

地铁车站二氧化碳相变致裂法施工的动力响应分析<sup>\*</sup>王莉<sup>1,2</sup> 张力<sup>2</sup> 孙礼超<sup>3</sup> 殷小桃<sup>3</sup> 张壮<sup>3</sup>

(1. 中电建路桥集团有限公司, 100048, 北京; 2. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 100083, 北京;

3. 乌鲁木齐城市轨道交通集团有限公司, 830026, 乌鲁木齐//第一作者, 工程师)

**摘要** 以乌鲁木齐地铁1号线王家梁车站小导洞CO<sub>2</sub>相变致裂法施工为工程背景, 研究CO<sub>2</sub>致裂技术原理。计算得出压力为270 MPa的CO<sub>2</sub>致裂器致裂产生的能量与277 g TNT所具有的能量相当。使用LS-DYNA软件对转化为TNT当量的CO<sub>2</sub>致裂爆破进行数值模拟, 对地表BRT(快速公交)车站和浅埋排水管道两处风险源进行安全分析。研究表明: 各监测点振动速度达到峰值的时间与应力波传递时间一致; 爆破的振动影响随着离爆源的距离逐渐增加而逐渐减小, 模拟和实测振动速度均在安全范围以内。将CO<sub>2</sub>致裂能转化为TNT当量进行模拟计算的方法合理可行。

**关键词** 乌鲁木齐地铁; CO<sub>2</sub>致裂; 动力响应

**中图分类号** TU751.9

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.021

**Dynamic Response Analysis of CO<sub>2</sub> Phase Change Fracturing Method Construction at Metro Station**

WANG Li, ZHANG Li, SUN Lichao, YIN Xiaotao, ZHANG Zhuang

**Abstract** Based on the engineering background of Wangjialiang Station on Urumqi metro line 1 that adopts the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) phase change fracturing method in construction, the principle of CO<sub>2</sub> fracturing technology is studied. Calculation result shows that the energy produced by 270 MPa CO<sub>2</sub> fracturing device is comparable to 277 g TNT. Then, the numerical simulation of CO<sub>2</sub> fracture blasting that is converted into TNT equivalent is performed by LS-DYNA software, the data obtained are used for the monitoring and analysis of two risk sources: surface BRT station and shallow drainage pipe. This research shows that the time when vibration velocity of the monitoring points near BRT station reaches the peak value in agreement with that of the stress wave transmission. When the distance from the detonation source increases, the vibration effect of blasting will gradually decrease, and the simulated and actual monitored velocity data are within safety limits. It is reasonable and feasible to convert CO<sub>2</sub> fracturing energy in-

to TNT equivalent.

**Key words** Urumqi subway; carbon dioxide fracturing; dynamic response

**First author's address** Power China Roadbridge Construction Group Co., Ltd., 100048, Beijing, China

近年来, 随着破岩技术的不断革新和发展, 一些新型的非炸药破岩技术在国内外得到推广使用。美国的AIRDOX公司早在1938年便开始研究高压气体爆破破煤技术, 并研制了CO<sub>2</sub>爆破筒。随后, 英国、挪威等国也开始研究CO<sub>2</sub>爆破技术, 并将其运用在高瓦斯矿井的采煤工作面, 代替常规煤矿炸药进行采煤作业<sup>[1-2]</sup>。我国近年来也研制了各型CO<sub>2</sub>致裂产品, 并且在煤矿领域广泛运用。文献[3]和文献[4]分别研究了CO<sub>2</sub>爆破技术在煤矿巷道掘进和回采工作面落矿的运用, 爆破效果良好、安全性高; 文献[5-7]对CO<sub>2</sub>致裂在煤矿瓦斯增透方面的运用进行了研究; 文献[8-10]通过研究和试验将CO<sub>2</sub>相变能进行TNT当量的转化, 为煤矿确定合理的装药量和布孔参数等提供指导。

目前对CO<sub>2</sub>相变致裂爆破技术的介绍或研究大都集中在煤矿领域, 多数的工程运用也都是通过以往施工案例和类似工程进行设备的选型和使用, 而针对CO<sub>2</sub>致裂爆破在地铁隧道等市政交通工程领域的研究分析罕见。本文主要介绍CO<sub>2</sub>相变致裂爆破在地铁隧道施工中的运用, 研究分析其原理, 通过能量转化估算其致裂爆破的TNT当量, 并对使用PBA(洞桩法)施工的乌鲁木齐地铁1号线王家梁站小导洞开挖进行数值模拟, 将爆破振动和爆破效果与现场实际施工监测数据进行对比, 对爆破风险源进行安全预测, 同时为实际施工提供技术建议。

<sup>\*</sup> 科技北京百名领军人才培养工程(Z151100000315014); 国家青年科学基金资助项目(51504016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-16-021A3)

## 1 CO<sub>2</sub> 相变致裂法简介

CO<sub>2</sub> 相变致裂法作为一种新型非炸药破岩技术,其原理是:液态 CO<sub>2</sub> 吸热汽化膨胀,压力急速上升,致裂管达到目标压力后瞬间释放高压气体对岩体进行致裂爆破,从而达到破岩的目的。图 1 为 CO<sub>2</sub> 致裂器结构示意图。

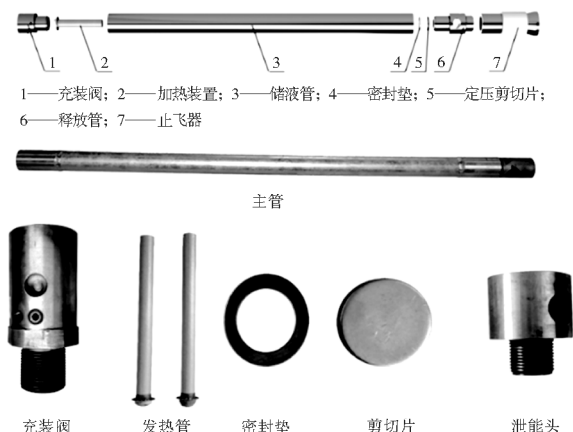


图 1 CO<sub>2</sub> 致裂器结构示意图

CO<sub>2</sub> 致裂法具有安全、环保、可控、无污染等优点,在地铁隧道等市政施工中有很好的运用前景。

文献[8]和文献[10]通过研究和试验,总结了液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的爆炸能计算公式,为其转化为 TNT 当量的计算提供了公式依据。

$$E_g = \frac{PV}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{0.1013}{P} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中:

$E_g$ ——气体的爆破能量, kJ;

$P$ ——容器内气体的绝对压力, MPa;

$V$ ——容器的容积, m<sup>3</sup>;

$K$ ——气体绝热指数, CO<sub>2</sub> 取 1.295。

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

式中:

$W_{TNT}$ ——CO<sub>2</sub> 相变致裂装置的近似 TNT 当量;

$Q_{TNT}$ ——1 kg TNT 爆炸能, 取 4 250 kJ/kg。

## 2 CO<sub>2</sub> 致裂法的工程运用

本文以新疆乌鲁木齐地铁 1 号线王家梁站工程为实例, 分析 CO<sub>2</sub> 致裂法的在地铁工程中的运用。王家梁站为中间站, 车站主体结构总长为 232.2 m, 宽为 20.1 m。车站主体采用暗挖 PBA 施工, 车站标

准段采用箱型框架结构。车站地表分布有广泛杂填土及人工素填土, 填土下方主要由侏罗系泥岩、砂岩构成。侏罗系泥岩呈层状分布, 是车站的主要基岩, 其中: 强风化泥岩属极软岩, 修正后围岩等级 VI 级; 中风化泥岩属极软岩, 修正后围岩等级 V 级。本研究未考虑地下水影响。综合考虑施工环境和施工条件等因素, 决定采用 CO<sub>2</sub> 致裂爆破法对王家梁站小导洞进行开挖掘进。

小导洞开挖过程中主要考虑的风险源是位于地铁车站正上方的 BRT(快速公交) 车站(见图 2 a)) 和两根分别埋深 2.98 m、1.22 m 的排水管(见图 2 b))。BRT 车站为承载能力较差的玻璃幕墙结构, 排水管则正好穿过车站主体。如果爆破振动超过安全值, BRT 车站幕墙易破裂损坏, 排水管线会变形渗漏。

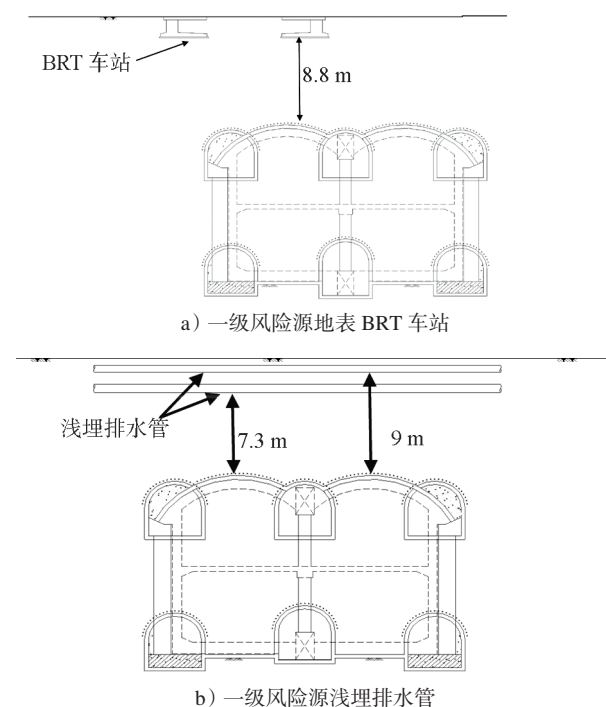


图 2 王家梁车站与风险源的相对位置关系图

## 3 CO<sub>2</sub> 相变致裂的数值模拟

### 3.1 模型的建立

建模过程中保持小导洞上部边界到地表的距离与实际距离一致。将小导洞底部至模型底部的距离设置为小导洞高度的 3 倍, 将小导洞 2 个边缘到模型边界的距离设置为隧道宽度的 3 倍, 以便减少边界效应。因此, 模型的尺寸为 50 m × 48 m × 3 m。将模型的 4 个侧面以及底面均设置为无反射的固定边界来消除反射波的影响, 同时各边界位移满足

$u_x=0, u_y=0, u_z=0$ 。围岩及炸药均采用 8 节点 SOLID164 实体单元来模拟。

文献[11]通过实际监测发现,隧道爆破掘进过程中,不同类型的炮孔对地表产生的振动影响不同,其中,掏槽孔起爆产生的地表振动最强烈,其振速幅值约为其他类型炮孔的 2 倍。小导洞掘进过程中,掏槽孔起爆时岩石的夹制作用较大,对地面产生的振动作用也最大。辅助孔和周边孔由于自由面多、装药量少等原因,与掏槽孔相比,其起爆产生的振动较小。而且在实际开挖过程中,主要是通过控制掏槽孔的起爆药量来控制爆破对围岩的振动,所以在数值模拟计算中,主要对上层中间 2 号小导洞掏槽孔进行数值模拟。

### 3.2 状态方程及参数的选取

在数值模拟过程中,将  $\text{CO}_2$  相变致裂爆破的能量转化为 TNT 当量,选取炸药的爆速为 3 000 m/s、炸药的密度为  $960 \text{ kg/m}^3$ 、爆压为 6.0 GPa。通过式(1)和式(2)计算可得出爆破压力为 270 MPa 的  $\text{CO}_2$  致裂相变致裂能转化为 TNT 当量约为 277 g。转化后的炸药本构模型采用 LS-DYNA 软件自带的高性能炸药材料(MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN)。炸药状态方程采用 JWL 状态方程<sup>[12-13]</sup>:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V_1} \right) \exp(-R_1 V_1) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V_1} \right) \exp(-R_2 V_1) + \frac{\omega E_0}{V_1} \quad (3)$$

式中:

$V_1$ ——爆轰产物相对比容;

$E_0$ ——初始内能比;

$A, B, R_1, R_2, \omega$ ——与材料性质有关的常数,可以由 TNT 的密度、爆速和绝热系数拟合得到。

炸药状态方程各参数取值见表 1。计算模型岩层参数取值见表 2。

表 1 炸药状态方程参数取值表

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$
371.0	3.23	4.15	0.95	0.3	7.0

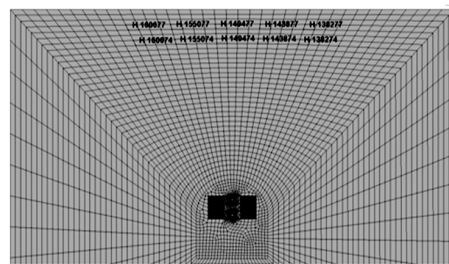
表 2 计算模型岩层参数取值表

土层	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/MPa	泊松比	埋深/m
杂填土	16.5	10	5	0.33	0~2
卵石	21.5	38	90	0.22	2~7
强风化泥岩	22.0	20	100	0.26	7~24

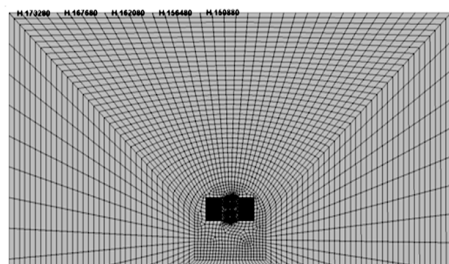
### 3.3 爆破振动影响分析

岩石爆破是一个复杂的过程,想要准确分析爆

破的振动影响比较困难,但由于质点振动速度是一个比较容易监测的稳定的物理量,所以目前我国一直采用质点振动速度来表征爆破振动强<sup>[14]</sup>。在王家梁车站小导洞  $\text{CO}_2$  致裂爆破 TNT 当量转化后的数值模拟中,在模型地表 BRT 车站和浅埋排水管 2 个风险源附近设置监测点,监测致裂爆破的振动影响。监测点布置图如图 3 所示。爆破过程中应力波传播如图 4 所示。

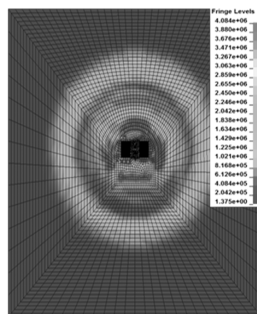


a) 浅埋排水管监测点

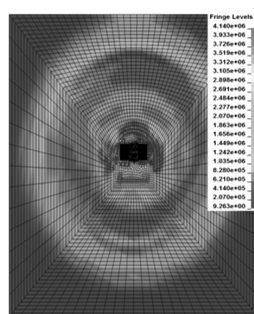


b) BRT 车站附近监测点

图 3 模型监测点布置图



a) 应力波传至排水管



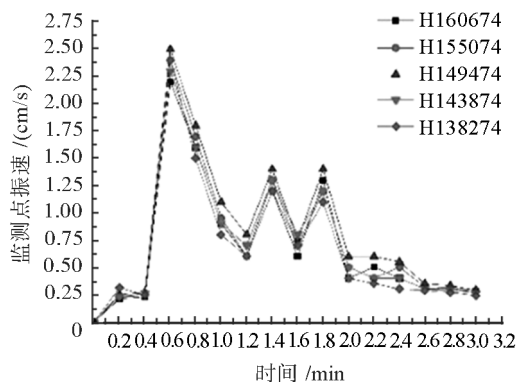
b) 应力波传至地表附近

图 4 应力波传播至风险源处过程云图

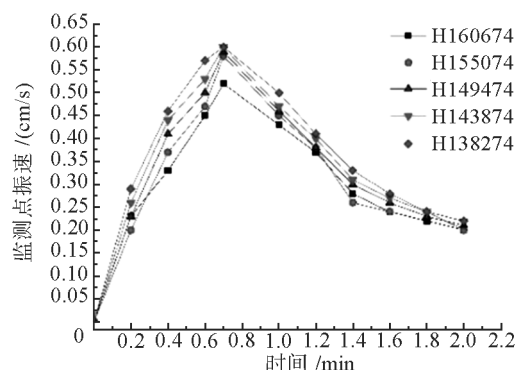
由应力波传播过程可以看出,起爆后应力波由爆源向四周传播直至逐渐衰减。0.6 ms 左右应力波传播至风险源浅埋排水管附近,0.7 ms 左右应力波传播至地表风险源 BRT 车站附近。读取 2 号小导洞模型 2 处风险源监测点的综合振动速度,绘制各监测点的振动速度时程曲线,如图 5 所示。

$\text{CO}_2$  相变致裂能转化为 TNT 当量的数值模拟结果中,小导洞正上方浅埋排水管附近 0.6 ms 左右





a) 浅埋排水管附近各监测点振速时程曲线



b) 地表 BRT 车站附近各监测点振速时程曲线

图 5 监测点振速时程曲线

振动速度达到最大值,约为 2.5 cm/s;地表 BRT 车站附近 0.7 ms 左右振动速度达到最大值,约为 0.56 cm/s。结合图 4 应力波传播过程可知,应力波传至浅埋排水管和地表 BRT 车站附近的时间,与监测点振动速度达到峰值的时间一致。由此可以得出监测点振动速度和应力波传播之间的规律:应力波传至监测点时,监测点的振动速度达到峰值;随着应力波的传播和衰减,质点的振动速度也由峰值逐渐减小。

在实际施工过程中,在王家梁车站 2 号小导洞上方地表 BRT 车站附近设置多个监测点,进行  $\text{CO}_2$  致裂爆破的振动速度监测。监测结果表明,各监测点最大振动速度均在 0.6 cm/s 以下,且地表几乎无振感。将数值模拟计算结果与实际振动监测数据进行比较发现,将  $\text{CO}_2$  相变致裂转化为 TNT 当量进行数值模拟的振动速度监测结果与现场实测振动速度值(0.2 ~ 0.6 cm/s)相当。我国目前主要将保护对象所在地的质点峰值振动速度作为安全判据。根据最新的爆破安全规程<sup>[15]</sup>,地表 BRT 车站和浅埋排水管附近, $\text{CO}_2$  相变致裂爆破数值模拟和现场实测的峰值振动速度均在安全范围以内,目前的致裂量能

够保证施工安全。由此可以得出,施工选用的  $\text{CO}_2$  致裂量符合安全施工要求。但考虑到施工地质条件和围岩岩性较差,在施工过程中还应该加强振动监测,及时对施工进行安全预报。

设定爆源正上方监测点 H148080 为坐标原点,以 5 m 为间隔设置其余各监测点(如图 6 所示),进一步分析致裂爆破振动速度与爆源距离之间的关系。读取监测点振动速度时程曲线,H173280—H125680 各监测点的振动速度峰值依次为 0.22 cm/s、0.35 cm/s、0.45 cm/s、0.65 cm/s、0.42 cm/s、0.38 cm/s、0.24 cm/s。发现地表各监测点随着距爆源距离增大,振动峰值逐渐减小。施工现场也取爆源正上方为原点,以 5 m 为间隔设置与数值模型对应的监测点,编号依次为监测点 1 ~ 5。实测波形图的振动峰值最大约为 0.78 cm/s,最小约为 0.2 cm/s。将实测振动速度数据(见表 3)与上述数值模拟结果比较,研究爆源距离与振动速度之间的关系,发现监测点的峰值振动速度由爆源正上方向远离爆源的地方逐渐递减。

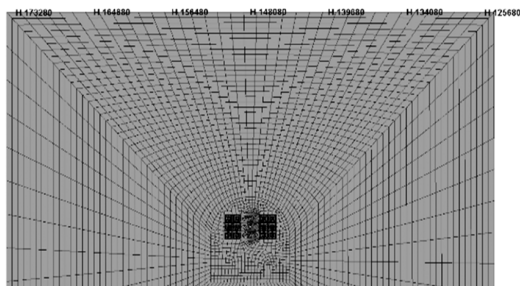


图 6 爆源上方不同间距的监测点

表 3 监测点实测振动速度

监测点编号	1	2	3	4	5	6	7
振动速度峰值	0.29	0.32	0.47	0.78	0.51	0.29	0.23

通过对现场实测数据和数值模拟监测点数据的对比分析发现,数值模拟和现场实测振动速度值的平均误差大约在 11%。两者存在误差是因为实际施工受到岩石性质、周围环境等各种因素的影响,但误差结果在可接受范围之内。由图 7 反映的规律可知:距离爆源越近,监测点振动速度越大;随着离爆源的距离增加,振动影响逐渐减弱。综上所述,由数值模拟反映的计算结果分析可知,地表 BRT 车站和浅埋排水管附近接近爆源的地方受致裂爆破振动的影响较为强烈。因此,在实际的施工过程中,应注意和加强离爆源距离较近处风险源的安全监测,以保证施工安全顺利进行。

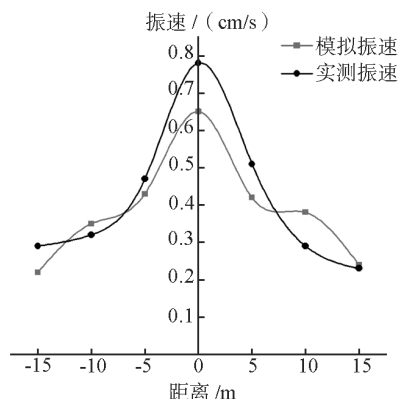


图7 不同监测点实测和数值模拟峰值振动速度对比

综合以上数值模拟计算结果可见,通过能量转化的方式,能够运用现有的计算方法和软件简单地计算  $\text{CO}_2$  气体相变的能量,以及模拟其相变致裂的爆破振动影响。通过对比数值模拟计算结果与现场监测数据可知,爆破振动影响爆破施工的重要因素可以在转化 TNT 当量后的模拟中较好地体现出来。在现场施工中,这对于致裂管用量的控制和风险源振动的预测有很好的指导意义及参考作用。

#### 4 结论

以新疆乌鲁木齐地铁1号线王家梁车站小导洞开挖采用  $\text{CO}_2$  致裂法施工为工程背景,对  $\text{CO}_2$  致裂施工工艺的原理、施工方法,以及  $\text{CO}_2$  相变致裂的 TNT 当量转化进行研究,并对致裂爆破效果运用 LS-DYNA 软件进行数值模拟,将数值模拟结果与现场实际施工情况进行比较分析,得出以下结论:

(1) 相比基于化学反应的传统钻爆法,  $\text{CO}_2$  相变致裂法是一种由液态  $\text{CO}_2$  经过相变体积迅速膨胀将岩石挤压致裂的物理爆破方法。除了在煤矿行业进行掘进和增透以外,近年来该施工方法已广泛应用于地铁隧道等市政基础设施建设。

(2) 通过  $\text{CO}_2$  相变致裂的 TNT 能量转化可以得出压力为 270 MPa 的 M2L270-51/1000 型  $\text{CO}_2$  致裂器的致裂能量相当于 277 g TNT 的当量。

(3) 通过 LS-DYNA 软件对转化为 TNT 当量后的  $\text{CO}_2$  致裂施工进行数值模拟,对地表 BRT 车站和浅埋排水管 2 个爆破风险源进行振动监测。起爆后 0.6 ms 小导洞正上方浅埋排水管附近振速达到最大,约 2.5 cm/s;起爆 0.7 ms 地表 BRT 车站附

近综合振速达到最大,约为 0.56 cm/s;应力波到达监测点的时间与监测点振动达到峰值的时间一致。致裂爆破的振动影响均在安全范围以内。

(4) 通过对比数值模拟和现场监测数据发现,爆破产生的地表振动速度在爆源正上方最大,随着离爆源距离的增加振动速度呈逐渐较小趋势。模拟计算结果显示爆破振动规律与现场施工实际情况和监测数据统计规律接近,两者平均误差在 11% 左右。

#### 参考文献

- [1] SINGH S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1998, 13(3): 305.
- [2] VIDANOVIC N, OGNJANOVIC S, ILINCIC N, et al. Application of unconventional methods of underground premises construction in coal mines[J]. Technics Technologies Education Management, 2011, 6(4): 861.
- [3] 王大赛.  $\text{CO}_2$  爆破在掘进工作面的应用[J]. 化工管理, 2016(15): 101.
- [4] 聂政.  $\text{CO}_2$  炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8): 62.
- [5] 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.
- [6] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态  $\text{CO}_2$  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.
- [7] 王兆丰, 周大超, 李豪君, 等. 液态  $\text{CO}_2$  相变致裂二次增透技术[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 597.
- [8] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态  $\text{CO}_2$  相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84.
- [9] 陈喜恩, 赵龙, 王兆丰, 等. 液态  $\text{CO}_2$  相变致裂机理及应用技术研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(9): 95.
- [10] 杜泽生, 范迎春, 薛宇飞, 等.  $\text{CO}_2$  爆破采掘装备及技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 36.
- [11] 张继春, 曹孝君, 郑爽英, 等. 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4158.
- [12] 浣石, 蒋国平. 用 Lagrange 分析方法确定固体炸药基于 JWLL 状态方程的反应速率方程[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(3): 33.
- [13] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 贾虎, 徐颖. 岩体开挖爆炸应力损伤范围研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 3489.
- [15] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程: GB 6722—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

(收稿日期: 2017-09-04)