

DOI:10.16186/j.cnki.1673-9787.2015.01.001

# 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究

王兆丰<sup>1</sup>, 孙小明<sup>1</sup>, 陆庭侃<sup>2</sup>, 韩亚北<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**针对单一低透气性煤层瓦斯含量高、预抽效果不理想的情况,采用液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术,在穿层钻孔中利用瞬间产生的高压 CO<sub>2</sub> 气体冲击煤体,产生大量裂隙并促使裂隙发育、扩展,以达到提高煤层透气性的目的。在河南焦煤能源有限公司九里山 16051 底抽巷进行的试验表明:液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术可有效提高瓦斯抽采效果,试验后平均抽采流量 0.057 m<sup>3</sup>/min,是试验前平均流量的 4.3 倍,是相同抽采时间内水力冲孔措施平均抽采流量的 2.3 倍;抽采体积分数也有所提升;在试验考察期内流量衰减系数降低到 0.046 d<sup>-1</sup>,增透效果显著。

**关键词:**单一低透气性煤层;液态 CO<sub>2</sub>;致裂技术;增透

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:1673-9787(2015)01-0001-05

## Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO<sub>2</sub> phase transition

WANG Zhaofeng<sup>1</sup>, SUN Xiaoming<sup>1</sup>, LU Tingkan<sup>2</sup>, HAN Yabei<sup>1</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

**Abstract:** For the condition of high gas content and unsatisfactory gas pre-drainage effect in a single low permeability coal seam, the fracturing technique by liquid CO<sub>2</sub> phase transition was adopted, and the instantaneous high pressure CO<sub>2</sub> jet to impact the coal in the boring to produce a large number of promoted and expanded fracture was utilized in a coal seam, so as to make the permeability developed eventually. Through the experiment in 16051 floor roadway of Jiulishan Mine, it showed that the effect of gas drainage was improved obviously by the fracturing technique with liquid CO<sub>2</sub> phase transition. The average gas flow turned to be 0.057 m<sup>3</sup>/min after experiment, which was 4.3 times of the flow before fracturing measures, and was 2.3 times of the flow by using the hydraulic flushing. The gas concentration also had been enhanced. During the test, the flow attenuation coefficient decreased to 0.046 d<sup>-1</sup>. The research results indicated that anti-reflection effect is remarkable.

**Key words:** single low permeability coal seam; liquid CO<sub>2</sub>; fracturing technique; anti-reflection

## 0 引言

我国 95% 以上的高瓦斯、高突出矿井开采的

煤层是低透气性煤层<sup>[1]</sup>,其中,只有少部分煤矿具有保护层开采条件,多数矿井为单一煤层开采。单一低透气性煤层瓦斯含量高,抽采难度大,在抽

收稿日期:2014-09-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2006CB202204);国家自然科学基金资助项目(51274090150974056)。

作者简介:王兆丰(1963—),男,湖南湘潭人,河南省特聘教授/博导,主要从事矿井瓦斯灾害防治技术及装备研究及教学工作。

E-mail:wzf3988@163.com

采过程中具有流量小、衰减快、预抽时间长、钻孔利用率低等特征,给矿井安全生产、采掘接替造成极大的困难。为了解决单一低透气性煤层中瓦斯预抽的难题,国内学者提出了水力冲孔、水力压裂、深孔预裂爆破等增透措施<sup>[2-13]</sup>,这些措施在提高煤层透气性方面起到了一定作用,也是人们在探索瓦斯治理方面取得的宝贵成果。然而,这些措施还存在着这样或者那样的缺点:水力冲孔技术在硬煤中冲孔难度大,在软煤中又容易造成塌孔压埋钻具,同时喷孔严重,导致作业场所环境恶劣;水力压裂设备复杂、封孔困难,压裂的裂缝易形成新的高应力区;深孔预裂爆破主要存在装药量不好控制、装药不好出现“哑炮”等致命缺陷,一旦出现“哑炮”,处理极为困难。此外,若火药质量欠佳,还可能引起爆燃,引发煤尘瓦斯爆炸的恶性事故。

为了解决单一低透气性煤层的瓦斯预抽难题,河南理工大学和湖南汉寿中煤科技有限公司、英国 CARDOX 公司合作,首次将液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术引入低透气性煤层增透,在河南焦煤能源有限公司九里山矿 16051 底抽巷取得了非常好的试验效果。该技术既能保持深孔预裂爆破等传统增透措施的良好效果,又能克服它们在技术、装备和操作层面的缺陷,为解决矿井瓦斯问题提供了新的思路。

## 1 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术

### 1.1 装置构成

20 世纪 50 年代,英国、德国等国家利用液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术在高瓦斯矿井采煤,以提高采出煤炭的块炭率,后来被广泛用于岩石、混凝土和其它物质的快速安全爆破<sup>[14]</sup>。液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂装置主体由释放筒、储液管和推送杆构成,如图 1 所示。储液管 a 端与释放筒相连,通过连接件在储液管端头安置一个控制 CO<sub>2</sub> 释放的定压泄能片, b 端安放发热管,并拧上连接件形成可以灌装液态 CO<sub>2</sub> 的密闭容器。发热管内置有桥式电路,通 0.8 A 电流时会发生反应,放出大量热量。不同规格的储液管可装入 1.0 ~ 1.4 kg 的液态 CO<sub>2</sub>。释放筒上均匀分布用于排出 CO<sub>2</sub> 气体的小孔。推送杆与普通钻杆类似,一端为外螺纹,另一端为内螺纹,其内部安置有导线,当推送杆与储液管连接起来时,即可与发热管形成通路。通过连接一定数量的推送杆,可将释放筒安置于钻孔的预定位置。

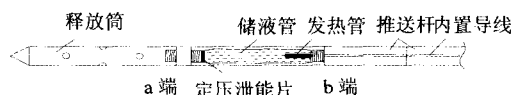


图 1 液态二氧化碳相变致裂装置

Fig.1 Fracturing equipment by liquid CO<sub>2</sub> phase transition

### 1.2 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透原理

在井下使用液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂装置时,利用钻机将液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂装置推入钻孔中的预定位置,在钻孔外用起爆线将推送杆的内置导线与起爆器相连,如图 2 所示。启动本安型低压起爆器,触发发热管迅速反应,放出的热量使储液管内 CO<sub>2</sub> 在 20 ms 内从液态转化为气态,压力急剧升高,最高达 270 MPa。当气态 CO<sub>2</sub> 压力达到定压泄能片的额定工作压力时,会瞬间将其冲破,并通过释放筒上的排气孔向外爆发,体积膨胀 600 倍,爆生气体通过排气管的导向作用,冲击开孔方向煤壁。极大的压应力使煤体产生破碎区域,继而高压气体膨胀并充满压力释放方向上的裂隙以及深部的原生裂隙,形成准静态应力场,裂纹、裂隙的尖端产生应力集中,促使微小裂隙扩张、发展,直到 CO<sub>2</sub> 气体的压力降低到不足以使裂隙继续扩展为止<sup>[15]</sup>。通过液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂,可在煤体中形成一个高透气性、低应力的安全区域,加快煤体瓦斯由吸附态转化为游离态,实现低透气性煤层的瓦斯强化抽采,达到快速消突的目的。

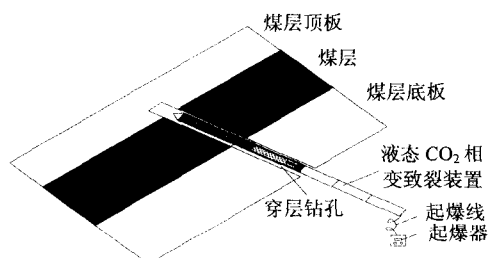


图 2 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂装置井下使用示意图

Fig.2 Fracturing equipment by liquid CO<sub>2</sub> phase transition using underground

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术在致裂增透的效果上与炸药预裂爆破有相似之处,但使用更为安全,其主要作用在于使煤体产生裂隙而不对煤体产生过度粉碎,不会破坏煤体骨架的完整性。液态 CO<sub>2</sub> 预裂爆破技术具有如下优势。

(1) 爆破过程无火花外露。

(2) 采用低压起爆(9 V),相比传统起爆方式(1 800 V)更安全。

(3) 不产生具有破坏性的震荡或震波,减小

了诱发瓦斯突出的概率。

(4)不需要进行验炮,爆破后便可进入,可连续作业。

## 2 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术现场试验

### 2.1 试验矿井及工作面特征

试验在河南焦煤能源有限公司九里山矿 16051 底板抽采巷进行。该矿为严重的煤与瓦斯突出矿井,主采的二<sub>1</sub>煤层是典型的单一低透气性煤层。建矿以来一共发生了 64 次煤与瓦斯突出,2011 年在 16031 回风巷发生了最大规模的一次煤与瓦斯突出,突出煤(岩)量 3 246 t,瓦斯量  $2.912 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

16051 工作面紧邻发生突出事故的 16031 工作面,煤层平均厚度 7.1 m,倾角 11°,构造煤普遍发育,煤质较软,瓦斯含量较大。16051 运输巷实测煤层瓦斯含量  $W_0 = 24.36 \text{ m}^3/\text{t}$ ,煤层瓦斯压力  $p = 2.08 \text{ MPa}$ ,煤的坚固性系数为 0.1 ~ 0.3,百米钻孔瓦斯流量为  $0.04 \text{ m}^3/\text{min}$ 。煤层透气性差,抽采较为困难。为保证 16051 运输巷掘进,九里山矿布置了一条底抽巷预抽条带煤层瓦斯,并采用水力冲孔作为增透措施。水力冲孔效果也不错,但是施工环境恶劣,增加了泥水运排工序,冲孔过程中易于塌孔和喷孔,射流的压力与冲出的煤量不易控制,因此,需要探寻一种更好的增透方法。

### 2.2 试验步骤

在 16051 底抽巷的 96 号钻场施工 1 号穿层钻孔(图 3)作为相变致裂试验孔,并按九里山矿原抽采钻孔布置方式施工 2 号孔,为相变致裂提供自由面,1 号孔与 2 号孔孔间距为 5 m。此外,在邻近钻场施工 3 号钻孔,进行日常的水力冲孔工作,3 号孔距 1 号致裂孔 20 m,使其不受到致裂影响。连续测量 1、2 号孔的抽采流量及体积分数,并与 3 号孔进行对比,考察试验效果。

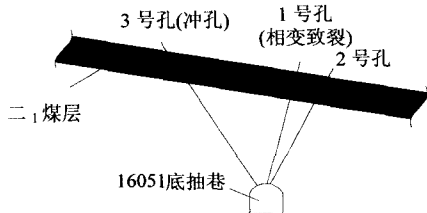


图 3 穿层钻孔布置图

Fig.3 Layout drawing of layer-through boring

(1)在底抽巷施工 1 号、2 号穿层钻孔及邻近钻场的 3 号孔,钻孔孔径 94 mm。钻孔成孔后需要用压风清理孔内煤渣,确保孔道通畅。利用临

时封孔器对 1 号孔进行临时封孔,并测试流量和体积分数,即为未采取增透措施时的初始数据。

(2)待 1 号孔流量衰减稳定后,开始进行液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂试验。撤出临时封孔器,将释放筒、储液管、推送杆依次连接好后安置在钻机上,利用钻机卡瓦、动力头将若干根推送杆连接起来,推入钻孔中,最终使相变致裂装置的释放筒部分位于煤层之中。在最外一根推送杆上用起爆线与内置导线相连,并由专职放炮员放线到人员撤离的安全位置,再与低压起爆器相连。该操作过程安全简单,只需注意在联线过程中将线头短接,防止井下杂散电流影响发热管性能。

(3)由于孔内有推送杆,对封孔造成一定困难,故仅在孔口使用黄泥进行简易封堵。

(4)准备工作就绪后,放炮员测试线路的导通性,无误后启动起爆器。人员撤离点距试验地点约 500 m,起爆后听不到致裂过程的声响,并且感觉不到冲击波及震动波。随后再测试导通性,显示为断路,说明相变致裂试验已完成。

(5)30 min 后,人员回到试验现场。相变致裂装置仍固定在钻机上,地面上有少许从孔中落下的煤粒,巷道顶板完整,未见试验对顶板产生破坏。瓦斯探头检测的巷道瓦斯体积分数在试验期间没有变化,表明相变致裂试验只是在煤层中产生裂隙,不会导致瓦斯大量涌出而引起瓦斯超限。

(6)将释放筒、储液管、推送杆撤出钻孔,采用“两堵一注”的封孔工艺对预裂孔进行封孔,并及时联抽。在试验的同一天对 3 号孔进行了水力冲孔,封孔、联抽后持续考察 1,2,3 号孔的预抽效果。

## 3 预抽效果分析

### 3.1 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂试验数据

2012 年 8 月 16 日相变致裂完成后,实测获得的 1,2,3 号孔的流量、体积分数对比如图 4 和图 5 所示,瓦斯抽采数据如表 1 所示。

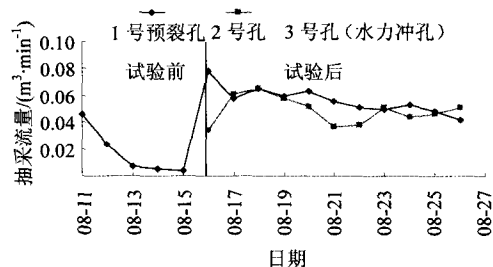


图 4 钻孔瓦斯抽采流量曲线

Fig.4 Gas flow curves of test boreholes

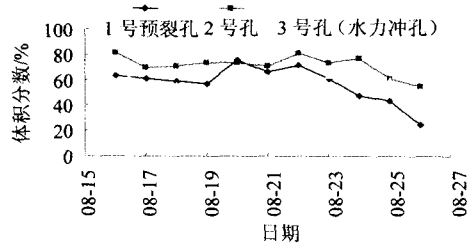


图5 钻孔瓦斯抽采体积分数曲线

Fig.5 Gas concentration curves of test boreholes

表1 钻孔瓦斯抽采流量与体积分数

Tab.1 Gas drainage flow and concentration of boreholes

测量日期	抽采流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )			抽采体积分数/%		
	1号预裂孔	2号孔	3号孔(冲孔)	1号预裂孔	2号孔	3号孔(冲孔)
2013-08-16	0.078	0.034	0.046	63	81	68
2013-08-17	0.058	0.061	0.034	61	70	55
2013-08-18	0.066	0.066	0.029	59	71	56
2013-08-19	0.060	0.058	0.024	57	74	52
2013-08-20	0.064	0.052	0.018	76	74	47
2013-08-21	0.056	0.037	0.022	67	71	49
2013-08-22	0.051	0.038	0.024	72	81	48
2013-08-23	0.050	0.051	0.016	61	74	64
2013-08-24	0.053	0.044	0.019	48	77	55
2013-08-25	0.049	0.047	0.015	44	61	60
2013-08-26	0.042	0.051	0.018	25	55	39

预裂孔邻近,受到了预裂作用的影响,抽采流量与预裂孔相当,平均抽采瓦斯流量达到 $0.049 \text{ m}^3/\text{min}$ ,同样高于3号孔平均抽采流量。

抽采流量增大的同时,钻孔流量衰减系数也比原来减小。相变致裂试验前,1号孔的衰减系数为 $0.384 \text{ d}^{-1}$ ;相变致裂后,在10 d的考察期内,1号预裂孔的流量衰减系数降为 $0.046 \text{ d}^{-1}$ 。相变致裂后,抽采流量的升高,以及流量衰减系数的降低,表明通过相变致裂,在煤体中产生了利于瓦斯抽采的裂缝、裂隙,改善了煤体的应力条件,促进了瓦斯的解吸,使钻孔瓦斯抽采更具有可持续性。

由表1及图5可知,采取相变致裂增透措施后,抽采体积分数也有不同程度提高,1号预裂孔钻孔瓦斯抽采体积分数为25%~82%,平均为57%,2号孔平均体积分数为71.7%,3号孔平均抽采体积分数为54%。2号孔体积分数升高幅度较大,相对提高了32.7%。

依据液态 $\text{CO}_2$ 相变致裂技术在国内的应用实例,其对岩石、混凝土等坚硬的脆性材料具有很好的致裂效果。用于软煤时,煤体弹性变形会吸

### 3.2 预抽效果分析

由表1及图4可知,相变致裂之后,1号试验孔瓦斯抽采流量有了极大地提高。相变致裂前流量已自然衰减为 $0.004 \text{ m}^3/\text{min}$ ,相变致裂后,当天测试的流量为 $0.078 \text{ m}^3/\text{min}$ ,提高了18.5倍。抽采10 d,平均抽采流量为 $0.057 \text{ m}^3/\text{min}$ ,是相变致裂前钻孔平均流量的4.3倍,是相同抽采时间内水力冲孔平均流量的2.3倍。2号抽采孔与1号

收一部分高压气体的冲击力,从而使致裂效果有所下降,但在16051底抽巷进行的现场试验中,该技术在坚固性系数为0.1~0.3的软煤中仍然具有很好的致裂效果,表明液态 $\text{CO}_2$ 相变致裂技术可有效应用于硬煤及软煤。

## 4 结论

(1)液态 $\text{CO}_2$ 相变致裂技术利用瞬间释放的高压、高速 $\text{CO}_2$ 气体冲击煤体产生大量裂隙,在钻孔周围形成一片裂隙发育、透气性好的抽采区域,达到了强化增透目的。

(2)通过相变致裂,钻孔瓦斯流量得到显著提升,预裂孔试验前流量已自然衰减为 $0.004 \text{ m}^3/\text{min}$ ,试验后升高到 $0.078 \text{ m}^3/\text{min}$ ,提高了18.5倍;在10 d的考察期内,平均抽采流量为 $0.057 \text{ m}^3/\text{min}$ ,是相变致裂前钻孔平均流量的4.3倍,是相同抽采时间内水力冲孔平均流量的2.3倍,抽采体积分数也有不同程度提高;流量衰减系数由 $0.384 \text{ d}^{-1}$ 降低到 $0.046 \text{ d}^{-1}$ ,使抽采更具有可持续性,表现出良好的强化抽采效果。

(3)液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术工艺简单,技术可行,实施过程及致裂过程安全可靠,不会对煤层的顶底板产生破坏,不会引起瓦斯超限。在软煤中也具有很好的增透效果,拓宽了该技术适用煤体的范围,为矿井瓦斯治理工作提供了新方法。

#### 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] 于不凡.煤矿瓦斯灾害防治与利用技术手册(修订版)[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
- [3] 俞启香.煤巷掘进预防煤及瓦斯突出的技术——超前水力冲孔[J].北京矿业学院学报,1959,21(4):52-57.
- [4] 刘明举,任培良,刘彦伟,等.水力冲孔防突措施的破煤理论分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2009,28(2):142-245.
- [5] 孙炳兴,王兆丰,伍厚荣.水力压裂增透技术在瓦斯抽采中的应用[J].煤炭科学技术,2010,38(11):78-80.
- [6] 王耀锋,李艳增.预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J].煤炭学报,2012,37(8):1326-1331.
- [7] 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.
- [8] 王佰顺,胡祖祥.长钻孔高压注水增透提高抽采效果的试验研究[J].煤炭工程,2008(10):66-68.
- [9] 王志军,张瑞林,张森,等.含瓦斯煤体定向水力压裂裂隙导控的数值分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2013,32(4):373-379.
- [10] 陈若建.东保卫矿低透气性煤层水力压裂增透技术研究[J].山东煤炭科技,2013(1):122-123.
- [11] 刘泽功,蔡峰,肖应祺.煤层深孔预裂爆破卸压增透效果数值模拟分析[J].安徽理工大学(自然科学版),2008,28(4):16-20.
- [12] 郭保华.煤与瓦斯突出的压力容器物理爆炸假说[J].河南理工大学学报(自然科学版),2012,31(3):261-267.
- [13] 李学臣.提高单一低透气性煤层抽采效果的增透途径[J].煤矿安全,2011,42(4):90-92.
- [14] 聂政.二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J].煤炭技术,2007,26(8):62-63.
- [15] DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Determination of rock-breaking performance of high-pressure supercritical Carbon dioxide jet[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(4): 554-560.

(责任编辑 李文清)