

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.011

## 钙结砾岩空气间隔装药爆破试验及应用

谢 烽,江雅勤,余德运,李泽华,高 亭  
(北方爆破科技有限公司,北京 100097)

**摘 要:** 为改善钙结砾岩爆后大块情况,以纳米比亚湖山铀矿爆破开采为工程背景,在施工现场进行空气间隔装药爆破试验。对相同炸药单耗下三种不同孔径的合理空气间隔长度进行研究,综合考虑大块率和块度级配情况。结果表明:直径165 mm的炮孔,空气间隔装药爆破间隔长度宜为1.5 m;直径251 mm的炮孔,空气间隔宜为2 m;孔径311 mm的炮孔,空气间隔宜为2.5 m;且当炮孔孔径251 mm时空气间隔2 m是最合理的装药结构。对试验得到的合理空气间隔结构进行工程应用,并从爆后效果、块度分布和经济效益三个方面与连续装药结构进行对比研究,实践表明:两者爆后的级配情况均符合铲装要求,采用间隔装药后没有出现1 m以上大块,大块率及级配情况略好于连续装药;空气间隔装药单孔可节省炸药量81.15 kg,节约炸药成本43.01美元。

**关键词:** 钙结砾岩;空气间隔装药;爆破块度;工程应用

**中图分类号:** TD235.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0063-06

## Test and Application of Calcium Conglomerate Air-decked Charge Blasting

XIE Feng, JIANG Ya-qin, YU De-yun, LI Ze-hua, GAO Ting  
(North Blasting Technology Co LTD, Beijing 100097, China)

**Abstract:** In order to improve the calcium conglomerates large blocks after blasting, taking the explosion mining of Husab Uranium Desposites in Namibia as the engineering background, the air-decked charge blasting test was conducted to study the reasonable spacing length of three aperture under the same power factor. Considering big block rate and grading, the results show that the air-decked charge blasting spacing length should be 1.5 m for the diameter of 165 mm, 2 m for the diameter of 251 mm, and 2.5 m for the diameter of 311 mm. The most reasonable charge structure is that the blasting hole diameter is 251 mm and the air spacing length is 2.5 m. The reasonable air-decked structure obtained from the test was verified. Compared with the continuous charging structure and air-decked charge structure in three aspects: blasting effect, rock fragmentation distribution and economic benefit, the results show that the gradation of both can meet with the requirements of shovel loading, but there is no large block with more than 1 m for air-decked charge blasting, and the big block rate and grading are slightly better than the continuous charging blasting. Air-decked charge blasting can save 81.15 kg of explosives for each single hole, reduce the cost of explosives \$43.01.

**Key words:** calcium conglomerate; air-decked charge; blasting fragmentation; engineering application

收稿日期:2020-07-09

作者简介:谢 烽(1988-)男,工程师、博士,主要从事工程爆破研究,(E-mail)731785179@qq.com。

通讯作者:江雅勤(1990-)女,工程师、博士,主要从事工程爆破研究,(E-mail)13552339726@163.com。

湖山铀矿位于西南非洲纳米比亚境内的西部沙漠地区,其铀资源储量位列世界第三,年开采剥离量约1.4亿吨。以白岗岩型铀矿和钙结型铀矿为主。钙结砾岩主要分布在爆破区域表层,钙质或硅质胶

结,砾岩成分以花岗岩砾石为主。由于钙结砾岩孔隙丰富,造成了爆破能量的损失,因此经常在爆堆表层形成大量的大块如图1所示。爆后产生的钙结砾岩大块不仅尺寸大,而且数量多。爆破块度过大则需要二次破碎,增加成本的同时还会产生粉尘和有毒气体,污染工作环境。但是依靠单纯地增加改变炸药单耗虽可以缓解表面大块率,却会造成爆破冲孔能量浪费。随着开采工作强度不断加大,穿孔成本增加,急需在钙结砾岩爆破装药结构上进行研究。控制钙结砾岩的爆破块度,不仅可为工程爆破开采控制岩石块度提供技术参考,同时对保证湖山铀矿爆破质量以及成本控制有着重大意义。

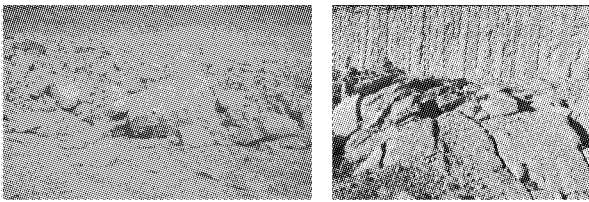


图1 爆破后钙结砾岩大块

Fig. 1 Large block of calcium conglomerate blasting

不同矿山工程对矿石的规格要求不一,而这些不同规格的矿石主要依靠爆破开采获得并有一定的级配要求。这要求在爆破开采中既要控制大块率,又要降低粉矿率,为此国内外学者对空气间隔装药技术改善块度问题进行了深入研究。早在19世纪40年代,前苏联学者 Melnioko 提出采用空气间隔装药结构控制爆破效果<sup>[1]</sup>。空气间隔装药通过延长爆压作用时间,增加爆破冲量,提高爆破的有效能量利用率<sup>[2]</sup>。在露天矿深孔台阶空气间隔装药爆破中,

影响爆破效果的重要参数有空气间隔长度与装填炸药长度之比,对于不同岩石岩体结构对应不同的值<sup>[3,4]</sup>。为了保证钻孔的利用率和避免大块产生<sup>[5-9]</sup>,空气间隔长度一般不超过3.0 m,每个装药段都设起爆体来起爆各装药段。

针对湖山铀矿位于表层的钙结砾岩爆后块度分布差的问题,尝试利用中部空气间隔装药技术进行一系列现场爆破试验,探讨爆破采场合理空气间隔装药结构,从而保证钙结砾岩爆破块度及块度级配满足矿山开采的质量和进队要求。

## 1 空气间隔装药爆破试验

### 1.1 试验方案

为研究湖山铀矿钙结砾岩混装炸药最佳空气间隔装药结构,在现场进行了165 mm、251 mm、311 mm 三组不同炮孔直径下中上部空气间隔装药爆破试验,各组试验根据间隔长度分别将爆区分为三块,单耗相同,试验时使用的空气间隔袋如图2所示,孔网参数如表1所示。

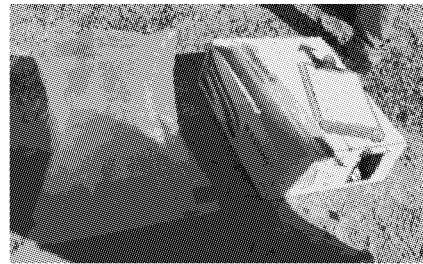


图2 空气间隔袋

Fig. 2 Air pocket

表1 孔网参数

Table 1 Blasting hole parameters

直径/ mm	台阶/m	超深/m	孔距/m	排距/m	填塞 长度/m	空气间隔 长度/m	炸药单耗/ (kg·m <sup>-3</sup> )
165	15	1.3	4.5	5.0	3.0	1.0/1.5/2.0	0.64
251	15	1.5	7.0	6.0	5.0	1.5/2.0/2.5	0.64
311	15	1.8	8.5	7.5	7.0	2.0/2.5/3.0	0.64

### 1.2 试验结果及分析

在爆破现场进行了炮孔直径165 mm、251 mm、311 mm 三组不同空气间隔装药爆破试验,试验结果采用图像分析法统计爆后块度,即每次爆破后用篮球作为参照物拍摄爆堆,利用软件 Split-Desktop3.0 对图片进行处理,块度分析图如图3所示,所得各组试验爆破块度分析结果见表2。

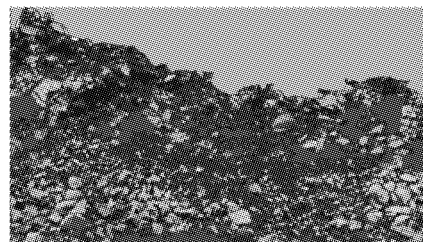


图3 块度分析图

Fig. 3 Fragmentation analysis diagram

表 2 各组试验爆破块度分布结果

Table 2 Distribution results of blasting fragmentation in each group tests

孔径/ mm	间隔 长度/m	≤1200 mm 块度占比%	≤1000 mm 块度占比%	≤600 mm 块度占比%	≤500 mm 块度占比%	≤400 mm 块度占比%
165	1.0	99.59	98.30	92.08	82.21	82.72
	1.5	100.00	100.00	98.11	93.32	84.31
	2.0	100.00	99.97	92.19	87.22	80.72
251	1.5	97.33	96.33	92.59	92.24	80.53
	2.0	100.00	97.72	95.29	94.10	83.68
	2.5	93.39	91.56	90.35	87.60	78.56
311	2.0	94.12	92.11	87.20	82.11	77.02
	2.5	100.00	95.07	90.46	83.61	81.58
	3.0	91.22	90.02	83.51	80.12	75.31

从表 2 可以看出:

(1)大块率。在孔径相同的情况下,不同空气间隔装药爆后大块率不同。对于 165 mm 炮孔,1.5 m 间隔时没有 1000 mm 以上的大块,1 m 间隔时大块率最高;对于 251 mm 炮孔,2 m 间隔时没有 1200 mm 以上的大块,2.5 m 间隔时大块率最高;对于 311 mm 炮孔,2.5 m 间隔时没有 1200 mm 以上的大块,3 m 间隔时大块率最高。

(2)块度级配。为提高铲装效率,湖山矿对非矿石区域爆后块度级配有一定的规定,要求岩石块度 1200 mm 以下控制到 100%,600 mm 以下控制到 90%,400 mm 以下控制到 80%。可知,对于 165 mm 炮孔,1.5 m 和 2 m 间隔时爆后岩石块度均符合级配要求;对于 251 mm 炮孔,2m 间隔时块度符合级配要求。对于 311 mm 炮孔,2.5 m 间隔时块度符合级配要求;其余工况下,爆后岩石块度均不符合级配要求。

综合考虑三种炮孔孔径爆后大块率和块度级配情况,各得到一组较合理的空气间隔装药长度。对于 165 mm 炮孔,宜取 1.5 m 间隔;对于 251 mm 炮孔,宜取 2 m 间隔;对于 311 mm 炮孔,宜取 2.5 m 间隔。

三种不同孔径下的爆后块度分布如图 4~6 所示,三种合理间隔装药爆后块度分布如图 7 所示。

从图 4~图 6 可以看出:三种孔径下,块度范围与块度占比组成的曲线均是呈整体上升趋势,曲线上升的陡缓反映了爆后岩石块度级配情况。当块度从 400 mm 以下过渡到 600 mm 时,其上升趋势很明显;当块度从 600 mm 以下过渡到 1200 mm 的过程中,上升逐渐减缓。说明岩石的块度越大占比越少,块度级配越好,可知三种孔径下对应的合理空气间隔与通过表 2 所得结论一致,即孔径 165 mm、251 mm、311 mm 分别对应的合理间隔为 1.5 m、

2 m、2.5 m。由此可见,随着炮孔孔径增大,空气间隔可以适当增加,这为大型矿山爆破开采使用大孔径装药提供了可靠依据。由图 7 可见,在试验范围内,251 mm 炮孔 2 m 间隔是最合理的空气间隔装药结构。

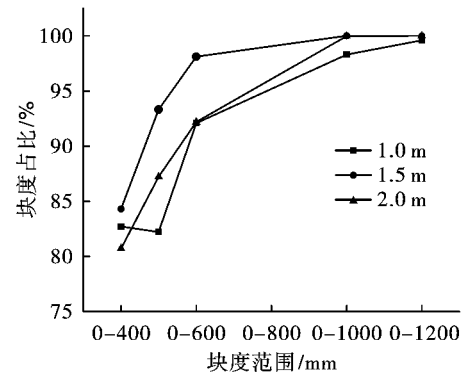


图 4 孔径 165mm 爆后块度分布

Fig. 4 Blasting fragmentation distribution of 165 mm diameter

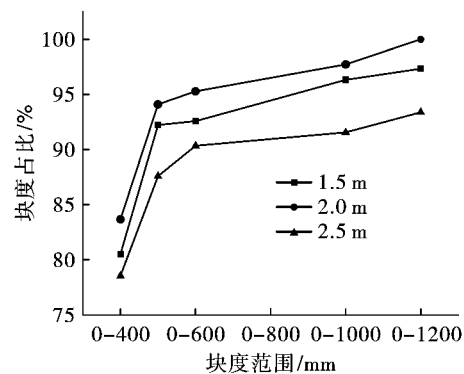


图 5 孔径 251mm 爆后块度分布

Fig. 5 Blasting fragmentation distribution of 251 mm diameter

2 m 空气间隔装药爆后块度分布如图 8 所示。可以看出,空气间隔均为 2 m 时,251 mm 孔径的炮孔,爆后块度分布更好。这是因为炸药单耗相同,165 mm 小直径炮孔堵塞过低,导致爆炸冲孔严重,

能量损失大,破碎半径小,孔口位置过度破碎,有效做功能量低;311 mm 炮孔直径过大,填塞过大,炸药重心低,炮孔上层炸药少,导致顶部出现大块。由此可见,炸药单耗和空气间隔长度相同时,填塞高度对爆后块度也有一定的影响。

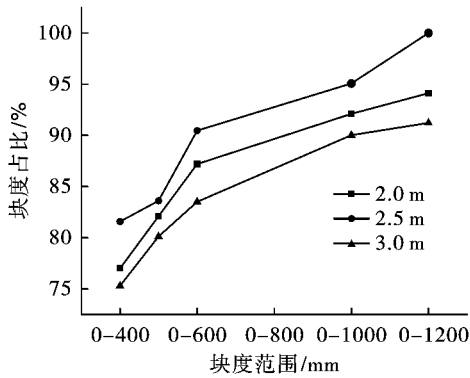


图6 孔径311 mm 爆后块度分布

Fig. 6 Blasting fragmentation distribution of 311 mm diameter

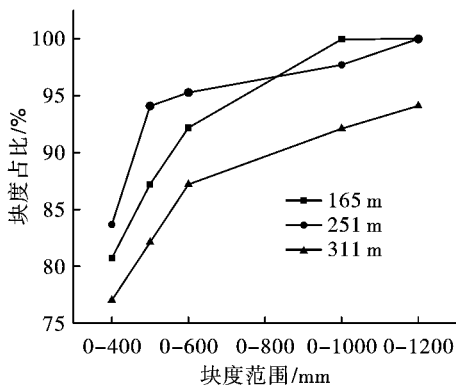


图7 三种孔径下合理间隔装药爆后块度分布

Fig. 7 Blasting block distribution of reasonably air-deck charge under three diameters

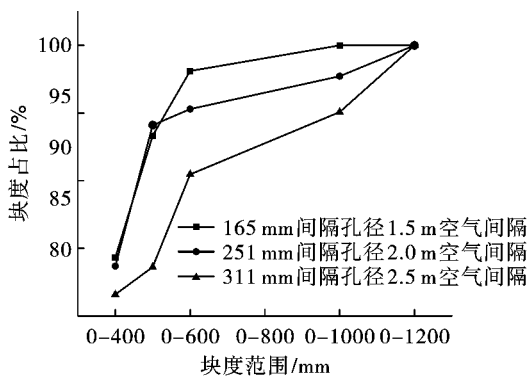


图8 2 m 空气间隔装药爆后块度分布

Fig. 8 Blasting block distribution at 2 m air-deck charge

## 2 工程应用

### 2.1 现场概况

钙结砾岩待爆区位于纳米比亚湖山铀矿,岩石

由钙结砾岩和花岗岩组成,表层5 m 为钙结砾岩,爆区及岩石分布情况如图9所示。爆区台阶高15 m,超深1.5 m,孔距为6 m,排距为7 m,孔径251 mm,炮孔内装填现场混装铵油炸药。为便于进行对比,将爆区分为左右两部分,其中左半区域为连续装药,右半区域为间隔装药,布孔情况如图10所示。间隔装药结构的堵塞长度为3.5 m。空气间隔装药以2 m 的空气间隔袋将药柱分上、下两部分,使炸药高度提高,用以破碎上部钙结砾岩,底部装填8 m 炸药,上部装填3 m。把空气柱长度与装填炸药长度之比定义为空气间隔比例,则其值为18%。

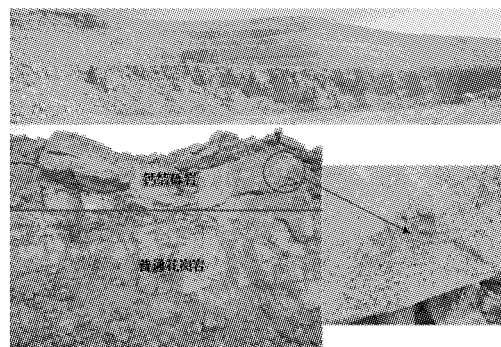


图9 钙结砾岩爆区及岩石分布情况

Fig. 9 Calcium conglomerate explosion area and rock distribution

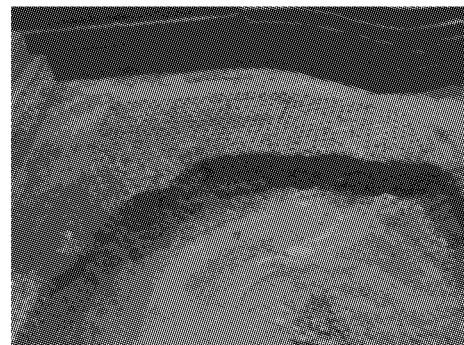


图10 爆前布孔情况

Fig. 10 Hole placement before blasting

### 2.2 应用结果分析

现场爆后效果如图11所示。整体看来,两种装药结构爆破效果相近,爆堆松散,大块少,不用进行二次爆破,爆堆高度低,方便装运。右半部分采用空气间隔的爆后块度好于左半部分连续装药的部分,这是因为空气间隔装药在同等装药量下上段炸药重心高,恰好能对表层钙结砾岩进行有效破碎。将爆破区域每隔一个开采排班后的开挖面进行块度分析,结果如表3所示,单孔炸药成本对比如表4所示。

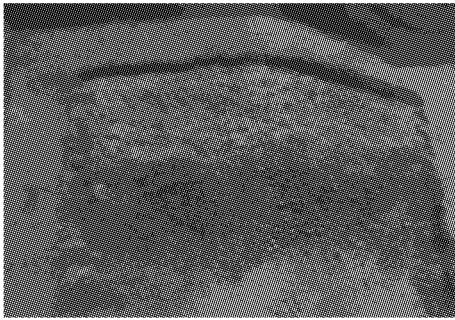


图 11 爆后效果

Fig. 11 Effect picture after explosion

表 3 爆后块度分布结果

Table 3 Results of blasting block distribution

装药结构	≤1200 mm 块度占比%	≤1000 mm 块度占比%	≤600 mm 块度占比%	≤500 mm 块度占比%	≤400 mm 块度占比%
连续装药	100	99.97	92.19	87.22	80.72
间隔装药	100	100.00	94.77	89.33	81.32

表 4 单孔炸药成本对比

Table 4 Cost comparison of single hole explosive

类别	连续装药	间隔装药	间隔装药 节省量
单孔装药量/kg	527.47	446.32	81.15
单孔炸药成本/美元	279.56	236.55	43.01

### 3 结论

根据以上试验及工程应用情况,可得出以下结论:

(1)在钙结砾岩爆区空气间隔装药结构,炮孔孔径增大,空气间隔可以适当增加,这为大型矿山爆破开采使用大孔径装药提供了可靠依据。

(2)试验结果表明,空气间隔相同时,炸药单耗相同,不同炮孔孔径下填塞高度对爆破块度也有一定的影响。

(3)从工程应用情况来看,空气间隔装药与连续装药爆破效果相近,采用间隔装药后没有出现1 m以上大块,两者爆后的级配情况均符合铲装要求,间隔装药爆破后块度及级配情况均略好于连续装药。采用空气间隔装药既降低了单孔炸药量,同时又改善了爆破质量,明显减少了钙结砾岩大块。可见,利用空气间隔技术改善铀矿钙结砾岩爆破大块是非常有效的,不仅能节省爆破成本,又能保证爆破效果利于铲装,这对于大型矿山进行钙结砾岩爆区爆破具有非常重要的意义。

从表3可以看出,采用间隔装药后没有出现1 m以上大块,两者爆后的级配情况均符合铲装要求,间隔装药爆破后块度及级配情况均略好于连续装药。因此,利用空气间隔技术处理钙结砾岩爆破块度的方法是行之有效的。

由表4可以看出,间隔装药比连续装药单孔可节省炸药81.15 kg,节约炸药成本43.01美元。对于湖山铀矿这样的特大型矿山,通过采用空气间隔装药调整装药结构后,每年可节省炸药近200 t,节约成本近10万美元,经济效益非常明显。

### 参考文献 (References)

- [1] MELNIKOV N V. Charge construction influence on explosion operations efficiency[R]. Reports of the VI science symposium on drilling, explosives, explosion operations and study of physical and mechanical properties of rocks, (Rolla, USA), Gosgortekkhizdat, 1962.
- [1] MELNIKOV N V. Charge construction influence on explosion operations efficiency[R]. Reports of the VI science symposium on drilling, explosives, explosion operations and study of physical and mechanical properties of rocks, (Rolla, USA), Gosgortekkhizdat, 1962.
- [2] 朱红兵. 空气间隔装药爆破机理及应用研究[D]. 武汉:武汉大学, 2006.
- [2] ZHU Hong-bing. Study on the mechanism and application of air-decking blasting [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (in Chinese)
- [3] 陈 辉, 史秀志, 管伟明. 层状岩体爆破装药结构试验研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019, 36(3): 361-368.
- [3] CHEN Hui, SHI Xiu-zhi, GUAN Wei-ming. Experimental study on blasting charge structure of layered rock mass [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2019, 36(3): 361-368. (in Chinese)
- [4] 李 斌, 马元军, 胡劲松, 等. 某铁矿大孔径中深孔爆破装药结构对比试验[J]. 现代矿业, 2019, 35(12): 117-119, 122.
- [4] LI Bin, MA Yuan-jun, HU Jin-song, et al. Comparative test on charge structure of large hole and medium deep hole blasting in an iron mine [J]. Modern Mining, 2019, 35(12): 117-119, 122. (in Chinese)
- [5] 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): 55-59.
- [5] LIU Ying-xin. Application of air interval charging in underground borehole blasting of tonglushan delafossite mine [J]. *Blasting*, 1998, 15(2): 55-59. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] CHEN Qing-kai, XIA Ya-wei, LIU Zhan-fu, et al. The effect of constraint conditions on the gap distance of emulsion explosive [J]. *Mining Research and Development*, 2017, 37(1): 45-49. (in Chinese)
- [7] 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.
- [7] YE Hai-wang, NONG Dong-lin, ZHAO Ming-sheng, et al. Numerical simulation and experiments study on emulsion explosive charging in water-filled-hole [J]. *Blasting*, 2011, 28(4): 11-14. (in Chinese)
- [8] 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.
- [8] WU Guo-qun. Application of micro trap testing system in iron mine [J]. *Opencast Mine Technology*, 2017, 32(6): 59-62. (in Chinese)
- [9] 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.
- [9] ZHU Kuan, CAO Jin-jun, HAO Ya-fei, et al. Research on influence factor of in-hole detonation velocity of mixed loading emulsion explosive [J]. *Blasting*, 2016, 33(4): 118-122. (in Chinese)

英文编辑: 黄 刚

(上接第 24 页)

- [13] KIM DS, MC CATER MK. Quantitative assessment of extrinsic damage in rock materials [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 1998, 31: 43-62.
- [14] FONDRIEST M, DOAN M-L, ABEN F, et al. Static versus dynamic fracturing in shallow carbonate fault zones [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 461: 8-19.
- [15] CHEHREGHANI S, NOAPARAST M, Rezai B, et al. Bonded-particle model calibration using response surface methodology [J]. *China Particuology*, 2017, 32(3): 141-152.
- [16] YANG X X, KULATILAKE P H S W. Effect of joint micro mechanical parameters on a jointed rock block behavior adjacent to an underground excavation: a particle flow approach [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2019(3): 1-23.
- [17] LI W, ZHOU X, CAREY J W, et al. Multiphysics lattice discrete particle modeling (M-LDPM) for the simulation of shale fracture permeability [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(12): 3963-3981.
- [18] XU X, Wu S, GAO Y, et al. Effects of micro-structure and micro-parameters on Brazilian tensile strength using flat-joint model [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3575-3595.
- [19] JIE L, WANG J. Stress evolution of rock-like specimens containing a single fracture under uniaxial loading: a numerical study based on particle flow code [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2017, 36(3): 1-14.
- [20] 刘 宁, 张春生, 褚卫江, 等. 深埋大理岩脆性破裂细观特征分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S2): 3557-3565.
- [20] LIU Ning, ZHANG Chun-sheng, CHU Wei-jiang, et al. Microscopic characteristics analysis of brittle failure of deep buried marble [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S2): 3557-3565. (in Chinese)
- [21] YANG B D, JIAO Y, LEI S T. A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles [J]. *Engineering Computations*, 2006, 23(6): 607-631.
- [22] 冯明明. 基于颗粒流裂隙岩体加卸荷宏细观力学特性研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [22] FENG Ming-ming. Macro-micro mechanical properties Study on cracked rock mass under loading based on DEM [D]. Huainan: Anhui University of Science and echnology, 2018. (in Chinese)
- [23] HUANG D, WANG J, LIU S. A comprehensive study on the smooth joint model in DEM simulation of jointed rock masses [J]. *Granular Matter*, 2015, 17(6): 775-791.
- [24] LEI X, ZENG Y. Parametric study of smooth joint parameters on the mechanical behavior of transversely isotropic rocks and research on calibration method [J]. *Computers & Geotechnics*, 2018, 98: 1-7.
- [25] BELL J F. An experimental diffraction grating study of quasi-static hypothesis of the SHPB experiment [J]. *Journal of the Mechanics Physics of Solids*, 1966, 14(6): 309-327.
- [26] MENG H, LI Q M. Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(5): 537-555.
- [27] LI Xi-bing, ZOU Yang, ZHOU Zi-long. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2013, 47: 1693-1709.

英文编辑: 柯 波