

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.020

利用爆炸水雾抑制露天爆破粉尘的试验研究

杨年华¹, 郭尧², 白和强³, 张昭³

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;
3. 北方爆破科技有限公司, 北京 100089)

摘要: 露天深孔爆破粉尘量大、污染范围广, 研究高效合理的爆破降尘技术是绿色矿山建设的当务之急。论文通过现场试验, 揭示露天深孔台阶爆破的粉尘来源主要有: 炮孔填塞物冲孔、岩石破裂及粉碎和临空面抛散三个部位, 粉尘产量与地下水、岩性、爆破方式密切相关。为此, 有针对性地设计了水袋封堵炮孔、爆区顶面和抛掷前方水袋爆炸成雾的立体水雾降尘模型。通过水袋爆炸成雾的专项试验, 得出合理的水袋爆炸成雾设计参数, 水袋爆炸的最佳炸药单耗为 $0.4 \sim 0.5 \text{ kg/m}^3$ 。现场试验应用表明, 合理的水袋间距为 $5 \sim 10 \text{ m}$ 、水袋比炮孔爆炸延时 $1.0 \sim 1.5 \text{ s}$, 孔口水袋封堵长度 4 m 以内。综合试验效果使爆破粉尘浓度降低了 50% 以上, 爆炸水雾降尘方法简易、效果明显。

关键词: 爆破粉尘; 爆炸水雾; 降尘; 台阶爆破

中图分类号: X932 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0130-06

Experimental Study on Dust Suppression by Explosion Water Mist in Open Bench Blasting

YANG Nian-hua¹, GUO Yao², BAI He-qiang³, ZHANG Zhao³

(1. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. North Blasting Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: Due to the large amount of dust and wide range of pollution caused by open-pit deep-hole blasting, it is urgent to study an efficient and reasonable blasting dust suppression technology for green mine construction. Through field test, the paper reveals that the dust sources of deep-hole bench blasting in open-pit mainly include three parts: ejection of blasting-hole stemming, breaking and crushing of rock, and scattering of surface. Besides, the dust production is closely related to groundwater, lithology and blasting mode. Therefore, a three-dimensional water mist suppression model was designed by using water bags to stemming the holes and be exploded into water mist in front of the bench surface of the blasting and throw area. Through the special tests of the water bags explosion, a reasonable design parameters of water bag explosion were obtained, the optimal explosive consumption for water bag explosion is $0.4 \sim 0.5 \text{ kg/m}^3$. The field tests and applications show that the reasonable water bags spacing is $5 \sim 10 \text{ m}$, the delay time of water bag blasting is $1.0 \sim 1.5 \text{ s}$ than that of hole explosion, and the stemming length of water bags is less than 4 m . The comprehensive test results reduce the concentration of blasting dust by more than 50% , and the method of dust suppression by explosion water mist is simple and effective.

Key words: blasting dust; explosion water mist; dust suppression; bench blasting

收稿日期: 2021-06-16

作者简介: 杨年华(1964-), 男, 研究员、博士, 主要从事爆破工程技术研究, (E-mail) ynianh@sina.com。

近年来, 大气粉尘污染防治问题受到广泛重视, 爆破粉尘给露天矿山开采造成很大困扰。由于露天

岩石爆破开挖规模大,粉尘产量大、粉尘浓度高、分散度高、易扩散、污染范围广^[1],使得针对露天深孔台阶爆破的降尘技术难以突破,目前尚处于探索阶段。最常见的方法有孔口水袋封堵、爆破前后高压水喷洒等一些简易降尘措施^[2-4],但似乎杯水车薪,降尘效果不很理想。我们经过多项工程实践,系统地对露天深孔台阶爆破的粉尘来源及扩散规律、水袋爆炸形成的水雾、水袋封堵炮孔爆破降尘效果、以及水袋布置和相关爆炸参数等几方面进行深入研究,开创出立体全方位爆炸水雾降尘模型和高效合理的设计方法。

1 露天台阶爆破粉尘产生和扩散规律

1.1 爆破粉尘产生及其影响因素

露天台阶爆破粉尘来源包括:爆区地表附着的

粉尘、炮孔口部填塞岩粉、岩石被爆炸冲击破坏过程中产生的粉尘、爆堆抛掷过程形成的粉尘。这些粉尘由爆炸冲击波扬起并随爆生气体扩散^[3,4]。爆破粉尘来源决定了粉尘的排放量,综合观察露天台阶爆破粉尘的扩散主要有以下特点:(1)爆生气体将炮孔填塞岩粉冲起,扬起很高粉尘柱;(2)岩石被爆炸冲击破裂粉碎产生的粉尘随爆堆运动,扩散较慢;(3)台阶临空面方向随爆生气体向前扩散形成粉尘云。见图1。

根据现场观察分析,三种爆破粉尘源根据地质、水文情况和爆破方式不同,产生的粉尘量比例也不同,所以影响爆破粉尘排量的因素主要有地下水情况、地质条件和爆破参数,下面对这三因素进行定性分析。

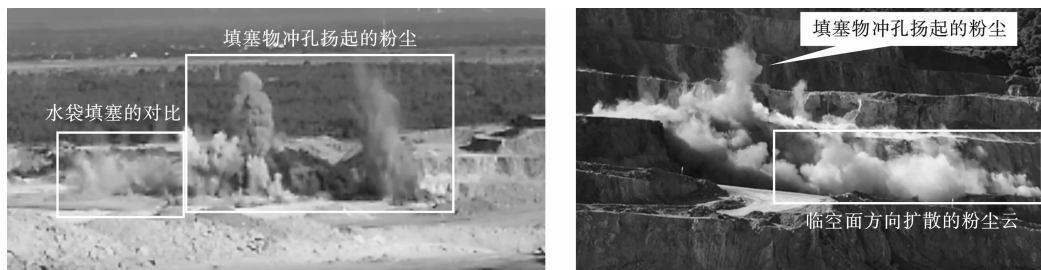


图1 露天台阶爆破粉尘来源和扩散情况

Fig. 1 The source and diffusion of blasting dust in open bench blasting

爆区地下水情况对爆破粉尘影响十分显著,地下水情况分三类:Ⅰ类,干炮区,炮孔内基本无水;Ⅱ类,局部炮孔有基岩裂隙水;Ⅲ类,地下水丰富,大多数炮孔内有水,且水位较满。Ⅰ类地下水情况极易

产生大量爆破粉尘;Ⅱ类地下水情况产生爆破粉尘量稍轻,主要与岩性有关;Ⅲ类地下水情况下,岩体饱水,爆破产生粉尘量很轻微。见图2。



(a) Ⅰ类地下水情况, 中~强风化花岗岩
(a) Type I of groundwater condition, moderate to strongly weathered granite

(b) Ⅲ类地下水情况, 弱风化花岗岩
(b) Type III of groundwater condition, weakly weathered granite

图2 爆区地下水情况对爆破粉尘影响

Fig. 2 Influence of groundwater condition in blasting area on blasting dust

地质条件对爆破粉尘影响较大,其中岩石性质、风化程度、地质构造为主要影响因素,岩性越软弱、风化越严重、节理裂隙越发育,则爆破粉尘量越大。

爆破参数对爆破粉尘量有一定影响,其中装药

结构、炸药单耗量、爆破方式等为主要影响因素。不耦合装药或水耦合装药时爆破粉尘量稍轻^[5,6];压渣爆破比多临空面爆破粉尘量少;炸药单耗量越大,爆破粉尘量越大。

1.2 露天台阶爆破粉尘扩散分布规律试验

为研究露天台阶爆破粉尘空间扩散分布规律,选择某次常规爆破条件下,在爆区不同方向的不同距离点放置粉尘收集盒实测粉尘扩散情况。具体在临空面前分别50m、100m、150m距离放置5列,同时在爆区后方30m处放置1排集尘盒,图3为落尘采集盒的布置位置示意图。称量集尘前后的盒子重量,计算单位面积粉尘降落量,依此分析粉尘扩散分布规律。选择天气晴朗无风情况下进行试验,将试

验结果进行统计处理,结果见表1。

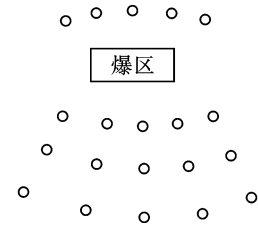


图3 落尘采集点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dust collection point

表1 不同距离的爆破粉尘扩散试验测试结果

至爆区边缘距离/m	50	100	150	30
爆区前方, 单位面积落尘量/ $(g \cdot m^{-2})$	6.54	2.54	0.86	2.26
爆区后方, 单位面积落尘量/ $(g \cdot m^{-2})$	7.00	1.17	1.17	2.03
平均值	7.35	1.09	0.87	3.54
	7.20	1.93	1.03	2.95

试验表明,爆区边缘前方50m处平均粉尘降落量为100m处的3.7倍,100m处平均粉尘降落量为150m处的1.9倍。说明爆破粉尘扩散浓度随前冲距离呈指数下降,50m范围以内的粉尘降落量极大。

2 水袋爆炸成雾过程的试验研究

2.1 爆炸形成水雾过程

根据水体受爆炸喷射的物理模型,将水袋爆炸抛撒成雾过程分为水雾升腾和水雾消散二个阶段,如图4所示。

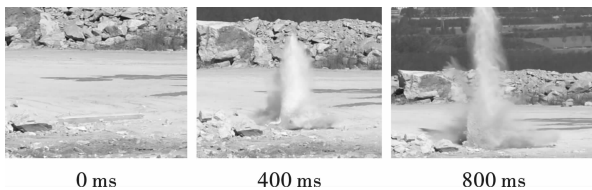


图4 爆炸水雾的不同时刻照片

Fig. 4 Photos of different moments of the explosion water mist

I)水雾升腾阶段。当炸药在水袋底部爆炸后,水袋瞬间破裂,水袋中的液体在爆炸冲击作用下形成射流喷射而出,在惯性作用下高速扩散的水体快速破碎形成水雾,水雾喷射高度与爆炸药量和水体量有关,水雾喷射至最大高度在1s以内。

II)水雾消散阶段。水雾形成后因自身惯性在空中漂浮、扩散,然后消落。水雾喷射越高扩散范围越宽,水雾的消散时程越长,水雾消散时程决定了水雾扑尘效果。试验测得水雾消散过程一般持续3~4s。

2.2 爆炸水雾的炸药单耗试验研究

爆炸药量与水的体积之比是炸药单耗量,爆炸水雾的炸药单耗对成雾效果有很大的影响^[7,8]。要保证水能被击散成水雾,且形成的水雾在空中持续一定时间,炸药单耗量必须适当。试验是在微风天气条件下进行的,试验布置了6条直径30cm水袋,每条水袋长10m,每3条水袋列成一排,3条水袋下分别埋设1根、2根、3根导爆索;第一排水袋内添加表面活性剂,第二排未添加。通过高速录像机观察不同药量爆炸后的成雾效果,同时测量水雾覆盖范围。图5为水袋爆破成雾过程。表2为爆炸成雾测试参数。

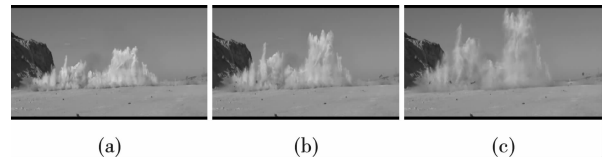


图5 水袋爆炸成雾过程照片

Fig. 5 Photos of water bags exploding into mist

表2 爆炸水雾扩散参数

水体特点	爆炸药量 (导爆索根数)	水雾喷射 高度/m	水雾散落 宽度/m
无表面活性剂	1	3.2	9.5
	2	12.8	10.7
	3	16.7	19.0
有表面活性剂	1	6.3	10.0
	2	13.3	10.8
	3	17.2	18.7

注:单根导爆索的药量(黑索金)为13g/m。

从表2中可以看出炸药量对成雾高度影响很大,单根导爆索爆炸时水雾高度很低,仅3~6 m;3根导爆索的爆炸水雾高度大约为1根导爆索的3倍,水雾宽度也达2倍。

若将炸药量和水量对成雾影响分开进行试验研究工作量太大,综合考虑水袋爆破试验中炸药量和装水量这两者对出雾率的影响,可将水体的炸药单耗量作为自变量,爆炸水雾参数为因变量,试验研究炸药单耗量 K 值与水雾的覆盖面积、持续时间以及喷射高度之间的关系。

根据不同炸药量和水量的小型水袋爆炸试验,利用EOS 70D相机高速连拍记录水袋爆破喷雾过程,并在现场设置长度标尺,对试验拍摄图像进行处理,用标准网格计算水雾覆盖面积、喷射高度。爆炸水雾试验共分5组进行,将试验数据和图像处理后将计算结果列于表3,可以看出不同水炸药单耗与水雾覆盖面积、喷射高度以及持续之间的对应关系。

表3 爆炸水雾试验结果

Table 3 Explosive water mist test results

炸药单耗 K / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水雾覆盖 面积 A/m^2	水雾喷射 高度 H/m	水雾持续 时间 t/s
0.37	44.76	1.93	3.98
0.39	49.82	1.92	4.17
0.40	54.21	1.95	4.56
0.50	66.44	2.11	4.86
0.65	88.24	2.17	4.08

水雾试验得到以下认识:

(1)由水雾覆盖面积与炸药单耗关系来看,炸药单耗在0.37~0.65 kg/m^3 范围内,水雾覆盖面积 A 与炸药单耗 K 之间成正比关系,即单位体积水的炸药量越大,水雾覆盖面积越大。

(2)水雾喷射高度 H 与炸药单耗 K 之间成正比关系,但水雾高度增长幅度不大。

(3)由水雾持续时间 t 与水体炸药单耗 K 并非正相关,当 K 小于0.50 kg/m^3 时,水雾持续时间与炸药单耗成正相关;当 K 大于0.50 kg/m^3 以后,水雾持续时间反而减小,因水体的炸药单耗过大,喷射出的水雾粒径过小,水雾消散更快。

因此,通过对比研究水雾覆盖面积 A 、喷射高度 H 、持续时间 t 随炸药单耗 K 的变化规律,认为当 K 取0.40~0.50 kg/m^3 时,水袋爆炸出雾效果更佳。

爆炸能大小对水袋爆炸形成的水雾参数影响很大,不同台阶高度和孔排距的爆破体需选择不同的水雾爆炸能。设置在台阶自由面前的水袋,要求爆炸形成的水雾高度尽可能大于粉尘扩散高度,确保

水雾对粉尘的有效拦截,因此台阶自由面前的水袋炸药单耗宜偏大;而爆破台阶上表面的水袋主要作用是将地表出现的粉尘笼罩在水雾范围内,水雾太高反而会降低水雾的浓度,因此台阶上表面水袋爆炸主要考虑水雾宽度,即水袋之间的间距和水雾宽度有关,保证爆区台阶顶面在爆炸水雾的覆盖下。见图6。

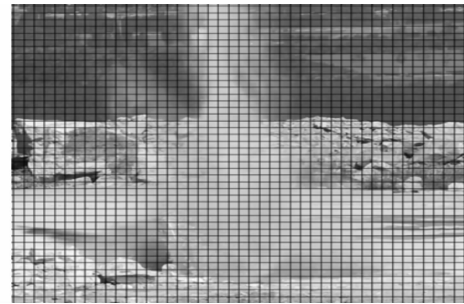


图6 爆炸水雾网格分析图

Fig. 6 Explosion water mist grid analysis diagram

3 爆炸水雾降尘技术在露天台阶爆破中的应用

露天矿山爆破降尘常规方法是采用爆破前后在爆区洒水的方法来降低爆破粉尘^[9],这种降尘方法效果非常有限。本文提出的新思路是爆破后能在台阶自由面前方和顶部同步出现立体喷射水雾,尽可能让水雾全方位包裹爆破烟尘,那就能取得显著降尘效果。根据台阶爆破粉尘产生和扩散特性,若在临空面前、台阶上表面和炮孔口三个主要出尘部位适时产生大量水雾,把握好立体水雾幕拦阻的方位,以及水雾形成和扩散时间,降尘效率将得到全面提高。

3.1 露天深孔台阶爆炸水雾降尘实例

本技术在某大型露天矿进行现场试验,取得显著爆炸水雾降尘效果。露天台阶爆区的炮孔直径为250 mm,孔深17 m,底部装填8 m高铵油炸药,再回填5 m长岩粉,最后填封4 m高水袋,由此彻底消除了炮孔填塞岩粉冲炮产生的粉尘柱^[10]。为获得爆炸立体水雾幕,在炮区临空面前方铺设2条水袋,水袋距离爆区临空面坡底距离分别为15 m、20 m;爆区台阶上表面共铺设多条水袋,水袋间隔在炮孔之间。在 $\phi 300$ mm的水袋底部埋设炸药,将水袋内的溶液爆炸喷射成水雾,爆区临空面前方水袋的爆炸药量为39 g/m,爆区台阶上表面的水袋爆炸药量为26 g/m。台阶上表面的水袋比前排炮孔延后50 ms起爆;临空面前方距离坡底较近处的水袋比第一排炮孔延期爆炸时间宜为1500 ms以上,第二

排水袋再延时 500 ms 起爆。水袋布置情况见图 7。效果都有保证,而且整体降尘效果非常明显。爆破及水雾扑尘过程见图 8,爆破安全与爆破

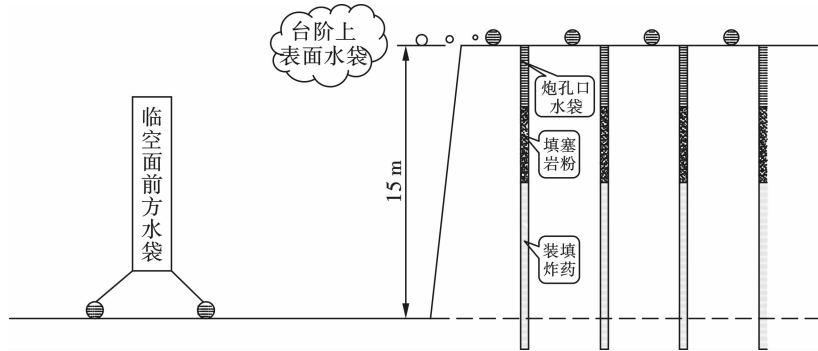


图 7 爆区炮孔和水袋布置剖面示意图(单位:m)

Fig. 7 Diagram of layout of hole and water bag in blasting area(unit:m)

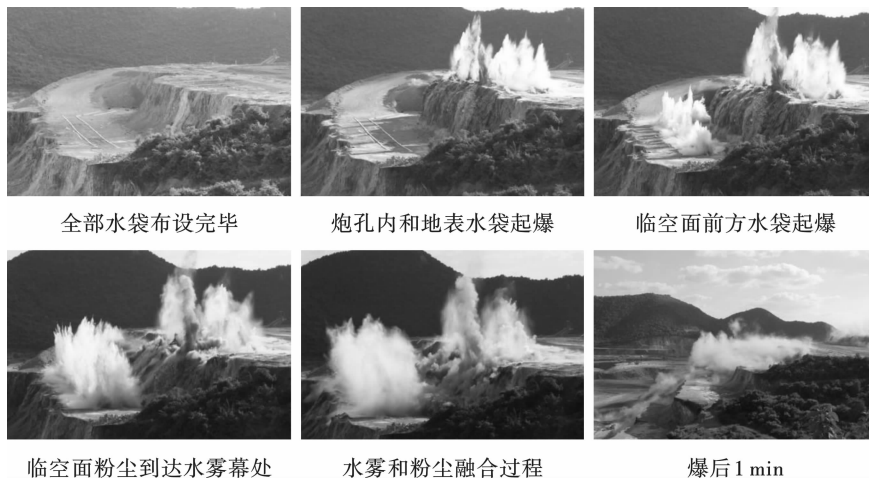


图 8 爆炸水雾拦阻粉尘效果

Fig. 8 The effect of explosive water mist to restrain dust

3.2 爆炸水雾降尘效果分析

通过 FCC-25 型防爆型粉尘采样仪器,对同等条件下未采取任何降尘措施的其他爆区进行粉尘浓度采集,采集地点在爆区的下风侧,风速 2 级,距离爆区分别为 50 m、75 m、100 m。从采集的数据来看,距离爆区 50 m 处的粉尘浓度在 358 ~ 397 mg/m³ 之间,75 m 处粉尘浓度在 169 ~ 193 mg/m³ 之间,100 m 处粉尘浓度在 85 ~ 105 mg/m³ 之间。可见露天台阶爆破粉尘浓度随着距离渐远会逐渐降低,100 m 以远爆破粉尘浓度衰减趋缓。

再看本次采用爆炸水雾降尘新技术后,以相同方法测得的粉尘浓度为:距离炮区 50 m 处的粉尘浓度为 192 mg/m³,75 m 处粉尘浓度为 103 mg/m³,100 m 处粉尘浓度为 51 mg/m³。通过计算可得出最大爆破粉尘浓度降低 50% 左右,对于露天台阶爆破来说降尘效果非常明显。未采用任何降尘措施条件下的爆破烟尘量,比采用爆炸水雾降尘后的烟尘量

成倍增加,现场肉眼观察爆炸水雾降尘效果也非常明显。

4 结论与展望

随着露天矿山台阶爆破的规模不断增大,大规模爆破开采产生的粉尘污染对矿区环境及人员健康造成严重影响,研究出高效合理的爆破降尘技术是绿色矿山建设的当务之急,本试验研究针对露天深孔台阶爆破,找到了一种简便有效的爆炸水雾降尘技术,主要取得以下几点新的认识。

(1) 露天台阶爆破粉尘的三大来源是:炮孔填塞物冲孔扬尘;岩石破裂及粉碎产生的粉尘;爆堆向临空面抛散出现的粉尘云。三种粉尘源受地下水影响最显著,岩性影响次之,爆破方式的影响有限。通过大量观测,露天台阶爆破的粉尘扩散宜在 50 m 范围内防阻。

(2) 依据爆破粉尘的产生源,有针对性地设置

爆炸水雾降尘方案,综合采用水袋封堵炮孔、爆区顶面水袋爆炸成雾和临空面前方水袋爆炸成雾,在合适的时间爆炸形成立体全方位水雾捕尘,其工艺简单、降尘效果明显。

(3)对水袋爆炸成雾进行了试验,得到了其关键控制参数:

①临空面前方水袋底部炸药单耗为 0.55 kg/m^3 ,爆区顶面的水袋炸药单耗为 0.4 kg/m^3 。

②临空面前方宜布设2排以上水袋,第1排水袋距临空面1倍台阶高度,第2排水袋再外延5~10 m;第1排水袋起爆时间比前排炮孔延迟1.5 s,第2排水袋起爆时间比第1排水袋再延迟0.5~0.8 s。

③封堵炮孔的水袋直径宜大于炮孔直径,水袋膜要有足够强度,否则容易划破水袋。水袋封堵长度一般在4 m以内。

(4)立体爆炸水雾全方位降尘技术现场试验应用表明,爆破粉尘浓度可降低50%左右,降尘效果明显,该技术非常适用于露天台阶爆破的大面积降尘,具有较高的推广利用价值。

展望露天台阶爆破的粉尘污染防治,需要对露天台阶爆破的同步爆炸水雾降尘工艺进行更多的改进,特别是对现场铺设水袋、灌水施工工艺需做成标准化产品,封堵炮孔的水袋和封口方式也需进行专门设计和工厂化生产。

参考文献 (References)

- [1] 杜翠凤,陈胜. 露天矿粉尘源强分析及贡献率实验研究[J]. 工业安全与环保,2014(10):76-79.
- [1] DU Cui-feng, CHEN Sheng. Experimental study on the contribution rate of dust sources analysis in open-pit ore [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014(10):76-79. (in Chinese)
- [2] 许秦坤,陈海焱. 爆破粉尘及炮烟控制现状[J]. 爆破, 2010,27(4):113-115.
- [2] XU Qin-kun, CHEN Hai-yan. Current situation of controlling blast dust and fume[J]. Blasting, 2010,27(4):113-115. (in Chinese)
- [3] 刘坚,李泽华. 露天矿爆破粉尘排放量影响因素分析及试验研究[J]. 爆破,2017(4):169-174.
- [3] LIU Jian, LI Ze-hua. Research on influence factors of blasting dust emission of open-pit mine [J]. Blasting, 2017(4):169-174. (in Chinese)
- [4] 陈小华. 露天矿开采工艺过程粉尘污染及防治对策[J]. 建筑技术开发,2016(11):158-159.
- [4] CHEN Xiao-hua. On surface mining process dust pollution and measures [J]. Building Technology Development, 2016(11):158-159. (in Chinese)
- [5] 姚海飞,金龙哲,刘建,等. 高效水炮泥降尘试验研究[J]. 中国煤炭,2009,35(11):99-102.
- [5] YAO Hai-fei, JIN Long-zhe, LIU Jian, et al. An experimental research on the dust suppression effects of highly effective water stemming [J]. China Coal, 2009,35(11):99-102. (in Chinese)
- [6] 崔媚华. 采矿爆破粉尘高效凝并技术的研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [6] CUI Mei-hua. Research on the high efficiency coagulation technology of mining blasting dust [D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [7] 张昭,佟彦军,李泽华,等. 露天矿山台阶爆破爆炸水雾降尘实验[J]. 工程爆破,2017,23(5):71-75.
- [7] ZHANG Zhao, TONG Yan-jun, LI Ze-hua, et al. The experimental research of using explosion water mist reduce dust in the bench blasting of open-pit mine [J]. Engineering Blasting, 2017,23(5):71-75. (in Chinese)
- [8] 郝成磊,李宏伟. 露天台阶爆破水雾降尘技术及效果评价[J]. 爆破器材,2018,40(1):59-64.
- [8] HAO Cheng-lei, LI Hong-wei. Dust suppression technology by blasting spray and its effect in open beach blasting [J]. Explosive Materials, 2018,40(1):59-64. (in Chinese)
- [9] 管仁生. 露天深孔岩石爆破水雾降尘试验研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2017.
- [9] GUAN Ren-sheng. Experimental study on dust suppression of water mist in open hole deep rock blasting [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017. (in Chinese)
- [10] 晋良海,罗汉. 露天梯段爆破粉尘体积分散度的分形表达[J]. 中国安全科学学报,2016(8):139-144.
- [10] JIN Liang-hai, LUO Han. Fractal expression of dust volume dispersion in bench blasting in open air [J]. China Safety Science Journal, 2016(8):139-144. (in Chinese)