

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.012

## 压渣爆破技术在路堑边坡治理中的应用\*

汪高龙<sup>1</sup>,王潇<sup>1</sup>,李跟<sup>1</sup>,李毅<sup>2</sup>

(1. 连云港明达工程爆破有限公司,连云港 222021;2. 武汉理工大学,武汉 430070)

**摘要:** 为确保连云港某地路堑边坡的稳定性,防止地质灾害的发生,使用爆破技术对该地边坡进行治理。该爆破区域施工场地狭小,石料出运受限,结合压渣爆破破岩机理,采用逐孔起爆的压渣爆破技术方案。留渣体厚度3.5 m、起爆时间间隔50 ms、炸药单耗0.45 kg/m<sup>3</sup>、前排单孔装药量130 kg、后排单孔装药量100 kg。通过爆破安全校核可以确保周围建筑物爆破振动安全性。爆破施工结果表明:爆破施工参数设置合理,降低了岩石大块率,减少了爆破地震效应,取得了良好的爆破效果。

**关键词:** 压渣爆破;复杂环境;爆破参数;合理渣厚

中图分类号: TB41

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2021)01-0075-05

## Application of Buffer Blasting Technology in Road Cutting Slope Treatment

WANG Gao-long<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>1</sup>, LI Gen<sup>1</sup>, LI Yi<sup>2</sup>

(1. Lianyungang Mingda Engineering Blasting Co., Ltd., Lianyungang 222021, China;

2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Blasting technology was used to ensure the stability of a cutting slope in Lianyungang in order to prevent geological disasters. The construction site of the blasting area was narrow and the transportation of stone was limited. This condition led to the application of the technical scheme of buffer blasting with hole by hole initiation based on related rock fragmentation mechanism. The thickness of the buffer body was 3.5 m, and the initiation delay interval was 50ms. The single-hole explosive charge in the front and rear rows were 130 kg and 100kg, respectively, with a powder factor of 0.45 kg/m<sup>3</sup>. The safety of surrounding buildings could be ensured by checking the blasting vibrations. The results show that the blasting parameters are reasonable for a good blast effect, which can reduce the boulder yield and the blast vibration effect.

**Key words:** buffer blasting; complex environment; blasting parameters; reasonable buffer thickness

由于岩石具有碎胀性,爆破后岩块呈松散状态,岩体体积增大。爆破前,通常要在自由面处预留足够空间,以容纳爆破碎胀所增加的那部分岩体体积。

这种条件下的爆破称为自由空间爆破,没有足够补偿空间的爆破则称为挤压爆破<sup>[1,2]</sup>。实际上,挤压爆破的补偿空间是从松散材料中挤压出来的,这种松散材料称为挤压材料,通常为前一次爆破未清理完的渣堆。所以挤压爆破又称为留渣爆破或压渣爆破<sup>[3-6]</sup>。1982年张生善等人对渣体在爆破过程中的作用进行详细阐述<sup>[7]</sup>,并分析了其产生的经济效果。费鸿禄将压渣爆破技术应用于路堑石方开挖的施工中<sup>[8]</sup>,实践证明该方法爆破效果良好,爆破岩石块度均匀,大块率低。尹岳降等人基于矿山台阶

收稿日期:2020-11-03

作者简介:汪高龙(1974-),男,学士、高级工程师,从事采矿工程、爆破工程方面的技术与管理工作,(E-mail)578591642@qq.com。

通讯作者:王潇(1984-),女,硕士、工程师,从事爆破施工设计与安全管理工作,(E-mail)289550658@qq.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804705)

爆破技术<sup>[9]</sup>,合理分析不同爆区的岩性差别,针对不同爆区设置了不同爆破参数。该方法使得爆破后岩石大块率大大降低。

张元娟等人对压渣爆破理论进行了详细说明<sup>[10]</sup>。压渣爆破技术是在原有“自由面”齐发爆破基础上发展而来的,因此施工方法基本与“自由面”爆破方法相类似,不同的是按设计预留了“渣体”,采用毫秒延时进行排间爆破,并相应地调整了孔网参数<sup>[11]</sup>。赵春艳等人应用遗传神经网络模型对台阶压渣爆破效果进行预测,增强了预测结果的可靠性,为选择爆破参数和取得良好的爆破效果提供了依据<sup>[12]</sup>。曹茂欣等人在路基石方开挖工程中,将压渣爆破与微差爆破相结合,取得了较为理想的爆破效果<sup>[13]</sup>。

## 1 工程概况

为消除地质灾害隐患,彻底解决连云港东疏港高速公路通车后的安全问题,连云港港口集团拟对东疏港高速公路中云台山路堑西侧边坡+84 m以下边坡崩塌、滑坡地质灾害进行工程治理。治理方法为将路堑西边坡+84 m以下边坡滑坡、崩塌危岩体清除。治理开挖总工程量近 $1.2 \times 10^7$  t。

### 1.1 爆区周边环境

本工程爆破开采区域正东侧正在运行的东疏港高速公路距爆破区域最近距离仅为20 m;东南方向有混凝土搅拌站最近距离仅为70 m;南侧爆区距康缘药厂最近距离为800 m,康源药厂有国家级生物中药重点实验室,实验室仪器对爆破震动要求极高,根据药厂提供仪器能够承受爆破震动上限值为0.1 cm/s。北侧邻近云门寺村和云门水库,距云门水库最近距离仅为25 m,云门寺村大多数民房都在复杂环境深孔爆破警戒200 m范围内,爆破作业环境十分复杂。

### 1.2 施工特点

本工程具有如下施工特点:

1) 爆破作业区域临近运行中高速公路,爆破环境复杂,爆破规模受限。

2) 因配套工程影响,石料出运受限,山场石料挤压影响爆破作业面形成。

3) 爆破作业工期较短,压渣爆破应用是完成本工程任务关键技术。

## 2 压渣爆破技术研究

压渣爆破即是在露天台阶爆破中利用预留渣体控制待爆区的前冲距离,使被爆岩体与预留渣体产

生挤压碰撞,达到进一步改善爆破岩体块度分布的一项爆破技术。如图1所示。该技术可使钻孔爆破工作与清渣工作同步进行,提升工作效率,同时减少爆破体大块率。

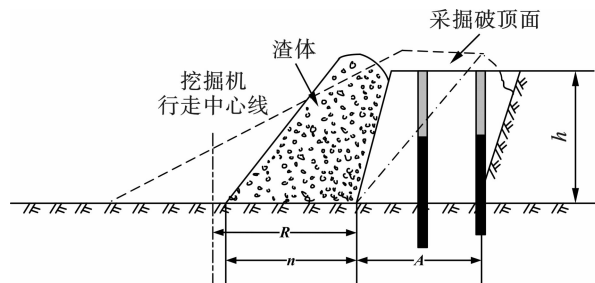


图1 压渣爆破条件下爆堆规格与采掘的关系图  
Fig. 1 The relationship between blasting muck pile specifications and mining under buffer blasting

压渣爆破的破岩原理可总结成三个方面:1) 利用留渣体控制爆堆的前冲距离,爆堆体受爆破能量作用,向前运动过程中与留渣体碰撞,这种高速碰撞与冲击,进一步破碎岩石,降低岩石大块率。2) 留渣体的存在使得爆炸产生的高温高压气体在岩体内部的作用时间增长,延缓了高温高压气体从岩体向外部逸出的时间,提高了炸药的能量利用率。3) 压渣爆破采用炮孔间毫秒延时逐孔起爆方式,该种起爆方案可使岩体处于连续的应力状态,使岩石的破碎更为充分<sup>[14-16]</sup>。

## 3 爆破方案

### 3.1 采场布置

根据东疏港路堑工程以及+84 m以上平台综合治理的施工经验,拟将本工程分为五个开采平台,分别为+69 m、+54 m、+39 m、+26 m、+17 m。前四个平台靠近边坡时按两级开采平台分为三级最终平台,最终形成+74 m、+64 m、+54 m、+44 m、+35 m、+26 m六个台阶,+26 m平台下降9 m形成+17 m台阶,如图2所示。

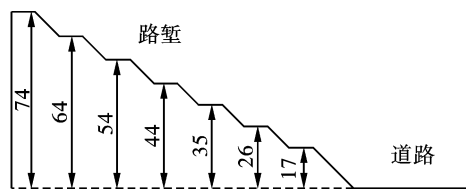


图2 爆破台阶布置(单位:m)  
Fig. 2 Arrangement of bench blasting(unit:m)

### 3.2 爆破参数确定

台阶爆破主要参数包括炮孔直径、孔深、孔距、

排距、炸药单耗与单孔装药量等。

1) 炮孔直径  $D$ 。根据工程现场岩石性质、台阶高度与现有钻机设备等条件,本工程钻机拟采用PC385 露天潜孔钻机,钻头直径  $d = 115 \text{ mm}$ ,则炮孔直径  $D = 115 \text{ mm}$ 。

2) 钻孔形式。钻孔形式采用倾斜孔,倾角  $\alpha$  为  $75^\circ$ 。

3) 孔深  $L$  与超深  $h$ 。炮孔深度由台阶高度和炮孔超深共同决定。该工程台阶高度  $H = 15 \text{ m}$ 。炮孔超深是为了克服底板阻力,使爆破后不留岩坎。本工程炮孔超深  $h$  按  $1 \text{ m}$  计算。结合炮孔倾角,计算孔深  $L = (H + h) / \sin \alpha = 16.6 \text{ m}$ ,如图3所示。

4) 底盘抵抗线。根据压渣爆破的特殊性与前期对矿体爆破效果的了解与掌握,根据炮孔孔径计算压渣爆破的底盘抵抗线:  $W_d = KD$ ,  $K$  值取  $30$ ,计算  $W_d = 3.45 \text{ m}$ ,选取  $W_d = 3.2 \text{ m}$ 。

5) 孔距  $a$  和排距  $b$ 。孔距  $a = mW_d$ 。  $m$  为钻孔密集系数,一般取  $1.0 \sim 1.6$ ,据岩石性质及其节理发育情况,取  $m = 1.5$ ,则  $a = 1.5 \times 3.2 = 4.8 \text{ m}$ 。排距  $b = W_d = 3.2 \text{ m}$ 。炮孔剖面示意图如图3所示。

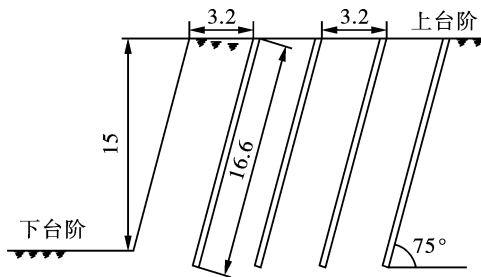


图3 炮孔剖面示意图(单位:m)  
Fig. 3 Schematic diagram of blasthole section(unit:m)

6) 填塞长度。填塞长度指装药药柱顶面至孔口这段不装药的长度。合理的堵塞长度确定能降低爆炸气体能量损失和增加钻孔装药量。若堵塞长度过大,则单孔装药量减少,当岩石较坚硬时,岩石大块率较高。堵塞长度较小则容易产生冲炮,不仅浪费炸药能量,而且容易产生爆破飞石。综合考虑岩石大块率、爆破安全性与压渣爆破的特殊施工条件,填塞长度:  $\Delta l = (20 \sim 30) D$ , 计算得  $\Delta l = 2.3 \sim 3.45 \text{ m}$ ,本工程取堵塞长度  $\Delta l = 3.0 \text{ m}$ 。

7) 炸药单耗  $q$ 。对于深孔爆破,炸药单耗是一个比较重要的参数,受岩石的可爆性、炸药的种类、自由面条件和块度要求等因素影响。根据采区现状,台阶高度  $H = 15 \text{ m}$ ,依据岩石岩性与工程经验,确定炸药单耗  $q = 0.45 \text{ kg/m}^3$ 。

8) 单孔装药量  $Q$ 。单孔装药量可按下列公式计算<sup>[17]</sup>

$$Q = qabH = 0.45 \times 3.2 \times 4.8 \times 15 = 103 \text{ kg},$$

实际取  $Q = 100 \text{ kg}$  (1)

前排孔由于紧挨留渣体,爆破产生的能量损失较大,为保证前排孔爆破质量,需要增加装药量  $30\% \sim 40\%$ ,本工程前排孔装药量  $130 \text{ kg}$ 。

### 3.3 压渣厚度

合理的留渣厚度对压渣爆破的效果至关重要。留渣厚度可由下式计算得出<sup>[17]</sup>

$$B = \frac{W_d K}{2} \left( 1 + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right) = \frac{W}{2} \left( K + \frac{C_2}{C_1} \right) \quad (2)$$

式中:  $B$  为留渣厚度,  $m$ ;  $W$  为底盘抵抗线,  $m$ ;  $K$  为留渣体的松散系数;  $\rho_1$  为岩石密度,  $t/m^3$ ;  $\rho_2$  为留渣体的堆积密度,  $t/m^3$ ;  $C_1$  为岩体中弹性波波速,  $m/s$ ;  $C_2$  为矿渣内弹性波波速,  $m/s$ 。

$$C_2 \approx 500(3 + d) \quad (3)$$

式中,  $d$  为留渣体岩块的平均尺寸,  $m$ 。

根据工程测量情况,  $d = 0.8 \text{ m}$ ,  $C_1 = 4000 \text{ m/s}$ ,  $C_2 = 1900 \text{ m/s}$ ,  $k = 1.3 \sim 1.77$ ,本工程取  $k = 1.6$ 。代入(2)式求得  $B = 3.32 \text{ m}$ 。实际取  $B = 3.5 \text{ m}$ 。

### 3.4 布孔方式和起爆网路

基于前述压渣爆破的作用原理,为增加岩石相互撞击的机率,本工程施工孔眼呈矩形布置,如图4所示。矩形爆破的起爆方式使得被抛掷起来的大块岩石相互撞击,增加岩石的相互撞击概率,减小岩石大块率。

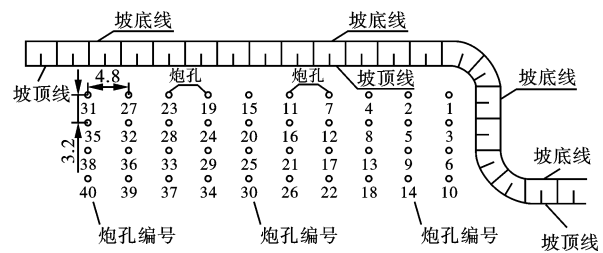


图4 炮孔平面布置图(单位:m)  
Fig. 4 Layout of the blast hole(unit:m)

起爆顺序为毫秒延时逐孔起爆,如图5、6所示。炮孔间的起爆顺序为相间布置,延期时间为毫秒级,逐孔起爆产生的应力波能量在时间、空间上是相互分开的,振动效应随之减小。由于避开了主振相的相位,相比传统起爆技术,爆破振动效应可减少  $1/3 \sim 2/3$ 。

逐孔起爆技术的关键是合理选择起爆间隔时间,延时间隔时间  $t$  按下式计算<sup>[17]</sup>

$$t = aw \quad (4)$$

式中:  $a$  为与岩石有关的系数,取  $a = 6$ ;  $w$  为最

小抵抗线,  $w = w_d = 3.2$  m。经计算:  $t = 14$  ms, 按施工经验取  $t = 50$  ms。起爆方法采用复式非电起爆网路, 激发笔引爆。

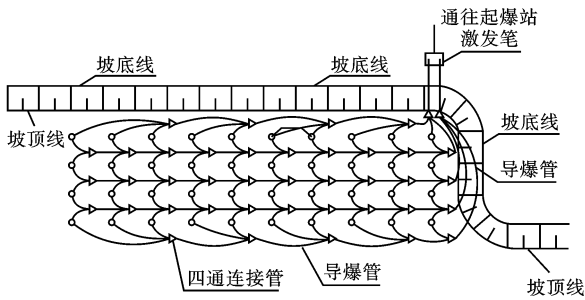


图5 起爆网路敷设

Fig. 5 Detonation network laying

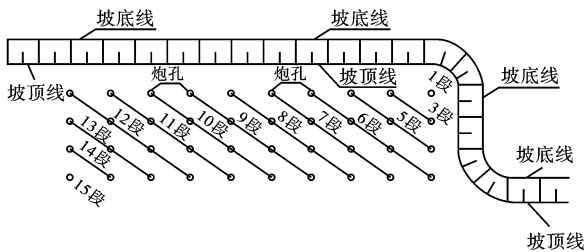


图6 雷管段别

Fig. 6 Detonator segment

装药形式为人工装药, 采取连续耦合装药结构<sup>[18]</sup>, 如图7所示。

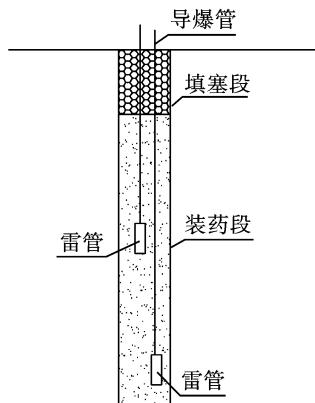


图7 装药结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the charge structure

炸药使用2#岩石乳化炸药, 起爆雷管为导爆管雷管。为确保每个炮孔均被可靠起爆, 每孔装两发同段别雷管, 炮孔上部采用正向起爆, 炮孔底部采用反向起爆。

### 3.5 爆破安全距离校核

岩石爆破时, 伴随着爆破过程必然产生爆破地震、爆破飞石、空气冲击波及有害气体, 因此, 爆破时为确保爆区周围人员、设备以及建筑物等的安全, 爆

破设计时必须确定爆破危害范围。我国爆破安全规程采用保护对象所在地质点峰值振动速度作为主要判别依据<sup>[19]</sup>。安全距离的确定可采用萨道夫斯基经验公式进行估算<sup>[20]</sup>

$$R_d = Q^{1/3} (K/V)^{1/\alpha} \quad (5)$$

式中:  $Q$  为最大一段齐爆药量, 本次施工最大一段齐爆药量不超过 300 kg, 一次爆破总药量为 3000 kg;  $K$  是与地质、地形条件有关的系数, 取  $K = 150$ ;  $\alpha$  为衰减系数, 取  $\alpha = 1.65$ 。  $V$  为爆破地震波速度, 根据被保护建筑物的特征取  $V = 0.1$  cm/s。

经计算, 爆破安全距离  $R_d = 552.24$  m, 此安全距离满足康缘药业重点实验室对爆破安全距离的要求, 所以采区开展的爆破是完全可行的。

### 3.6 爆破飞石安全距离校核

深孔爆破个别飞散物安全允许距离按下式计算<sup>[17]</sup>

$$R_f = (40/2.25)d \quad (6)$$

式中:  $R_f$  为个别飞石安全距离, m;  $d$  为炮孔直径  $d = 115$  mm。计算结果  $R_f = 181.1$  m。该计算结果小于《爆破安全规程》规定值, 同时, 根据爆破现场爆后实际测量, 爆破飞石最远距离 171.2 m, 故应以规程规定值作为圈定警戒范围的依据, 即中深孔爆破时以  $R = 300$  m 为半径圈定爆破警戒范围。

## 4 结论

连云港东疏港高速公路中云台山路堑边坡的工程实践表明, 该压渣爆破参数选择合理, 符合实际情况。爆破后, 爆堆松散、块度均匀、大块率较低、有效提高了采装速率。基于以上工程, 得出如下结论:

1) 路堑边坡爆破中采用压渣爆破技术, 可达到控制飞石, 减少爆堆大块率的目的, 获得了良好的爆破效果。

2) 逐孔起爆可有效减少一次齐爆药量, 降低爆破地震效应。

3) 压渣厚度与炸药单耗对压渣爆破效果具有重要影响。本工程压渣厚度 3.5 m, 炸药单耗  $0.45$  kg/m<sup>3</sup> 可以取得预期的爆破效果。

4) 综合采用压渣爆破、逐孔起爆等技术, 同时对炸药单耗等爆破参数进行优化设计, 解决了大块率和根底控制等难题, 极大地提高了施工质量。

### 参考文献 (References)

- [1] 刘维信, 王劲翔, 王其杰, 等. 多排孔延时松动挤压爆破陷落柱技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(10): 61-65.

- [1] LIU Wei-xin, WANG Jin-xiang, WANG Qi-jie, et al. Millisecond delay loose and squeeze blasting with multi-row blast hole for subsided column [J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(10): 61-65. (in Chinese)
- [2] 李洪彦, 郁华嘉. 中深孔无井拉槽挤压爆破工艺参数优化[J]. *现代矿业*, 2020, 36(10): 52-56.
- [2] LI Hong-yan, YU Hua-jia. Optimization of process parameters of medium-deep hole extrusion slotting blasting without cutting well [J]. *Modern Mining*, 2020, 36(10): 52-56. (in Chinese)
- [3] 熊 亮, 郑文强. 压渣爆破在建龙矿业马剑子沟采区的应用[J]. *露天采矿技术*, 2018, 33(3): 69-71.
- [3] XIONG Liang, ZHENG Wen-qiang. Application of extrusion blasting in Majianzigou of Jianlong Mining Area [J]. *Open-cast Mining Technology*, 2018, 33(3): 69-71. (in Chinese)
- [4] 费鸿禄, 孙晓宇, 关福晨, 等. 水下深埋岩石爆破振动衰减规律研究[J]. *爆破*, 2020, 37(3): 26-33.
- [4] FEI Hong-lu, SUN Xiao-yu, GUAN Fu-chen, et al. Vibration attenuation law of underwater deep buried rock blasting [J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 26-33. (in Chinese)
- [5] BRUNETON, MARIANNE. Complex lithospheric structure under the central baltic shield from surface wave tomography [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B10): B10303.
- [6] 杨建华, 代金豪, 姚 池, 等. 岩石高边坡爆破开挖损伤区岩体力学参数弱化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5): 968-975.
- [6] YANG Jian-hua, DAI Jin-hao, YAO Chi, et al. Weakening laws of rock mass properties in blasting excavation damage zone of high rock slopes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(5): 968-975. (in Chinese)
- [7] 张生善, 徐金汉. 压渣爆破方法与经济效果[J]. *爆炸与冲击*, 1985(1): 72-77.
- [7] ZHANG Sheng-shan, XU Jin-han. Method of buffer blasting and its economic effects [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1985(1): 72-77. (in Chinese)
- [8] 费鸿禄. 台阶挤压爆破技术在路堑开挖中的应用[J]. *爆破*, 1998(3): 29-32.
- [8] FEI Hong-lu. The application of bench extruding blasting technology in cutting excavation [J]. *Blasting*, 1998(3): 29-32. (in Chinese)
- [9] 尹岳降, 朱子晗, 陈 明, 等. 长九神山灰岩矿开采爆破试验研究[J]. *爆破*, 2020, 37(4): 43-47.
- [9] YIN Yue-jiang, ZHU Zi-han, CHEN Ming, et al. Experimental study on mining blasting of Chang-jiu Limestone Mine [J]. *Blasting*, 2020, 37(4): 43-47. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y, HUANG J. Study on theoretical analysis of buffer blasting [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 7(1): 342-344.
- [11] 李晓阳. 谈自由面对土(石)爆破效果的影响[J]. *爆破器材*, 1986(4): 20-22.
- [11] LI Xiao-yang. Talk about freely facing the influence of soil (stone) blasting effect [J]. *Explosive Materials*, 1986(4): 20-22. (in Chinese)
- [12] 赵春艳, 常 春, 张继春, 等. 台阶压渣爆破效果遗传神经网络预测[J]. *岩土力学*, 2003(2): 88-90.
- [12] ZHAO Chun-yan, CHANG Chun, ZHANG Ji-chun. Prediction of bench tight blasting effects through genetic neural network [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003(2): 88-90. (in Chinese)
- [13] 曹茂欣, 张成良, 唐 海. 微差挤压爆破技术在路堑开挖中的应用[J]. *爆破*, 2002(2): 41-42.
- [13] CAO Mao-xin, ZHANG Cheng-liang, TANG Hai. Application of millisecond compression blasting in excavation of fault trough [J]. *Blasting*, 2002(2): 41-42. (in Chinese)
- [14] ZHANG Z X. Rock fracture and blasting: theory and applications [M]. OXFORD: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [15] 王文才. 露天矿合理挤压爆破参数的确定与应用[J]. *中国矿业*, 2000(3): 48-50.
- [15] WANG Wen-cai. Determination of reasonable extruding blasting parameters at an open-pit mine [J]. *China Mining Magazine*, 2000(3): 48-50. (in Chinese)
- [16] 岳志坤, 李瑞泽, 李福千, 等. 爆破方法对岩石爆破块度分布影响的试验研究[J]. *爆破*, 2019, 36(3): 9-15.
- [16] YUE Zhi-kun, LI Rui-ze, LI Fu-qian, et al. Experimental study on influence of excavation method on rock blasting fragmentation distribution [J]. *Blasting*, 2019, 36(3): 9-15. (in Chinese)
- [17] 王玉杰. *爆破工程* [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007.
- [17] WANG Yu-jie. *Blasting engineering* [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [18] 杨跃宗, 邵珠山, 熊小锋, 等. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J]. *爆破*, 2018, 35(4): 26-33.
- [18] YANG Yue-zong, SHAO Zhu-shan, XIONG Xiao-feng, et al. Comparison of radial and axial uncoupled charge in rock blasting [J]. *Blasting*, 2018, 35(4): 26-33. (in Chinese)
- [19] GB 6722—2014 爆破安全规程[S].
- [19] GB 6722—2014 Blasting safety code [S]. (in Chinese)
- [20] 汪旭光. *爆破设计与施工* [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 224-238.
- [20] WANG Xu-guang. *Blasting design and construction* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 224-238. (in Chinese)