

二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术

霍中刚

(煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013)

摘要:针对低透气性煤层瓦斯抽采难度大、预抽效率低的问题,研发出二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术,通过理论分析、现场试验和数值模拟研究发现: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。贝勒煤矿井下试验结果显示,致裂后钻孔瓦斯流量增大3.8~6.7倍,钻孔瓦斯流量衰减系数由 0.691 d^{-1} 降为 0.052 d^{-1} ,煤层透气性系数提高26倍,预裂影响半径达4.5~5.7 m,在很大程度上改善了矿井瓦斯治理的效果,降低了瓦斯治理的经济成本,确保了煤矿采掘接替和安全生产。

关键词:瓦斯抽采;二氧化碳致裂器;深孔预裂爆破;煤层增透

中图分类号:TD235.3 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2015)02-0080-04

New technology of carbon dioxide fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement

HUO Zhong-gang

(China Coal Research Institute Company Limited, Beijing 100013, China)

Abstract: According to high gas drainage difficulty and low drainage rate problems of the low permeability seam, a new technology of carbon dioxide fracturer applied to the deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement was developed. With the theoretical analysis, site test and numerical simulation conducted, the study results showed that the carbon dioxide fracturer applied to the deep borehole pre-cracking blasting in seam could promote the pore systematic development in the seam, could improve the permeability of the seam and could reach the enhanced gas drainage target. The underground test results of Beile Mine showed that After the fracturing operation conducted, borehole gas flow volume was increased by 3.8~6.7 times, the flow attenuation coefficient was reduced from 0.691 d^{-1} to 0.052 d^{-1} , the seam permeability coefficient was increased by 26 times, the pre-cracking influence radius was reached to 4.5~5.7 m, the mine gas control effect was highly improved and the economic cost of gas control was reduced. Thus the mine mining and excavation replacement and safety production were ensured.

Key words: gas drainage; carbon dioxide fracturer; deep borehole pre-cracking blasting; coal seam permeability improvement

0 引言

目前,国内通常采用炸药预裂、水力压裂和水力冲孔等技术手段来增加煤层裂隙,提高煤层透气性,促使瓦斯更容易从煤层中解吸出来,从而提高瓦斯抽采效率,消除煤层的突出危险性^[1-3]。这些技术在治理矿井瓦斯工作中发挥了很好的作用,但仍存在一定的局限性:①炸药预裂爆破仍未根本解决

钻孔爆破的装药参数及封孔工艺,而且炸药审批困难,运输及储存受到严格管制。②水力压裂对封孔效果提出了更高的要求,且压裂方向不可控,易形成新的应力增高区。③水力冲孔容易引发巷道瓦斯超限,且对下向穿层钻孔煤层增透效果较弱^[4]。随着煤矿采深不断加大,煤层瓦斯含量及瓦斯压力不断增高,煤层透气性更差,导致传统煤层增透技术的局限性更为凸显。为了破解这些技术难题,笔者研制

收稿日期:2014-10-18;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2015.02.018

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05041-003-02,2011ZX05065-006)

作者简介:霍中刚(1968—),男,吉林长春人,研究员,现任煤炭科学技术研究院有限公司装备分院院长。

引用格式: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.

HUO Zhong-gang. New technology of carbon dioxide fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 80-83.

成功新型煤层增透设备——二氧化碳致裂器,针对二氧化碳致裂器深孔预裂爆破增透技术进行深入研究,并在贵州贝勒煤矿进行现场试验,旨在实现低透气性煤层的瓦斯高效抽采,从而保证矿井的安全生产。

1 二氧化碳致裂器工作原理及特点

1.1 二氧化碳致裂器工作原理

二氧化碳致裂器由充装阀、发热装置、储液管、定压剪切片、密封垫、释放管等6个部分组成,其结构如图1所示。

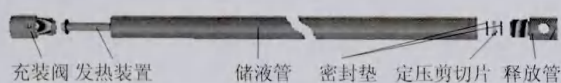


图1 二氧化碳致裂器结构

在二氧化碳致裂器储液管内,利用专用的充装设备注入液态二氧化碳,保持储液管内液态二氧化碳压力为8~10 MPa,启动加热装置产生足量热量,使二氧化碳温度不断升高且压力持续增大^[5-7],突破了二氧化碳的气液变化临界点(31℃、7.4 MPa),管内二氧化碳由气-液两相转化为次临界状态及超临界状态(图2)。超临界二氧化碳具有接近液体的高密度和接近于气体的低黏度、高扩散系数,极易渗透到煤岩体深处的孔隙、裂纹中,有利于促进煤体中的裂隙扩展^[8-9]。

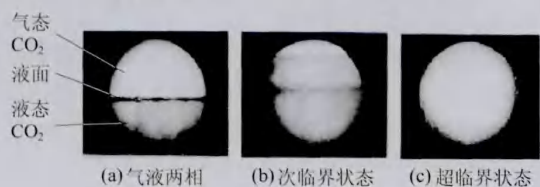


图2 储液管内二氧化碳的状态转变

储液管内急剧升高的压力最终达到定压剪切片极限强度(可设定)时,高压二氧化碳冲破定压剪切片从释放管释放,瞬间喷出的超临界二氧化碳在煤体内产生了以应力波和爆生气体为主要动力的破煤能量。在应力波作用下,介质质点产生径向位移,由此在煤体中产生径向压缩和切向拉伸,当切向拉伸应力超过煤的动抗拉强度时会产生径向裂隙。在应力波向煤体深部传播的同时,爆生气体紧随其后迅速膨胀,进入由应力波产生的径向裂隙中,由于气体的尖劈作用,使裂隙继续扩展。随着裂隙的不断扩展,爆生气体压力迅速降低。当压力降到一定程度时,煤体开裂的应力因子^[10]小于煤体的断裂韧性,

裂隙停止扩展。最终,在钻孔周围形成一片透气性高、裂隙发育的区域,从而达到预裂爆破的目的。

1.2 二氧化碳致裂器的主要特点

1) 安全性高,工作可靠。储液管采用高强度合金钢制造,能承受较高压力而不产生塑性变形;液态二氧化碳气化过程吸收热量,使周围温度降低;发热装置的电气性能指标满足国家标准规定,致裂器在体积分数为9%的可燃气中进行试验,不会产生任何明火或火花,不会引爆可燃气体;二氧化碳爆破致裂过程为物理过程,不同于炸药的化学爆炸,爆破压力释放过程中,不产生相互叠加的震荡波,降低了诱发瓦斯突出的概率。释放的二氧化碳体积约0.6 m³,不会引起二氧化碳超限。

2) 爆破能量可控。通过安装使用不同规格的定压剪切片,可以得到不同的释放压力,从而控制爆破能量。

3) 主要部件可重复使用。二氧化碳致裂器工作后,除发热装置、定压剪切片、密封垫外,其他部件可重复使用。储液管可重复使用上千次。

4) 操作简单方便。在需要进行预裂爆破的位置施工钻孔,成孔后利用钻机将致裂器送入孔中,实现预裂深度的精确定位,远距离放炮后再用钻机取出钻孔中的致裂器,整个过程只需3名工人约在2.5 h内即可完成。

2 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破增透技术及现场试验

井下现场试验在贵州省纳雍县贝勒煤矿1603运输巷M₆煤层中进行。该矿为煤与瓦斯突出矿井,巷道采用U型棚支护。M₆煤层倾角25°~39°,厚度1.75~2.9 m,夹矸0.2~0.8 m;顶(底)板岩性均以细砂岩和粉砂岩为主,局部夹泥岩;普氏系数0.4,破坏类型属Ⅲ~Ⅳ,原始瓦斯含量12.15 m³/t,瓦斯压力1.15 MPa,钻孔抽采影响半径1.0 m。煤层结构简单、层理明显,裂隙发育,掘进期间无断层影响。

2.1 二氧化碳预裂爆破增透技术方案设计

在1603运输巷依次布置1—6号顺层钻孔,布孔方式如图3所示,钻孔布置参数见表1。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。

2.2 二氧化碳预裂爆破增透施工工艺

1) 按照设计参数施工1号爆破孔,实施至预定

深度后,通过压风清理钻孔中的残渣,然后退出钻杆,并测试钻孔瓦斯涌出参数。但此时不可移动钻机或更改钻机参数,如钻机支护位置、钻机方位角、倾角等。

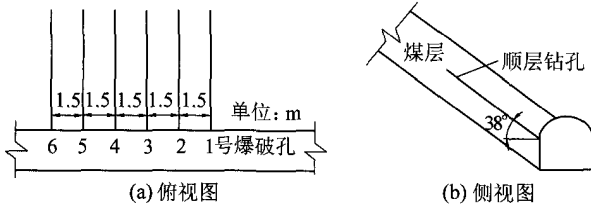


图3 试验钻孔布孔方式

表1 预裂爆破试验钻孔布置参数

孔号	类型	倾角/(°)	钻孔长度/m	至爆破孔距离/m
1	爆破孔	38	100	—
2	考察孔	38	100	1.5
3	考察孔	38	100	3.0
4	考察孔	38	100	4.5
5	考察孔	38	100	6.0
6	考察孔	38	100	7.5

2) 测试完毕后,利用钻机将二氧化碳致裂器推送入孔中。100 m的钻孔中等间距布置10套致裂器,致裂器之间通过一定数量的连接管连接。将致裂器全部送入钻孔后,装入封孔器和止飞机构。

3) 按照《煤矿安全规程》和《防治煤与瓦斯突出规定》的要求实施放炮作业。

4) 爆破完毕后,打开封孔器测试管,测试钻孔瓦斯流量及考察孔的瓦斯流量。

5) 利用钻机将钻孔中的致裂器和连接管依次取出,对试验钻孔进行封孔,封孔长度不小于10 m,始封深度2 m,并持续考察瓦斯涌出参数。

2.3 深孔预裂爆破增透效果分析

1) 试验前后钻孔瓦斯流量。由图4可知:1号爆破孔试验前自然瓦斯流量已衰减到1.6 L/min,通过实施预裂爆破,流量增大到28.2 L/min;邻近爆破孔的2、3、4号考察孔流量也有不同程度的增大,平均流量增大3.8~6.7倍;距离爆破孔较远的5、6号钻孔,瓦斯流量未受到预裂爆破的影响。

同时,试验后钻孔瓦斯流量的衰减也大幅降低,试验前通过自然瓦斯流量拟合得到钻孔自然瓦斯涌出规律为

$$q_1 = 59.28e^{-0.691t}$$

式中: q_1 为自然情况下钻孔瓦斯涌出量,L/min; t 为钻孔自排瓦斯时间,d。

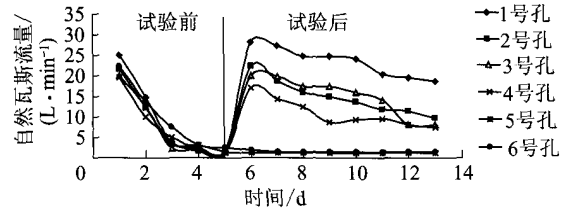


图4 试验前后钻孔自然瓦斯流量

预裂爆破试验后,钻孔瓦斯涌出规律为

$$q_1 = 30.454e^{-0.0528t}$$

试验结果表明,二氧化碳深孔预裂爆破后,钻孔瓦斯流量衰减系数由 0.691 d^{-1} 降为 0.0528 d^{-1} ,有效改善了致裂范围内煤体的孔隙结构,促使瓦斯更容易的解吸及排放,使瓦斯抽采更具有可持续性。

2) 爆破前后煤层透气性系数。目前,国内广泛采用周世宁院士提出的径向流量法来测定煤层的透气性系数^[11]。 M_0 煤层原始透气性系数为 $0.4793 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,进行预裂爆破试验后,通过试验区煤层瓦斯含量、瓦斯压力及钻孔瓦斯流量等实测数据,可计算得到透气性系数为 $12.9643 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,比试验前提高了26倍。

3) 预裂爆破影响半径。由图4及试验前后钻孔瓦斯流量的分析可知,2、3、4号孔处于预裂爆破的影响范围内,预裂爆破影响半径达到了4.5 m,不足6.0 m。

3 二氧化碳深孔预裂爆破影响半径模拟

为了进一步探究预裂爆破的影响范围,在现场试验的基础上,采用ANSYS-DYNA模拟软件,依据贝勒煤矿 M_0 煤层力学参数建立爆生裂纹发育、扩展的几何模型。 M_0 煤层煤体弹性模量 $2 \times 10^9 \text{ Pa}$,泊松比0.35,内摩擦角 33° ,抗压强度0.7 MPa,抗拉强度0.06 MPa,黏聚力3.5 MPa,二氧化碳致裂器的释放压力250 MPa。模拟煤体直径30 m,钻孔直径0.089 m。通过数值模拟,得到了二氧化碳致裂器在煤体中产生的裂隙沿钻孔径向随时间延长的发育情况(图5)。

从图5可以看出,在致裂过程初期,钻孔近区煤体受到破坏形成粉碎圈并向外扩张。在 $t = 159.5 \mu\text{s}$ 时粉碎圈范围已经形成,同时在粉碎圈外围开始形成大量细小裂纹,这些小的裂纹形成了新的自由面,随后爆生气体驱动裂纹继续扩展。在拉应力的作用下,粉碎圈外围的细小裂纹发生开裂,沿径向方向向煤体深处发展,并且在径向裂纹间隙处

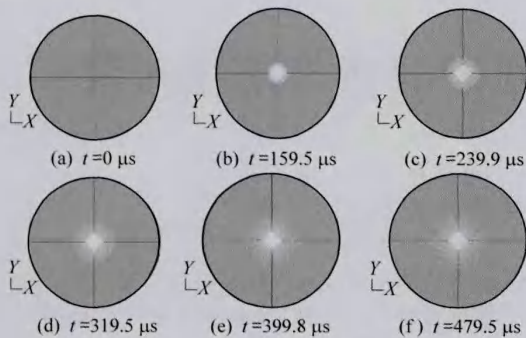


图5 二氧化碳致裂器预裂爆破后裂纹发展过程

也发育有横向裂纹,形成网状交叉裂隙。在 $t = 479.5 \mu\text{s}$ 时,致裂作用到达后期,裂纹开裂的驱动力随着爆生气体压力的衰减而衰减,裂纹停止扩展,此时形成的致裂区域半径约为 5.7 m ,即二氧化碳致裂器的在贝勒煤矿条件下的预裂爆破影响半径。

通过现场试验和数值模拟,得到二氧化碳致裂器深孔预裂爆破的影响半径为 $4.5 \sim 5.7 \text{ m}$,即在这个区域内,煤体裂隙充分发育,爆破孔抽采效果达到最优,可认为抽采影响半径与预裂爆破的影响半径相当,同样为 $4.5 \sim 5.7 \text{ m}$,是原始抽采影响半径的 $4.5 \sim 5.7$ 倍。

4 结 论

1) 采用二氧化碳致裂器进行深孔预裂爆破操作过程安全,预裂后无炮烟,不产生一氧化碳、氮氧化物等有毒气体,不会引起二氧化碳超限,也不会对巷道稳定性产生影响,安全可靠。

2) 在低透气性煤层中进行二氧化碳预裂爆破,能使预裂孔周围煤体产生大量新的裂隙,并促使原生裂隙得到扩展,钻孔瓦斯流量增大 $3.8 \sim 6.7$ 倍,钻孔瓦斯流量衰减系数由深孔预裂爆破前的 0.691 d^{-1} 降为 0.052 d^{-1} ,煤层透气性系数比

试验前提高了 26 倍,增透效果显著。

3) 通过现场试验与数值模拟相结合的方式,得到了预裂爆破的影响半径为 $4.5 \sim 5.7 \text{ m}$,抽采影响半径是试验前的 $4.5 \sim 5.7$ 倍。为消除抽采钻孔之间的空白带,可按照 8 m 的孔间距布置爆破抽采孔,只需在 770 m 长的 1603 运输巷布置 97 个爆破孔,相对原先抽采设计的 385 个抽采孔,可节省 75% 的钻孔工程量,既减少了工程成本,又缩短了施工周期,同时抽采效果也好于预裂前的钻孔瓦斯抽采效果,为低透气性煤层的安全生产提供了保障,具有较高的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 于不凡. 煤矿灾害防治及利用手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2005.
- [2] 刘健,刘泽功,石必明,等. 突出煤层快速掘进深孔预裂爆破预抽瓦斯技术[J]. 煤炭科学技术,2008,36(8):45-48.
- [3] 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.
- [4] 刘健,刘泽功,蔡峰. 石门揭煤深孔预裂爆破增透效果试验研究[J]. 煤炭科学技术,2011,39(6):30-32,128.
- [5] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破,1994(3):72-74.
- [6] 魏刚,夏洪满,姜凤岗,等. 液态 CO_2 爆破器落煤试验研究[J]. 煤矿开采,2009,14(1):22-24.
- [7] 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.
- [8] 杜玉昆,王瑞和,倪红坚,等. 超临界二氧化碳射流破岩试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(4):93-96.
- [9] GUPTA A P. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalance[R]. SPE 96992,2005.
- [10] BROCK D. 工程断裂力学基础[M]. 王克仁,何明元,高桦,译. 北京:科学出版社,1980:114-159.
- [11] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机理[J]. 煤炭学报,1990,15(1):15-24.

(上接第 79 页)

- [4] 曹代勇,姚征,李小明,等. 单相流驱替物理模拟实验的煤粉产出规律研究[J]. 煤炭学报,2013,38(4):264-268.
- [5] 刘升贵,贺小黑,李惠. 煤层气水平井煤粉产生机理及控制措施[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(4):508-512.
- [6] 柳迎红,刘强,刘春艳. 煤层气解堵实验研究[J]. 中国煤层气,2009,6(4):34-37.
- [7] 李瑞,王生维,陈立超,等. 煤层气排采中煤粉产出量动态变化及影响因素[J]. 煤炭科学技术,2014,42(6):122-125.
- [8] 魏迎春,张傲翔,姚征,等. 韩城区块煤层气排采中煤粉产出规

律研究[J]. 煤炭科学技术,2014,42(2):85-89.

- [9] 王庆伟. 沁南潘庄区块煤粉产出机理与控制因素研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013:57-95.
- [10] 张公社,田文涛,陶杉,等. 煤层气储层煤粉运移规律试验研究[J]. 石油天然气学报,2011,33(9):105-108.
- [11] 王双明,王晓刚,范立民,等. 韩城矿区煤层气地质条件及赋存规律[M]. 北京:地质出版社,2008:45-48.
- [12] 郑重. 韩城矿区煤的煤岩特征及煤层气生储因素分析[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(5):23-25.
- [13] SY-T 6302—1997,压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法[S].