

液态 CO₂ 致裂技术在冲击地压防治中的应用

张宏伟¹, 朱峰¹, 李云鹏¹, 张柏林², 陈莹¹, 张智纲²

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000; 2. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁抚顺 113122)

摘要:为解决冲击地压常规解危措施中的难题,研发了冲击地压防治新技术,即液态 CO₂ 致裂。系统介绍了液态 CO₂ 致裂技术的工作原理,在实验室中通过自主研发设备进行压力转化率测试,测试了不同孔壁和泄能头间距与爆破压力的关系,根据实验室研究成果在现场进行了工业性试验。研究实践表明,液态 CO₂ 致裂无明火、可反复使用,是一种新型安全高效的防冲手段。孔壁和泄能头间距越小,孔壁所受压力越大;间距为 10~21 mm 时,压力转化率为 70%~82%;封孔较不封孔压力增大了 52.3%。选用直径为 50、65 mm 两种规格的钻孔进行现场煤体致裂,通过钻孔窥视和光纤监测发现致裂效果良好,研究成果可在高瓦斯冲击地压矿井进行应用。

关键词:冲击地压;液态 CO₂ 致裂技术;压力转化率;钻孔窥视;光纤监测

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)12-0023-07

Application of liquid CO₂ fracturing technique in rock burst control

ZHANG Hongwei¹, ZHU Feng¹, LI Yunpeng¹, ZHANG Bailin², CHEN Ying¹, ZHANG Zhigang²

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. CCTEG Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China)

Abstract: In order to solve the problem of rock burst in conventional controlling measures, this paper studied the impact of new technology, pressure treatment liquid CO₂ fracturing system. This paper introduced the working principle of liquid CO₂ fracturing technology, test the conversion rate of pressure by independent development equipment in the laboratory, and test the relationship between the blasting pressure and the different spacing of hole wall and discharge head. According to the results, industrial experiment is carried out in the field. The results indicates that liquid CO₂ fracturing can be no fire and used repeatedly, it is a new type of safe and efficient controlling measure. The smaller the spacing between hole wall and discharge head, the more pressure on the hole wall. When the spacing is from 10 mm to 21 mm, the conversion rate of pressure is 70% ~ 82%. The pressure of sealing increased by 52.3% compared with no sealing. Selected two types of drilling hole (ø50 mm, ø65 mm) to split the coal seam in the field, it has good pressure relief effect monitored by peeping drilling hole and optical fiber sensor, the research results can be applied in high gas and rock burst mines.

Key words: rock burst; liquid CO₂ fracturing technique; the conversion rate of pressure; peeping drilling hole; optical fiber monitoring

0 引言

冲击地压作为矿井动力灾害中最为严重的灾害之一,严重影响着矿井的安全生产,甚至危及工人的生命。截至 2015 年,全国共有 177 个冲击地压矿井,如何有效的对冲击地压进行防治,已经成为众多

科研工作者和现场专家亟待解决的问题。目前,冲击地压解危措施主要有钻孔卸压^[1-4]、煤层注水^[5-8]、卸压爆破^[9-12]、水压致裂^[13-15]等手段,根据矿井工作面不同的地质环境和开采情况,采用不同的解危措施。由于矿井地质条件不尽相同,在众多措施中,有些矿井采用常规措施仍达不到理想的卸

收稿日期:2017-08-31;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.12.005

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274117)

作者简介:张宏伟(1957—),男,黑龙江汤原人,教授,博士生导师。通讯作者:朱峰,博士研究生。Tel:13464874687, E-mail: huafeng3966@126.com

引用格式:张宏伟,朱峰,李云鹏,等. 液态 CO₂ 致裂技术在冲击地压防治中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 23-29.

ZHANG Hongwei, ZHU Feng, LI Yunpeng, et al. Application of liquid CO₂ fracturing technique in rock burst control[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 23-29.

压解危效果,因此亟需寻求一种安全有效的冲击地压防治手段。

笔者采用液态 CO_2 致裂技术对冲击地压矿井煤体进行卸压爆破,从而达到卸压解危的目的。液态 CO_2 致裂技术目前在瓦斯增透、煤岩巷掘进、顶煤欲裂等领域应用正趋于成熟^[16-20],在冲击地压领域应用几乎空白。笔者从致裂原理、实验室测试、现场工业性试验和效果检验介绍了液态 CO_2 致裂技术在冲击地压防治领域的可行性及有效性,为冲击地压防治提供了新手段。

1 工程背景

同煤集团忻州窑矿是典型的煤柱型冲击地压矿井,西二盘区 8939 工作面保护煤柱应力集中,易发生冲击地压。8939 工作面所采煤层属于“三硬”煤层,煤层注水措施效果不明显;同时忻州窑矿属于高瓦斯矿井,不能在回采巷道应用卸压爆破措施。目前 8939 工作面主要采取钻孔卸压措施进行卸压解危。

通过数值模拟研究,8939 工作面与 8937 工作面之间的煤柱,在巷道掘进前和掘进后煤柱应力分布状态如图 1 所示,煤柱应力分布由单峰值曲线变为双峰值曲线。

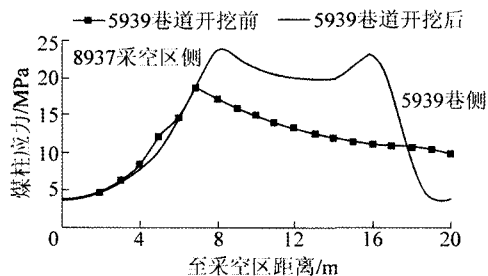


图1 8937与8939工作面之间煤柱应力分布曲线
Fig.1 Stress distribution curve of coal pillar between Panel 8937 and Panel 8939

靠近 5939 巷道一侧的应力峰值点距巷帮约为 7 m,应力由 12 MPa 上升至 23 MPa,升高了 91.7%;靠近采空区侧的应力峰值点距 5939 巷约 13 m,应力峰值由 19 MPa 上升至 23.5 MPa,升高了 23.7%。根据卸压钻孔解危原理,钻孔长度应超过应力峰值区域,才可起到更好的效果。因此,建议在 8939 工作面 5939 巷向保护煤柱施工 10~15 m 长的钻孔。

现场施工过程中,钻孔直径为 108 mm,钻孔间距为 0.5 m,距巷道底板 0.5 m,垂直煤壁使用爬道钻机进行施工。受煤柱高应力影响,钻机仅能在煤体

中施工 5~6 m,将出现卡钻现象,当再钻进时可能会出现丢钻杆和翻钻伤人现象,与设计距离相差较大。爬道钻机满足不了钻孔的深度要求,若减小钻孔直径,则钻孔施工长度可增加,但卸压效果不好。另有 170 型钻机可施工长钻孔,但由于该设备过于沉重,搬家、安装等工艺操作不便,将使卸压区域跟不上回采的速度,影响工作面正常生产。

因此,提出使用液态 CO_2 致裂技术进行爆破,该技术可使用爬道钻机施工小钻孔,既满足了卸压钻孔的长度,又可在钻孔中煤柱高应力区进行 CO_2 致裂爆破,增大影响范围,减少工作量,提高卸压效果,从而达到解危防冲的目的。

2 液态 CO_2 致裂技术工作原理

2.1 CO_2 致裂器

CO_2 致裂器是一种新型的用于煤炭开采的致裂设备,与传统的火药爆破器材不同, CO_2 致裂器是由一个高强度的可以重复使用的充装液态 CO_2 金属管、加热器(发热装置)、定压泄能机构等组成。将致裂器置于煤体钻孔内,使用发爆器启动加热器,加热内部的液态 CO_2 成为气体,管道中压力持续增大压迫定压泄能机构,使其中的定压剪切片破断,随后释放出超大体积的 CO_2 气体,进行爆破致裂。 CO_2 致裂器各部分构成如图 2 所示。



1—起爆头(充装阀);2—发热管;3—主管;
4—密封垫;5—剪切片;6—泄能头
图2 CO_2 致裂器结构及组成部件

Fig.2 Structure and components of CO_2 splitting device

2.2 液态 CO_2 致裂原理

CO_2 致裂爆破在巷道煤柱侧施工只发生在介质内部,没有爆破自由面,主要利用了 CO_2 致裂的内部作用, CO_2 致裂器埋设需要保证一定的安全深度,确保巷道不能出现明显致裂外部作用现象。 CO_2 在低于 31 $^{\circ}\text{C}$ 或压力大于 7.35 MPa 时以液态存在,而温度超过 31 $^{\circ}\text{C}$ 时开始气化,且随温度的变化而不断变化。利用这一特点,在致裂器主管内充装液态 CO_2 ,使用加热器快速激发加热装置,液态 CO_2 瞬间气化膨胀并产生高压,当压力达到剪切片极限强度时,定压剪切片破断,高压气体从放气头释放,作用在煤岩体上。除形成爆炸空腔外,自爆源中心向外依次形

成压缩粉碎区、破裂区和震动区,其中卸压范围主要包括压缩粉碎区、破裂区,从而达到爆破卸压的目的,其原理如图3所示,致裂器采用可连接式,可实现多点同时定向致裂。为了满足 CO₂致裂器的现场使用,CO₂致裂器的组装、充装、固定以及起爆、回收等多个工艺流程,如图4所示。

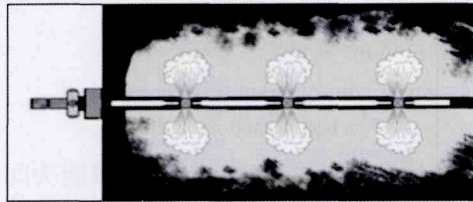


图3 CO₂致裂器串联爆破示意

Fig. 3 Series blasting schematic diagram of CO₂ splitting device

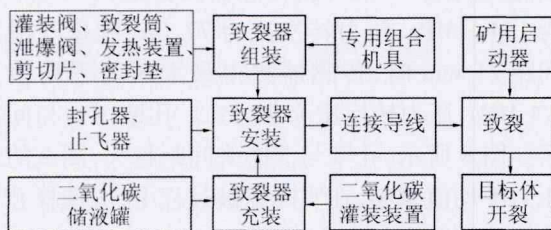


图4 CO₂致裂器工艺流程

Fig. 4 CO₂ splitting device technology flow chart

和炸药爆破相比,CO₂致裂措施爆破威力不及炸药,但其安全性好,在某些方面可代替炸药,主要优点如下:①工作时不产生任何明火或火花;②致裂后致裂器表面温度极低,产生的CO₂气体营造了一个惰性气体环境,从本质上杜绝了瓦斯爆炸的可能性;③CO₂致裂器致裂威力较大、抛煤量多、块大、抛出距离短,减少了工人的劳动强度,且不会造成放炮伤人事故的发生;④CO₂致裂器致裂后基本不扬尘,降低了煤尘爆炸隐患;⑤CO₂致裂器的致裂能力可控,通过选择不同剪切片、CO₂充装质量及发热装置等调节控制致裂器的工作压力;⑥CO₂致裂器无炮烟,不会产生有毒气体,不危害工人身体健康;⑦CO₂致裂器一次投入可反复使用。

3 液态 CO₂致裂爆破实验室试验

3.1 试验目的

在前期现场试验过程中,致裂器与钻孔孔壁间距过大或过小,爆破效果均不理想。为了确定合理的致裂爆破参数,针对液态 CO₂致裂器爆破进行实验室测试,确定致裂器与钻孔孔径匹配关系,致裂器爆破时钻孔中不同位置受力情况以及

封孔对爆破效果的影响,为冲击地压防治提供依据。

3.2 试验设备研发

考虑到试验操作的可行性和安全性,研发设计了 CO₂爆破测试装置。测试装置由三棱柱支架、钢管和 CY-YD-214 压力传感器 3 部分组成,如图5所示,三棱柱支架用来维持测试装置的稳定;钢管用来模拟爆破钻孔,垂直于钢管外壁每隔 200 mm 加工 3 个小孔,共加工 6 组,用来安装压力传感器和模拟煤层透气性;压力传感器垂直固定在测试装置管壁,用来测试致裂器爆破时的压力。



图5 CO₂爆破测试装置

Fig. 5 CO₂ blasting test device

研发了3种规格的测试装置尺寸见表1;致裂器参数见表2。

表1 测试装置参数

Table 1 Test device parameters

测试装置	内径/mm	长度/mm	管壁厚度/mm
CSZZ-82/2500	82	2 500	6.5
CSZZ-68/2500	68	2 500	4.5
CSZZ-48/2500	48	2 500	14.0

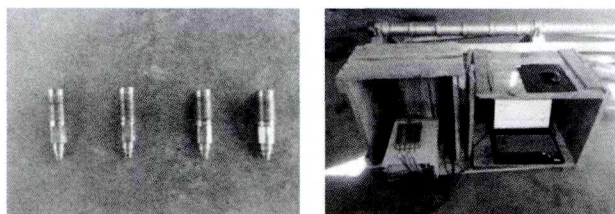
表2 液态 CO₂致裂器规格参数

Table 2 Specification parameters of liquid CO₂ splitting device

致裂器	外径/	主管长	药卷长	剪切片	剪切片	装气量/
	mm			度/mm	度/mm	
ZLQ-38/300	38	300	15	高强合金钢	200/300	0.07

将致裂器 ZLQ-38/300 放置在 3 种规格的测试装置中进行爆破测试;试验采用 YE5853-4CH 信号放大器和 YE6231 数据采集器如图6所示,采集爆破过程中释放的 CO₂对管壁的压力,使用 YE7600 软件处理数据,最终通过对比分析测试压力数据来

确定爆破参数。



(a) CY-YD-214压力传感器 (b) CO₂爆破参数测试仪

图6 试验设备

Fig. 6 Test equipments

3.3 试验方案设计

根据试验目的和要求,共设计6种测试方案(表3),每组方案各测试3次,测试方案如图7、图8所示。爆破前打开所有管壁小孔,通过控制剪切片强度来控制爆破威力。采样频率设置为96 kHz,需要封孔时使用纯棉布进行封孔0.5 m。

表3 试验方案设计
Table 3 Test scheme design

方案	测试装置规格	致裂器规格	是否封孔	传感器数量	剪切片强度/MPa	孔壁与泄能头间距/mm
方案1	CSZZ-48/2500	ZLQ-38/300	封孔	2	200	10
方案2	CSZZ-68/2500	ZLQ-38/300	封孔	2	200	17
方案3	CSZZ-82/2500	ZLQ-38/300	封孔	2	200	21
方案4	CSZZ-82/2500	ZLQ-38/300	封孔	4	300	—
方案5	CSZZ-82/2500	ZLQ-38/300	封孔	2	300	21
方案6	CSZZ-82/2500	ZLQ-38/300	不封孔	2	300	21

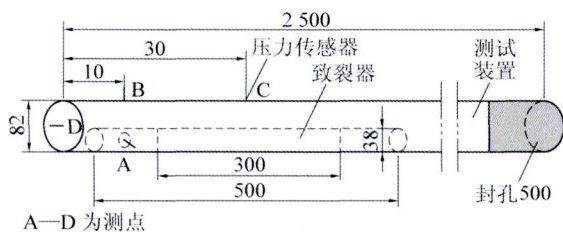


图7 测试方案示意

Fig. 7 Test scheme diagram

3.4 试验数据处理分析

1) 孔径匹配数据处理分析。根据试验设计对方案1—方案3进行爆破,测试致裂器与钻孔孔径匹

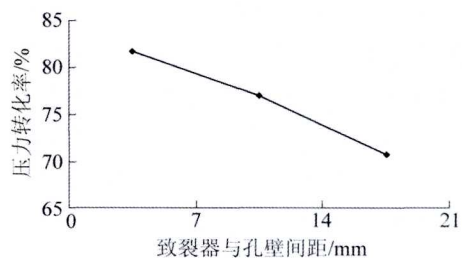


图8 孔壁压力与间距的关系

Fig. 8 Relationship between pore wall pressure and distance

配关系,每种方案测试3次。孔壁与泄能头间距10 mm时,传感器测得最大压力平均值为163.6 MPa,剪切片强度为200 MPa,压力转换比为81.8%;孔壁与泄能头间距17 mm时,传感器测得最大压力平均值为154.1 MPa,压力转换比为77.1%;孔壁与泄能头间距21 mm时,传感器测得最大压力平均值为141.4 MPa,压力转换比为70.7%。孔壁压力与间距关系如图8所示,孔壁与泄能头间距越大,测试的最大压力平均值越小,在实际爆破过程中,应选择孔壁与泄能头间距小的组合。

因此,致裂器与孔壁间距为10~21 mm时,剪切片强度在200 MPa时,压力转化率在70%~82%。现场使用时,建议致裂器与钻孔孔壁间距为10~15 mm。

2) 测试装置不同位置受力分析。根据试验设计对方案4进行爆破,确定测试装置不同位置的受力情况(图7)。测点A压力传感器距离致裂器泄能头约21 mm,与泄能头出气口保持水平;测点B和C均位于测试装置顶部,测点D位于测试装置尾部。对该方案测试3次,正对泄能头出气口A点压力最大,压力均达到200 MPa以上,煤体单轴抗压强度为32.3 MPa,测点A可以达到煤体破坏要求;测点C基本不受影响,压力几近为0,测点C和测点D受影响较小,压力均未超过10 MPa,均达不到煤体的破坏要求,致裂器仅对泄能头正对区域有致裂效果。

因此,在现场实际操作中,务必使致裂器泄能头径向保持水平。对于爆破范围较长的区域,可实施多节致裂器串联爆破。

3) 封孔效果数据处理分析。根据试验设计对方案5、方案6进行爆破,确定封孔对爆破效果的影响。在封孔条件下测试压力最大为201.7 MPa,爆破时发出闷声,管壁打开的5组小孔喷出大量烟

雾,整个测试装置产生轻微变形;不封孔条件下测试压力最大为 132.4 MPa,爆破声音巨大,管壁打开的 5 组小孔喷出少量烟雾,致裂器瞬间反冲出测试装置。

由此可见,封孔条件下致裂器对测试装置爆破作用力更大、更为安全;爆破压力比不封孔条件下增大 52.3%。因此,在现场进行爆破前必须封孔。

4 现场试验及效果分析

4.1 直径 38 mm 致裂器试验

在忻州窑矿 8939 工作面 5939 巷煤柱侧 680 m 附近进行液态 CO₂致裂爆破试验,并用钻孔窥视设备对爆破效果进行检验。采用致裂器规格 ZLQ-38/300 和 ZLQ-38/600 多个串联爆破,CO₂质量分别为 0.07 kg 和 0.16 kg,施工直径 50 mm 钻孔进行爆破,共施工 3 个钻孔,钻孔间距为 1.0 m,致裂器与钻孔孔壁距离为 12 mm。试验参数及效果见表 4。

表 4 直径 38 mm 致裂器爆破参数及效果
Table 4 Blasting parameters and effect of ϕ 38 mm splitting device

爆破孔	致裂器型号	孔径/mm	孔深/m	装药长度/m	装药质量/kg	封孔措施	爆破效果
1	ZLQ-38/300	50	10	1.4	0.21	未封孔	不明显
2	ZLQ-38/300 ZLQ-38/600	50	10	1.7	0.30	黄土封孔	孔壁部分破坏
3	ZLQ-38/300 ZLQ-38/600	50	10	2.0	0.39	黄土封孔	拔出困难 塌孔 2m

爆破孔 1 装气量仅 0.21 kg,未封孔,同等条件下爆破效果不明显。爆破孔 2 装气量为 0.30 kg,使用湿润黄土进行封孔,将黄土压紧压实,爆破后孔壁部分破坏,孔内有很多碎屑。爆破孔 3 装气量为 0.39 kg,使用黄土进行封孔,致裂器拔出过程较为困难,窥视仪器仅能窥视到孔底 7.0 m,说明爆破后钻孔底部塌孔 3.0 m,孔壁有很多小煤块和碎屑,孔壁在爆破后凹凸不平,爆破效果较好,如图 9 所示。

因此,型号为 ZLQ-38/300 和 ZLQ-38/600 串联爆破对应的 ϕ 50 mm 钻孔,CO₂质量至少为 0.3 kg 才会对钻孔起到爆破效果,爆破时必须封孔,装气量越多爆破效果相对越好。

4.2 直径 53 mm 致裂器试验

在 8939 工作面 5939 巷煤柱侧 1115 m 附近再次进行液态 CO₂致裂爆破试验,并用钻孔窥视设备

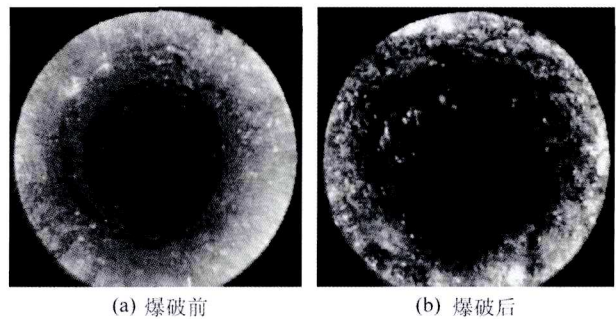


图 9 5939 巷 680 m 处钻孔爆破前后效果示意
Fig. 9 Effect diagram of borehole shape before and after blasting at 680 m in Roadway 5939

对爆破效果进行检验。本次试验 CO₂致裂器规格为 ZLQ-53/800,即外径 53 mm、主管长度为 800 mm,CO₂质量约 0.4 kg。试验选取直径为 65 mm 钻头施工钻孔,共施工 3 个钻孔,钻孔间距为 1.0 m,钻孔用黄土封孔 1.0 m,致裂器与钻孔孔壁距离为 12 mm。爆破参数及效果见表 5,爆破后孔内出现塌孔现象,有较多的破碎煤块,孔壁较为粗糙。因此,型号为 ZLQ-53/800 对应的 ϕ 65 mm 钻孔爆破效果良好,对煤柱的应力峰值区域进行了有效的卸压爆破(图 10),其中,3 个钻孔均采用黄土封孔;爆破孔 1 爆破效果:孔内有气体扩散声,仅探测至 8.0 m 处,孔内有众多碎小煤块,控制孔有较小煤块和白雾;爆破孔 2 爆破效果:塌孔 2.5 m,孔内有众多碎小煤块,孔壁较为粗糙,控制孔有较小煤块和白雾;爆破孔 3 爆破效果:致裂器拔出困难,塌孔 2.3 m,控制孔有较小煤块和白雾。

表 5 直径 53 mm 致裂器爆破参数及效果
Table 5 Blasting parameters and effect of ϕ 53 mm splitting device

爆破孔	致裂器型号	孔径/mm	孔深/m	装药长度/m	装药质量/kg
1	ZLQ-53/800	65	10	0.8	0.40
2	ZLQ-53/800	65	10	0.8	0.40
3	ZLQ-53/800	65	10	0.8	0.40

4.3 效果分析

采用光纤监测对 ϕ 108 mm 卸压钻孔和 ϕ 65 mm 液态 CO₂爆破孔进行效果监测。卸压孔(1 号和 2 号)最大应变达 50,卸压范围约 0.8 m;爆破孔(3 号和 4 号)最大应变为 105,卸压范围约 1.5 m。由此可见,同比矿用 ϕ 108 mm 卸压钻孔,CO₂致裂爆破减小了钻孔直径,增加了钻孔长度,扩大了钻孔间距,

增大了卸压范围,应用效果良好,建议推广使用。

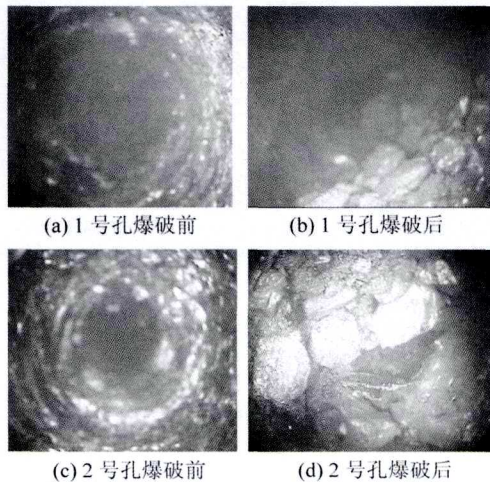


图10 5939巷1115m处钻孔爆破前后效果示意
Fig.10 Effect diagram of borehole shape before and after blasting at 1 115 m in Roadway 5939

5 结 论

1)介绍了致裂器的组成结构和工作原理,液态CO₂致裂技术具有无明火、可反复使用等优点,可在防冲领域进行应用。

2)通过自主研发设备在实验室测试了爆破压力参数。封孔比不封孔效果好,压力增大52.3%;在同一钻孔中,仅泄能头出气口位置对孔壁作用力最大,其余位置压力很小。现场应用时,务必使致裂器泄能头径向保持水平,进行封孔后爆破。

3)致裂器与孔壁间距为10~21mm时,剪切片强度在200MPa时,压力转化率在70%~82%。现场应用时,建议致裂器与钻孔内壁间距10~15mm。

4)在忻州窑矿工作面保护煤柱区域进行了工业性试验,通过钻孔窥视仪探测发现爆破后钻孔尾部出现塌孔、拔出致裂器困难等现象;通过光纤监测卸压影响范围,在煤体中液态CO₂致裂技术较钻孔卸压措施起到较好的卸压作用,可在冲击地压防治领域进行应用。

参考文献(References):

[1] 林柏泉,杨威,吴海进,等.影响割缝钻孔卸压效果因素的数值分析[J].中国矿业大学学报,2010,41(2):153-157.
LIN Boquan, YANG Wei, WU Haijin, *et al.* A numeric analysis of effects different factors have on slotted drilling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 41(2): 153-157.

[2] 兰永伟.钻孔卸压防治煤矿冲击地压的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2005.

[3] 陈峰,潘一山,李忠华,等.利用钻屑法对卸压钻孔措施效果的分析评价[J].岩土工程学报,2013,35(S2):266-270.
CHEN Feng, PAN Yishan, LI Zhonghua, *et al.* Analysis and evaluation of effects of borehole pressure relief measures by drilling cutting method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 266-270.

[4] 耿敏敏,马占国,龚鹏,等.高应力煤巷卸压孔布置方式对卸压效果影响分析[J].中国安全生产科学技术,2012,8(11):5-10.
GENG Minmin, MA Zhanguo, GONG Peng, *et al.* Analysis of the effect on pressure relief by the pressure relieving hole layouts on high stress coal roadway[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(11): 5-10.

[5] 肖国知,王兆丰.煤层注水防治煤与瓦斯突出机理的研究现状与进展[J].中国安全科学学报,2009,19(10):150-158,179.
XIAO Zhiguo, WANG Zhaofeng. Status and progress of studies on mechanism of preventing coal and gas outburst by coal seam infusion[J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(10): 150-158, 179.

[6] 章梦涛,宋维源,潘一山.煤层注水预防冲击地压的研究[J].中国安全科学学报,2003,13(10):73-76,2.
ZHANG Mengtao, SONG Weiyuan, PAN Yishan. Study on water pouring into coal seam to prevent rock burst[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(10): 73-76, 2.

[7] 潘俊锋,宁宇,蓝航,等.基于千秋矿冲击性煤样浸水时间效应的煤层注水方法[J].煤炭学报,2012,37(S1):19-25.
PAN Junfeng, NING Yu, LAN Hang, *et al.* Water injection methods in coal bed based on experiments of water immersion time effect of Qianqiu coal samples with burst trend[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 19-25.

[8] 蒋承林.煤层注水的防突机理分析[J].湘潭矿业学院学报,1999,14(3):3-6.
JIANG Chenglin. Analysis on the mechanism of outburst prevention on seam infusion[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 1999, 14(3): 3-6.

[9] 魏明尧,王恩元,刘晓斐.深部煤层卸压爆破防治冲击地压效果的数值模拟研究[J].岩土力学,2011,32(8):2539-2543.
WEI Xiaoming, WANG Enyuan, LIU Xiaofei. Numerical simulation of rock burst prevention effect by blasting pressure relief in deep coal seam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2539-2543.

[10] 李剑锋,何岗,国兴福.深孔卸压爆破控制冲击地压的机理及应用[J].煤炭科技,2008(1):75-77.
LI Jianfeng, HE Gang, GUO Fuxing. Mechanism and application of deep hole pressure relief blast to control rock burst[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2008(1): 75-77.

[11] 欧阳振华.多级爆破卸压技术防治冲击地压机理及其应用[J].煤炭科学技术,2014,42(10):32-36.
OUYANG Zhenhua. Application and mechanism of mine strata pressure pumping prevention with multi stage blasting pressure releasing technology[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 32-36.

[12] 顾合龙,南华,王文,等.爆破卸压技术防治冲击地压的应

- 用与检验[J].煤炭科学技术,2016,44(4):22-26.
- GU Helong, NAN Hua, WANG Wen, *et al.* Inspection and application of blasting and pressure released technology to mine pressure bump prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 22-26.
- [13] 欧阳振华, 齐庆新, 张寅, 等. 水压致裂预防冲击地压的机理与试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S2): 321-325.
- Ouyang Zhenhua, QI Qingxin, ZHANG Yin, *et al.* Mechanism and experiment of hydraulic fracturing in rock burst prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 321-325.
- [14] 池明波. 水力割缝防治忻州窑矿冲击地压试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [15] 范晋伟. 冲击煤层的水压致裂防治研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [16] 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 Zhonggang. New technology of carbon dioxide fracture applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 80-83.
- [17] 李付涛. 二氧化碳爆破增透技术的试验应用[J]. 煤, 2016(1): 16-18.
- LI Futao. The trial application of carbon dioxide blasting anti-reflection technology[J]. Coal, 2016(1): 16-18.
- [18] 王海东. 突出煤层掘进工作面 CO₂ 可控相变致裂防突技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 70-74.
- WANG Haidong. CO₂ controllable phase transition fracturing and outburst prevention technology of gateway driving face in outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 70-74.
- [19] 刘文郁, 王滨. 二氧化碳爆破深孔预裂强化增透试验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(3): 178-179.
- LIU Wenyu, WANG Bin. Experimental study of carbon dioxide deep hole pre-splitting blasting Improved anti-reflection[J]. Coal Technology, 2016, 35(3): 178-179.
- [20] 周西华, 门金龙, 宋东平, 等. 煤层液态 CO₂ 爆破增透促抽瓦斯技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(2): 60-65.
- ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, *et al.* Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO₂ blasting[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2): 60-65.
- (上接第 22 页)
- [7] 刘金海. 煤矿冲击地压监测预警技术新进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 71-77.
- LIU Jinhai. New progress of monitoring and early warning technology of rock burst within coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 71-77.
- [8] 齐庆新, 李晓璐, 赵善坤. 煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 1-5.
- QI Qingxin, LI Xiaolun, ZHAO Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 1-5.
- [9] 窦林名, 牟宗龙, 陆菜平, 等. 采矿地球物理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [10] 潘俊锋, 王书文, 刘少虹, 等. 基于集中静载荷探测的冲击地压危险性预评价[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1227-1234.
- PAN Junfeng, WANG Shuwen, LIU Shaohong, *et al.* Pre-evaluation of burst hazards based on concentrated static load detection[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1227-1234.
- [11] 韩军. 煤矿冲击地压地质动力环境研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 83-88, 105.
- HAN Jun. Study on geologic dynamic environment of mine strata pressure bump[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 83-88, 105.
- [12] 姜福兴, 舒凑先, 王存文. 基于应力叠加回采工作面冲击危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2428-2435.
- JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2428-2435.