

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.003

露天矿炮孔水量水温对爆破效果影响试验研究*

郭连军^{1,2},董二虎³

(1. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870; 2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 鞍山 114051;
3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 深凹露天矿台阶爆破时普遍存在孔壁裂隙渗水、含水炮孔内外温差大、爆堆遇水易出现大面积泥化软化的现象,炮孔水量及水温度对爆破效果的影响却又缺乏系统的试验研究。从炮孔含水量和水温度与炸药能量比例相匹配的角度出发,利用相似模拟试验探究混合片麻岩爆破特征,结合交互试验结果对比于大孤山铁矿含水台阶爆堆大块分布不规律的现状,得到孔内温度低于、等于或高于采场环境气温时填药高度与水深度比分别为0.33、略大于0.5或0.5时爆破效果更为理想,最后针对大矿混合片麻岩炮孔含水爆破提供了装药高度与水深比值参数的优化建议。

关键词: 水环境; 台阶爆破; 含水炮孔; 块度分布

中图分类号: TB41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0019-09

Influence of Blasting Hole Water Volume and Temperature on Blasting Effect in Open Pit Mines

GUO Lian-jun^{1,2}, DONG Er-hu³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. College of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;)

Abstract: There are some common phenomena during bench blasting in a deep open-pit mine: Water seepage in blast hole wall, Large temperature difference inside and outside of a water-filled blast hole, and The mud is easy to soften when exposed to water. However, the influence of blasthole water volume and temperature on the blasting effect lacks systematic experimental research. According to the principle that the volume and temperature of water is somehow proportional to the explosive energy, a similar simulation test was designed to investigate the blasting characteristics of the mixed gneiss. The results of the interactive test are compared with the large block distribution of the water-bearing bench blasts in the Dagushan Iron Mine. In order to achieve the desirable blasting effect, when the temperature in the hole is lower than the ambient temperature, the ratio of charge height to the water depth should be set as 0.33. The ratio turns to be 0.5 when the temperature in the hole is higher than the ambient one. While the temperature in the hole equals to the ambient temperature, the ratio of charge height to water depth would be slightly more than 0.5. Finally, an optimization scheme for the charge height and water depth ratio is provided for the water hole blasting of the Dugushan iron ore mixed gneiss.

Key words: water environment; bench blasting; ore hole with percolation water; rock distribution

大孤山铁矿作为试验调研的露天含水矿山,爆破产生的预裂缝附近含有大量的水渍、爆堆结冰、

渗水泥化现象普遍。渗水浮渣台阶和干孔台阶爆破从爆堆大块产出率、平均台车装运时间、爆破冲

炮、噪音和爆破震动方面也具差异性。一部分水源于采坑汇水,一部分自然降水经地表流入采场直至渗入炮孔。由于大矿浮渣较厚自然降水易引起矿岩蓄水现象,牙轮钻布孔等机械扰动引起岩层通道裂隙水流入炮孔直至水压平衡。爆破中台阶岩层渗水、爆区汇水面积大等情况普遍存在。冬季含水炮孔内外温差可达30℃,在布孔穿爆、台阶测量和现场装药时,遇到了钻孔突水冻结钻头和地表设备、低温水环境测量仪器难以使用及混装车装药裸露时水迹冻结炸药等问题。

MMichael研究了装药密度和装药半径对压力变化影响^[1],HGSnay论证了水下爆炸时爆炸相似规律的具体使用要求^[2]。太原理工大学通过现场模型试验^[3],证明水垫层装药爆破技术可从整体上改善破碎效果。仓上金矿通过反复试验研究分析近500个炮孔^[4],发现水层高度应接近或等于炮孔超深时爆破效果有改善。任少峰等通过试验说明改变布孔方式、排水护孔、水间隔装药能有效控制爆破效果^[5]。高保彬采用水耦合方式的定向断裂爆破技术达到爆破能量有效分配提高了软岩巷道爆破质量^[6]。而关于露天矿山自然状态下台阶爆破炮孔含水量与炮孔内外环境温差对爆破效果影响研究很少。

1 炮孔水环境测量

露天矿炮孔测量往往人工使用带配重的测绳,孔深通过测量员“手感”判别绳是否变松来度量,连续多孔测量易沾泥侵水,甚至无法使用(冬季低温条件测绳沾水冻硬),数据误差大可靠性小。大孤山铁矿不同台阶各种水环境下炮孔底部沉降不同深度的高品味磁铁矿炮泥或混合岩岩渣,矿区水文地质条件和区域气候决定了台阶水的来源^[7]。炮孔测量面临以下问题:①如何准确快速的在地表测量中深孔深度数据;②台阶孔口如何获取每个炮孔含水量数据;③如果露天台阶炮孔含泥渣含水,如何测量炸药陷入泥渣的深度。

大矿布孔72h后进行爆破,对采场高品味磁铁矿炮泥和混合岩岩渣进行现场沉淀试验,发现72h

后水炮孔中泥渣溶解量已趋于稳定,孔底水泥渣界面和泥渣沉淀清晰可辨,此时炮孔水温度与含水量成为影响装药爆破的最直观的因素。为研究大矿台阶水环境设计了浮力杆测量装置^[8],为本次试验研究提供准确实际的炮孔状态参数。

1.1 浮力杆结构

炮孔含泥渣含水台阶爆破时一次性在炮孔外刻度槽读出炮孔、含水、空气柱和底部泥渣深度。如图1、图2结构:1为刻度尺;2为副杆软管;3为半圆空心管^[9];I-I横面为悬浮杆及副杆截面图;4为清洗空间;5为底板面;6为刻度球;7为内空间;8为转动副^[9];9为卡口;10为拆卸板;11为卡扣;12为水网;13为螺旋弹簧;14为锥形罩。

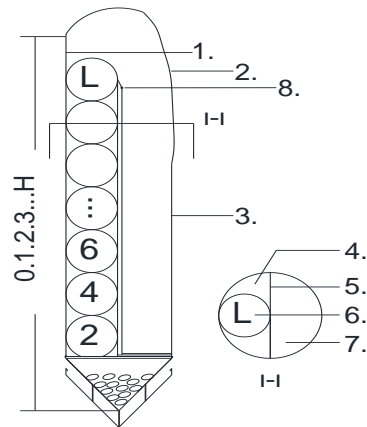


图1 浮力杆示意图

Fig. 1 The model of buoyancy device

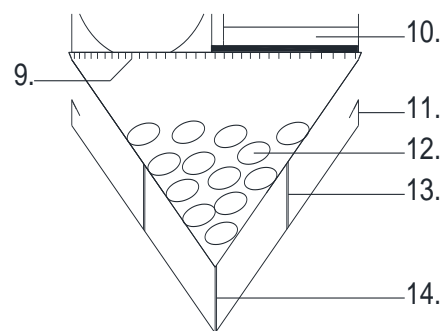


图2 进水端结构

Fig. 2 The inlet ends

1.2 现场测量及数据

如图3,在大矿采场48个炮孔进行测量。分图(a)为爆破装药前-186m台阶14个炮孔的测量结果。分图(b)为6个-319m台阶当天新布的靠帮炮孔。分图(c)为-198m台阶一周前打11个预裂孔、坡顶线的炮孔5个、上台阶根底3个边角孔及-198m台阶新布炮孔9个。

收稿日期:2019-01-13

作者简介:郭连军(1963—),男,教授,研究生导师,从事岩石爆破破碎机理等研究,(E-mail)glj0412@126.com。

通讯作者:董二虎(1989—),男,博士研究生,从事矿山爆破相关研究,(E-mail)395256183@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51474123);国家重点研发计划(2016YFC0801603)

如图 3,分析实测的 5 种数据:空气柱和含水深度值在离散型布孔分布中变化幅度最大,即使同一台阶炮孔之间其变化值达 0~11 m,其中含水孔的位置多数靠近台阶边帮。连续测量新钻炮孔深度、水

温度、含水量和泥渣厚得其数据曲线趋于平稳,函数值变化极小。可以得到大矿台阶爆破时含水现象非常普遍,根据现场情况试验具有较高研究意义。

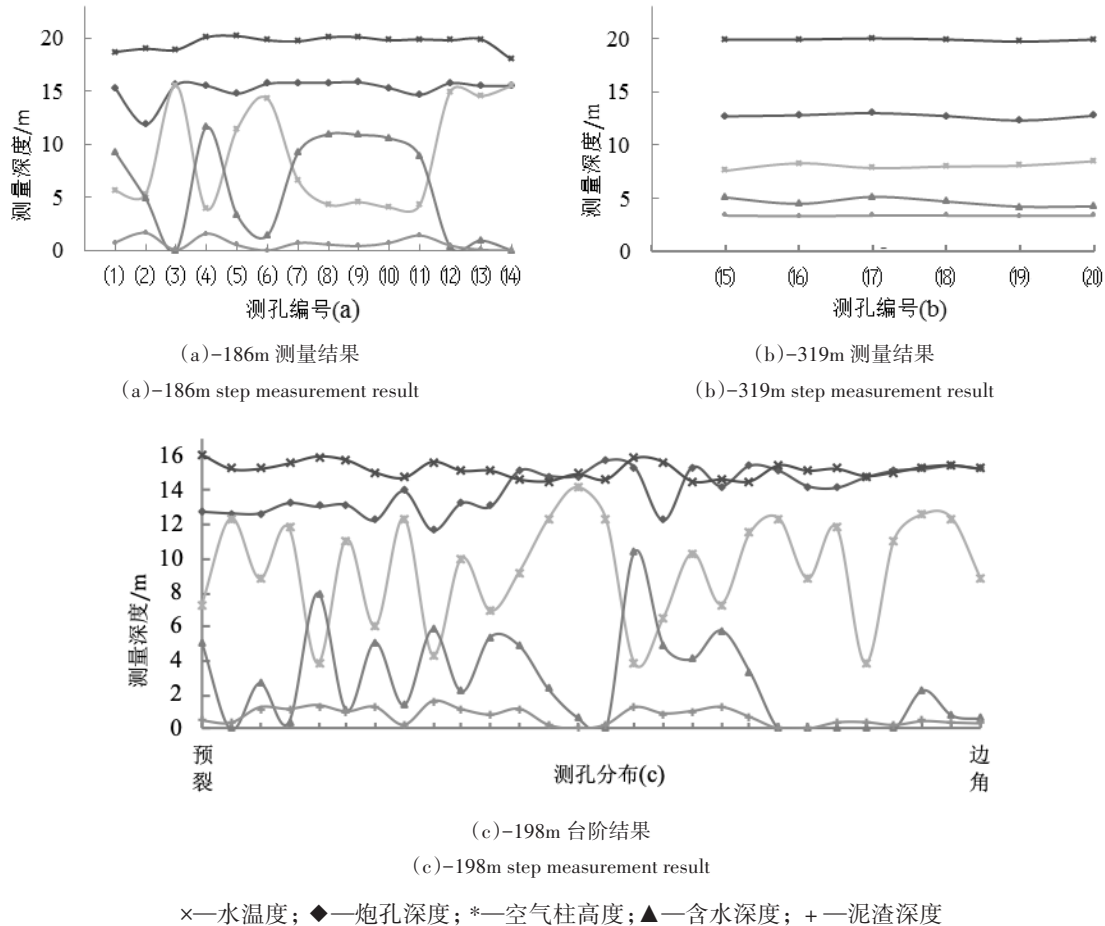


图 3 实测炮孔数据分布图

Fig. 3 Blasthole data distribution map

2 试验原理及设计

相同爆破环境下利用多次现场对比试验模拟水炮孔不同含水环境下的爆破过程。量化水量指标定量论述爆破破碎效果,在水温水量变化过程中计算炸药有效能量利用率变化情况。利用正交交

互试验分类编组处理数据对比实际露天矿爆破参数,目的是找到最具代表性的水环境爆破优化参数。

2号岩石乳化炸药作为大孤山铁矿山爆破成品炸药成为试验选定用的炸药^[10],与鞍钢爆破公司所使用的重铵油炸药密度、抗水性能相近。见表1。

表 1 炸药参数

Table 1 Emulsion products

岩石乳化炸药	密度/ (g·cm ⁻³)	爆速/ (m·s ⁻¹)	殉爆 距离/ cm	做功 能力/ m	猛度/ mm	气体量/ (L·kg ⁻¹)	撞击感度	摩擦感度	热感 度
2号	0.95~1.30	≥3200	≥3	≥260	≥12	≤80	爆炸概率≤8%	爆炸概率≤8%	不燃
露天乳化炸药	1.10~1.30	≥3000	≥2	≥240	≥10	不爆			

2.1 试验特点及爆破要求

爆破对象采用高标号 C45 混凝土^[11], 砣体最小胶凝材料配比: 最高水胶比 0.6, 最小商砣胶凝材料量 250 kg/m³。

如图 4 所示, (a) 和 (b): 炮孔材料选用防水亚克力玻璃管, 保水耐温塑料模具浇筑砣体、表面覆盖材料根据养护厂温度测定情况随时调换, 保证混凝土内外温度差小于 25℃, 保持良好的湿度条件。(c)

和 (d): 得到砣体与试块形状完整、表面满足水平平整, 满足爆破设计要求。因模具空间上大下小可减弱 24 h 初凝碎石微沉淀现象, 高强度塑料模具保护了水分流失又加强了砣体养护过程中恒温要求, 使得砣体各向更均匀、提高养护强度。同时于振捣台制作 3.375 dm³ 正方体试块若干以备静态力学实验使用。(e) 和 (f): 精度 0.1℃ 测温传感器、鞍千矿备采台阶做好现场标记准备爆破作业。



(a) 炮孔材料
(a) Blasthole material



(b) 模型养护
(b) Model preparation



(c) 混凝土养护 28 d
(c) Concrete curing 28 days



(d) 试块养护 28 d
(d) Test block curing 28 days



(e) 温度传感器
(e) Temperature sensor



(f) 准备爆破布置
(f) Site blasting operation

图 4 C45 砣体模型制备图

Fig. 4 Concrete model preparation diagram

表 2 大矿混合岩静态力学实验

Table 2 Experimental results of rock mechanics properties of mixed rock

名称	加载与层理方向	块体密度/ (g·cm ⁻³)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗剪参数		变形参数	
					内聚力/ MPa	内摩擦角	弹性模量/ GPa	泊松比
片麻状混合岩	平行	2.7	37.89	2.9	6.73	42.64	42.53	0.39
	垂直	2.6	68.40	7.1	9.00	40.00	66.32	0.20
	平均	2.6	53.15	5.0	7.87	41.32	54.43	0.30

对同期养护的混凝土试块进行静态力学实验同时整理大矿常见混合岩种力学参数^[12], 数据汇总结果如表 2 (最大和最小值只取测定极值)。见表 3。

东北大学资源与土木工程学院岩石力学实验

室得到大孤山铁矿混合片麻岩与试验砣体静态力学参数具有较高相似性。结合小台阶现场爆破试验, 得到试验砣体与混合片麻岩岩种爆破性分级评分不超过级别 II₂。选用均匀性较好各向同性的 C45 高强度混凝土模拟片麻岩进行爆破试验, 在炸

表 3 混凝土力学实验结果

Table 3 Concrete physical and mechanical properties test results

试验对象	块体密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗剪参数		变形参数		声波速度/ (m·s ⁻¹)
				内聚力/ MPa	内摩擦角/ 度	弹性模量/ GPa	泊松比	
混凝土试件	最大	2.41	56.44	4.37		49.49	0.31	4655
	最小	2.37	54.91	3.98	9.02	44.78	28.86	
	均值	2.40	55.68	4.00		33.39	0.33	

药能耗比例计算、爆破效果及爆堆统计方面具有一定参考价值。

2.2 试验计算理论公式

在试验时,根据爆炸几何相似原理和岩石爆破性指数实验认为重力、炸药种类、装药密度保持不变保证装药方式及岩体性质不变。只有炸药性能和被爆岩体参数发生变化,采场台阶逐孔起爆孔深 $1\text{ m} \leq W \leq 15\text{ m}$ 范围内,不考虑内聚力和重力有^[13]

$$Q = W^3 k_3 \left[(1+n^2) / 2 \right]^2 = k_b W^3 \quad (1)$$

最小抵抗线 $W < 1\text{ m}$ 时,能量准则式(2)尽管是以爆破漏斗为研究对象导出的,但只涉及炸药性能和被爆岩体参数时,式(2)中的 K_3 值也适用于式(1)^[14]。瑞典 Langefors 用集中药包在台阶松动爆破条件下,给出能量准则式

$$Q = (k_2 W^2 + k_3 W^3 + k_4 W^4) \quad (2)$$

当抛掷爆破单位体积炸药消耗量 $Q/V \geq 4.6\text{ kg/m}^3$ 时才出现抛掷^[14]。式(2)中第一和第三项系数 K_2 、 K_4 与炸药种类及岩石性质有关,炸药和岩体不变条件下为常数^[15],试验中 $W=0.26\text{ m}$ 所以 K_4 项忽略不计。根据 U Langefors 在一般岩石中采用松动爆破情况下的药量计算式(3),取兰式式 $K_2=0.07$,结合式(1)和式(2)在得到试验装药量和爆破体积条件下反算出 K_3 值。

$$\frac{Q}{w^3} = \frac{0.07}{w} + 0.35 + 0.004w \quad (3)$$

混凝土塑料模具如图 5。

试验选取炮孔直径 45 mm,炮孔深度 0.26 m,2 号岩石乳化炸药药卷直径 32 mm,连续柱状装药置于孔底。对大孤山铁矿历史爆破数据及效果进行整理统计得到片麻状混合岩平均炸药单耗为 0.29 kg/t,炮孔深度 15 m、台阶爆破 $W_d=8.1 \sim 8.6\text{ m}$ 、孔排距 6.5~7.5 m、填塞均值 7 m。由兰式公式和爆破性分级判据参数计算单个砧体理论药量为 36~51 g(计算略),考虑到交互作用中的装药因素、起爆和装药方式的影响,炮

孔装药量依次取 35、40 和 45 g 三种(炸药密度 1.15 g/cm^3),装药高度为 3.8、4.4 和 4.9 cm。大矿填塞为 6~7 m 达到孔深的 40%,试验中填深取孔内 10 cm 加 20 cm 孔外延长填塞。装药工作结束即用准备好的薄塑料胶黏球塞入孔内固定位置,使得纯净水和填塞料之间互相分离。将填塞材料放入孔内压实,做好布线及警戒工作于 3 min 内起爆^[16]。

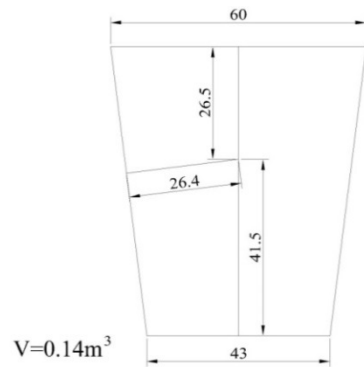


图 5 试验模具结构尺寸(单位:cm)

Fig. 5 The concrete plastic mold structure(unit:cm)

3 现场试验

如表 4 为现场采用的试验参数统计正交表 $L_{16}(5 \times 3^2)$,根据露天矿台阶爆破炮孔含水时现场调控装药量操作的调研,设计了依据水量增加装药量与采场相同增加比例的相似模拟试验,其中 N 代表空气柱高度、水深度、装药高度和孔深的比例。

3.1 块度统计及分布

爆破试验后将距爆源附近所有岩块和较远处飞石收集平铺拍照记录,间隔式布置毫米分度值水平刻度标尺,不同时态图像分辨率不得小于 200pix/in。利用 Photoshop 软件调整图像“中间调对比度”使暗调更暗使高光更亮,利用 Matlab 等软件写入 Prewitt 算子检测边缘再生成所有矿块边界封闭拟合曲线^[17]。见图 6~图 9。

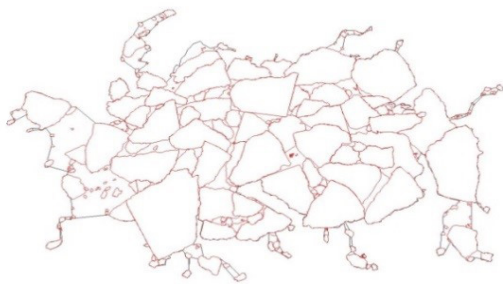
表4 统计试验参数交互表

Table 4 Test parameters statistical interaction table

试验次数	试验编号	温度/°C	含水深度/cm	药量/g	N
1	01#	2.3	5	35	10:5:4:26
2	02#	3.0	10	40	5:10:4.5:26
3	03#	3.2	15	45	0:15:5:26
4	11#	18.5	5	35	10:5:4:26
5	12#	17.9	10	40	5:10:4.5:26
6	13#	18.0	15	45	0:15:5:26
7	21#	38.0	5	35	10:5:4:26
8	22#	40.4	10	40	5:10:4.5:26
9	23#	40.4	15	45	0:15:5:26
10	31#	30.3	5	35	10:5:4:26
11	32#	31.5	10	40	5:10:4.5:26
12	33#	30.1	15	45	0:15:5:26
13	41#	50.8	5	35	10:5:4:26
14	42#	52.6	10	40	5:10:4.5:26
15	43#	51.3	15	45	0:15:5:26
16	0#	27.9	0	35	



(a) 经 Photoshop 处理的图像
(a) Photoshop generated image



(b) 拟合边界展示
(b) Boundary Fitting
图6 矿块边界拟合图

Fig. 6 Rock block boundaries fit the show

利用CAD软件计算封闭拟合曲线块度面积、周长数据^[18]。绘制对应函数曲线如图10(43#)所示。如式(4),将矿块形态假设为椭球进行数据计算,假

设 b_i 、 a_i 分别为长短半轴,将 $f(x)=a_i+b_i$ 作为矿块纵向尺寸统计数据。

$$a_i = \frac{L_i + \gamma}{8}; b_i = \frac{8S_i}{\pi(L_i + \gamma)}$$

$$\gamma = \sqrt{L_i^2 + \frac{64}{\pi} S_i} - 32 S_i \quad (4)$$

式中: a_i 、 b_i 为椭球长短半轴。

如图7,从含水炮孔爆破爆堆极大块分布形态发现炸药爆炸后没有出现自由面片落也没有明显的粉碎区。根据块度尺寸分布情况,将A值为30~300 cm²之间块度称为较大块、大于等于300 cm²为极大块。基本每个爆堆都出现了1~3个半孔极大块残留体,测量半孔周长接近于1/3完整炮孔。试验说明水中爆炸冲击波、水流冲击和气动脉动都比较平和,其爆堆碎块散落在附近,爆体岩种各向抗拉、抗剪强度基本一致。



(a) 残留炮孔 (b) 极大块形状
(a) Hole shape (b) Block size

图7 爆堆极大块半孔图

Fig. 7 Explosive heap block and residual hole shape

3.2 爆破炸碎体积及能量计算

如图8,根据爆体残留形态,测量残留砵体计算被爆破体积。 k_2 、 k_3 值由公式5计算。 k_2/W 数值不改变 k_3 值的曲线型态, k_2 取为常数0.07。

$$\frac{Q}{V} = \left(\frac{k_2}{W} + k_3 \right) \quad (5)$$

式中: Q 为装药量,kg; V 为被爆体积,m³; W 为最小抵抗线。



(a) 残留体形态 (b) 统计体积及节理裂隙
(a) Residual body (b) Counting volume and joints

图8 统计残留爆体及其节理裂隙

Fig. 8 Explosive residual type and joint fractures

如图 9,从对应的起爆顺序绘制 k_3 分布曲线。

从图 9 可得,水量增加的同时被爆体积及变形能比例显著增加,孔内含水量与被爆体积之间、 k_3 值与水量值皆趋于线性关系。如果将较低的变形能量比值下对应着更大的破碎体积称为理想爆破,可得试验 1、5、6、8 次为理想爆破、最优在第 5 次试验(装药高度与水深比为 1:2);反而爆破体积值小于能量比例函数值的 9、12、13、15 次试验中(尤其在能量比例数值较高点)最不理想爆破在第 15 次;经过 7~9 和 13~15 组试验与第 16 次试验对比分析,得到相应的高温水环境(炮孔温度高于环境温度)中爆破体积较多时装药高度与水深比为 1:2。

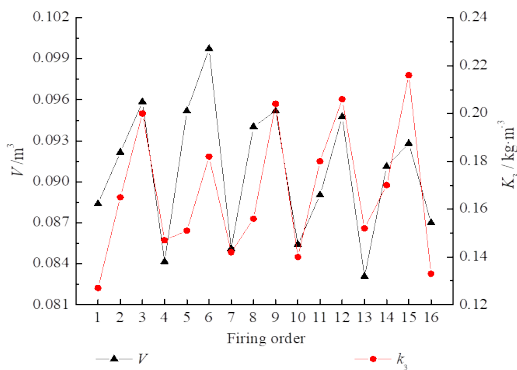


图 9 被爆体积及能量分布数据图

Fig. 9 Blasting volume and energy distribution curve

3.3 数据结果分析

分 9 组测量统计残留砵体节理裂隙平均走向方位角。最后将绘制好的节理走向玫瑰花图与计算验证后的 15 组块度分布函数曲线图整理如图 10:分布函数数据曲线 x 轴计数值按矿块尺寸升序展开,左边 y 轴数值对应块度分布(④号标记线)与①号块度累计曲线的面积值 A,右边 y 轴数值为 $f(x)$ 求和函数、块度变化曲线(③号、②号曲线) L 值。②号曲线说明块度尺寸变化分布,①号曲线 x 坐标处斜率等于块度面积值。厘米级及以下颗粒因遮挡数量众多,只统一计算累计面积值,爆堆块度从有效范围内统计而不是单纯比对数量。

(1) 孔温为 3℃ 组试验:块度数量从累计曲线与块度分布曲线明显分离时(有效剔除小于等于毫米级尺寸块度的影响)分别计为 125、110 和 95 个。可得水量的增加同时累计曲线增幅减弱、求和与块度分布曲线越来越低,变化区域幅度与密度明显减小。说明 3℃ 组试验时随水量增加大块出现率减少、块度分布更趋于均匀。玫瑰走向花图说明节理数量及总长度先增加后显著减少。

(2) 孔温 18℃ 组试验:块度分布与累计曲线分

离时块度个数计 275、125 和 110 个。随水量增加累计曲线增幅减少、块度求和与分布曲线斜率越来越小,变化区域幅度与密度明显减小。大块出现率减少、块度分布更趋于均匀,节理数量和总长度先增加后减少。

定义碎岩占比 ω 等于块度变化与求和曲线函数值分离处 x 值与各自总序列值之比。

$$\omega = n/N \dots \dots \dots (7)$$

式中:n 为组试验中碎岩数量;N 为块度分布总数量。

(3) 孔温 30℃ 组试验:块度数量从曲线明显分离时计为 76、130 及 144 个。水量增加则块度累计函数值先增大后有所减少、求和曲线与分布曲线斜率减小后再增加。区域变化幅度和密度增加后再减小,极大块数量减少后增加。 ω 分别为 69%、63% 和 64%。块度先在较大块范围内集中化分级然后在较大块范围内趋于均匀化。节理裂隙数量和总长度有所增大。

(4) 40℃ 组试验:累计与块度分布曲线明显分离时块度数量为 240、180 和 120 个。随水量增加累计曲线函数值先减小再明显增大、块度分布曲线与求和曲线稍微减小后明显增大。变化区域密度越来越小,振幅越来越大。 ω 值为 40%、44% 和 37%。说明极大块先减少后明显增加,趋于较大块范围内均匀化(较大块占比增加)。随水量增加节理裂隙数量和总长度先变小再增大。

(5) 50℃ 组试验:曲线分离后块度数量依次为 230、89 和 145 个。累计曲线函数值明显增大,变化区域密度先减小后增大,区域内极大块有所减少。 ω 分别为 55%、45% 和 50%。说明随水量增加极大块出现率减少、爆堆块度分布范围逐渐集中于较大块区域。节理裂隙面积累计明显减小后再增加。

结合表 4 分析三种含水深度下温度按梯度增加时的分布函数曲线如图 11。

如图 11(a) 炮孔含水为 5 cm 时结合 y 轴温度梯度 T, 相对而言 11# 和 21# 试验极大块含量少、较大块积分面积大,统计残留体节理及被爆体积等情况,则爆破效果最优的为 11# 试验。同组 11# 号试验对比爆破效果最差 31# 砵体,被爆体积减小了 2%、变形能占比多出 5,较大块约为其 1.92 倍、玫瑰花图面积却减少了 57%。

同理(b) 水深为 10 cm 时,22# 砵体炸药利用率相对最优。同组 22# 号砵体对比爆破效果最差 42# 试验,被爆体积加大了 4%、减少炸药单耗 4%、较大块数量基本一致、节理面积加大 34%。

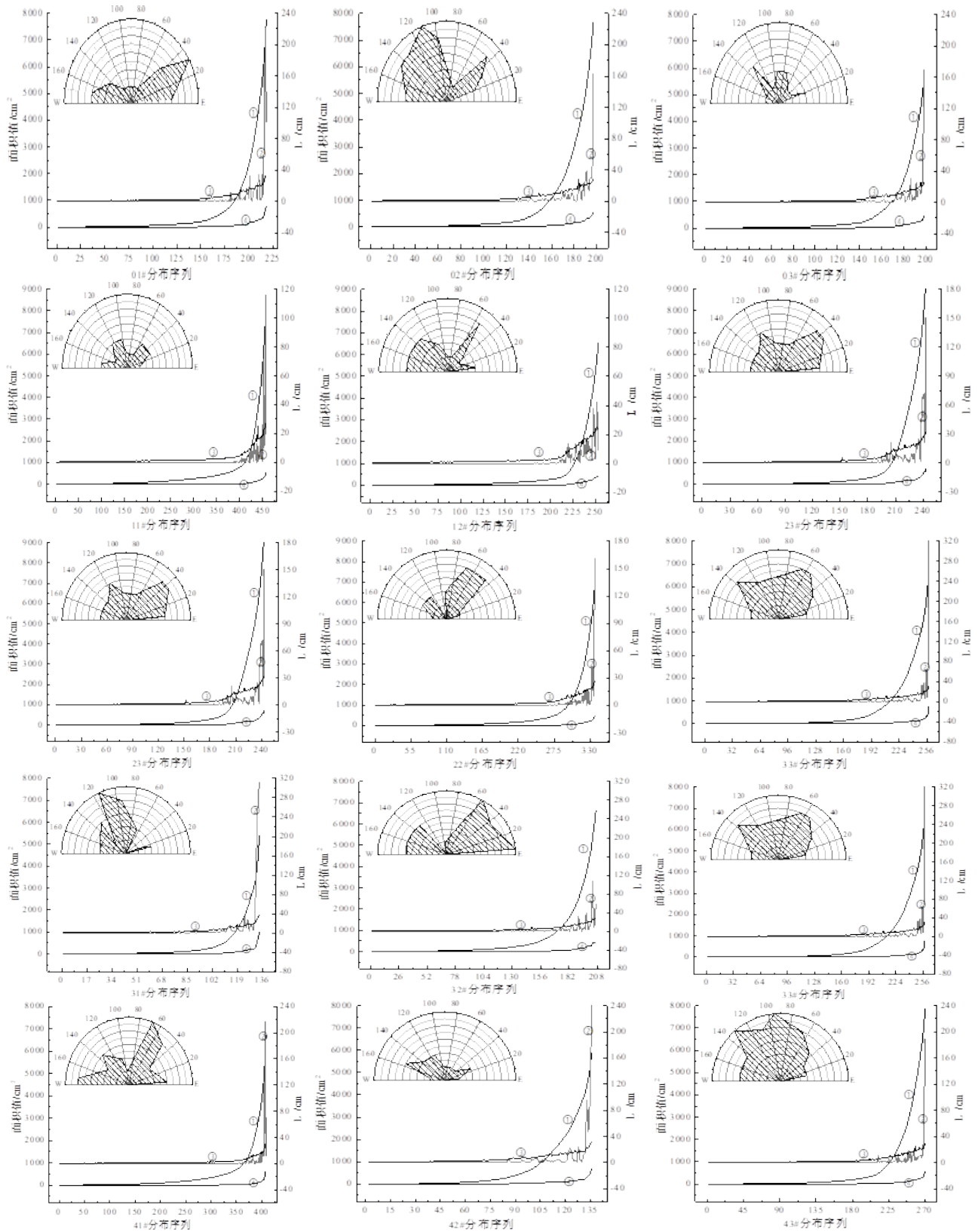


图 10 分布函数曲线数据图

Fig. 10 Distribution function curves

含水深度为 15cm 不变时结合节理裂隙发育等情况,相比最优为 03# 硎体爆破试验,相比同组效果最差的 33# 硎体,爆破破碎体积增加 1%、炸药单耗减

小了 2%、较大块个数增加了 94%、玫瑰面积减少 76%。由图可知随水量增加较大块分布序列趋于集中化分组,说明水量增加爆堆块度分布有明显改善趋

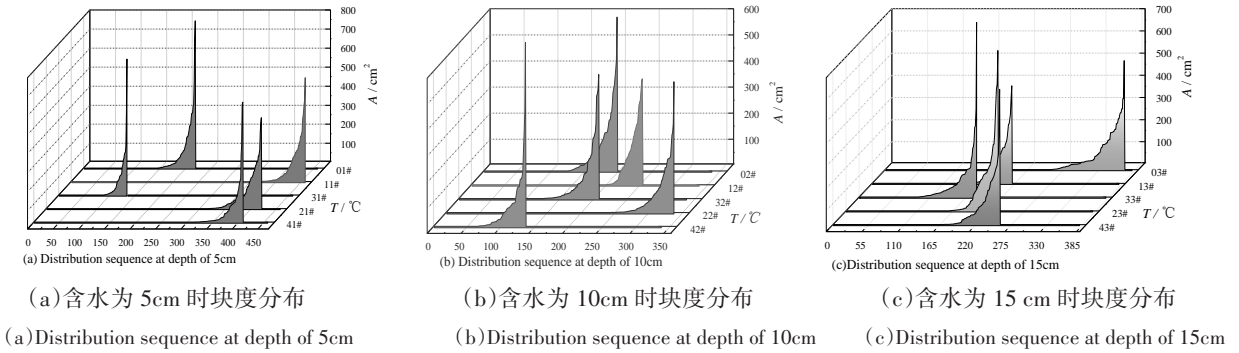


图 11 温度梯度下块度分布曲线数据图

Fig. 11 Blockiness distribution curve under temperature gradient

势,同时各级别块度占比趋于稳定。

炸药爆炸由不可压缩的水传递爆轰压力,水中爆炸气体产物的膨胀速度慢,均匀作用在周围介质产生破裂;水的密度和惯性远比气体大,2号岩石乳化炸药理论爆热为 4552 kJ/kg,水吸收能量远远大于气体所携带的能量,因此水楔的劈裂作用及部分水汽化能量加大爆力静作用效果;定容爆破瞬间 16 μs 内,试验增加 5 cm 水柱吸热 24 kJ 气用量 0.1 m³,减小粉碎区塑性流动耗能增加流体热能破岩威力;试验效果直接说明水对冲击破坏具改善作用。

4 结论

现场测量露天台阶松动爆破中炮孔复杂水环境,从爆堆和残留爆体型态及爆破能量分配值分别说明在相同爆破参数和爆破条件下水量水温对爆破效果影响的差异性。结合大矿实际情况总结并得到以下结论:

(1)通过现场调研和试验论证,炮孔中水泥浆密度在沉淀 72 h 后等于同温度下水的密度。得到一种新型的露天矿山炮孔测量技术,为台阶爆破前装药提供准确的炮孔状态数据。

(2)炸药单耗、装药方式不变时,建议高温爆破水环境下大矿混合片麻岩装药高度:水深值为 1:2 可提高爆破体积。

(3)炮孔水深度不变温度接近环境温度(27℃)时爆破效果较差、0~10℃效果最优,满水炮孔爆破后块度分布随温度升高逐渐趋于稳定。

(4)矿山炸药参数、岩石种类不变且孔内低于采场环境气温时,随布孔含水量增加则爆堆块度分布更均匀大块率减少,建议大矿低温爆破装药:含水长度为 1:3,爆破效果较为理想且对围岩扰动小。环境气温接近孔内温度时建议大矿装药高度与含

水深度比值略大于 0.5,则爆堆块度分布较为理想爆破扰动小。孔内温度大于环境气温时,随含水量增加极大块减少块度集中于较大块内分布,此时建议混合片麻岩高温装药长度与含水深度比为 1:2 爆破效果更理想且围岩扰动最小。

参考文献 (References)

- [1] MICHAEL M. Explosion effects and properties: part II - explosion effects in the water[J]. AD-A056694, 1978.
- [2] SNAY H G. The scaling of underwater explosion phenomena[J]. AD-271468, 1961.
- [3] 林 哲, 张世平. 露天矿水垫层装药结构爆破效果的研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(9):40-43.
- [3] LIN Zhe, ZHANG Shi-ping. Study on blasting effect of charge structure of open-pit mine water cushion [J]. Mining Research and Development, 2017, 37(9): 40-43. (in Chinese)
- [4] 林德余, 马万昌, 李 忠, 等. 岩石爆破中水垫层作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992(2):130-39.
- [4] LIN De-yu, MA Wan-chang, LI Zhong, et al. Research on the effects of bottom water cushion on long hole blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992(2): 130-39. (in Chinese)
- [5] 任少峰, 严鸿海, 张义平, 等. 某露天矿含水炮孔爆破危害效应控制试验研究[J]. 爆破, 2018, 35(3):55-59,79.
- [5] REN Shao-feng, YAN Hong-hai, ZHANG Yi-ping, et al. Experimental study on hazard control of water hole blasting in open-pit mine [J]. Blasting, 2018, 35(3): 55-59,9. (in Chinese)
- [6] 高保彬, 刘云鹏. 定向断裂爆破技术在软岩巷道中的应用[J]. 爆破, 2013, 30(3):54-57,111.
- [6] GAO Bao-lin, LIU Yun-peng. Application of directional fracture blasting technology in soft rock tunnel [J]. Blasting, 2013, 30(3):54-57,111. (in Chinese)