

## 二氧化碳爆破采掘装备及技术研究

杜泽生<sup>1,2,3,4</sup> 范迎春<sup>1,2,4</sup> 薛宇飞<sup>2,4</sup> 陈朋磊<sup>2,4</sup> 王 洁<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 河南省煤炭科学研究院有限公司, 河南 郑州 450001;  
3. 中国安全生产协会, 北京 100013; 4. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

**摘 要:** 针对试验矿井煤巷掘进速度慢、安全性低、爆破产生粉尘和有害气体较多的问题, 提出了适合试验矿井煤巷掘进的二氧化碳爆破技术, 研制了二氧化碳爆破开采器, 并获得国家专利。该装备的工作原理是利用液态二氧化碳瞬间发生相变产生高压, 作用于周围煤(岩)体, 从而实现破煤(岩)。经井下1 600 m长煤巷的掘进实践表明: 二氧化碳爆破相比于传统炸药爆破, 安全性高, 爆破效果好, 煤炭成块率可提高1倍以上, 达到65%~78%; 抛煤距离缩短约40%, 为0~3 m; 粉尘及炮烟量减少约50%, 二氧化碳体积分数一般为0.02%~0.09%, 一氧化碳体积分数一般为 $(3\sim16)\times10^{-6}$ ; 该技术能够为井下创造良好的掘进工作环境, 有利于作业人员的身体健康, 实现了安全高效掘进。

**关键词:** 二氧化碳爆破技术; 二氧化碳爆破开采器; 液态二氧化碳; 相变

**中图分类号:** TD235.45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)09-0036-07

## Study on carbon dioxide blasting mining and driving equipment and technology

Du Zesheng<sup>1,2,3,4</sup> Fan Yingchun<sup>1,2,4</sup> Xue Yufei<sup>2,4</sup> Chen Penglei<sup>2,4</sup> Wang Jie<sup>2</sup>

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Henan Provincial Coal Science Research Institute Company Limited, Zhengzhou 450001, China; 3. China Association of Work Safety, Beijing 100013, China;  
4. China Academic for Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

**Abstract:** According to the slow drilling and blasting driving speed, low safety, dust occurred from the blasting and many harmful gas problems of the seam gateway in the trial mine, a carbon dioxide blasting technology suitable for the seam gateway driving in the trial mine was provided. A carbon dioxide blasting miner was researched and developed with the National Patent. The operation principle of the equipment was to apply the high pressure from the phase transition during the liquid carbon dioxide and then would be affected to the surrounding coal and rock mass. Therefore, the coal and rock breaking was realized. The driving experiment practices of a 1 600 m seam gateway in the underground mine showed that in comparison with the conventional blasting, the carbon dioxide blasting would have the high safety, high blasting effect and good blasting effect. The lump coal rate could be improved over 200% and would be reached at 65%~78%. The coal throw distance was reduced about 40% and was 0~3 m. The dust and blasting fume volume was reduced about 50%, the carbon dioxide volume fraction was 0.02%~0.09% generally and the carbon monoxide volume fraction was  $(3\sim16)\times10^{-6}$  generally. All those could create an excellent driving working environment in the underground mine, could be favorable to the physical health of the operation personnel and could realize the safety and high efficient driving.

**Key words:** carbon dioxide blasting technology; carbon dioxide blasting device; liquid carbon dioxide; phase transition

## 0 引 言

煤炭是我国的主要能源, 据调查显示, 我国有90%的煤炭处于地表之下, 因此, 在井工开采煤矿的

生产过程中, 巷道掘进占据着非常重要的地位。煤矿巷道掘进工程中, 煤巷掘进工程约占总巷道掘进工程量的70%。目前, 我国井工煤矿煤巷掘进方式主要有钻眼爆破法<sup>[1-6]</sup>和掘进机掘进法2种。钻眼爆

收稿日期: 2016-05-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.09.007

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2012YQ2401270502); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51404138)

作者简介: 杜泽生(1981—), 男, 河北衡水人, 副研究员, 博士研究生。Tel: 13488882002, E-mail: duzesheng@139.com

引用格式: 杜泽生, 范迎春, 薛宇飞, 等. 二氧化碳爆破采掘装备及技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 36-42.

Du Zesheng, Fan Yingchun, Xue Yufei, et al. Study on carbon dioxide blasting mining and driving equipment and technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 36-42.

破法对地质条件适应性强,开挖成本低,但是钻爆工作的单项工序耗时久,影响掘进效率,需要一些特殊器材,如专用炸药、毫秒雷管、导爆索等,爆破过程中工作面会产生大量粉尘和有害气体,存在较大的安全隐患。掘进机掘进法<sup>[7-11]</sup>具有掘进速度快、用工少、施工安全、开挖面平整、造价低的优点,但是机体庞大,运输不便,对地质条件及煤岩性变化的适应性差,使用有局限性。针对地质条件复杂、煤层赋存变化大、瓦斯灾害严重、煤岩性质变化较大的煤矿,提出了一种全新的、高效的掘进技术设备,即二氧化碳爆破掘进装备及技术(以下称二氧化碳爆破开采器)。

二氧化碳爆破器最早由英国的 CARDON 公司提出,称为 Cardox Tube System,该技术在当时主要用于煤矿采煤。Caldwell T 在对几种防爆型岩石破裂技术的对比中指出,Cardox 装置并不属于爆炸范畴,而只是高压气体发生器,因此,它不会受限于炸药的管制而导致使用范围受到限制。印度学者 S P Singh 介绍了这种装置的结构和使用方法,通过在 Bulawayo 金矿的试验,证实 2 管联爆取得的效果与 5 个装有普通炸药钻孔爆破效果相同,指出 Cardox 装置可以用于采石场大规模开挖和水库、大坝附近的爆破<sup>[12]</sup>。Cardox 装置利用释放出的高速二氧化碳气体产生巨大的剪切力,使固体物质有效地破碎成小块从而便于移动<sup>[13-14]</sup>。在土耳其,煤矿通过在钻孔中使用 Cardox 装置提高块煤率。在英国、德国,液态二氧化碳相变致裂凭借其安全性和稳定性,广泛应用于大型储罐罐壁的清理及易燃、可燃材料的处理。

20 世纪 80 年代,国内一些矿山科学领域的学者开始对这项技术有了初步认识,逐步对二氧化碳爆破器进行技术改进。“十一五”期间开始在煤矿有针对性地进行相关试验,并取得了一定的效果。笔者自 2011 年开始基于 Cardox 装置,对爆破管、发热管化学药剂、起爆头等各组成部分进行深入研究,多次试验、改进,最终形成性能稳定、型号多样的成套装备及技术,目前正在申请矿用产品安全标志证书。

## 1 二氧化碳爆破技术工艺

### 1.1 二氧化碳爆破开采器研制

为了寻找可替代传统雷管炸药爆破的本质安全型爆破技术,基于英国的 Cardox Tube System,研发

了二氧化碳爆破开采器成套装备,该装备以二氧化碳爆破开采器为主体,配备无损组装设备、液态二氧化碳快速充装设备、起爆设备、运输及防碰撞设备等配套装备。

二氧化碳爆破开采器主要由起爆头、发热管、主管、垫片、泄能片及泄能头等 6 个部分组成,如图 1 所示。发热管为化学药剂反应发热,化学药剂是专利配方,主要成分为高氯酸钾、草酸铵、水杨酸等多种化学粉末,其特性为在绝氧的环境中,被强电流激发才会发生反应,产生高热但不燃烧,但在有氧环境中,无论电激发还是火焰加热均不会发生反应。



图 1 二氧化碳爆破开采器基本结构

Fig. 1 Basic structure of carbon dioxide blasting device

二氧化碳在温度为 31 °C 以下或者压力大于 7.2 MPa 时以液态形式存在,而当温度超过 31 °C 时,无论其压力多大,液态二氧化碳相变为气体。利用二氧化碳的这一物理特点,采用配套的充装设备在爆破开采器的主管内充装液态二氧化碳,使用矿用起爆器激发发热管,发热管在 0.1 s 内产生 800 °C 以上的高温,将液态二氧化碳瞬间气化,体积膨胀 600 倍以上产生高压,当压力超过泄能片的剪切强度(可设定压力)时,泄能片被剪断,高压气体从泄能头快速释放,作用在周边煤岩体上,从而达到破岩或落煤的目的<sup>[15-19]</sup>。二氧化碳爆破技术的主要工艺流程为开采器组装、液态二氧化碳充装、钻孔施工、爆破安装和起爆 5 个阶段。

### 1.2 二氧化碳爆破技术工艺及特点

二氧化碳爆破技术能够代替炸药,可广泛用于煤(岩)巷道掘进、工作面落煤,技术工艺如图 2 所示。

二氧化碳爆破开采器是以液态二氧化碳为主要工作介质的物理爆破装备,能够提高作业效率,提高安全度,能够为企业带来巨大的经济效益、环保效益和社会效益<sup>[20-22]</sup>,具有以下技术优点:①采用独特的设计,在工作时不会产生任何明火或火花;②属于低温开采器,爆破后二氧化碳爆破开采器表面温度及产生的二氧化碳温度极低,再加上产生的大量的高压二氧化碳能够营造一个惰性的气体环境,从本质上杜绝了瓦斯爆炸的可能性;③爆破威力大、抛

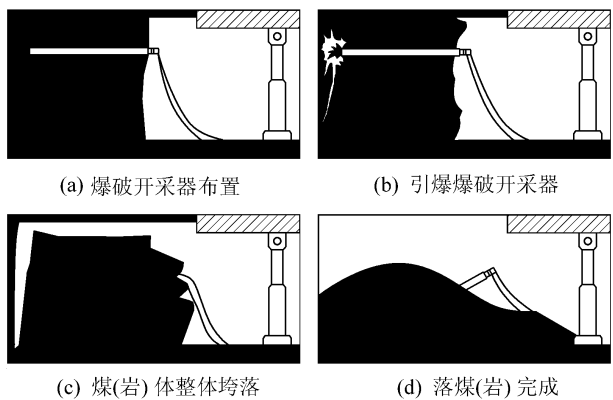


图2 二氧化碳爆破掘进工艺示意

Fig. 2 Schematic diagram of mining technology with carbon dioxide blasting

煤量多、块大、抛出距离短,减少工人劳动强度,且不会发生放炮崩人事故;④爆破后,粉煤比例明显降低,基本不扬尘,消除了煤尘爆炸隐患;⑤爆破能力可控,通过选择不同泄能片、二氧化碳充装质量及发热管等调节控制开采器的工作压力;⑥爆破后,由于发热管的燃烧仅会产生微量一氧化碳及氮氧化物等有毒气体,能够改善工作环境;⑦一次投入可反复使用。设备结构及性能经数千次反复试验、改进、优化,使用中故障少、可靠性高、适用性强。

1.3 爆炸能量换算与选型

二氧化碳爆破器作为一种具有爆炸能量的装备,经过大量试验及经验总结<sup>[23-25]</sup>,得出其爆炸能量计算公式见式(1),爆炸当量计算见式(2)。

$$W = \frac{P_1 V}{K - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K - 1}{K}} \right] \quad (1)$$

式中:  $W$  为爆炸能量, J;  $P_1$  为爆炸压力, Pa;  $P_2$  为标准大气压力, Pa;  $V$  为爆破器内部空间体积,  $\text{m}^3$ , 取  $0.001 \text{ m}^3$ ;  $K$  为二氧化碳绝热系数, 取  $1.295$ 。

爆炸当量换算公式为

$$W_{\text{TNT}} = \frac{W}{Q_{\text{TNT}}} \quad (2)$$

式中:  $W_{\text{TNT}}$  为 TNT 爆炸当量, kg;  $Q_{\text{TNT}}$  为  $1 \text{ kg}$  的 TNT 爆炸能量为  $4\,520 \text{ kJ}$ 。

根据二氧化碳爆破器装备特性,对几种不同类型爆破器的爆炸能量进行计算见表1。针对不同的爆破对象和使用环境,可以选择相应爆炸当量的二氧化碳爆破器。

表1 不同类型爆炸能量

Table 1 Blasting energy of different type

序号	爆破压力 $P/\text{Pa}$	爆炸能量 $W/\text{kJ}$	爆炸当量 $W_{\text{TNT}}/\text{kg}$
1	50	148.48	0.03
2	100	304.74	0.07
3	150	462.90	0.11
4	200	622.14	0.15
5	250	782.12	0.18
6	300	846.28	0.20

2 二氧化碳爆破掘进试验方案

2.1 试验地点概况

试验地点为贵州某煤矿 M6 号煤层的 1603 回风巷, M6 号煤层位于上煤组中部,煤层可采厚度  $0.80 \sim 3.20 \text{ m}$ , 平均厚度  $1.85 \text{ m}$ 。煤层的稳定程度指数为  $18.37$ , 变异系数为  $0.41$ 。煤层顶板和底板均为泥岩, 属较稳定薄~中厚全区可采煤层。1603 回风巷道(煤巷)全断面面积约  $10 \text{ m}^2$ , 煤的普氏系数为  $0.4 \sim 0.7$ , 煤的视密度为  $1.41 \text{ g/cm}^3$ 。根据其特点选择爆炸压力为  $200 \text{ MPa}$ 、直径为  $75 \text{ mm}$  的开采器进行掘进试验。

2.2 试验方案设计

使用二氧化碳爆破技术进行 1603 回风巷全断面掘进,掘进长度约  $1\,600 \text{ m}$ ,通过对比考察工艺程序、落煤块度、抛煤距离、产生的有毒有害气体量( $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$ )、空气中颗粒度和振动波等指标,评价二氧化碳爆破掘进与传统炸药爆破掘进的效果。

2.2.1 钻孔布置

为了满足巷道全断面掘进需要,共布置 33 个钻孔,钻孔直径为  $78 \text{ mm}$ ,钻孔长度为  $2.10 \text{ m}$ ,如图 3 所示。编号为 1 的钻孔为掏槽孔,由于二氧化碳爆破技术工艺的特殊性,掏槽孔布置位置较传统炸药爆破布置位置下移,最下端掏槽孔位于底板附近,以实现在掏槽的同时落底。对于坚硬岩石在掏槽部位增加布置空辅助孔,如图 3 中的 4-1、4-2 钻孔,用以创造自由面;在底板附近增加布置辅助孔和周边孔,如图 3 中的 2-1、2-11、3-1、3-13 钻孔,以满足落底需要。

2.2.2 钻孔施工技术与要求

为加快试验进程,提高打钻效率,使用复合钻进技术施工钻孔,即使用常规钻头(直径  $d$ )钻进一定深度  $l$  后预留  $500 \text{ mm}$ ,再用专用钻头钻进至预定总

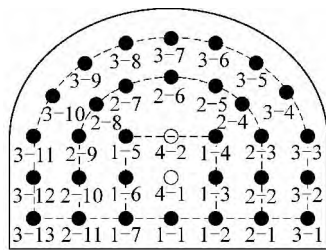


图 3 钻孔布置示意

Fig. 3 Sketch map of drill hole layout

深度  $L$  如图 4 所示。

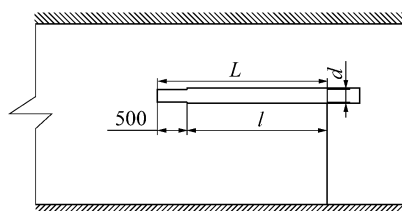


图 4 复合钻进技术示意图

Fig. 4 Sketch Map of composite drilling technology

常规钻进深度  $l$  与预定钻进总深度关系为

$$l = L - 500 \quad (3)$$

其中: 500 mm 即为预留深度, 也是二氧化碳爆破技术最小保障止飞深度。

### 2.2.3 试验效果考察方法

为了考察二氧化碳爆破应用于煤矿煤层巷道掘进效果, 在爆破后考察其爆破影响范围、落煤距离、落煤成块率、环境气体指标等。

1) 爆破影响半径考察。爆破完毕后, 二氧化碳开采器会随煤体垮落下来, 工作面爆破钻孔周围会形成一个孔洞, 首先观察孔洞的形状, 并绘制草图, 然后测出孔洞的几何半径  $r$ , 如图 5 所示。

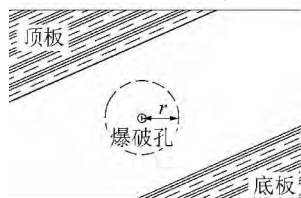


图 5 爆破影响半径测量示意

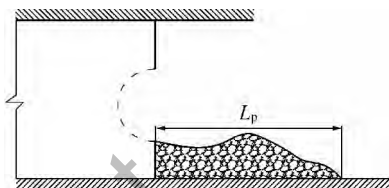
Fig. 5 Sketch map of measurement of blasting influence radius

爆破影响半径的考察, 是针对不同矿区地质条件和采掘条件而开展二氧化碳采掘技术工艺的第 1 步, 它的研究为后续钻孔布置提供重要参数指导。

一般情况下, 单孔爆破影响半径越大, 则工作面有效爆破钻孔布置数量越少, 能够节省施工成本、爆破能量成本及时间成本。

2) 爆破后落煤距离考察。由于爆破钻孔中瞬

间释放的能量, 不仅对钻孔周围煤岩体有破碎作用, 使煤岩体从原始矿体剥落下来, 同时由于布孔、装药及起爆方式的不同而导致煤岩体向巷道自由面空间垮落方式也不同, 而煤岩体的垮落方式会影响工作面煤岩体的运输及清理工作。如果煤岩体崩落过远, 则会加重工人施工强度和难度、降低工作效率, 也不利于下一阶段支护工作的开展, 影响工作面循环作业效率, 所以考察工作面煤岩体崩落距离也是衡量爆破效果的重要技术指标之一, 二氧化碳爆破开采器落煤距离如图 6 所示。

图 6 爆破开采器落煤距离  $L_p$  测量示意Fig. 6 Sketch map of measurement of coal falling distance  $L_p$  using blasting device

3) 爆破后落煤成块率。煤炭采出后, 根据煤体块径可分成 5 类, 粉煤粒径  $<15$  mm、煤丁粒径  $15 \sim 30$  mm、小块粒径  $30 \sim 60$  mm、中块粒径  $60 \sim 90$  mm、大块粒径  $>90$  mm。相同品质下, 粉煤与块煤的价格会有成倍的差距。对于小型工作面而言, 无法使用分选机来考察其块度, 因而使用筛网对爆破落煤进行筛分, 筛网孔径分别  $30$ 、 $60$ 、 $90$  mm。在爆破落煤后, 依次筛选粒径段分别为  $<30$  mm、 $30 \sim 60$  mm、 $60 \sim 90$  mm、 $>90$  mm 的煤样, 并称出筛后其质量, 然后称出落煤总质量。

4) 环境质量考察。炮掘(炮采)后, 工作面会出现大量粉尘和烟气, 甚至会产生有毒有害气体, 常见的有毒有害气体有二氧化碳、一氧化碳及瓦斯等。弥散在巷道中的有毒有害气体一方面有害工人身体健康、影响工作效率, 另一方面有发生瓦斯爆炸、煤尘爆炸、窒息或中毒等事故的危险, 所以爆破后工作面环境数据是评价爆破效果的重要综合技术指标。

5) 技术效果对比考察。为了考察二氧化碳爆破开采器的爆破效果及其技术先进性, 与传统炸药爆破相比较, 采用工艺程序、块度、抛煤距离、光面效果、爆破后震动、有毒有害气体等指标进行评价。

## 3 试验成果及分析

累计掘进煤巷  $1\,600$  m,  $800$  个循环作业, 施工  $52\,800$  m 各类钻孔, 每个工作日可实施  $4 \sim 6$  个循环

作业,平均每天5个循环作业,每个循环进尺2 m,出煤量7.8 t,累计出煤总量6 240 t,如图7所示。

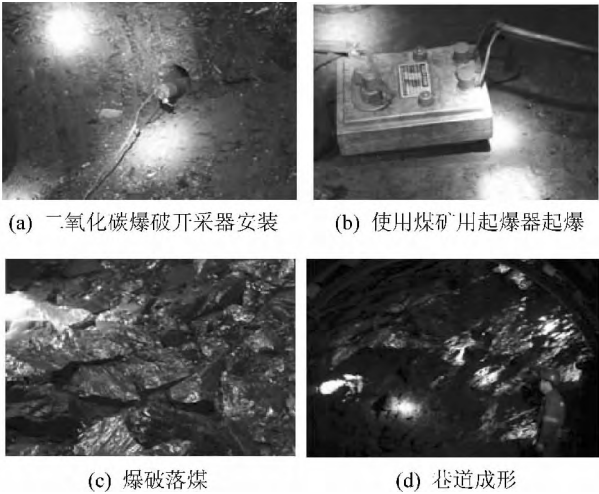


图7 现场试验图片

Fig. 7 Field test photos

1) 钻孔影响半径。经过统计分析发现:①工作面单孔爆破后形成的孔洞随着钻孔位于工作面断面上的相对位置不同而显示出明显的差异;②当钻孔位于断面中心时爆破孔洞呈现较为规则的椭圆形,且爆破影响半径最大达到1.5 m;③当钻孔位于巷道左右帮或顶底板时,钻孔爆破空洞由于受到巷道的束缚作用而呈现出不同的规则,但是共同点是椭圆形规律在有束缚的一方“受损”,即椭圆形延伸受到阻碍;④当钻孔周围存在地质构造、煤岩体性质有所变化时,椭圆形延伸规律也会受到影响,会出现椭圆形规律不明显,或在遇到构造时,一方椭圆形曲线形成受阻的现象。爆破钻孔空洞的形状对于煤岩体的均质特性较为敏感,在均质煤岩体中爆破效果最好,在具有明显介质分层的区域由于非均质性损失大量爆破能而出现爆破效果较差的状况。

2) 抛煤距离。单孔爆破时,抛煤距离一般为0~2.5 m,全断面爆破抛煤距离一般为0~3 m。这样的抛煤距离能够较好地满足工作面出煤和清理工作面的需求。

3) 落煤粒径分析。通过连续跟踪统计分析,爆破后粒径小于30 mm的占比33%,粒径为30~60 mm的占比25%~32%,粒径为60~90 mm的占比30%~35%,粒径大于90 mm的占4%~8%,大块率(粒径大于30 mm的煤块质量与落煤总质量的比值)可达到70%左右,炸药爆破落煤大块率为30%~35%。二氧化碳爆破开采器能够较好地提高煤体成块率,在成块保值方面具有满意的使用效果。

4) 环境质量分析。单孔爆破后巷道环境一氧化碳体积分数为 $(0\sim1)\times10^{-6}$ ,二氧化体积分数为0%~0.1%,粉尘浓度为 $14\sim25\text{ mg/m}^3$ ;全断面爆破后一氧化碳体积分数一般为 $(6\sim14)\times10^{-6}$ ,二氧化碳体积分数一般为0.18%~2.15%,粉尘浓度为 $86\sim125\text{ mg/m}^3$ ;无论采用单孔爆破,还是全断面爆破,巷道空气中有毒有害气体浓度均未超限,一方面从本质上防止了由于有毒有害气体浓度超限导致的气体爆炸或粉尘爆炸、工人窒息等事故的发生,另一方面也改善了巷道作业环境,有利于工人身心健康。

5) 技术及经济指标对比分析。传统炸药爆破采掘工艺与二氧化碳爆破采掘工艺及现场应用实际情况对比见表2。

表2 爆破效果对比指标

Table 2 Comparative index of blasting effect

序号	对比指标	传统炸药爆破工艺	CO <sub>2</sub> 开采器工艺
1	工艺程序	简单	简单
2	致裂物性质	特种器材、备案、炸药库	物理相变器材
3	操作人员	特种作业、持证上岗	非特种作业、培训上岗
4	钻孔要求	对孔径、曲直度要求不高	对孔径、曲直度要求高
5	块煤率	30%~35%	65%~78%
7	有毒有害 CO	$24\times10^{-6}$	$(3\sim16)\times10^{-6}$
8	CO <sub>2</sub>	3%~8%	0.02%~0.09%
9	空气中颗粒物度	$545\sim650\text{ mg/m}^3$	$85\sim125\text{ mg/m}^3$

从表2可以看出,二氧化碳爆破掘进各项技术指标均优于传统炸药爆破,可见二氧化碳爆破技术不但可以完全取代传统炸药爆破,而且在主要技术指标上具有明显优势。

本次采用二氧化碳爆破技术掘进煤巷1 600 m,800个循环作业,累计用时159 d,平均每天144 h,平均日进尺10 m,累计出煤总量6 240 t,未发生事故。在经济指标上二氧化碳爆破工艺与传统炸药爆破工艺进行了对比,见表3。

由表3可以看出,二氧化碳爆破工艺各项经济指标均绝对优于传统爆破工艺,掘进速度提高了2~3倍,工时效率提高了2.3倍,爆破综合成本降低了30%,尤其是实现了本质安全。

表 3 爆破经济指标对比

Table 3 Comparison of blasting economic indicators

序号	对比指标	传统炸药爆破工艺	开采器工艺
1	掘进速度/(m·月 <sup>-1</sup> )	90~100	300~360
2	爆破成本/(万元·m <sup>-1</sup> )	800~1 200	700~1 000
3	落煤售价/(元·t <sup>-1</sup> )	280	320
4	爆破工时效率/(m·工 <sup>-1</sup> )	0.020	0.069
5	千米事故起数/次	2	0
6	掘进附加成本/(元·m <sup>-1</sup> )	600~700	300~500

## 4 结 论

针对当前煤矿巷道爆破掘进过程中存在的问题,研制了二氧化碳爆破成套装备,提出了二氧化碳爆破巷道掘进技术,并进行了现场应用。研究表明,二氧化碳爆破器能够适用于煤矿井下巷道掘进,与传统炸药爆破相比具有较高的安全性、较理想的爆破效果、较良好的爆破工作环境、较低的掘进成本等多方面优势。通过表 3 对比结果可知,二氧化碳爆破与传统炸药爆破相比有着非常明显的技术优势,主要体现在如下 7 个方面。

1) 实现本质安全。据统计,传统炸药爆破易引发煤矿井下瓦斯爆炸或煤尘爆炸事故,同时处理瞎炮时也极易发生人员伤亡事故,给矿井生产带来重大安全隐患。二氧化碳爆破技术采用独特的设计,在工作时不会产生任何明火或火花;二氧化碳爆破开采器属于低温爆破,爆破后二氧化碳开采器表面温度及产生的二氧化碳温度极低(-2~0℃);爆破后产生的高压二氧化碳能够制造一个惰性的气体环境,从而本质上杜绝了瓦斯爆炸的可能。二氧化碳爆破处理瞎炮工艺简单安全,只需将未爆的开采器带到井上,使用专用拆装设备释放二氧化碳即可,不存在安全隐患。

2) 爆破效果良好。传统炸药由于爆破能量无法得到比较精确地控制,往往会由于装药量过大而导致剥落的煤炭块煤率低(30%~35%),抛煤距离远(0~5 m),一方面降低了煤炭的经济价值,另一方面也增加了工人劳动强度。二氧化碳爆破开采器爆破威力大,能够达到炸药爆破落煤效果,同时通过对泄能片型号、液态二氧化碳充装重量及发热管型号等的调控,可以相对精确地对其爆破能进行控制;二氧化碳爆破具有抛煤量多、块大、抛出距离短的优点,相比于传统炸药爆破,安全性高,爆破效果好,煤

炭成块率为 65%~78%,约是炸药爆破掘进的 2 倍以上;抛煤距离 0~3 m,约是传统炸药爆破掘进的 60%。

3) 额外设备需求少。使用二氧化碳爆破技术进行掘进,除需要与二氧化碳开采器止飞相匹配的冲击钻头外,基本无其他额外设备需求,在操作上不会增加过多的额外设备和人员投入。

4) 有害气体少。传统炸药爆破会产生大量二氧化碳及一氧化碳等有害气体,一般放炮后工作面二氧化碳或一氧化碳往往会超限;而采用二氧化碳爆破技术全断面爆破产生的二氧化碳及一氧化碳等气体较少,从未发生过超限现象。二氧化碳体积分数一般为 0.02%~0.09%,一氧化碳体积分数一般为 $(3\sim16)\times10^{-6}$ ,有较大的安全空间。

5) 粉尘及炮烟少。传统炸药爆破会产生大量粉尘及炮烟,一般放炮后 30 min 左右才会将巷道内的粉尘及炮烟排空;而二氧化碳爆破产生的粉尘及炮烟一般 3~5 min 便会排尽,粉尘及炮烟量减少 50%以上。

6) 其他有害影响小。采用二氧化碳爆破技术爆破后不会产生冲击波,不会产生较大的爆破声响。由于产生的有毒有害气体少,震荡波及声响小,能够为井下创造良好的采掘工作环境,有利于作业工人的身心健康。

7) 爆破经济成本低。二氧化碳爆破工艺单纯爆破成本与传统炸药工艺相比降低了 30%,如果综合考虑掘进速度、工时效率、事故率等其他指标,二氧化碳爆破将大幅降低采掘成本,具有绝对的低成本优势。

## 参考文献(References):

- [1] 董方庭.巷道设计与施工[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994:20~25.
- [2] 王玉杰.爆破工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2009:36~39.
- [3] 叶成林,邢敦爱.大倾角煤层回采巷道快速掘进技术[J].煤矿支护,2009(4):25~27.  
Ye Chenglin,Xing Dun'ai.Rapid excavation technology in large inclined coal seam[J].Coal Mine Support,2009(4):25~27.
- [4] 邓如彬.大坡度巷道岩巷作业线快速掘进施工技术[J].中州煤炭,2015(11):91~92.  
Deng Rubin.Rapid excavation technology on operating line of rock drift with large-inclined line[J].Zhongzhou Coal,2015(11):91~92.
- [5] 丁录仕.炮掘巷道快速掘进技术[J].煤矿开采,2004,9(4):

- 50-51.
- Ding Lushi. Fast driving technology in blasting driving roadway [J]. Coal Mining Technology 2004 9(4): 50-51.
- [6] 张文涛, 陈群忠, 支文耀, 等. 火成岩侵蚀区巷道快速掘进技术 [J]. 中州煤炭 2013(5): 59-62.
- Zhang Wentao, Chen Qunzhong, Zhi Wenyao *et al.* Roadway quick excavation technology in igneous rock erosion area [J]. Zhongzhou Coal 2013(5): 59-62.
- [7] 李恒信. 浅议炮掘巷道快速掘进技术 [J]. 中国科技博览 2012(38): 16.
- Li Hengxin. Discussion on rapid excavation technology of blasting roadway [J]. China Science and Technology Review 2012(38): 16.
- [8] 常建新, 镐振, 杨盼杰, 等. 赵固二矿大断面岩巷快速掘进技术 [J]. 中州煤炭 2013(6): 57-59.
- Chang Jianxin, Gao Zhen, Yang Panjie *et al.* Research on rapid excavation technology of rock roadway with large cross section in Zhao-gu No.2 Coal Mine [J]. Zhongzhou Coal 2013(6): 57-59.
- [9] 张庆磊, 陈宏彬, 彭小亚. 煤巷快速掘进方法的研究与应用 [J]. 中州煤炭 2014(12): 23-24.
- Zhang Qinglei, Chen Hongbin, Peng Xiaoya. Research and application on quick excavation technology of coal roadway [J]. Zhongzhou Coal 2014(12): 23-24.
- [10] 张德军, 宋永行. 浅析煤矿巷道掘进技术的影响因素 [J]. 中华民居 2012(3): 292.
- Zhang Dejun, Song Yongxing. Analysis on influencing factors of roadway construction in coal mines [J]. China Homes 2012(3): 292.
- [11] 王炎龙. 超前钻孔掩护高瓦斯厚煤层巷道快速掘进技术 [J]. 中州煤炭 2015(1): 69-70.
- Wang Yanlong. Quick excavation technology of advance drilling in high gas thick coal seam roadway [J]. Zhongzhou Coal 2015(1): 69-70.
- [12] Cubaud J C, Hachemi A, Ahmadi Murat M. Procédés de destruction des ouvrages en béton armé [J]. Matériaux et Constructions, 1977, 10(3): 127-138.
- [13] Sato M, Hoshina Y, Hanai M. Dielectric properties in high pressure CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> gas using coaxial cylindrical electrode and on the surface of spacer [C] // IEEE. Piscataway, NJ, USA 2002.
- [14] Franke H, Thiel H G. Theoretical and diagnostic investigation of gas blast turbulence controlled arcs in circuit breakers [J]. Elektrotechnische Zeitschrift ETZ A, 1971 92(5): 298-302.
- [15] 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.
- Nie Zheng. Application of carbon dioxide blasting technique in coal mines [J]. Coal Technology 2007 26(8): 62-63.
- [16] 黄园月, 唐春晓, 尹岚岚. 二氧化碳致裂器快速充装系统的研制 [J]. 煤矿机械 2015 36(7): 114-115.
- Huang Yuanyue, Tang Chunxiao, Yin Lanlan. Development on fast filling system of carbon dioxide fracturing facility [J]. Coal Mine Machinery 2015 36(7): 114-115.
- [17] 范迎春. 二氧化碳爆破增透技术在低透气性煤层中的应用研究 [J]. 中州煤炭 2015(5): 1-3.
- Fan Yingchun. Application research on low permeability seam of carbon dioxide blasting fracturing technology [J]. Zhongzhou Coal 2015(5): 1-3.
- [18] 范迎春, 霍中刚, 姚永辉. 复杂条件下二氧化碳深孔预裂爆破增透技术 [J]. 煤矿安全 2014 45(11): 74-77.
- Fan Yingchun, Huo Zhonggang, Yao Yonghui. Application of deep hole pre-splitting blasting and permeability increasing technology by carbon dioxide under complex conditions [J]. Safety in Coal Mines 2014 45(11): 74-77.
- [19] 王海东. 突出煤层掘进工作面 CO<sub>2</sub> 可控相变致裂防突技术 [J]. 煤炭科学技术 2016 44(3): 70-74.
- Wang Haidong. CO<sub>2</sub> 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.
- [20] 周西华, 门金龙, 王鹏辉, 等. 井下液态 CO<sub>2</sub> 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.
- Zhou Xihua, Men Jinlong, Wang Penghui *et al.* Industry experimental research on improving permeability by underground liquid CO<sub>2</sub> blasting [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015 11(9): 76-82.
- [21] 魏刚, 夏洪满, 姜凤岗. 液态 CO<sub>2</sub> 爆破器落煤试验研究 [J]. 煤矿开采 2009 14(1): 22-24.
- Wei Gang, Xia Hongman, Jiang Fenggang. Test research on coal drop with liquid CO<sub>2</sub> blaster [J]. Coal Mining Technology 2009, 14(1): 22-24.
- [22] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用 [J]. 煤炭科学技术 2016 44(3): 75-79.
- Zhao Long, Wang Zhaofeng, Sun Juzheng *et al.* Application of permeability improvement technology with liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam [J]. Coal Science and Technology 2016 44(3): 75-79.
- [23] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的 TNT 当量研究 [J]. 中国安全科学学报 2014 24(11): 84-88.
- Dong Qingxiang, Wang Zhaofeng, Han Yabei *et al.* Research on TNT equivalent of liquid CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing [J]. China Safety Science and Technology Journal 2014 24(11): 84-88.
- [24] 李付涛. 二氧化碳爆破增透技术的试验应用 [J]. 煤 2016 25(1): 16-18.
- Li Futao. The trial application of carbon dioxide blasting anti-reflection technology [J]. Coal 2016 25(1): 16-18.
- [25] 李兴. CO<sub>2</sub> 爆破技术在煤矿巷道掘进中的应用研究 [J]. 能源技术与管理 2014 39(6): 167-168.
- Li Xing. Application research of carbon dioxide blasting technology for coal mine roadway excavation [J]. Energy Technology and Management 2014 39(6): 167-168.