质对 CH₄ 吸附能力,是煤层瓦斯赋存的关键因素.煤层瓦斯抽采是靠压力差和浓度差进行的,压力差和浓度差决定的煤层瓦斯流动状态要通过煤层孔裂隙来实现,在液态 CO₂ 爆破作用下,煤层破碎导致孔裂隙增加,随着煤层瓦斯的渗流与扩散,煤基质上的 CH₄ 解吸出来,孔内瓦斯压力减小,煤层深部与抽采孔瓦斯压力梯度增大,煤体内部瓦斯的吸附解吸平衡状态被打破,煤层 CH₄ 继续解吸并向抽采孔运移,大大促进瓦斯抽采.

利用液态 CO₂ 爆破产生具有一定宽度的裂隙通道,明显提高煤层的透气性,有利于提高煤层瓦斯流动能力和流动状态,大大提高钻孔瓦斯抽采纯量、提高抽采效果.

2 爆破增透试验

2.1 试验区域选择与流程

现场试验在陕西蒋家河煤矿 ZF201 工作面运输顺槽进行.ZF201 工作面回采煤层为 4[#]煤层,平均厚度 10 m,煤层倾角 8°,顶板岩性以泥岩为主,局部夹粉砂岩,底板岩性以泥岩为主.煤层原始瓦斯含量 8.62~8.98 m³/t,最大瓦斯压力为 0.653 MPa,煤层结构简单,层理明显.钻孔及爆破参数见表 2.

表 2 钻孔及爆破参数表

参数	孔径/mm	孔深/m	装药长度/m	倾角/(°)	方位角
爆破孔、控制孔	75	35	30	1	垂直巷道

使用 CO₂ 开展深孔预裂爆破增透技术主要工艺流程包括:实施爆破钻孔、送入 CO₂ 爆破器及连接管、固定爆破器、撤人起爆、爆破器取出,对爆破孔进行封孔并连接抽采,开展效果考察,流程如图 2 所示.

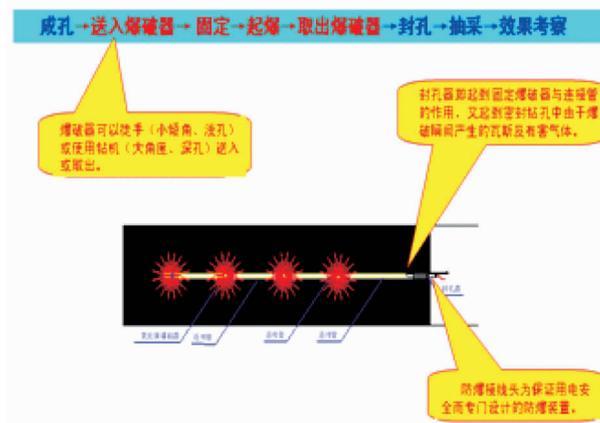


图 2 深孔 CO₂ 预裂爆破基本工艺

为避免钻孔间的截流作用,采用图 3 的布孔方式进行液态 CO₂ 爆破试验,钻孔成孔后,使用快速封孔器封孔,并测试钻孔自然瓦斯涌出量.

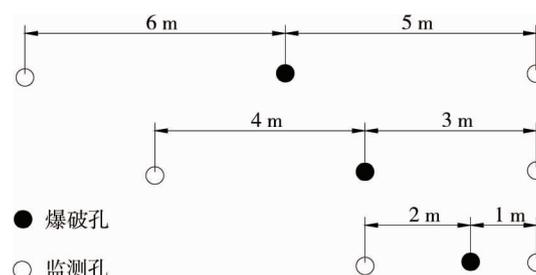


图 3 钻孔布置

具体流程如下:

- 1) 钻孔施工至既定深度,采用压风设备对爆破排渣,退出钻杆测试钻孔瓦斯涌出参数;
- 2) 按照既定爆破器间距将爆破器和连接管送入爆破孔,安装止飞器和封孔器;
- 3) 根据规范要求对液态 CO₂ 爆破;
- 4) 爆破后考察爆破孔和监测孔瓦斯流量;
- 5) 取出爆破器和连接管并进行封孔,继续监测钻孔瓦斯涌出参数.

2.2 钻孔瓦斯流量衰减系数对比

爆破后钻孔自然瓦斯流量监测如图 4 所示,爆破前各钻孔自然瓦斯流量衰减至 0.002 m³/min,爆破后各钻孔瓦斯流量有不同程度的提高,其中爆破孔平均自然瓦斯流量提高倍数最大,提高近 15 倍,与爆破孔不同距离的监测孔提高倍数不一,其中距离爆破孔 1~4 m 的监测孔提高明显,为 6.8~13.4 倍,距离爆破孔 5~6 m 的监测孔所受影响较小.

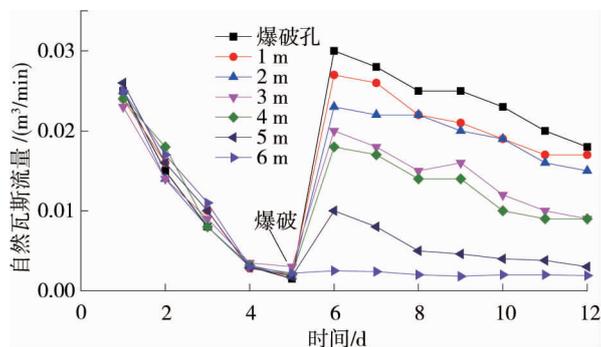


图 4 试验前后钻孔自然瓦斯流量

相比爆破前,爆破后钻孔瓦斯流量衰减系数得到了大幅度的降低,通过对监测数据的拟合,得到爆破前后钻孔瓦斯流量衰减规律如下:

爆破前:

$$q_{t1} = 0.0383 e^{-0.0548t} \quad (1)$$

爆破后:

$$q_{t2} = 0.0336 e^{-0.0336t} \quad (2)$$

式中: q_{t1} , q_{t2} 分别为爆破前后钻孔自然瓦斯涌出量, m³/min; t 为钻孔自排瓦斯时间, d.

对煤层进行液态 CO₂ 爆破增透后,煤体孔裂隙结构发生改变,煤层瓦斯解吸能力得到提高,钻孔自然瓦斯流量衰减系数由 0.054 8/d 减小为 0.033 6/d,有利于瓦斯抽采的持续进行.同时,由于爆破后距离爆破孔 1~4 m 的监测孔瓦斯流量提高明显,距离爆破孔 5 m 处瓦斯流量仍有部分提高,而距离爆破孔 6 m 处瓦斯流量无明显变化.可见,液态 CO₂ 爆破有效影响半径达到 5~6 m.

2.3 液态 CO₂ 爆破增透效果

煤层透气性系数是衡量煤体中瓦斯流动难易程度的一项重要指标,是评价煤层瓦斯抽放难易程度和瓦斯突出防治的重要技术参数.爆破后煤体松动,孔裂隙增加,煤层透气性得到大幅度提升.随着抽采时间的增加,由于爆破裂隙逐渐闭合,造成爆破孔周围煤体透气性系数逐渐降低,一个月后透气性系数趋于稳定,采用径向流量法测定爆破地点爆破前后透气性系数,爆破前后对比,趋于稳定时,煤层透气性系数提升 3.61 倍左右,爆破前后透气性系数测试结果见表 3.

3 现场试验效果

在现场同时进行 4 组液态 CO₂ 爆破增透试验,采用分段式连续爆破,爆破孔与控制孔间距均为 7 m,爆破孔与抽采孔间隔布置,钻孔布置及爆破器安装方式如图 5 所示.

控制孔前期作为爆破控制孔增加自由面,爆破结束作为抽采孔进行瓦斯抽采,监测爆破前后瓦斯抽采参数,各测点钻孔平均瓦斯抽采浓度变化如图6所示,各测点钻孔平均瓦斯抽采混量变化如图7.

表3 爆破前后透气性系数测试结果

测点	爆破前透气性/(m ² /(MPa ² ·d))	爆破后透气性/(m ² /(MPa ² ·d))
1	0.773 0	2.51
2	0.822 0	2.60
3	0.852 0	2.71
4	0.729 0	2.81
5	0.922 0	2.77
6	0.636 0	1.89
7	0.608 0	2.99
8	0.73 2 0	2.64
9	0.903 0	2.70
10	0.802 0	2.96
11	0.763 0	3.46
12	0.825 4	2.95
13	0.701 0	3.41
14	0.713 0	3.57

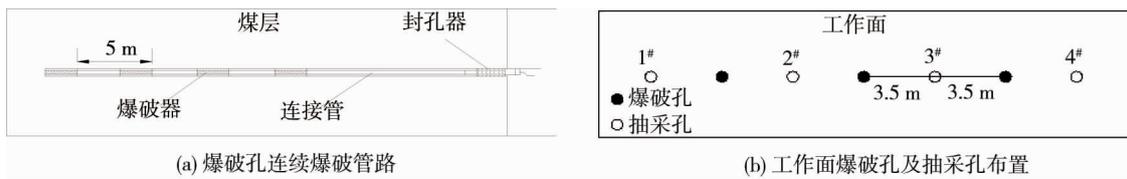
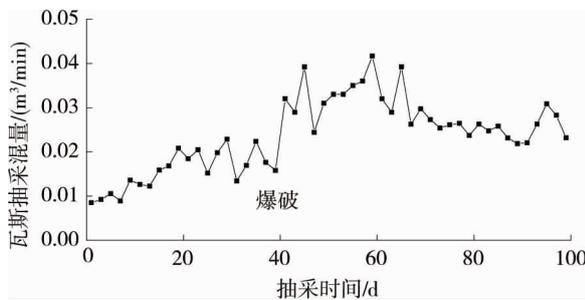
图5 液态 CO₂ 爆破钻孔参数布置

图6 抽采钻孔爆破前后瓦斯抽采浓度对比

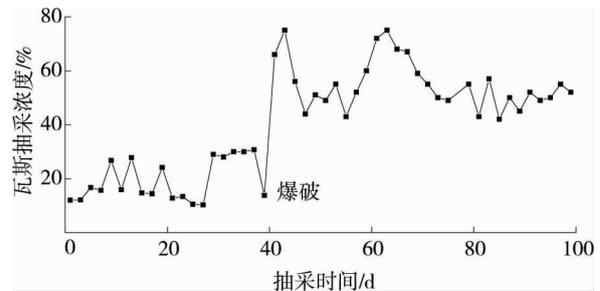


图7 抽采钻孔爆破前后瓦斯抽采混合流量对比

统计分析各测点可知,液态 CO₂ 爆破后瓦斯抽采浓度平均提高了 3.16 倍,瓦斯抽采混合流量提高了 1.71 倍.主要是由于爆破后煤层透气性系数显著提高,瓦斯流动阻力减小、流动速度加快,可持续提高瓦斯抽采混量直至趋于稳定.

ZF201 工作面地质储量 291.73 万 t,工作面前 200 m 地质储量 30.2 万 t.煤层瓦斯含量为 8.98 m³/t,工作面前 200 m 瓦斯储量为 271.196 万 m³.ZF201 工作面前 200 m 抽采时间从 2 月到 8 月,经预裂爆破后,运输顺槽、回风顺槽抽采瓦斯纯量分别为 56.825,48.587 万 m³,共抽采瓦斯 105.412 万 m³,抽采率 38.9%.回采前 ZF201 工作面前 200 m 可解吸瓦斯量为 4.81<6 m³/t,符合规定.

综上所述,蒋家河煤矿 ZF201 工作面现场试验 CO₂ 深孔预裂爆破增透技术,瓦斯抽采纯量提高 1.71 倍,瓦斯抽采率提高到 38.9%,实现了低透气性高瓦斯煤层工作面煤与瓦斯安全高效共采.

4 结论

1) 利用液态 CO₂ 爆破产生具有一定宽度的裂隙通道,可以明显提高煤层的透气性,有利于提高钻孔

瓦斯抽采纯量和抽采效果。

2) 通过对比分析爆破前后钻孔自然瓦斯流量,表明爆破后各钻孔瓦斯流量都得到了不同程度的提高,确定了爆破有效影响半径达到 5~6 m。

3) 液态 CO₂ 爆破致裂增透技术在蒋家河煤矿 ZF201 工作面进行了现场试验,瓦斯抽采纯量提高 1.71 倍,瓦斯抽采率提高到 38.9%,促进了低透气性高瓦斯煤层工作面煤与瓦斯安全高效共采。

参考文献:

- [1] 王兆丰,刘军.我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J].煤矿安全,2005,36(3):29-32.
- [2] Wang F T, Ren T, Tu S H, et al. Implementation of underground longhole directional drilling technology for greenhouse gas mitigation in Chinese coal mines[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 11(6): 290-303.
- [3] Wang F T, Zhang C, Liang N. Gas permeability evolution mechanism and comprehensive gas drainage technology for thin coal seam mining[J]. Energies, 2017,10(9): 1382.
- [4] 翟成,李贤忠,李全贵.煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J].煤炭学报,2011,36(12):1996-2001.
- [5] 王兆丰,王林,陈向军.深孔预裂爆破在高瓦斯特厚煤层回采中的应用[J].煤炭科学技术,2008,36(8):31-33.
- [6] 郭德勇,吕鹏飞,单智勇,等.瓦斯抽采煤层增透深孔聚能爆破钻孔参数[J].北京科技大学学报,2013,35(1):16-20.
- [7] 张英华,倪文,尹根成,等.穿层孔水压爆破法提高煤层透气性的研究[J].煤炭学报,2004,29(3):298-302.
- [8] 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(1):1-5.
- [9] 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.
- [10] 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):39-45.
- [11] 周西华,门金龙,王鹏辉,等.井下液态 CO₂ 爆破增透工业试验研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(9):76-82.
- [12] 罗朝义,江泽标,郑昌盛,等.CO₂ 相变致裂技术在顺煤层钻孔增透中的应用[J].煤炭科学技术,2017,45(11):138-143.
- [13] 邹永洛.煤与瓦斯突出煤层 CO₂ 相变致裂增透技术试验研究[J].煤矿安全,2018,49(3):5-8.
- [14] 黄园月,尹岚岚,倪昊,等.二氧化碳致裂器研制与应用[J].煤炭科技,2015,34(8):123-124.