

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.05.011

# ANFO 在炮孔中的殉爆起爆试验研究<sup>\*</sup>

余德运 谢 烽 王旭耀  
北方爆破科技有限公司(北京,100097)

**[摘 要]** 为了检验空气间隔装药结构中,现场混装铵油炸药(ANFO)主发装药段殉爆被发装药段的可行性和可靠性,设计了殉爆检验和试验方法,进行了5次共36个孔内ANFO殉爆试验,并测试了6个孔径为311 mm的孔内ANFO爆速。结果表明:沙漠地区某露天矿干燥钙质硅酸盐和覆盖砂层台阶爆破时,空气分段间隔装药中,上部装药段可以不设起爆体,直接利用底部装药段殉爆起爆,且孔径311 mm的炮孔比孔径165 mm的炮孔殉爆距离更大;被殉爆的上部装药段的爆速比底部装药段低,且随空气间隔长度的增大而降低;与常规分段起爆相比,采用殉爆起爆,没有放置上部装药段起爆体的工序,从而提高装药效率,节省起爆体成本。

**[关键词]** ANFO; 殉爆; 爆轰速度; 空气间隔

**[分类号]** TD235.2; TJ510.3<sup>+</sup>6; TQ563

## Experimental Study on Sympathetic Detonation of ANFO in Hole

YU Deyun, XIE Feng, WANG Xuyao  
North Blasting Technology Co, Ltd. (Beijing, 100097)

**[ABSTRACT]** In order to test the feasibility and reliability of ANFO main charge detonating charged charge in the air-deck charging structure, a test and verified method of sympathetic detonation of ANFO in hole was designed. 36 holes in design were tested for 5 times and detonation velocity of ANFO in 6 holes with diameter of 311 mm were measured. The results show that, during a dry calcareous silicate and sand covered bench blasting at an open-pit mine in the desert, the main charge could detonate the nearby charge without primer. Compared with 165 mm, the sympathetic detonation distance would be longer for 311 mm in diameter. The detonation velocity of charged charge is lower than that of the main charge, and the detonation velocity decreased as the air gap prolongs. Compared with the normal independent detonation, the sympathetic detonation would be more efficient and economic. The process of placing the upper charging section initiator is unnecessary, so as to improve the charging efficiency and save the cost of the initiator.

**[KEYWORDS]** ANFO; sympathetic detonation; velocity of detonation; air-deck

## 引言

空气间隔爆破技术已在世界采矿业中得到了大量的应用。早在19世纪40年代,前苏联学者Melnioko和Marchenkov<sup>[1-2]</sup>提出空气间隔装药结构的特点:一是降低初始爆压,控制过度粉碎区;二是增大爆破作用时间,使爆炸冲量增大;三是应力波反射作用,增强应力场。其效果上可节省装药量,降低炸药单耗,并且可以改善块度分布<sup>[3-6]</sup>。根据空气层和装药段在炮孔中的位置,可分为上部间隔、中部间隔和底部间隔。露天矿山开采台阶爆破中采用空气

中部间隔装药时,为了确保钻孔的利用率、避免空气间隔段产生大块,空气间隔长度一般不超过3.0 m。

针对台阶爆破时空气中中部间隔装药结构中的间隔长度一般不超过3.0 m、约束条件下炸药的殉爆距离将显著增大<sup>[7-8]</sup>这一特性,仅在炮孔底部装药段设起爆体,上部装药段不设起爆体,尝试直接利用底部装药段殉爆上部装药段的可行性和可靠性。

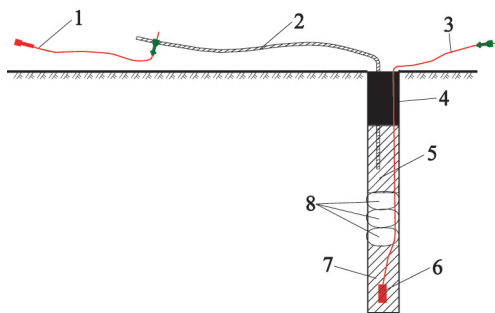
## 1 被发药包殉爆试验

### 1.1 试验方案

现场混装铵油炸药(ANFO)孔内殉爆试验时炮

<sup>\*</sup> 收稿日期:2020-03-01  
第一作者:余德运(1981-),博士,高级工程师,主要从事爆破安全技术及数值仿真计算研究。E-mail:yudeyun2000@163.com

孔装药结构如图 1 所示。利用空气袋实现中部间隔装药,为防止空气袋因上部荷载(上部装药段+填塞料)而下滑,从而导致间隔长度的变化,中部间隔部分采用空气袋叠加的方式实现;仅在底部装药段(主发药包)设起爆体,上部装药段(被发药包)无起爆体;上部装药段内埋设 1 根导爆索并引至地表,并在导爆索末端再连接 1 发瞬发非电导爆管雷管(地表雷管),其作用在于避免导爆索发生爆燃引起的误判。起爆后,地表雷管击发,表明被发药包殉爆;否则,即殉爆失败。



1 - 地表雷管;2 - 导爆索;3 - 孔内雷管脚线;4 - 填塞;  
5 - 被发药包;6 - 起爆弹;7 - 主发药包;8 - 空气袋。

图 1 孔内殉爆试验

Fig. 1 Sympathetic detonation test in hole

## 1.2 试验器材

ANFO 中硝酸铵与柴油的质量比为 95 : 5,密度  $0.83 \text{ g/cm}^3$ , 孔内爆速  $3\ 800 \sim 4\ 200 \text{ m/s}$ , 粒度为  $2.5 \sim 3.0 \text{ mm}$  ( $>95\%$ ); 炮孔孔径  $311 \text{ mm}$  时,主、被发药包药量分别为  $360$ 、 $240 \text{ kg}$ ; 对于孔径  $165 \text{ mm}$  的炮孔,主、被发药包药量都为  $100 \text{ kg}$ ; 起爆体为  $400 \text{ g}$  起爆弹 + 1 发  $500 \text{ ms}$  非导爆管雷管; 地表非电雷管采用瞬发非电导爆管雷管; 空气间隔袋规格为  $\varnothing 34 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  和  $\varnothing 17 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 。

## 1.3 试验结果

在某矿山开采爆破生产现场,共开展 5 次殉爆试验。第 1 ~ 3 次试验区域岩石为钙质硅酸盐(密度  $2.85 \text{ g/cm}^3$ , 岩石硬度系数 12), 炮孔孔径为  $311 \text{ mm}$ , 每次试验 6 个炮孔; 第 4 次试验区域为覆盖砂层(密度  $2.16 \text{ g/cm}^3$ , 岩石硬度系数 5), 炮孔孔径为  $311 \text{ mm}$ , 试验 8 个炮孔; 第 5 次试验区域为覆盖砂层, 炮孔孔径为  $165 \text{ mm}$ , 试验 10 个炮孔。试验结果见表 1。表 1 中, \* 为放置爆速测试线的装药孔。

从表 1 试验结果可以看出,对于孔径  $311 \text{ mm}$  的炮孔,不论是较坚硬的钙质硅酸盐,还是较软的覆盖砂层,当空气间隔长度不大于  $320 \text{ cm}$  时,被发药包都能完全殉爆;但空气间隔长度为  $360 \text{ mm}$  时,被发药包不能完全殉爆。对于孔径  $165 \text{ mm}$  的炮孔,

当空气间隔长度不大于  $200 \text{ cm}$  时,被发药包都能完全殉爆;当空气间隔长度大于  $200 \text{ cm}$  时,被发药包就已经不能完全殉爆了。由此可以得出,炮孔孔径大,殉爆距离也大,殉爆能力越强。

另外,第 4 次试验过程中, G1 孔在装入第 6 个空气间隔袋后发生塌孔,岩屑隔离了主、被发药包,导致该孔殉爆失败。因此,当孔口附近的钻屑和破碎围岩稳定性不好时,要避免空气间隔层混入钻屑、岩石碎块等杂质而影响主发药包的殉爆能力。

## 2 孔内 ANFO 爆速测试

### 2.1 测试原理

炸药爆速测定的方法有很多,如电测法、导爆索法(又称道特里士法)、高速摄影成像法、连续示波器法、探针法等。由于各种使用条件的限制,孔内炸药爆速一般采用探针法进行测定<sup>[9-10]</sup>。当前,孔内爆速测量一般选用基于探针法原理的 Micro-Trap 孔内爆速数据记录仪。

Micro-Trap 孔内爆速测试系统见图 2。将爆速测试线一端两极连接后埋于装药孔内,进行正常装药操作。爆破前,将爆速测试线另一端与爆速测试仪相连,初始爆速测试线长度为  $L_1 + L_2$ , 对应电阻为  $R_1 + R_2$ ; 起爆体爆炸瞬间,爆速测试线长度变为  $L_1 + L_3$ , 对应电阻为  $R_1 + R_3$  (起爆弹爆炸瞬间,高温高压气体作用下,爆速测试线端部两极之间熔接,仍可保持导通); 起爆体爆炸后  $\Delta t$  时刻,爆速测试线因爆轰波的向上传播而逐渐熔断变短,长度变为  $L_1 + L_t$ , 对应电阻为  $R_1 + R_t$ 。  $\Delta t$  时刻内,爆速测试线长度减少  $\Delta L = L_3 - L_t$ , 测试回路电阻减小,导致电压降低  $\Delta V$  (该值可通过  $\Delta t$  前、后实时电压相减得到), 则炸药爆炸后形成的爆轰波向前传播的速度,即爆速  $D = \Delta L / \Delta t$ 。

利用 Micro-Trap 爆速数据记录仪可以方便采集到电压和时间的变化相关曲线 ( $\Delta V - \Delta t$  曲线), 利用数据转化,将  $\Delta V - \Delta t$  变化曲线转化为爆速测试线变化的长度随时间变化的曲线,即  $\Delta L - \Delta t$  曲线,从坐标轴  $L - t$  曲线的斜率变化可以直观地看出测试炸药爆速连续变化趋势。

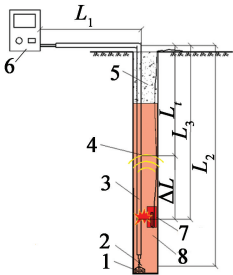
### 2.2 爆速分析

图 3 为测试孔(孔号为 L13)装药结构,图 4 为 Micro-Trap 爆速测试仪输出的测试线长度-时间曲线,其斜率变化即为炸药爆速。从图 4 可以看到,起爆弹起爆瞬间(A点)测试线炸断,测试线长度瞬间变短,此时主发药包被起爆弹引爆,爆轰开始;从A

表 1 殉爆试验参数及结果

Tab. 1 Parameters and results of sympathetic detonation test

试验次数	岩体类型	孔号	孔径/ mm	孔深/ m	主发药包		被发药包		间隔器 个数	间隔距 离/cm	瞬发地 表雷管
					药量/kg	高度/kg	药量/kg	高度/kg			
1	钙质 硅酸盐	* L13	311	16.6	360	6.0	240	4.0	4	160	击发
		L14		16.5					4	160	击发
		L15		16.8					4	160	击发
		* L16		16.8					5	200	击发
		L17		16.4					5	200	击发
		L18		17.1					5	200	击发
2	钙质 硅酸盐	* M07	311	16.5	360	6.0	240	4.0	6	240	击发
		M08		16.7					6	240	击发
		M09		17.0					6	240	击发
		M10		17.2					7	280	击发
		M11		16.8					7	280	击发
		* M12		16.9					7	280	击发
3	钙质 硅酸盐	* K04	311	16.5	360	6.0	240	4.0	8	320	击发
		K05		16.7					8	320	击发
		K06		16.7					8	320	击发
		K07		17.0					9	360	未击发
		K08		17.5					9	360	未击发
		* K09		16.5					9	360	击发
4	覆盖 砂层	G1	311	17.2	360	6.0	240	4.0	6	240	塌孔未击发
		G2		17.5					6	240	击发
		G5		17.0					7	280	击发
		G7		17.6					7	280	击发
		G8		17.0					8	320	击发
		G9		17.3					8	320	击发
		G10		17.7					9	360	击发
		G11		17.1					9	360	未击发
5	覆盖 砂层	K13	165	17.1	100	5.5	100	5.5	3	120	击发
		K14		16.5					3	120	击发
		K15		17.0					4	160	击发
		K16		17.2					4	160	击发
		K17		17.0					5	200	击发
		K18		17.3					5	200	击发
		K19		16.9					6	240	未击发
		K20		16.6					6	240	击发
		K21		17.0					7	280	未击发
		K22		16.5					7	280	未击发



1 - 配重砂袋;2 - 测试线初始连接;3 - 测试线;  
4 - 爆轰波阵面;5 - 填塞段;6 - 测试仪;7 - 起爆弹;  
8 - 炸药。

图 2 孔内爆速测试系统

Fig. 2 Test system of detonation velocity in hole

到 B,即爆轰从起爆弹位置至主发药包顶,测试线长度缩短 3.0 m,斜率是主发药包的爆速(3 968 m/s);从 B 到 C 段为空气间隔段,测试线长度缩短 1.5 m,该段斜率即主发装药段起爆后产生的高温高压爆生气体产物向上推进的速度;从 C 到 D 为被发药包装药位置殉爆至爆轰结束,测试线长度缩短 4.0 m,其斜率是被发药包爆速(3 621 m/s)。

图5为不同空气间隔长度的孔内爆速,空气间隔长度分别为 0、160、200、240、280、320 cm 和 360 cm。图6为实测到的孔内主发药包的爆速。可以看出,主发药包爆速不完全相同(3 725~4 012

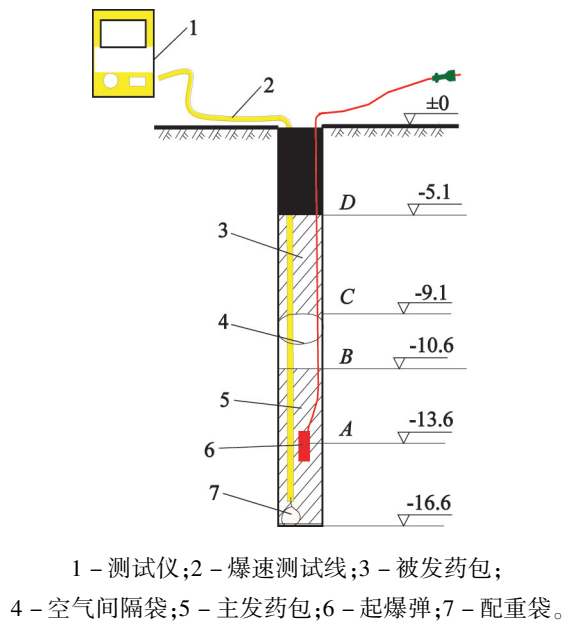


图 3 炮孔装药结构(单位:m)

Fig. 3 Charging structure of the hole(unit:m)

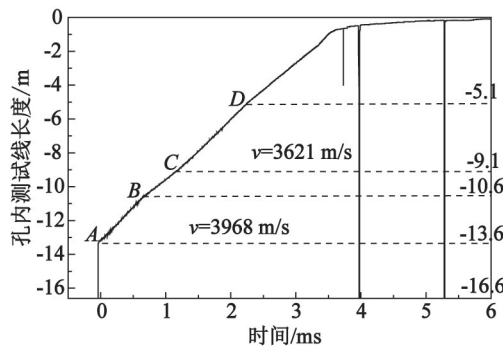


图 4 实测爆速

Fig. 4 Actual detonation velocity of ANFO

m/s),被发药包爆速随空气间隔长度增大而降低。另外,当空气间隔长度在 160 ~ 280 cm 时,被发药包爆速随空气间隔长度的变化不大;但是当空气间隔长度大于 280 cm 后,被发药包爆速下降速率显著增大,这与陈庆凯等<sup>[7]</sup>研究得到的乳化炸药在 PVC 管和金属管内被发药卷爆速变化规律一致。

炸药的理论爆速应为一稳定值。但是,3 次爆速测试(共 6 孔)实测到的主发药包爆速并不完全相同(3 725 ~ 4 012 m/s)。这是因为,在工程试验中,每个孔的孔壁条件、围岩条件和填塞条件也不严格相同;因此,相同条件的主发药包、相同规格的起爆体,得到的爆速不完全相同,但误差在 10% 以内。被发药包是被主发药包爆炸后产生的能量(爆轰波和高温高压产物)殉爆,空气间隔长度越大,主发药包爆炸后能量衰减越多,击发被发药包的能量就越小,直至无法殉爆被发药包。在特定条件和范围下,

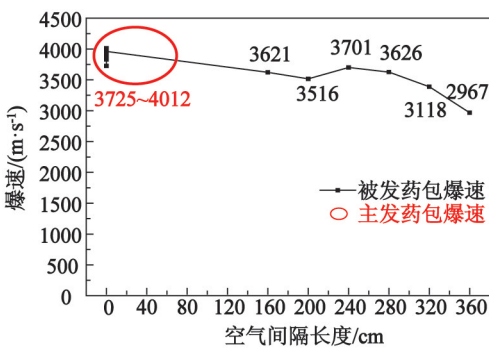


图 5 不同空气间隔长度时主发和被发药包的爆速

Fig. 5 Detonation velocity of main charge and charged charge with different air-deck length

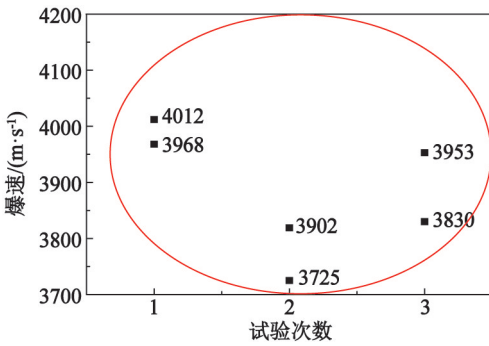


图 6 主发药包爆速

Fig. 6 Detonation velocity of main charge

击发被发药包的能量大,其爆速也会高,这与“雷管 + 起爆弹起爆”比“雷管直接起爆”可获得较高的孔内爆速原理相同。

### 3 工程应用

#### 3.1 爆破设计

爆破区块形状呈梯形,18 排,每排 15 ~ 25 个炮孔,共 385 个炮孔,试验区块围岩类型为白岗岩(密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>,岩石硬度系数 15.6),爆破参数如表 2 所示。

所有炮孔都采用空气中间间隔装药结构,以中间起爆点和控制排为界,一侧采用常规孔内分段起爆,各装药段分别设起爆体;另一侧采用殉爆起爆,仅主发装药段设起爆体,被发装药段不设起爆体,如图 7 所示。

起爆网路采用鱼骨型网路,如图 8 所示。孔内起爆雷管延期时间为 500 ms,地表延期雷管组合为:排间延期时间为 75 ms,孔间延期时间为 42 ms。

#### 3.2 爆破效果

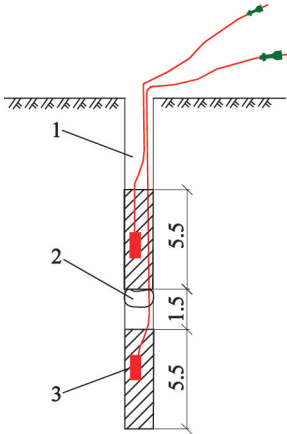
经爆后测量和分析,分段起爆的前冲更严重,其



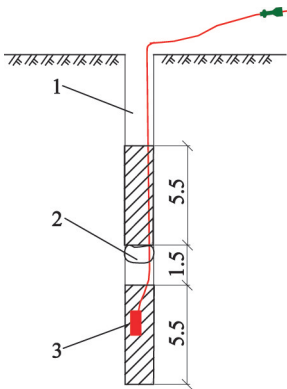
表 2 台阶爆破试验参数

Tab.2 Bench blasting test parameters

孔径/ mm	台阶高度/ m	超深/ m	孔距/ m	排距/ m
165	15.0	1.5	4.5	5.0
填塞高度/ m	单孔药量/ kg	间隔长度/ m	单耗/ (kg·m <sup>-3</sup> )	
4.0	100+100	1.5	0.59	



(a) 常规分段起爆



(b) 殉爆起爆

1 - 填塞; 2 - 空气间隔袋; 3 - 起爆体。

图 7 装药结构(单位:m)

Fig. 7 Charging structure(unit:m)

最大前冲距离约 52 m,殉爆起爆的最大前冲距离为 31 m,位于起爆点附近;分段起爆的后拉也更严重,其后拉范围为 1.6~4.2 m,殉爆起爆的后拉范围为 1.7~3.6 m;利用块度分析软件 Split-Desktop 3.0 分

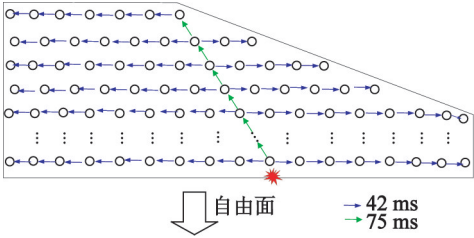
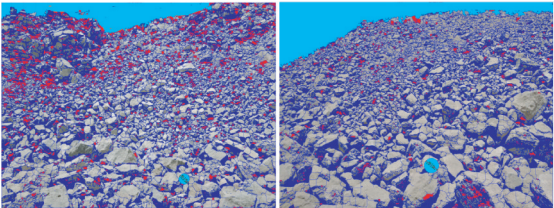


图 8 起爆网路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of detonation network

别对分段起爆和殉爆起爆区域的块度进行对比(图 9),爆破效果分析见表 3。

从本次爆破试验结果来看,相比殉爆起爆方式,分段起爆前冲距离更大,但分段起爆试验区域炮孔排数也多,殉爆起爆是否有利于控制前冲,还需进行更多试验;另外,对于块度分布和后拉控制,两种起爆方式的结果差别不明显。



(a) 常规分段起爆 (b) 殉爆起爆

图 9 爆后块度对比

Fig. 9 Fragmentation distribution after blasting

3.3 装药效率

空气间隔装药的工序见图 10。分段起爆后每孔装药总历时 4 min;而采用空气间隔殉爆起爆方式后,省去了设置上分段起爆体这一工序,每孔装药只需 3 min,这意味着效率提高了 25%;另外,还节省 1 发起爆弹和 1 发孔内管,起爆体成本降低 50%。

4 结论

1) 沙漠地区某露天矿干燥钙质硅酸盐和覆盖砂层中,台阶爆破时空气中部分间隔装药,上部装药段可以不设起爆体,直接利用底部装药段殉爆起爆,且

表 3 爆破效果分析

Tab.3 Analysis of blasting outcome

方式	最大前冲距离/ m	后拉范围/ m	块度分布/%			
			<250 mm	<400 mm	<600 mm	<1 000 mm
分段起爆	52.0	1.6~4.2	82.2	85.8	89.7	96.1
殉爆起爆	31.0	1.7~3.6	83.1	84.3	88.6	95.6

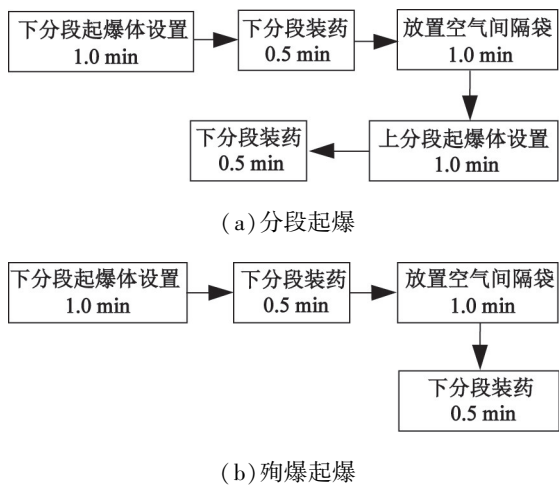


图 10 空气间隔装药工序

Fig. 10 The process of air-deck charging

炮孔孔径越大,殉爆能力越强;对于 311 mm 孔径炮孔,空气间隔长度不超 320 cm,上部装药段都能殉爆;对于 165 mm 孔径炮孔,空气间隔长度不超 200 cm,上部装药段都能殉爆;311 mm 孔径的炮孔相比 165 mm 孔径的炮孔殉爆距离更大,殉爆能力更强。

2) 被发药包的爆速比主发药包低,且随空气间隔长度的增大而降低,但并不存在线性关系;在空气间隔长度的某个范围内,被爆药包爆速变化不大,但是当空气间隔长度续约增加时,爆速下降速率增大。

3) 空气间隔装药采用殉爆起爆方式,更有利于控制前冲和保护后侧围岩;与常规分段起爆相比,其装药效率高(可提高 25%),且能节省 50% 的起爆器材。

参 考 文 献

[1] MELNIKOV N V. Charge construction influence on explosion operations efficiency[R]. Reports of the YI science symposium on drilling, explosives, explosion operations and study of physical and mechanical properties of rocks. USA, Gosgortekkhizdat:Rolla, 1962.

[2] MELNIKOV N V, MARCHENKOV L N. Effective methods of application of explosion energy in mining and construction[C]//The 12th US Symposium on Rock Mechanics. New York: AIME, 1971: 359-378.

[3] PAL R P, SINGH R B, MONDAL S K. Air-deck blasting in opencast mines using low cost wooden spacers for

efficient utilisation of explosive energy[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 1995,43(8): 5-15.

[4] MOXON N T, MEAD D, RICHARDSON S B. Air-decked blasting techniques: some collaborative experiments[J]. Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy, Section A: Mining Industry, 1993, 102: A25-A30.

[5] 张国建,周百川,张大宁,等. 应用底部间隔装药爆破技术提高石灰石矿块矿率[J]. 中国矿业,1995, 4(6): 22-26.

ZHANG G J,ZHOU B C,ZHANG D N, et al. Increasing limestone lump rate by bottom broken charge blasting[J]. China Mining Magazine, 1995, 4(6): 22-26.

[6] 刘颖歆. 空气间隔装药在铜绿山矿深孔爆破中的应用[J]. 爆破, 1998, 15(2): 55-58,89.

LIU Y X. Application of air interval charge in underground borehole blasting of Tonglushan Delafossite Mine[J]. Blating, 1998, 15(2):55-58,89.

[7] 陈庆凯,夏亚伟,刘占富,等. 约束条件对乳化炸药殉爆距离影响的研究[J]. 矿业研究与开发,2017,37(1):45-49.

CHEN Q K,XIA Y W,LIU Z F, et al. The effect of constraint conditions on the gap distance of emulsion explosives[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(1):45-49.

[8] 叶海旺,农冬灵,赵明生,等. 混装乳化炸药水孔装药数值模拟及试验研究[J]. 爆破, 2011,28(4):11-14.

YE H W,NONG D L,ZHAO M S, et al. Numerical simulation and experimental study on emulsion explosive charge in water-filled hole[J]. Blasting, 2011, 28(4): 11-14.

[9] 吴国群. Micro-Trap 孔内爆速测试系统在铁矿山中的应用[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(6):59-62.

WU G Q. Application of Micro-Trap testing system in iron mine[J]. Opencast Mining Technology, 2017, 32(6):59-62.

[10] 朱宽,曹进军,郝亚飞,等. 对影响现场混装乳化炸药孔内爆速因素的探究[J]. 爆破,2016, 33(4):118-122.

ZHU K,CAO J J,HAO Y F, et al. Research on influence factor of in-hole detonation velocity of mixed loading emulsion explosive[J]. Blasting, 2016, 33(4): 118-122.