

doi: 10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.005

## 钙质砂地基含水率对爆破振动特性影响分析\*

钟冬望<sup>1,2</sup> 杜泉<sup>1,2</sup> 孟庆山<sup>3</sup> 雷学文<sup>1</sup> 何理<sup>1,2</sup> 司剑峰<sup>1,2</sup> 伍岳<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学, 武汉 430065; 2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;  
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 含水率对钙质砂地基爆破振动特性的影响研究, 是岛礁建设工程急需解决的问题。基于小波包变换技术分析了试验中3种含水状态钙质砂地基的能量衰减规律。研究表明: 同一药量情况, 同一测点情况下, 钙质砂地基中含水率高的质点振动速度较含水率低的大。质点爆破振动的能量衰减速率均随着爆心距的增加而逐渐趋缓, 饱和钙质砂地基大于湿钙质砂地基大于干钙质砂地基。同时比较了3种含水状态的钙质砂地基质点的径向、切向、垂向的振动速度峰值, 得出了3种含水状态的钙质砂地基的萨道夫斯基计算公式, 拟合优度较好, 对岛礁工程建设和试验研究具有参考价值。

**关键词:** 钙质砂; 振动速度; 萨道夫斯基公式; 含水状态; 小波包能量分析

**中图分类号:** TU435; TU413.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0031-05

## Analysis of Influence of Moisture Content of Calcareous Sand Foundation on Blasting Vibration Characteristics

ZHONG Dong-wang<sup>1,2</sup>, DU Quan<sup>1,2</sup>, MENG Qing-shan<sup>3</sup>, LEI Xue-wen<sup>1</sup>, HE Li<sup>1,2</sup>, SI Jian-feng<sup>1,2</sup>, WU Yue<sup>1,2</sup>

(1. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Province Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center,

Wuhan 430065, China; 3. State Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Engineering,

Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The influence of moisture content on the vibration characteristics in calcareous sand foundation is an urgent problem to be solved in the construction projects of islands and reefs. Based on the wavelet packet transform technology, the energy decay laws of three kinds of water-bearing calcareous sandy ground in the experiment were analyzed in this article. Studies have shown that the vibration particle velocity with high water content in calcareous sand foundation is greater than that with low water content with the same charge amount and the same measuring point. The of particle vibration gradually slowed down with the increase of the distance to blast center. This energy attenuation rate is the largest for the saturated calcareous sand foundation, second largest for the wet calcareous sand foundation, and then the least for the calcareous dry sand foundation. At the same time, the radial, tangential, and vertical peak particle vibration velocities of the three types of water-bearing calcareous sandy foundation were compared, and the K values,  $\alpha$  values of the Sadovsky formula were obtained with a good fitting goodness. This study has reference value for island reef engineering construction and related experimental research.

**Key words:** calcareous sand; vibration velocity; Sadovsky formula; watery state; wavelet packet energy analysis

近年来 随着国家海上丝绸之路战略的推出 海洋资源的开发和国防安全的需要 使得我国海域建设不断加速。在我国南海诸岛广泛分布着钙质砂。钙质砂是由海洋生物成因的、富含碳酸钙或碳酸镁等特殊岩土介质组成 经物理、生物、化学及化学作用过程形成的碳酸盐沉积物。钙质砂颗粒具有多孔隙、形状不规则、易破碎、颗粒间易胶结等特点<sup>[1]</sup>。我国对于南海岛礁的相关研究 主要开始时期可追溯到上世纪 70 年。到目前为止 研究成果颇丰。这些成果中对于钙质砂在静荷载下钙质砂的力学物理特性的研究较为多见 张家铭等人对钙质砂进行了一维和等向压缩试验阐述了钙质砂的压缩特性及其压缩机理同时探讨了破碎与塑性功、膨胀、应力应变、强度之间的关系<sup>[2]</sup>。钱炜对某岛礁一定深度范围内的钙质砂 开展了剪切性能及压缩特性试验研究 发现珊瑚砂砾混合碎屑物的压缩变形与珊瑚砾块和珊瑚砂的质量组成有关 同时也受到含水量的影响<sup>[3]</sup>。魏久淇等利用改进的直径 37 mm 分离式霍普金森铝制压杆 对级配相同的钙质砂与福建标准砂开展 35 组被动围压冲击试验 研究了应变率和密度对两种砂动态力学特性的影响<sup>[4]</sup>。赵章泳使用经过系统标定的霍普金森压杆试验装置对不同含水率钙质砂进行了在准一维应变条件下的动态压缩试验 发现当钙质砂应变小于 0.025 时潮湿试样的切向模量高于干燥试样 而在应变大于 0.025 时则相反。潮湿钙质砂的切线模量随含水率的增加先减后增<sup>[5]</sup>。同时提出了非饱和钙质砂锁变现象的模型。徐学勇等人在自己制作的 1 m<sup>3</sup> 立方体试验箱中 研究了饱和钙质砂在小药量爆炸荷载作用下的动力响应特性 比较了相同试验条件下石英砂钙质砂的爆炸响应<sup>[6-7]</sup>。但在露天大尺度模型条件下 钙质砂地基在爆破荷载作用下质点振动响应的研究尚不多见。

开展了干钙质砂地基、湿钙质砂地基和饱和钙质砂地基中球形药包爆炸试验 测试各含水状态钙质砂地基的不同爆心距的质点振动速度。分析不同含水状态钙质砂地基中的爆破振动速度峰值和能量

衰减规律 并对试验中各含水状态钙质砂地基的质点振动速度峰值基于萨氏公式进行拟合 得到了相应的  $K$ 、 $\alpha$  值。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料与设备

本试验所用的地基材料为南海某岛礁上的钙质砂细颗粒 如图 1 所示。如图 2 所示为本次试验的试验现场环境。本次采用的振动测试仪器为中科测控生产的 TC-4850 采样频率设置为 8 kHz。爆破试验所用的炸药类型为岩石乳化炸药。

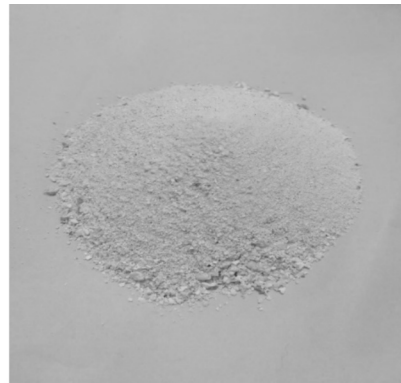


图 1 钙质砂细颗粒

Fig. 1 Fine particle calcareous sand



图 2 试验现场

Fig. 2 Test site

### 1.2 试验方案

本试验将晒干的钙质砂细砂颗粒填满试验长 4 m、宽 3 m、深度为 0.6 m 的基坑中并用夯机压实。对钙质砂地基干、湿、饱和 3 种含水状态进行药量为 0.05 kg、0.1 kg、0.15 kg 的爆破振动试验 其中干钙质砂地基含水率为 0% 湿钙质砂地基含水率为 50% 饱和钙质砂地基含水率为 100% 试验参数如表 1 所示。试验装药埋深为 25 cm 测振仪器在地基中的布置测点如图 3 所示 测点距离爆源的位置 即爆心距分别为 1.3 m、1.5 m、1.7 m、1.9 m、2.1 m。

收稿日期: 2020-07-16

作者简介: 钟冬望(1963-) 男 博士、教授 从事矿山工程力学、爆炸理论及其应用等方面的教学与科研工作 (E-mail) 1057831589@qq.com。

通讯作者: 孟庆山(1974-) 男 研究院、博士生导师 从事珊瑚岛礁工程地质和力学特性方面的研究工作 (E-mail) qsmeng@whrsm.ac.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574184、51404175); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20181109); 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室开放基金项目(Y201717)

表 1 钙质砂地基振动试验参数

Table 1 Vibration test parameters of calcareous sand foundation

地基类别	含水率/%	装药埋置深度/cm	药量/kg	爆心距/m				
干钙质砂	0	25	0.05、0.10、0.15	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
湿钙质砂	50	25	0.05、0.10、0.15	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
饱和钙质砂	100	25	0.05、0.10、0.15	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1

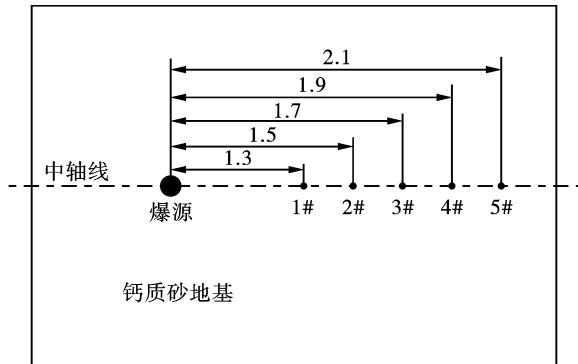


图 3 振动测点布置示意图(单位:m)

Fig. 3 Vibration measurement point layout( unit: m)

## 2 试验结果与分析

### 2.1 振速峰值(ppv)比较及其衰减规律 对钙质砂地基3种不同含水率分别进行了

0.05 kg、0.1 kg、0.15 kg 药量的爆破试验,分析3种不同含水率钙质砂地基径向、切向、垂向的爆破质点振动速度峰值(ppv),测试数据如表2所示,数据绘制成图4所示。

结合表2及图4,可得各种地基质点振动速度与爆源药量和爆心距的规律。对于同一药量,3种不同含水率的钙质砂地基的ppv均为径向最大,垂直向次之,切向最小。相同爆心距,含水率越高的钙质砂地基ppv越大。药量越大,振动速度越大。药量一定时,随着爆心距增加,振动速度减小。ppv衰减速率随爆心距的增加而减小。对比不同含水率地基的ppv可以看出,同等药量,同一爆心距的条件下,饱和钙质砂地基ppv较湿钙质砂大,湿钙质砂地基ppv较干钙质砂地基ppv大。在1.3 m到2.1 m范围内,干钙质砂地基质点ppv的衰减速率较湿钙质砂地基ppv和饱和钙质砂地基ppv大。

表 2 药量不同爆心距质点3向振速峰值

Table 2 The peak of the 3-speed vibration velocity

地基类型	爆心距/m	振动速度峰值/(cm·s <sup>-1</sup> )								
		0.05 kg			0.10 kg			0.15 kg		
		径向	切向	垂向	径向	切向	垂向	径向	切向	垂向
干钙质砂	1.3	10.00	2.81	9.80	17.73	4.63	12.21	26.10	6.83	16.33
	1.5	8.09	1.87	6.87	14.91	3.12	8.15	21.43	5.13	12.96
	1.7	6.07	1.37	3.98	12.89	2.59	5.25	18.22	3.66	10.71
	1.9	5.17	1.11	3.03	11.42	1.55	3.23	13.81	2.73	8.96
	2.1	4.06	1.06	2.11	10.76	1.38	3.01	11.82	2.36	7.57
湿钙质砂	1.3	14.53	6.20	11.36	22.87	6.70	14.56	29.05	8.95	18.08
	1.5	12.12	5.56	9.78	19.43	5.59	12.33	23.02	7.78	16.03
	1.7	10.15	4.72	8.85	17.34	5.27	11.25	20.56	6.52	13.87
	1.9	8.94	3.96	7.56	15.02	4.66	10.23	18.86	5.56	11.39
	2.1	8.17	3.26	5.95	13.50	3.93	9.35	16.50	4.33	10.52
饱和钙质砂	1.3	17.63	8.06	13.15	25.06	9.27	18.65	33.11	10.21	20.60
	1.5	15.62	7.33	11.69	21.76	8.05	17.36	27.13	9.45	18.55
	1.7	14.15	6.36	10.75	17.35	7.13	15.03	24.07	7.97	16.86
	1.9	12.43	5.52	9.96	16.78	6.08	13.86	21.76	7.90	15.02
	2.1	11.13	5.01	8.93	15.52	5.79	11.79	20.15	7.57	13.99

### 2.2 萨道夫斯基公式拟合

萨道夫斯基公式在平整地形条件下预测地面的爆破振动质点速度具有较高的精度。我国长期以来

在爆破地震安全距离与质点振动速度计算方面也是采用萨道夫斯基公式。目前,《爆破安全规程》对陆源岩土萨氏公式的 $K, \alpha$ 值有相应的范围。对岛

礁的钙质砂类的岩土却是空白。由上述比较得知，径向 ppv 为最大，危害较大。利用 python 进行编程

对径向振动速度拟合得到不同地基的萨道夫斯基公式的  $K$ 、 $\alpha$  的值及相关拟合优度，如表 3 所示。

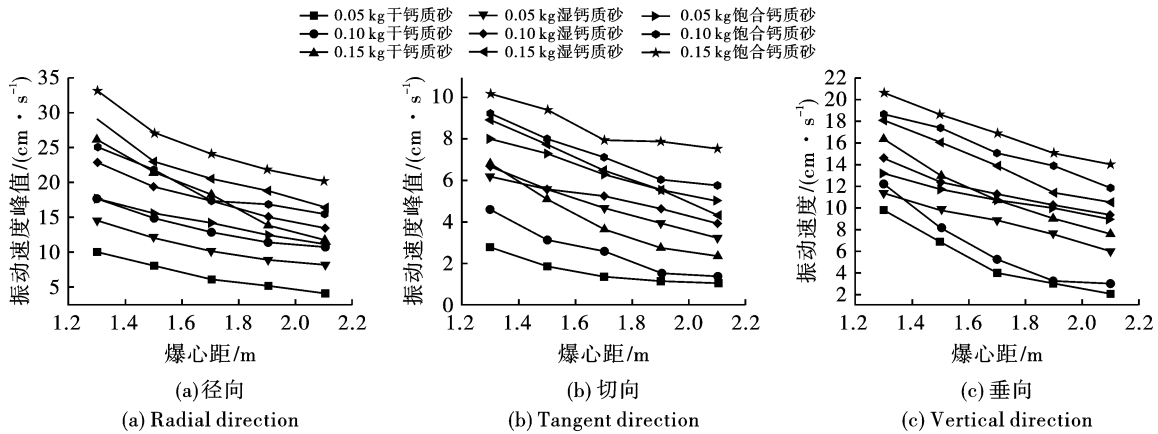


图 4 质点 3 向振速峰值比较

Fig. 4 Comparison of particle point 3 to vibration velocity peak

表 3 钙质砂地基萨氏公式及  $K$  值、 $\alpha$  值

Table 3 Sadowski formula and  $K$  value and  $\alpha$  value of various calcareous sand foundations

地基类型	$K$ 值	$\alpha$ 值	拟合优度 $R^2$	残差平方和	萨氏公式
干钙质砂	221.52	3.05	0.953	0.178	$v = 221.52 \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{3.05}$
湿钙质砂	129.59	2.14	0.939	0.113	$v = 129.59 \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{2.14}$
饱和钙质砂	101.28	1.74	0.921	0.112	$v = 101.28 \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{1.74}$

表 3 中列出了通过试验数据拟合的萨氏公式，从拟合结果优度值来看，试验数据的拟合效果较好，拟合结果可以为今后的工程实践和科研工作作为参考。从表中可以看出钙质砂地基的含水状态对萨氏公式中的  $K$  值、 $\alpha$  值较大的影响。钙质砂地基中含水越高，其对应的萨氏公式  $K$  值和  $\alpha$  值越小。

2.3 爆破振动能量的小波包分析

对于爆破振动的研究，越来越多的学者发现爆破振动危害不仅与质点的振动速度峰值有关还与振动的主振动频率和爆破地震波中的能量有着密切的关系，有学者提出了用能量分析的方法来研究爆破振动。目前，用小波包分析的方法对质点能量进行分析已被广泛使用<sup>[8-11]</sup>。本模型试验使用的采样频率为 8 kHz，根据采样定理，Nyquist 频率为 4 kHz。根据小波包算法，采用二进尺度变换，对信号 10 层分解后第  $j$  个频带重构信号对应的频率范围为

$$[j \sim (j + 1)] \times f_a / 2^{10} \quad (1)$$

式中： $j=0, 1, 2, 3, \dots, 2^{10}-1$ ； $f_a$  为分析频率  $f_a = 4$  kHz。

设小波包分解爆破振动信号为  $x(t)$ 。将信号  $x(t)$  投影到小波包基上，通过各个小波包系数反映

爆破振动信号的不同特征，其表达式如下

$$x(t) = x_{i,0}(t_0) + x_{i,1}(t_1) + x_{i,2}(t_2) + \dots + x_{i,j}(t_j) = \sum_{j=0}^{2^i-1} x_{i,j}(t_j) \quad (2)$$

式中  $x_{i,j}(t_j)$  为微振动信号小波包分解到节点  $i, j$ ，即（第  $i$  层第  $j$  频带）上的重构信号。

利用小波包变换将爆破振动信号的能量信息映射到不同频段上，结合巴什瓦定理及式(2)可知，第  $i$  层信号分量的能量为

$$E_{i,j} = \int |x_{i,j}(t)|^2 dt = \sum_{m=1}^n |v_{j,m}| \quad (3)$$

式中： $v_{j,m}$  表示重构信号； $x_{i,j}$  离散点对应的赋值； $m$  为离散点的个数  $n$  为采样数据的长度，其中  $m = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, n$ 。

所以，爆破振动的总能量为

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^i-1} |eE_{i,j}|^2 \quad (4)$$

依据式(1)~(4)，通过 python 进行相应的编程，统计归纳得出不同含水状态的钙质砂地基的各测点爆破振动信号能量值如表 4 所示，采用样条曲线绘制如图 5 所示。

表 4 钙质砂地基测点总能量

Table 4 Measurement total energy of calcareous sand foundation

地基类型	药量/kg	不同爆心距测点总能量 $E_0$ /kJ				
		1.3 m	1.5 m	1.7 m	1.9 m	2.1 m
干钙质砂	0.05	12.60	6.87	4.16	3.21	2.66
	0.10	19.23	10.52	6.82	5.03	4.25
	0.15	28.77	15.93	10.56	8.65	6.73
湿钙质砂	0.05	28.15	17.58	11.20	8.06	6.27
	0.10	36.55	26.58	17.06	11.62	7.83
	0.15	46.97	32.96	22.69	16.75	13.16
饱和钙质砂	0.05	42.62	30.12	20.90	15.71	12.35
	0.10	51.33	37.26	27.88	20.16	16.03
	0.15	61.21	45.82	33.75	25.66	19.58

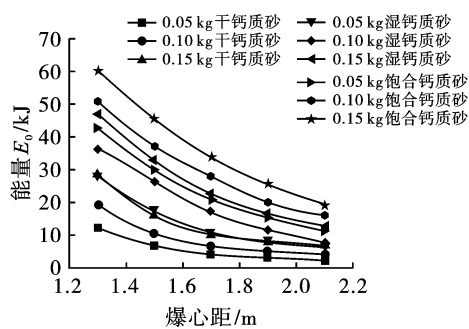


图 5 各含水率钙质砂地基质点能量衰减趋势

Fig. 5 Energy attenuation trend of matrix points in calcareous sands with different water content

结合表 4 和图 5 可以看出,在爆心距 1.3 m 的测点 3 种含水状态的地基能量,饱和钙质砂地基质点能量最大,湿钙质砂的次之,干钙质砂的最小,爆心距在 1.3 m 后 3 种地基的爆破振动能量的衰减速率逐步减缓,爆破振动能量速率在饱和钙质砂地基中最快,在湿钙质砂中次之,在干钙质砂中最慢。

### 3 结论与展望

目前,随着国家综合国力的日益增强,科研与基建能力的大幅提升,对于海洋的开发和科研探索将会迅速增长,这有利于国家的国防安全建设以及科研综合能力的增长。本文通过对钙质砂地基的爆炸振动响应特性试验探索,得出如下结论:

(1) 本文比较了 0.05 kg 药量下的钙质砂地基的测点的径向、切向、垂向 3 个方向质点振动速度峰值(ppv),每种含水状态的钙质砂地基 ppv,径向最大,垂向次之,切向最小。

(2) 得出了同种条件下 3 种含水状态的钙质砂地基的振动衰减公式。实验表明:质点振动速度衰减速率随爆心距的增加而减小。在爆破荷载作用下,饱和钙质砂质地基的质点振动速度较湿钙质砂

地基的大,湿钙质砂地基的质点振动速度较干钙质砂地基的大。

(3) 本文基于小波包技术对钙质砂地基测点的能量进行了分析,同药量情况下,饱和钙质砂地基的质点爆破振动的能量比湿钙质砂地基的大,湿钙质砂地基的质点爆破振动能量比干钙质砂地基的大,质点爆破振动的能量衰减速率随着爆心距的增加而逐渐趋缓,其衰减速率:饱和钙质砂地基大于湿钙质砂地基大于干钙质砂地基。

### 参考文献(References)

[1] 陈海洋,汪 稔,李建国,等.钙质砂颗粒的形状分析[J].岩土力学,2005,26(9):44-47.  
 [1] CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Shape analysis of calcareous sand particles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 44-47. (in Chinese)  
 [2] 张家铭,张 凌,蒋国盛,等.剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J].岩土力学,2008,29(10):2789-2793.  
 [2] ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, JIANG Guo-sheng, et al. Experimental study on crushing of calcareous sand particles under shearing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2789-2793. (in Chinese)  
 [3] 钱 伟.某岛礁珊瑚砂力学性质的室内试验研究[J].土工基础,2016,30(4):527-532.  
 [3] QIAN Wei. Laboratory experimental study on mechanical properties of coral sand in an island reef [J]. Geotechnical Foundation, 2016, 30(4): 527-532. (in Chinese)  
 [4] 魏久淇,王明洋,邱艳宇,等.钙质砂动态力学特性试验研究[J].振动与冲击,2018,37(24):24-29.  
 [4] WEI Jiu-qi, WANG Ming-yang, QIU Yan-yu, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of calcareous sand [J]. Vibration and Shock, 2018, 37(24): 24-29. (in Chinese)

(下转第 74 页)

- mine steps [J]. *Blasting* 2018 35(1): 59-65. (in Chinese)
- [3] 曹进军, 朱 宽. 中深孔与浅孔联合布孔在煤层底板爆破中的数值模拟研究[J]. *爆破* 2016 33(4): 65-72.
- [3] CAO Jin-jun, ZHU Kuan. Numerical simulation of the combination of middle and deep holes and shallow holes in blasting of coal seam floor [J]. *Blasting* 2016 33(4): 65-72. (in Chinese)
- [4] 李继业, 郭春阳. 一次爆破成型技术在道路开挖中的应用[J]. *采矿技术* 2018 18(3): 91-93.
- [4] LI Ji-ye, GUO Chun-yang. Application of a blasting forming technology in road excavation [J]. *Mining Technology*, 2018 18(3): 91-93. (in Chinese)
- [5] 高 魁, 刘泽功. 爆破应力波在构造带煤岩的传播规律及破坏特征[J]. *煤炭学报* 2018 43(S1): 79-86.
- [5] GAO Kui, LIU Ze-gong. Propagation law and failure characteristics of blasting stress wave in coal with structural belt [J]. *Journal of China Coal Society* 2018 43(S1): 79-86. (in Chinese)
- [6] 徐向宇, 姚邦华. 煤层预裂爆破应力波传播规律及增透机理模拟研究[J]. *爆破* 2016 33(2): 32-38.
- [6] XU Xiang-yu, YAO Bang-hua. Simulation of stress wave propagation and anti-reflection mechanism in pre-splitting blasting of coal seams [J]. *Blasting* 2016 33(2): 32-38. (in Chinese)
- [7] 郑吉玉, 王公忠. 低透气性煤层松动爆破增透效应研究[J]. *爆破* 2018 35(2): 37-40 49.
- [7] ZHENG Ji-yu, WANG Gong-zhong. Study on anti-reflection effect of loose blasting in low permeability coal seam [J]. *Blasting* 2018 35(2): 37-40 49. (in Chinese)
- [8] 凡春礼, 栾龙发. 提高小龙潭露天煤矿块煤率的爆破试验研究[J]. *爆破* 2011 28(2): 53-55 82.
- [8] FAN Chun-li, LUAN Long-fa. Blasting test study on improving coal lump rate in Xiaolongtan open-pit coal mine [J]. *Blasting* 2011 28(2): 53-55 82. (in Chinese)
- [9] 冷振东, 刘 亮. 起爆位置对台阶爆破爆堆形态影响的离散元分析[J]. *爆破* 2018 35(2): 50-55 100.
- [9] LENG Zhen-dong, LIU Liang. Discrete element analysis of influence of initiation position on step blasting burst form [J]. *Blasting* 2018 35(2): 50-55 100. (in Chinese)
- [10] 王传利. 空气间隙小耦合装药爆破作用的理论和实验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2012.
- [10] WANG Chuan-li. Theoretical and experimental study on small-coupling charge blasting in air gap [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology 2012. (in Chinese)

英文编辑: 赵 亮

## (上接第 35 页)

- [5] 赵章泳, 邱艳宇, 紫 民, 等. 含水率对非饱和钙质砂动力特性影响的试验研究[J]. *爆炸与冲击* 2020, 40(2): 023102.
- [5] ZHAO Zhang-yong, QIU Yan-yu, ZI Min, et al. Experimental study on the effect of water content on the dynamic characteristics of unsaturated calcareous sand [J]. *Explosion and Shock Waves* 2020 40(2): 023102. (in Chinese)
- [6] 徐学勇, 汪 稔, 王新志, 等. 饱和钙质砂爆炸响应动力特性试验研究[J]. *岩土力学* 2012 33(10): 2953-2959.
- [6] XU Xue-yong, WANG Ren, WANG Xin-zhi, et al. Experimental study on dynamic response characteristics of saturated calcareous sand explosion [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2012 33(10): 2953-2959. (in Chinese)
- [7] 徐学勇, 汪 稔, 胡明鉴, 等. 饱和钙质砂爆炸密实动力特性试验研究[J]. *岩土力学* 2012 33(2): 402-414.
- [7] XU Xue-yong, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Experimental study on compact dynamic characteristics of saturated calcareous sands [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012 33(2): 402-414. (in Chinese)
- [8] 宋光明. 爆破振动小波包分析理论与应用研究[D]. 长沙: 中南大学 2001.
- [8] SONG Guang-ming. Theory and application of blasting vibration wavelet packet analysis [D]. Changsha: Central South University 2001. (in Chinese)
- [9] 谢全民, 龙 源, 钟明寿, 等. 基于小波、小波包两种方法的爆破振动信号对比分析[J]. *工程爆破* 2009, 15(1): 5-9.
- [9] XIE Quan-min, LONG Yuan, ZHONG Ming-shou, et al. Comparative analysis of blasting vibration signals based on wavelet and wavelet packet methods [J]. *Engineering Blasting* 2009 15(1): 5-9. (in Chinese)
- [10] 中国生, 敖丽萍, 赵 奎. 基于小波包能量谱爆炸参量对爆破振动信号能量分布的影响[J]. *爆炸与冲击* 2009 29(3): 300-305.
- [10] ZHONG Guo-sheng, AO Li-ping, ZHAO Kui. Influence of explosion parameters based on wavelet packet energy spectrum on energy distribution of blasting vibration signals [J]. *Explosion and Shock Wave* 2009 29(3): 300-305. (in Chinese)
- [11] 何 理, 钟冬望, 刘建程, 等. 微差爆破试验及爆破振动能量的小波包分析[J]. *金属矿山* 2014 43(6): 10-15.
- [11] HE Li, ZHONG Dong-wang, LIU Jian-cheng, et al. Millisecond blasting test and wavelet packet analysis of blasting vibration energy [J]. *Metal Mine* 2014 43(6): 10-15. (in Chinese)

英文编辑: 黄 刚