

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.023

## 二氧化碳膨胀爆破新型致裂管与安全技术研究

梅比<sup>1</sup>,高星<sup>2</sup>,方莹<sup>3</sup>,朱振海<sup>1</sup>,张北龙<sup>2</sup>

(1. 广东兴凯隆气爆新技术有限公司,广州 515000;2. 广东省爆破行业协会,广州 515000,  
3. 力凯工程装备(深圳)有限公司,深圳 518000)

**摘要:** 为了解决施工中“飞管”问题和“充气管”搬运、操作的安全隐患及公安机关对二氧化碳膨胀爆破治安管理的难题,采取对致裂管结构的优化设计和现场实爆试验相结合的方法。经过“设计-试验-改进”的反复研究,成功地研究出一种新型致裂管和孔内充气工艺并开发了末端管控信息系统。初步现场应用研究认为二氧化碳膨胀爆破产生的振动值仅是同样药量的炸药爆破产生的振动值的1/20~1/15。

**关键词:** 二氧化碳;膨胀爆破;致裂管;孔内充气;末端管控

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)02-0153-07

### Study on a New Type of Fracturing Tube and Safety Technology of Carbon Dioxide Expansion Blasting

MEI Bi<sup>1</sup>,GAO Xing<sup>2</sup>,FANG Ying<sup>3</sup>,ZHU Zhen-hai<sup>1</sup>,ZHANG Bei-long<sup>2</sup>

(1. Guangdong XingKaiLong Gas Explosion New Technology Company Limited, Guangzhou 515000, China;2. Guangdong Blasting Industry Association, Guangzhou 515000, China;  
3. Likai Engineering Equipment(Shenzhen) Company Limited, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** “Flying pipe” and handling and operation of “gas-filled tube” are potential security issues, which bring difficult problems of blasting security management to public security organs. In order to solve these problems, a method of combining the optimized design of cracking pipe structure with the field explosion test was adopted. As a result, after “design-test-improvement” repeated research, a new type of fracturing pipe, a technology of inflation process in hole and a terminal management and control information system were successfully developed. According to the preliminary application study, the vibration value produced by carbon dioxide expansion blasting is only 1/20~1/15 of that produced by the same explosive blasting.

**Key words:** carbon dioxide; expansion blasting; fracturing tube; gas filling in the hole; terminal control

为了促进二氧化碳膨胀爆破技术的应用与发展,中国爆破行业协会在2016年10月将二氧化碳膨胀破岩技术研究列入中国爆破行业中长期(2016—2025)科学技术发展规划<sup>[1]</sup>。2019年11月18日召开的中爆协六届七次常务理事会议2019年度工作报告指出<sup>[2]</sup>:“二氧化碳膨胀爆破具有振动小、

无污染、本质安全性高的特点,是特别复杂环境下无法实施炸药爆破作业的一种补充,并广泛应用于煤矿井下放顶煤开采、瓦斯抽排放等爆破作业中,为促进爆破技术进步、提高爆破本质安全和社会公共安全水平发挥了重要作用”。

在此之前,国内学者对二氧化碳膨胀爆破的研究主要集中在二氧化碳相变机理、裂岩机理及在煤矿排放瓦斯等方面的应用方面,对二氧化碳膨胀爆破的器材及施工方法的研究较少<sup>[3-12]</sup>。由于过去二

收稿日期:2021-01-23

作者简介:梅比(1981-),男,博士,黑龙江人,广东兴凯隆气爆新技术有限公司,从事工程爆破与岩体破碎研究,(E-mail) 13924219070@163.com。

氧化碳膨胀爆破器材和施工工艺存在明显的缺陷,客观上存在“飞管”和被不法分子利用威胁公共安全的治安和安全隐患。但是,由于国家主管部门至今没有对二氧化碳膨胀爆破作出具体的治安管理规定,导致这一技术的研究与应用受到较大的影响。

为了促进二氧化碳膨胀爆破技术的研究与应用,在中国爆破行业协会的指导下,对二氧化碳膨胀爆破器材、施工工艺及安全管理进行了初步研究,发明了新型致裂管、创新提出孔内充气工艺、开发了末端管控信息系统,认为由爆破单位采用“新型致裂管+孔内充气工艺+末端管控系统”可以有效地解决公安机关对二氧化碳膨胀爆破治安管理的难题。

## 1 二氧化碳膨胀爆破破岩原理与致裂管泄气方式

### 1.1 二氧化碳膨胀爆破破岩原理

将液态二氧化碳充入致裂管中,将致裂管装入炮孔,用起爆器起爆激发管(也叫发热管),起爆器

输出电流使激发管中电点火柴被点着,从而使激发管中的药粉速燃,加热致裂管中的液态二氧化碳,使其产生相变(由液态变为气态);相变后,致裂管内气体压力迅速提高到 100 ~ 300 MPa,气体体积膨胀到原来液态时的 600 倍以上;当气体的压力大于致裂管泄气元件的抗剪强度时,高压气体从泄气孔(缝)冲出,作用于炮孔壁上,使炮孔周围的岩石开裂、破碎。

### 1.2 二氧化碳膨胀爆破致裂管泄气方法

在本研究开始之前,国内有两种致裂管,一种是通过致裂管内高压气体剪切破裂片而释放能量(泄气),也称为第一代致裂管;另外一种致裂管不用破裂片,当致裂管内气体压力大于焊缝的抗拉强度时,气体能量就从致裂管侧面的焊缝处释放,也称为第二代致裂管。图 1 给出了两种致裂管泄气方式的比较。将致裂管与激发管组装在一起并充好二氧化碳气体后,我们称它为致裂器,图 2 给出了第一代致裂器的结构示意图。

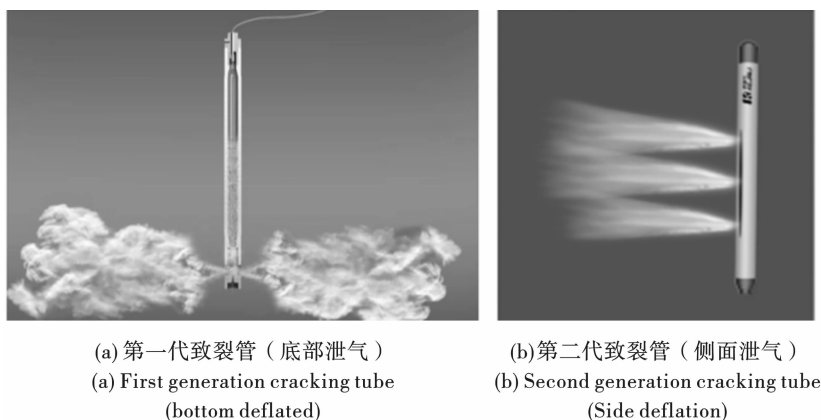


图 1 两种致裂管泄气方式比较示意图

Fig. 1 Comparison diagram of two fracturing tube venting methods

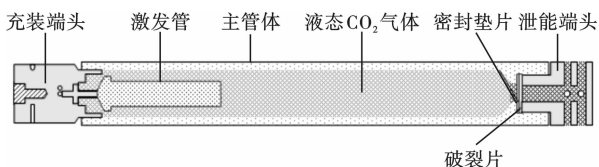


图 2 第一代二氧化碳膨胀爆破致裂器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the first generation carbon dioxide expansion blasting cracker

## 2 第一、二代二氧化碳致裂管存在的安全问题

经过前几年的工程应用,第一、二代二氧化碳致裂管暴露出以下安全问题:

(1) 第一代致裂管由于需要回收重复使用,故

其管壁很厚,一般在 10 mm 以上。使用第一代致裂管时,炮孔孔口不堵塞,容易发生“飞管”问题,从而造成安全事故,如图 3 所示。2016 年在贵州某地的施工中,致裂管飞出 200 多米砸断附近的动车架空输电系统,导致动车中断运行,那次“肇事”者就是第一代致裂管。

(2) 第二代致裂管改为一次性使用不回收,装入炮孔后孔口进行堵塞。这样做虽然解决了“飞管”问题,但是,需要先充好气再搬运到工地,再装入炮孔。这种作业方式存在两类安全隐患:一是搬运带高压气体的致裂器到作业现场的过程中容易发生爆管伤人事故(湖北某市曾发生过这样的事故,导致搬运人员受伤);二是充好气的致裂器容易成为不法分子威胁公共安全的工具。



(a) 露在孔外的致裂管  
(a) Cracking pipe exposed  
outside the hole

(b) 飞管现象  
(b) Flying pipe  
phenomenon

图3 第一代致裂器破岩情况及飞管现象  
Fig. 3 The rock breaking situation and flying tube  
phenomenon of the first generation fracturing device

(3)为防止不法分子打着二氧化碳膨胀爆破的幌子非法制造爆炸物威胁公共安全(如在致裂管中装填民用爆炸物品、易制爆危险化学品、烟火药等),公安机关需要现场打开致裂器进行检查。由于充好气体的致裂器在现场无法打开,故不能满足公安机关现场打开致裂器进行治安检查的需要。

上述问题的存在困扰着行业主管部门制订相应的治安管理办法和安全操作规程,直接影响了二氧化碳膨胀爆破技术的深入研究与推广应用。

### 3 孔内充气方法的提出与第三代致裂管的研究

#### 3.1 孔内充气方法的提出

针对第一、二代致裂管存在的问题,我们经过反复研究,提出了先装管后充气的孔内充装作业方法并研制了第三代致裂管,使用孔内充装方法和第三代致裂管,可有效地克服第一、二代致裂管存在的安全问题。

孔内充装方法是:在装管之前,从储存室分别把激发管和致裂管(未充气)搬运到工地,在现场进行组装,组装好了以后,把未充气的致裂器装入炮孔,然后将炮孔堵塞起来。所有炮孔都堵塞好以后,再逐个给致裂器充气,都充好气以后,再进行后续的连接、防护、警戒、起爆作业。

#### 3.2 第三代致裂管的研究

##### 3.2.1 第三代致裂管的结构特点

第三代致裂管(已申请国家相关专利)如图4所示,在外形上与第二代致裂管基本相似,主要差异在于第三代致裂管有一套满足孔内充气的组件,另外管壁厚度比第二代致裂管薄得多,大大减轻了操

作人员的劳动强度。目前,根据施工中常用钻头直径的大小,主要有4种不同规格(直径)的致裂管,可分别充装1 kg、3 kg、5 kg和10 kg二氧化碳气体(液态)。图5给出了第三代致裂管(内含激发管)结构示意图,其结构特点如下:

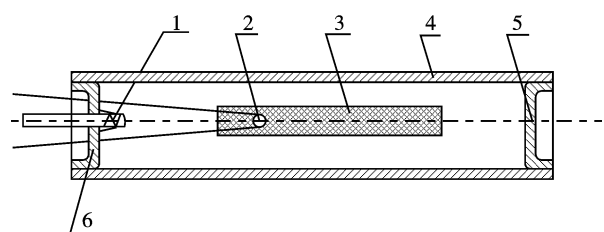
(1)钢管的管壁比较薄,仅1.5 mm,一次性使用。

(2)采用卷板工艺加工,致裂管侧面的焊缝成为释放二氧化碳高压气体的通道。

(3)致裂管的正常工作压力是8 MPa,极限可承受25 MPa的压力。



图4 4种规格的第三代致裂管外形图  
Fig. 4 Outline drawing of the third generation  
fracturing tube of 4 specifications



1 - 单向阀, 2 - 电点火柴, 3 - 激发管,  
4 - 管壁(钢或PE), 5 - 后堵盖, 6 - 前堵盖  
1 - check valve, 2 - electric matches, 3 - excitation tube,  
4 - tube wall(steel or PE), 5 - rear blocking cover,  
6 - front blocking cover

图5 第三代致裂管(含激发管)结构示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of the structure of the third  
generation fracturing tube(including excitation tube)

##### 3.2.2 第三代致裂管的安全特性

(1)以使用5 kg规格的二氧化碳致裂管(长1.6 m)为例,炮孔深度一般是5~6 m,堵塞长度最少有3~4 m,最小抵抗线一般为2 m左右。由于堵

塞长度大于最小抵抗线,因此,起爆后气体膨胀能量难以将致裂管向上冲出炮孔,因而,解决了产生“飞管”的问题。

(2)由于二氧化碳气体是从致裂管侧面释放而不是从致裂管底部释放,这种气体释放方式,也有助于消除“飞管”问题,同时使得气体膨胀压力更加均匀地作用在炮孔壁上。

(3)操作中,必须把致裂管先放入炮孔内,孔口堵塞好以后再充气,这样做,可保证充气时致裂管万一开裂也不会威胁作业人员的安全。

(4)带有泄压保险机构。当在孔外充装二氧化碳气体时,充装压力达到1 MPa时,保险机构开始动作,如继续充装二氧化碳气体,就会出现“前面充,后面漏”的效果,确保在孔外充气时致裂管内的气

体压力达不到4 MPa,也就是说,达不到激发管产生发热效应所需要的围压。

(5)由于充气需要专用充气设备(储气罐和充气机),因此,离开专用设备无法把二氧化碳气体充入致裂管内。此外,在常规情况下充气至少需要两人以上协同作业,多人同时作业可以互相监督,可以防止个别人员搞非法事情。因此,即使致裂管丢失、被盗或被不法分子拿到手,他们也无法充装二氧化碳气体威胁公共安全。

### 3.2.3 第一、二、三代致裂管的性能比较

第三代致裂管是在第一、二代致裂管基础上改进设计而成的,图6给出了第三代致裂管的实物图片。表1给出了第一、二、三代致裂管的结构特点和安全性能的比较。

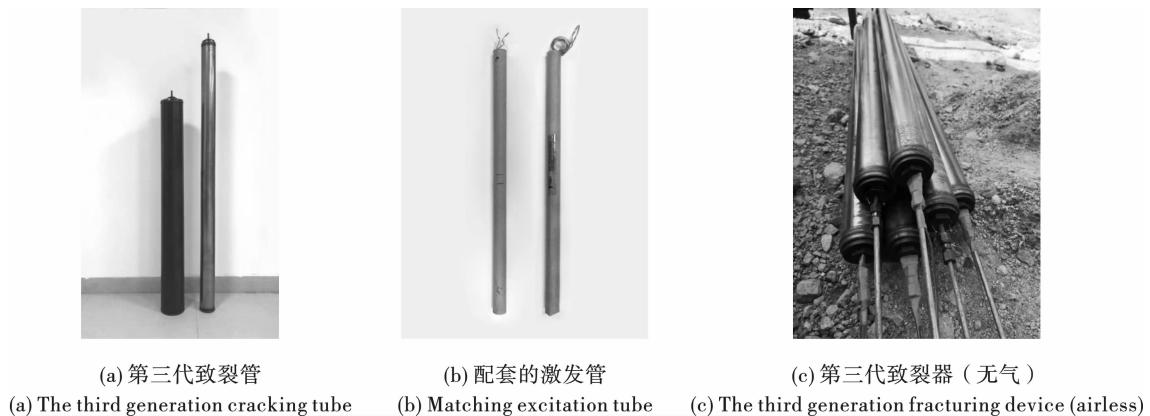


图6 第三代二氧化碳膨胀爆破器材

Fig. 6 The third-generation carbon dioxide expansion blasting equipment

表1 第一、二、三代致裂管结构特点和安全性能比较表

Table 1 Comparison table of structural characteristics and safety performance of the first, second and third generation fracturing tubes

序号	性能项目	第一代致裂管	第二代致裂管	第三代致裂管
1	管壁厚度	很厚(15~18 mm)	较厚(5~8 mm)	薄(1.5 mm)
2	使用重复性	可重复使用	一次性使用	一次性使用
3	充气方式	在加工间充好气后搬运到现场	在加工间充好气后搬运到现场	在炮孔内充气
4	泄气方式	从管子底部泄气孔	从管子侧壁	从管子侧壁
5	发生飞管概率	大	零	零
6	被不法分子利用的风险	有	有	无
7	公安现场检查能否打开致裂管	不能	不能	能
8	搬运“气弹”的安全隐患	有	有	无
9	工人劳动强度	很高	较高	低

## 4 二氧化碳膨胀爆破末端管控信息系统的研发

为了加强对二氧化碳膨胀爆破的安全管理,率先开发了二氧化碳膨胀爆破末端管控信息系统,该

系统可以有效倒逼二氧化碳膨胀爆破从业单位落实企业主体责任;对激发管、致裂管实行电子标签溯源管理并与器材流向各环节上的责任人员进行绑定,严格落实经手人员的责任;对现场存放、出入库(柜)行为进行视频监控管理,严防激发管、致裂管

流失、被盗事件的发生。系统主要功能在于:

#### 4.1 二氧化碳膨胀爆破器材流向溯源管理功能

由器材生产厂家通过系统下载、打印电子标识,粘贴在激发管、致裂管上,并扫码入库同时把相关信息输入信息系统;销售、使用单位出入库保管、使用时分别扫码确认,将销售、使用环节上的经手人员与器材进行绑定,落实流向各环节上操作人员的责任,确保激发管、致裂管得到有效监控,杜绝流失、被盗。

#### 4.2 作业现场视频监控管理功能

在作业现场建立视频监控技术防范系统,采集二氧化碳激发管、致裂管储存场所的开关门信息、领用视频监控信息,满足管理部门远程访问、查询和管理的需要。

#### 4.3 公安属地管理数据共享功能

本系统为属地公安机关进行治安管理、查询统计、数据共享预留了功能模块和数据接口,属地公安机关如果希望通过本系统对本辖区从事二氧化碳膨胀爆破的单位、项目、器材进行查询统计和治安管理,只需要在本系统上用手机号注册一个管理员用户账号,就可以查看到流入本辖区的二氧化碳膨胀爆破器材的“来龙去脉”以及各环节上的责任人员,还可以查看本辖区各项目现场器材出入库的视频图像等信息。

#### 4.4 使用易制爆专用储存柜现场存放激发管

为了做好防盗、防抢工作,在项目作业现场建设一个值班室、一个器材室(可以用集装箱代替),激发管存放在器材室里的一个专用储存柜里,这个专用储存柜本是供易制爆危险化学品小剂量单位存放易制爆危险化学品用的,实行“双人双锁”管理。图7给出了专用储存柜实物照片,该储存柜取得公安部权威机构的防盗安全检测报告。



图7 易制爆危险化学品小剂量存放专用储存柜  
Fig. 7 Special storage cabinet for low-dose storage of explosive hazardous chemicals

## 5 第三代致裂管和孔内充装方法的应用情况

目前,第三代致裂管和孔内充装方法已经在四个方面获得初步应用,一是场地平整工程(汕头市项目);二是基坑开挖工程(惠州市项目);三是隧洞开挖工程(汕尾市项目);四是水下航道疏浚工程(广西项目)。

### 5.1 对二氧化碳膨胀爆破钻爆参数优化研究

研究表明:一根5 kg(气体重量)的二氧化碳致裂管(外径76 mm、长1600 mm),适用的钻孔孔径为90 mm,对于微风化岩石,最小抵抗线1.8~2.2 m,孔距2~2.2 m,排距1.8~2 m,孔深5~5.5 m,堵塞长度3~4 m,单位耗气量在0.21~0.31 m<sup>3</sup>/kg(单位m<sup>3</sup>/kg是指一公斤液态二氧化碳爆破破碎多少立方米的岩石)。

### 5.2 爆破振动效应测试与研究

#### 5.2.1 露天场平爆破实测爆破振动情况

在露天场平工程(肇庆市项目)中,一次起爆8根5kg的致裂器(成一排),在最小抵抗线的反方向距离爆破中心10 m、15 m、20 m的地方布置测振传感器(三维),测得径向(X方向)振动幅值最大,分别是0.72 cm/s、0.60 cm/s和0.23 cm/s,对应的频率分别是60.15 Hz、50.31 Hz和38.46 Hz。典型的波形图见图8所示。

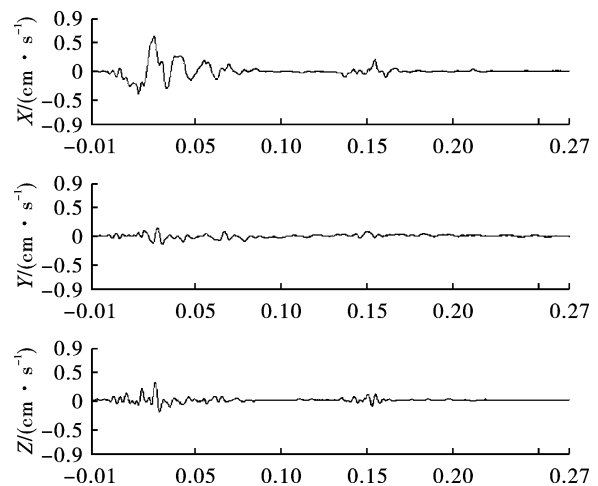


图8 典型的二氧化碳膨胀爆破振动波形  
(测点距离爆区中心后方15 m)

Fig. 8 Typical vibration waveform of carbon dioxide expansion blasting (measuring point is 15 m behind the center of blasting area)

#### 5.2.2 与同等炸药量爆破振动效应的比较

如果用同样的炸药量进行爆破(8个炮孔,每个炮孔装5 kg炸药),按照《爆破安全规程》13.2节中

的公式(1)进行计算,其中系数 $k$ 取150,衰减指数 $\alpha$ 取1.5,如果是40 kg炸药同时起爆,则在距离爆区10 m、15 m、20 m处的爆破振动峰值分别为:29.52 cm/s、15.52 cm/s、10.08 cm/s;如果8个炮孔逐孔起爆,最大一段药量是5 kg,则在距离爆区10 m、15 m、20 m处的爆破振动峰值分别为:10.02 cm/s、5.45 cm/s、3.53 cm/s。将炸药爆破振动效应计算值与二氧化碳爆破振动效应实测值比较,可以发现5 kg炸药同时起爆引起的爆破振动计算幅值分别是40 kg二氧化碳气体膨胀爆破引起的振动效应实幅值的14倍(10 m处)、9倍(15 m处)、15倍(20 m处)。

### 5.3 爆破冲击波和噪声的测试研究

同上爆破条件下,(1)对于空气冲击波,在距离爆区临空面右前方20m处布置传感器,仪器未触发,最大峰值压力低于仪器触发电平(0.16 kPa);(2)对于噪声,在距离爆区临空面右前方20 m处布置传感器,测得噪声为106.1 dB。

隧洞开挖和井下开挖尚处于尝试阶段,不过已经取得了可行性研究成果。爆破参数优化还有待进一步研究。

## 6 结论

(1)研究、提出了孔内充装的作业方法,为二氧化碳膨胀爆破提供了一种更加安全的作业方法。

(2)研究并发明了第三代致裂管,为解决二氧化碳爆破“飞管”事故、消除人搬车运“气弹”可能早爆伤人的安全隐患、杜绝致裂管被不法分子利用威胁公共安全等问题提供了安全保障,满足了公安机关现场检查时可以拆开致裂器进行检查的需要。

(3)研发了二氧化碳膨胀爆破末端管控信息系统,为管理部门加强二氧化碳爆破器材的流向管理和远程监督管理提供了信息化手段。

(4)在场地平整、基坑开挖、隧洞开挖和井下航道疏浚工程方面进行的相关研究取得的钻爆参数和安全操作注意事项,有助于管理部门制订相关管理办法,对于爆破行业制订相关安全操作规程具有一定的参考价值。

### 参考文献 (References)

[1] 高荫桐. 中国爆破行业中长期科学和技术发展规划(2016—2025)编制说明[J]. 中国爆破行业协会通讯, 2016(4):51-52.  
[1] GAO Yin-tong. Compilation of medium-and long-term science and technology development plan of China's blasting

industry (2016—2025) [J]. Communication of China Blasting Industry Association, 2016(4):51-52. (in Chinese)  
[2] 汪平. 中国爆破行业协会2019年度工作报告[J]. 中国爆破行业协会通讯, 2019(4):30-38.  
[2] WANG Pin. 2019 Annual work report of China blasting industry association[J]. Communication of China Blasting Industry Association, 2019(4):30-38. (in Chinese)  
[3] 李必红, 夏军, 陈丁丁. CO<sub>2</sub>相变膨胀破岩机理及其安全效应测试研究[J]. 采矿技术, 2017(1):61-63, 68.  
[3] LI Bi-hong, XIA Jun, CHEN Ding-ding. Experimental study on rock breaking mechanism and safety effect of CO<sub>2</sub> phase change expansion [J]. Mining Technology, 2017(1):61-63, 68. (in Chinese)  
[4] 刘国军, 张树文. 超临界CO<sub>2</sub>致裂页岩实验研究[J]. 煤炭学报, 2017(3):694-701.  
[4] LIU Guo-jun, ZHANG Shu-wen. Experimental study on fracturing shale by supercritical carbon dioxide [J]. Journal of Coal Industry, 2017(3):694-701. (in Chinese)  
[5] 孙可明, 辛利伟, 王婷婷, 等. 超临界CO<sub>2</sub>气爆煤体致裂规律模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017(3):1-6.  
[5] SUN Ke-ming, XIN Li-wei, WANG Ting-ting, et al. Simulation study on cracking law of supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion coal [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017(3):1-6. (in Chinese)  
[6] 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(9):36-42.  
[6] DU Ze-sheng, FAN Ying-chun, XUE Yu-fei, et al. Research on equipment and technology of carbon dioxide blasting mining [J]. Coal Science and Technology, 2016(9):36-42. (in Chinese)  
[7] 白志鹏. 常村煤矿液态CO<sub>2</sub>循环爆破致裂增透技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016(4):184-187.  
[7] BAI Zhi-peng. Research on cracking and anti-reflection technology caused by circulating blasting of liquid CO<sub>2</sub> in changcun coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2016(4):184-187. (in Chinese)  
[8] 王兆丰, 周大超, 李豪君, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变致裂二次增透技术[J]. 河南理工大学学报, 2015(12):14-17.  
[8] WANG Zhao-feng, ZHOU Da-chao, LI Hao-jun, et al. Phase change cracking secondary antireflection technology of liquid CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2015(12):14-17. (in Chinese)  
[9] 刘九员, 刘立州. 二氧化碳相变压裂技术在井筒煤中的应用[J]. 山西煤炭, 2015(3):3-5.  
[9] LIU Jiu-yuan, LIU Li-zhou. Application of carbon dioxide phase change fracturing technology in shaft coal [J]. Shanxi Coal, 2015(3):3-5. (in Chinese)

- [10] 孙小明,黄园月,倪昊. CO<sub>2</sub>致裂器泄能过程分析[J]. 煤炭科学技术,2015(4):263-265.
- [10] SUN Xiao-ming, HUANG Yuan-yue, NI Hao. Analysis of energy release process of CO<sub>2</sub> cracker[J]. Coal Science and Technology, 2015(4):263-265. (in Chinese)
- [11] 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(11):84-88.
- [11] DONG Qing-xiang, WANG Zhao-feng, HAN Ya-bei, et al. Study on TNT equivalent of liquid CO<sub>2</sub> phase transformation cracking [J]. China Safety Science Journal, 2014(11):84-88. (in Chinese)
- [12] 王兆丰,孙晓明. 液态二氧化碳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),2014,5(1):1-5.
- [12] WANG Zhao-feng, SUN Xiao-ming. Experimental study on enhanced gas pre-pumping by phase change cracking of liquid carbon dioxide[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science Edition), 2014,5(1):1-5. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第72页)

- [9] 陆伟,陈皓,李小青. 小净距隧道施工工序的数值模拟分析[J]. 公路,2014,59(10):291-296.
- [9] LU Wei, CHEN Hao, LI Xiao-qing. Numerical simulation analysis of the construction process of small-pitch tunnel [J]. Highway, 2014,59(10):291-296. (in Chinese)
- [10] 李建林,吴金刚,毕强. 大跨度小净距公路隧道设计与施工方法研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(5):157-162,227.
- [10] LI Jian-lin, WU Jin-gang, BI Qiang. Research on design and construction methods of highway tunnels with large span and small clear spacing [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019,56(5):157-162,227. (in Chinese)
- [11] 王继槐. 小净距隧道开挖数值模拟及动力特性研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2012.
- [11] WANG Ji-huai. The excavation numerical simulation and dynamic characteristic for neighborhood tunnel [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 王春梅. 小间距隧道爆破对既有隧道振动影响分析[J]. 爆破,2013,30(2):84-89.
- [12] WANG Chun-mei. Analysis of vibration influences of small tunnel blasting on existing tunnel [J]. Blasting, 2013,30(2):84-89. (in Chinese)
- [13] 仇文革,凌昊,龚伦,等. 引水隧洞下穿既有铁路隧道爆破施工振动影响及对策[J]. 中国铁道科学,2009,30(6):46-53.
- [13] QIU Wen-ge, LING Hao, GONG Lun, et al. Vibration effect and countermeasures of blasting construction of the diversion tunnel under the existing railway tunnel [J]. China Railway Science, 2009,30(6):46-53. (in Chinese)
- [14] 贾海鹏,刘殿书,陈斌,等. 相邻隧道爆破振速分布规律研究[J]. 矿业科学学报,2019,4(6):506-514.
- [14] JIA Hai-peng, LIU Dian-shu, CHEN Bin, et al. Study on the vibration velocity distribution law of adjacent tunnel blasting [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019,4(6):506-514. (in Chinese)
- [15] 石连松,高文学,王林台. 地铁浅埋隧道爆破振动效应试验与数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报,2018,38(12):1237-1243.
- [15] SHI Lian-song, GAO Wen-xue, WANG Lin-tai. Experimental and numerical simulation study on blasting seismic effect of subway shallow buried tunnel [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018,38(12):1237-1243. (in Chinese)
- [16] 王海亮,陈吉辉. 隧道上台阶分区爆破振动规律[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(3):43-50.
- [16] WANG Hai-liang, CHEN Ji-hui. Vibration laws of partition blasting in upper bench of tunnel [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018,37(3):43-50. (in Chinese)
- [17] 汪波,郭新新,王志伟,等. 新建隧道爆破施工对既有空洞病害隧道的动力响应分析[J]. 爆破,2019,36(3):116-123,146.
- [17] WANG Bo, GUO Xin-xin, WANG Zhi-wei, et al. Caused dynamic response of existing cavity disease tunnel by blasting excavation of newly-built tunnel [J]. Blasting, 2019,36(3):116-123,146. (in Chinese)
- [18] 喻军,刘松玉,童立元. 浅埋隧道爆破振动空洞效应[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010,40(1):176-179.
- [18] YU Jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan. Hollow effect induced by blasting vibration in shallow tunnels [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2010,40(1):176-179. (in Chinese)

英文编辑:柯波