

doi: 10.11799/ce202003013

# 底抽巷穿层钻孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术研究

陈继福

(山西大同大学 建筑与测绘工程学院, 山西 大同 037003)

**摘要:** 为了提高松软、低渗煤层的瓦斯抽采效率, 采用底抽巷穿层钻孔进行了液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂试验。结果表明: 煤层经历致裂后, 致裂钻孔直径明显增大, 瓦斯抽采影响半径为 10m 左右; 钻孔瓦斯纯流量和瓦斯浓度均得到大幅提升, 虽然每次致裂后期呈现一定程度衰减, 但依然维持较高水平; 与水力冲孔措施相比, 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂后的前期增透效果更佳; 液态 CO<sub>2</sub> 致裂不仅增强了煤层瓦斯抽采效率, 也提高了矿井掘进速度, 具有显著的安全和经济效益。

**关键词:** 穿层钻孔; 相变致裂; 抽采半径; 抽采效率

**中图分类号:** TD713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2020)03-0062-04

## Permeability enhancement with liquid CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing in crossing drilling from floor drainage roadway

CHEN Ji-fu

(College of Architecture and Surveying Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

**Abstract:** In order to improve the gas drainage efficiency of soft and low permeability coal seam, liquid CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing test is carried out with drilling holes through floor drainage roadway. The results show that the diameter of the fracturing borehole increases obviously and the radius of gas drainage is 10m after the coal seam fracturing. Both the pure gas quantity and gas concentration of borehole gas are greatly increased, it shows a certain degree of attenuation at the later stage of each fracturing though still remains at a high level. Compared with hydraulic flushing in hole, liquid CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing is better in early stage permeability enhancement, and the technology not only enhances the gas drainage efficiency, but also improves the tunneling speed, offering significant safety and economic benefits.

**Keywords:** crossing drilling; phase-transition fracturing; drainage radius; drainage efficiency

煤炭作为我国经济发展的主要动力, 在高强度开采条件下, 浅部煤炭资源已趋于枯竭, 深部开采将成为煤炭工业发展的必然趋势。矿藏开采深度的逐年增大, 必然导致开采条件的不断恶化。其中, 瓦斯灾害治理面临的挑战尤为严峻<sup>[1]</sup>。

目前, 我国煤矿主要采用瓦斯抽采降低煤层瓦斯突出危险性, 但限于我国煤层透气性普遍较低的基本国情, 传统的钻孔抽采方式依然难以达到理想效果<sup>[2]</sup>, 煤与瓦斯突出事故时有发生。为此, 国内外专家学者在改善煤层透气性的方法、技术和装备等方面进行了研究。深孔致裂爆破<sup>[3,4]</sup>、水力割

缝<sup>[5,6]</sup>、水力冲孔<sup>[7,8]</sup>、注气驱替<sup>[9]</sup>等技术, 均应用于煤矿的瓦斯治理。实践证明: 爆破技术在煤层致裂、增透、卸压和消突中最为有效, 但在施工过程中存在哑炮和拒爆等现象, 另外在瓦斯集聚区也存在一定危险性。

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术主要通过致裂钻孔内 CO<sub>2</sub> 形态的瞬间改变来实现煤层增透<sup>[10-15]</sup>, 因其安全、高效, 且设备成本低、操作简单等优势, 在煤矿中得到了良好的应用, 为治理矿井瓦斯灾害提供了新的思路。

收稿日期: 2019-04-03

作者简介: 陈继福(1964—), 男, 山西大同人, 副教授, 主要从事矿山地质与煤矿安全方面的教学和研究工作, E-mail: 641201029@qq.com。

引用格式: 陈继福. 底抽巷穿层钻孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(3): 62-65.

## 1 工程背景

试验矿井为平煤十三矿。矿井主采煤层为已<sub>15-17</sub>煤层,该煤层的整体赋存状态稳定,但区域瓦斯赋存差异性明显。其中,己一采区的突出危险性最大,瓦斯含量为 2.89 ~ 16.97 m<sup>3</sup>/t,瓦斯压力 0.2 ~ 3.6 MPa。为了降低矿井的突出危险性,目前主要采用穿层钻孔及本煤层钻孔进行瓦斯预抽。

试验工作面为已一采区 11111 工作面,该工作面标高 -470 ~ -630 m,位于突出危险区以内(-450 m 标高以上为突出危险区)。在施工预抽瓦斯钻孔期间,由于煤质疏松,部分钻孔出现塌孔、喷孔现象,严重影响工作的安全高效回采。

## 2 底抽巷穿层钻孔布置

钻场位置为 11111 工作面运输巷底板岩巷 220 m 处以东,采用穿层钻孔对 11111 工作面煤层实施液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透。本次试验共布置钻场 A、B、C 三组钻场,钻场间距为 10 m,每个钻场又分别布置致裂孔 2 个、抽采孔 11 个,13 个钻孔分两列排布,列间距 0.5 m。底抽巷穿层钻孔布置如图 1 所示。

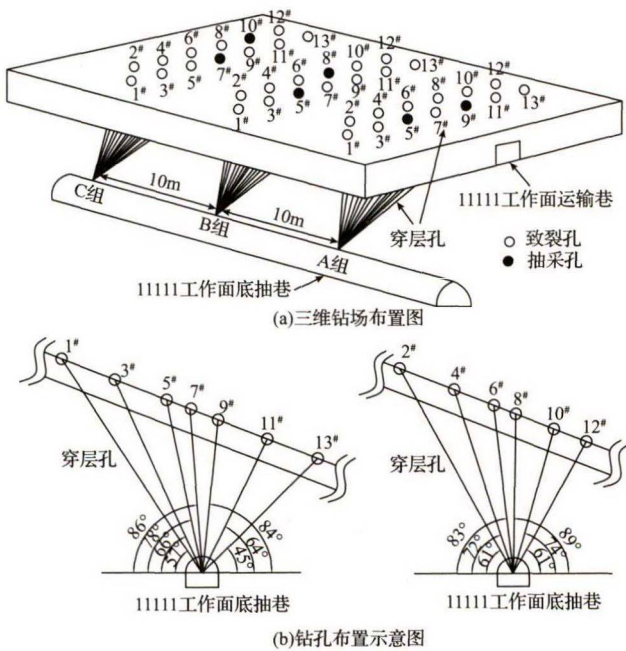


图 1 底抽巷穿层钻孔布置图

每一抽采钻孔施工完毕后,应立即封孔并连接到抽采管路,当每组钻场的所有抽采孔都完成施工及抽采管路连接时,间隔 7 d 进行致裂孔的施工和爆破,随即进行封孔和瓦斯抽采。第一次致裂后,邻

近的抽采钻孔瓦斯浓度或瓦斯纯流量下降幅度达到 50% 以上时,进行第二次致裂。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 致裂对钻孔的影响

液态 CO<sub>2</sub> 致裂后,在高压气体的作用下,致裂孔的形态会发生改变。为说明 CO<sub>2</sub> 致裂对钻孔的影响,采用钻孔窥视仪对比观测了同一深度致裂孔的孔壁形态,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出:致裂前的钻孔壁光滑平整,致裂后钻孔直径明显增大,并伴有大量的裂隙和孔洞,但钻孔依然能够保持较完整的形态,为瓦斯抽采创造了有利条件。

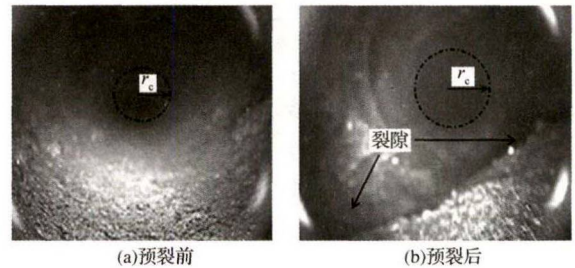


图 2 致裂前、后钻孔孔壁对比

### 3.2 致裂对瓦斯抽采半径的影响

距离致裂孔不同距离抽采孔瓦斯纯流量随时间变化曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,抽采孔与致裂孔之间的距离  $L$  是影响钻孔瓦斯纯流量的重要因素。由图 3(a) 可以看出,当两者之间的距离小于 7 m 时,致裂后抽采孔的瓦斯纯流量急剧下降,且在 4 h 内都保持在较低的水平,4 h 后钻孔纯流量开始呈现逐渐增大趋势。这是由于致裂瞬间储液管释放大量的高压 CO<sub>2</sub> 气体,使得致裂孔周围的煤体被压缩,煤层透气性减小,随时间推移,被压缩煤体逐渐松弛并产生许多新的裂隙,使得钻孔瓦斯纯流量逐渐增大。根据 3 组观测孔瓦斯抽采数据的统计分析得出,CO<sub>2</sub> 致裂后的平均压缩半径为 5.6 m,压缩效应持续时间约为 4 ~ 5 h。由图 3(b) 可以看出,当抽采钻孔与致裂钻孔间的距离超过 10 m 时,前 4 h 内的钻孔瓦斯纯流量并未呈现明显的下降趋势,即抽采钻孔受压缩效应影响较小或未受影响。由此可知,液态 CO<sub>2</sub> 致裂对瓦斯抽采的影响范围约为 10 m。

### 3.3 致裂对瓦斯抽采效率的影响

为分析液态 CO<sub>2</sub> 致裂对瓦斯抽采效率的影响,对抽采孔的瓦斯纯流量和瓦斯浓度进行了连续的数据考察分析,得到了钻孔瓦斯纯流量及瓦斯浓度随

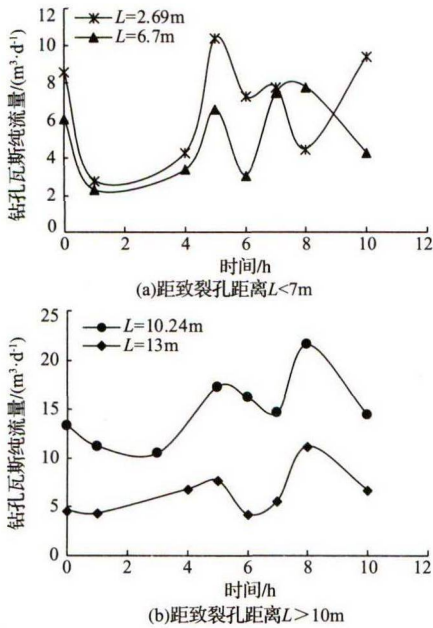


图3 距离致裂孔不同距离抽采孔瓦斯纯流量随时间变化曲线

时间的变化曲线,如图4、图5所示(各钻孔的变化特征具有相似性,限于篇幅,仅对一组数据进行分析)。

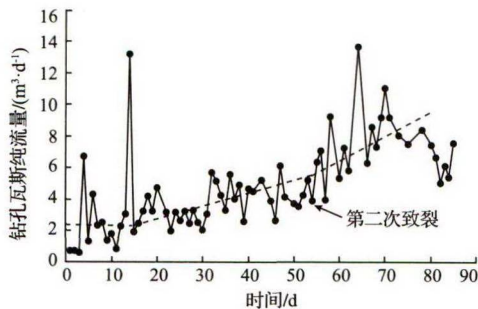


图4 瓦斯纯流量随时间变化曲线

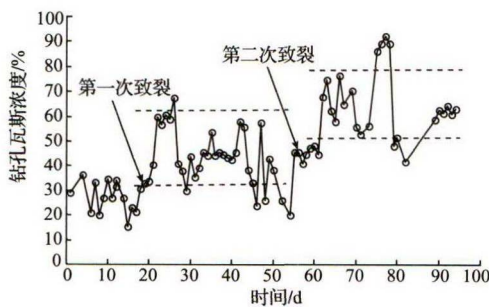


图5 瓦斯浓度随时间变化曲线

从图4可以看出:液态CO<sub>2</sub>致裂前,钻孔瓦斯纯流量相对较低,并且随着抽采时间的延长,钻孔瓦斯纯流量表现出明显的衰减趋势。第一次致裂后,钻孔瓦斯纯流量逐渐上升,随着抽采时间的增加,整体表现为增加趋势;第二次致裂后,钻孔瓦斯纯流量进一步增加,且增加幅度明显大于第一次致裂。

煤层经历两次致裂后,钻孔瓦斯纯流量得到了显著提升。

从图5可以看出:液态CO<sub>2</sub>致裂使得钻孔瓦斯浓度整体呈现阶梯状上升趋势。致裂前大部分钻孔瓦斯浓度在20%~40%之间波动,第一次致裂后,钻孔瓦斯浓度波动区间上升为30%~60%,第二次致裂后,钻孔瓦斯浓度波动区间进一步上升为50%~80%。经历两次预裂后的钻孔瓦斯浓度较预裂前提升了一倍。

综上所述,液态CO<sub>2</sub>致裂可以有效改善煤层的透气性,提高钻孔的瓦斯抽采效率。需要说明的是:在每次致裂的后期,钻孔瓦斯纯流量和瓦斯浓度均呈现出了一定程度的衰减,但与致裂前相比,依然保持在较高水平。这可能是裂隙随时间的闭合效应引起的。

### 3.4 与其他增透技术效果对比

煤层进行不同增透措施后钻孔瓦斯浓度变化情况如图6所示。由图6可以看出:和普通钻孔相比,无论采取哪种增透措施,都能够有效提高瓦斯抽采效率,在一定时间内使得瓦斯浓度维持在相对较高水平,有利于瓦斯抽采。在抽采前17d,CO<sub>2</sub>致裂后的瓦斯浓度显然高于水力冲孔,其平均瓦斯浓度分别为56.9%和42.4%。在接下来的约30d时间内,水力冲孔后瓦斯浓度则比CO<sub>2</sub>致裂高,分别为21.4%和16.7%。这种现象表明,CO<sub>2</sub>致裂初期在煤层内产生较多裂隙,使得煤层透气性增大,瓦斯浓度升高;随着时间的推移,在地应力压实作用下,致裂产生的裂隙、孔洞逐渐闭合,煤层透气性逐渐降低,瓦斯浓度随之降低。

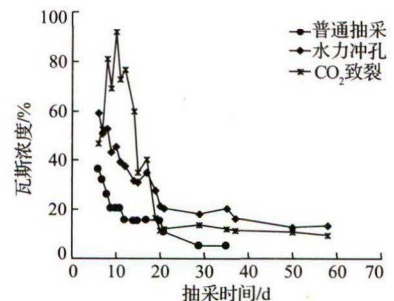


图6 不同增透技术效果对比

### 3.5 液态CO<sub>2</sub>致裂治理瓦斯综合效果评价

液态CO<sub>2</sub>致裂前、后相关参数变化情况见表1。从表1可以看出:液态CO<sub>2</sub>致裂后的煤层平均瓦斯含量和最大瓦斯涌出量分别降低了4.73m<sup>3</sup>/t、2.02m<sup>3</sup>/min,表明液态CO<sub>2</sub>致裂技术可以对煤层进

行有效增透,进而降低煤层的突出危险性。钻屑瓦斯解吸指标是评价矿井瓦斯突出倾向性的重要参数,由表1可见,致裂后该指标降低了一个水平,能够满足矿井安全生产的要求。同时,致裂后矿井日掘进进尺提高了3.3m/d,大大缩短了掘进工期。可见:采用液态CO<sub>2</sub>致裂增透技术能够为矿井带来显著的安全和经济效益。

表1 致裂前、后相关参数变化情况

瓦斯相关指标	平均煤层瓦斯含量/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	最大瓦斯涌出量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	钻屑瓦斯解吸指标K <sub>1</sub> / (mL·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1/2</sup> )	日掘进尺/ (m·d <sup>-1</sup> )
致裂前	12.41	5.5	0.40~0.42	2.4
致裂后	7.86	3.48	0.32~0.33	5.7

## 4 结论

1) 液态CO<sub>2</sub>致裂对钻孔周围产生了压缩效应,平均压缩半径为5.6m,压缩效应的持续时长约为4~5h,瓦斯抽采影响半径约为10m。

2) 煤层在经过两次液态CO<sub>2</sub>致裂后,瓦斯抽采效率显著提升,虽然每次致裂后期的瓦斯抽采效率出现了一定程度的衰减,但依然维持在较高水平。

3) 通过对比分析液态CO<sub>2</sub>致裂与水力冲孔技术的增透效果,得出液态CO<sub>2</sub>致裂在致裂初期的增透效果显著,而水力冲孔则在后期占优势。

4) 液态CO<sub>2</sub>致裂技术有效提升了瓦斯抽放效率,进而提高了工作面掘进速度,具有显著的安全和经济效益。

## 参考文献:

[1] 刘喜军. 深部煤岩瓦斯动力灾害防治研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 69-75.

- [2] 孙庆刚. 中国煤炭瓦斯灾害现状与防治对策研究[J]. 中国煤炭, 2014, 40(3): 116-119.
- [3] 周应江, 张友博, 李良山, 等. 综采工作面煤层超前深孔预裂爆破增透试验研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(4): 35-37.
- [4] 侯松, 翟文杰, 董浩. 低透气性煤层深孔预裂爆破增透技术应用[J]. 煤炭技术, 2017, 36(1): 206-208.
- [5] 宋维源, 王忠峰, 唐巨鹏. 水力割缝增透抽采煤层瓦斯原理及应用[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(4): 78-82.
- [6] 梁银权, 王进尚, 冯星宇. 高瓦斯低透气性煤层深钻孔高压水力割缝增透技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(6): 99-102.
- [7] 任仲久. 水力冲孔技术在低透气性突出煤层瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭工程, 2019, 51(3): 65-70.
- [8] 田慧玲, 汪国华, 高建成, 等. 水力冲孔增透技术在突出煤层中的应用实践[J]. 煤矿开采, 2017, 22(3): 85-88.
- [9] 林海飞, 黄猛, 李志梁, 等. 注气驱替抽采瓦斯技术在高瓦斯突出矿井煤巷掘进中的试验[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(3): 10-13.
- [10] 韩颖, 史晓辉, 雷云, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变致裂增透预抽瓦斯技术试验研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(10): 17-20.
- [11] 王兆丰, 孙小明, 陆庭侃, 等. 液态CO<sub>2</sub>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.
- [12] 罗朝义, 江泽标, 郑昌盛, 等. 低透煤层CO<sub>2</sub>相变致裂增透解吸技术的应用[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(1): 59-64.
- [13] 雷云, 刘建军, 张哨楠. CO<sub>2</sub>相变致裂本煤层增透技术研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 215-221.
- [14] 蒋志刚, 成艳英, 王小兵. 液态二氧化碳相变致裂在煤矿瓦斯灾害中的试验研究[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(2): 1-4.
- [15] 雷云. 低渗透高瓦斯煤层二氧化碳相变致裂增透理论及实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.

(责任编辑 苏越)