

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.003

## 深孔直眼掏槽爆破装药孔合理填塞长度研究\*

欧阳剑, 史秀志, 张宗国, 罗志华

(中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 在深孔直眼掏槽爆破中, 炮孔填塞长度是决定爆破效果优劣的重要影响因素, 过长或过短的填塞都会减弱掏槽爆破效果。为提高深孔直眼掏槽的爆破效果, 基于冲击波和爆生气体共同作用破岩理论, 通过分析装药孔填塞物冲出炮孔运动过程和岩石破碎所需时间关系, 得出直眼掏槽中合理填塞长度上下限值计算公式, 以此确定合理的填塞长度范围。进行三组模型试验, 分析试验产生爆破漏斗情况、爆堆质量和块度。试验结果表明: 模型试验中爆破效果最佳实验组的填塞值为 20 mm, 其值处于理论计算的合理填塞长度 19.86 mm 至 22.07 mm 区间, 验证了合理填塞长度范围的计算公式的合理性。针对过长填塞导致爆生气体过早从空孔的冲出的情况, 提出在深孔直眼掏槽爆破中对空孔上下两端进行适当的堵塞来减弱这种影响。

**关键词:** 直眼掏槽; 深孔; 填塞长度; 空孔; 模型试验

中图分类号: TD235

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)02-0016-07

## Reasonable Stemming Length of Charge Hole in Deep Borehole Parallel Cut

OUYANG Jian, SHI Xiu-zhi, ZHANG Zong-guo, LUO Zhi-hua

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In deep borehole parallel cut blasting, the length of the blast hole stemming is an important factor to determining the blasting effect. Too long or too short filling will weaken the cut blasting effect. In order to improve the blasting effect of deep borehole parallel cut blasting, based on the theory of rock fragmentation under the combined action of shock wave and explosion gas, by analyzing the relationship between the movement process of the stemming rushing out of the blast hole and the time required for rock fragmentation, the reasonable stemming in the cut is obtained. The calculation formula for the upper and lower limits of the length can determine the reasonable range of the stemming length. Three groups of model tests are carried out to analyze the blasting funnel, blasting pile quality and fragmentation produced by the test. The test shows that the stemming length of the experimental group with the best blasting effect in the model test is 20 mm, which is in the range of 19.86 mm to 22.07 mm of the reasonable stemming length calculated in theory. The reasonableness of the formula for calculating the reasonable stemming length range is verified. In view of the situation that the blasting gas passes through the empty hole due to the excessively long stemming, it is proposed to properly block the upper and lower ends of the empty hole in deep borehole parallel cut blasting to reduce this effect.

**Key words:** parallel cut; deep borehole; stemming length; empty hole; model test

收稿日期: 2022-01-04

作者简介: 欧阳剑(1997-), 男, 硕士研究生, 从事采矿与爆破方面的研究工作, (E-mail) j.ouyang@csu.edu.cn。

通讯作者: 史秀志(1966-), 男, 教授、博士生导师, 从事采矿与安全方面的研究与教学工作, (E-mail) baopo@csu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(51874350); 湖南省自然科学基金(2020JJ5743)

在深孔直眼掏槽爆破时, 是否存在空孔和炮孔堵塞质量都会直接影响最后形成爆堆的质量和块度。很多学者在空孔效应和炮孔堵塞效应方面做了大量研究<sup>[1-4]</sup>, 钟波波运用 RFPD-dynamic 软件探究

了两炮孔中间的空孔对动态裂纹的扩展方式的影响因素<sup>[5]</sup>。李启月运用 LS\_DYNA 对不同直径空孔在爆破时的动态破碎过程进行了模拟<sup>[6]</sup>, 并得到了直眼掏槽的应力分布规律。李延龙通过开展水炮泥堵塞模型试验<sup>[7]</sup>, 研究了单个炮孔中水炮泥堵塞作用机理及其在孔内的运动规律。郝亚飞通过不同堵塞长度的单自由面爆破试验<sup>[8]</sup>, 得出随着堵塞长度的增加爆破振动衰减指数呈上升趋势。王洋通过理论计算和数值模拟研究单个炮孔中平行双自由面的堵塞效应<sup>[9]</sup>。以上研究主要是对空孔效应以及单一炮孔的堵塞长度适配关系进行深入研究。而对于在有空孔情况下, 装药孔填塞长度对于深孔直眼掏槽爆破效果影响的研究较少。

通过空孔效应理论分析, 确定合理的装药孔与空孔间距、炸药最佳埋藏深度; 基于冲击波和爆生气体共同作用破岩机理, 确定合理的填塞物长度范围; 最后通过模型试验验证, 探究在深孔直眼掏槽中, 空孔存在时装药孔上部填塞物长度对爆破效果的影响。

## 1 炮孔填塞作用理论分析

### 1.1 空孔效应及炮孔堵塞机理

在直眼掏槽中, 空孔的存在会引起空孔附近岩石中应力场及邻近炮孔爆炸作用发生改变, 当应力波传递至空孔壁时发生反射, 反射回来的拉伸波反作用于已经产生径向破坏的岩石, 岩石产生环向拉伸破坏, 使岩石充分破碎。

炸药引爆后, 岩石在爆破冲击波和爆生气体共同作用下发生破碎。合理的堵塞长度能够增大爆炸冲击波的有效压力, 堵塞物受高压而冲出炮孔的这段时间, 相当于增加了爆生气体对岩石作用时间。此外还能为炸药充分反应提供了合适的反应环境, 提高了炸药的能量转化率, 并且能有效保持炮孔上部孔口完整性, 保护孔口。

### 1.2 填塞长度对爆破效果的影响

深孔直眼掏槽爆破时, 空孔通过提供自由面和补偿空间来提升爆破效果, 合理的填塞长度通过延长爆生气体对岩石的作用时间来提升爆破质量。但是在空孔存在时, 不合理填塞会起到相反的作用, 所以研究填塞长度与抵抗线的匹配关系对于岩石破碎有重要的作用。

填塞过短, 堵塞物过早冲出炮孔, 减少爆轰气体对岩石破碎的作用, 在孔口处产生大块, 使爆堆不均匀程度增加。填塞过长, 堵塞区域内的有效应力场随填塞长度明显衰减, 造成破碎区半径减小。爆生气体在装药孔产生, 穿过装药孔与空孔之间的贯通

裂纹, 从空孔冲出, 如图 1 所示, 降低了爆生气体在槽腔内的作用时间, 同时造成两孔连线处的岩石过度粉碎, 降低了爆破效果。

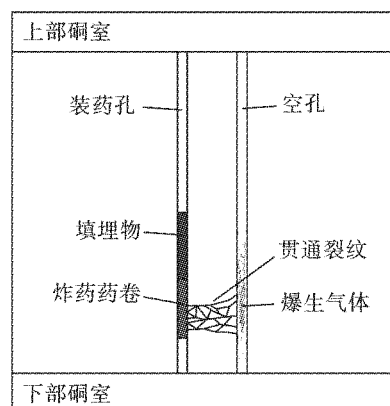


图 1 爆生气体经贯通裂隙和空孔冲出示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of blasting gas punching out through cracks and empty holes

## 2 填塞长度计算

### 2.1 最大可拉裂距离

在直眼装药爆破情况下, 炸药引爆后, 最大拉应力出现在装药孔与空孔之间的连线的孔壁处, 岩石发生拉伸破坏, 其破坏条件为炸药爆炸产生的应力波在空孔孔壁反射的拉应力高于岩石的动态抗拉强度, 其值可根据式(1)进行计算<sup>[10,11]</sup>

$$\sigma_{t \max} = (1 + 3\lambda) P_b \left( \frac{R_1}{S - R_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{t \max}$  为空孔孔壁处反射产生的最大拉应力, Pa;  $\lambda$  为侧应力系数, 泊松比  $\mu = \lambda / (\lambda + 1)$ ;  $P_b$  为作用于孔壁的初始压力, Pa;  $R_1, R_2$  分别为装药孔半径和空孔半径, mm;  $S$  为两孔中心之间的距离, mm;  $\alpha$  为爆炸应力波传播过程中的衰减系数  $\alpha = 2 - \mu / (1 - \mu)$ 。

采用岩石动态强度作为其破坏依据, 动态抗拉强度为

$$\sigma_{td} = \sigma_t \varepsilon_t^{1/3} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{td}$  为岩石动态抗拉强度;  $\sigma_t$  为岩石静态抗拉强度;  $\varepsilon_t$  为裂隙区加载应变率, 取  $10^2 \text{ s}^{-1}$ 。

作用于炮孔孔壁上的初始压力计算方法根据文献<sup>[12]</sup>可得下式

$$P_b = (\rho_e V_d^2 / 8) (r_c)^{2\gamma} \quad (3)$$

式中:  $P_b$  为孔壁初始压力, Pa;  $\rho_e$  为炸药密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $V_d$  为爆轰速度,  $\text{m/s}$ ;  $r_c$  为耦合比, 即炸药半径与炮孔半径之比,  $r_c = R_3 / R_1$ ;  $\gamma$  为炸药绝热膨胀常数, 一般取值为 1.5。

由此可以计算出能够发生拉伸破坏的两孔之间最大距离  $S$

$$S = R_2 + R_1 \left[ \frac{8\sigma_t \varepsilon_t^{1/3} R_1^3}{(1 + 3\lambda)\rho_e V_d^2 R_3^3} \right]^{-1/\alpha} \quad (4)$$

## 2.2 合理填塞长度

假设爆轰气体为理想气体,引爆后瞬间产生整个炮孔内的准静压场,作用与炮孔所有位置和方向,以近似刚体运动的状态分析填塞物冲出过程,整个作用时间非常短,以此确定合理填塞长度的范围。

### (1) 填塞物冲出炮孔所需时间

填塞物刚性运动在受到初始受力后做匀速运动,爆生气体在填塞物受力端产生的初始冲量  $I$  为

$$I = \pi R_1^2 P_b \frac{2L_d}{C_s} \quad (5)$$

式中:  $R_1$  为装药孔半径, mm;  $P_b$  为初始压力, Pa;  $L_d$  为填塞物长度, mm;  $C_s$  为填塞物中弹性波速度, m/s。

重力产生的冲量  $I_c$  和填塞物冲出时摩擦冲量  $I_f$  为

$$I_c = \rho_d \pi R_1^2 g \frac{2L_d^2}{C_s} \quad (6)$$

$$I_f = 2\pi R_1 L_d f \lambda P_b \frac{2L_d}{C_s} \quad (7)$$

式中:  $\rho_d$  为填塞物密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, 取 9.8 m/s<sup>2</sup>;  $f$  为填塞物与装药孔壁的摩擦系数;  $\lambda = \mu_d / (1 - \mu_d)$ ,  $\mu_d$  为动态泊松比, 一般取  $\mu_d = 0.8\mu$ 。

根据冲量定理, 速度  $V_0$  与冲量关系方程为

$$I - I_f - I_c = \rho_d \pi R_1^2 L_d V_0 \quad (8)$$

求得填塞物冲出炮孔时的速度  $V_0$  为

$$V_0 = \frac{2R_1 P_b - 4L_d f \lambda P_b - 2\rho_d R_1 L_d g}{\rho_d R_1 C_s} \quad (9)$$

则填塞物从炮孔内冲出需要的时间  $t_c$  为

$$t_c = \frac{L_h \rho_d R_1 C_s}{2(R_1 P_b - 2L_d f \lambda P_b - \rho_d R_1 L_d g)} \quad (10)$$

式中:  $L_h$  为一端炮孔内不装药长度, m。

### (2) 合理填塞长度计算

合理的填塞长度需要满足: 在填塞物冲出炮孔之前, 爆破槽腔内岩石已被破碎。为了尽可能利用爆生气体能量利用率, 应控制填塞物在冲出炮孔之前, 爆破槽腔与自由面之间已形成贯通裂隙。

#### a) 合理填塞长度下限值

槽腔内岩石破碎的时间  $t_{b1}$  为<sup>[13,14]</sup>

$$t_{b1} = \frac{2L_m}{C_p} + \frac{L_m}{C_r} \quad (11)$$

式中:  $L_m$  为药卷埋藏深度, m;  $C_p$ 、 $C_r$  分别为介质中的纵波速度和瑞利波速度, m/s。与式(10)联立有  $t_c = t_{b1}$ , 可得合理填塞长度的下限值, 解得

$$L_{d1} = \frac{R_1 P_b - \frac{L_h \rho_d R_1 C_s C_p C_r}{2L_m(2C_r + C_p)}}{2f\lambda P_b + \rho_d R_1 g} \quad (12)$$

#### b) 合理填塞长度上限值

贯通裂隙初始形成的时间  $t_{b2}$  为<sup>[15]</sup>

$$t_{b2} = \frac{2L_m}{C_p} + \frac{L_m}{C_0 \cos(\alpha/2)} \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  为岩石破碎角, °;  $C_0$  为裂隙扩展平均速度, m/s,  $C_0 \approx 0.1C_p$ ; 与式(10)联立有  $t_c = t_{b2}$ , 可得合理填塞长度的上限值, 解得

$$L_{d2} = \frac{R_1 P_b - \frac{L_h \rho_d R_1 C_s C_p \cos(\alpha/2)}{L_m[2\cos(\alpha/2) + 10]}}{2f\lambda P_b + \rho_d R_1 g} \quad (14)$$

则合理的填塞长度范围为  $L_{d1} \leq L_d \leq L_{d2}$ 。由于空孔的自由面效应, 空孔与装药孔之间距离可视为抵抗线长度。

## 3 模型试验

### 3.1 材料选取

混凝土试块骨料选用棒磨砂, 水泥选用 42.5# 普通硅酸盐水泥, 材料配比为水泥:棒磨砂:水 = 3:3:1, 质量浓度为 85%, 浇筑试验模型。模型制备完成后进行养护, 试块物理参数如表 1 所示。爆破材料包括电子雷管、起爆器, 雷管的线装药密度为 1 g/cm, 直径为 73 mm, 炸药长度为 3 cm, 爆速为 8300 m/s。

表 1 试块物理参数表

Table 1 Physical parameter table of test block

密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	横波波速/ (m · s <sup>-1</sup> )	纵波波速/ (m · s <sup>-1</sup> )	泊松比
2151	1.3 × 10 <sup>4</sup>	20.5	2.82	1546	2979	0.28

### 3.2 试验方案

设计试验围绕探究深孔直眼掏槽时上部填塞长

度对爆破效果的影响。掏槽爆破过程中空孔的布置方式一般呈对称分布, 依据对称试验方法, 在模型试

验时设置单个空孔, 设置合理的参数, 来达到多空孔 围绕掏槽时局部效果, 模型示意如图 2 所示。

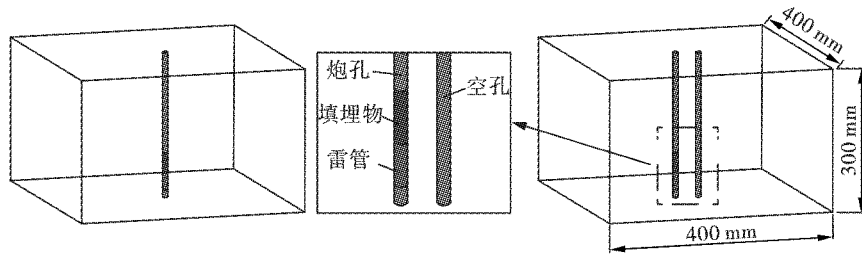


图 2 单双孔模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single and double hole model

设置单孔爆破漏斗模型试验进行对照, 其装药孔所有参数与双孔试验中的参数设置一致, 以此来对比分析双孔试验中填塞长度对爆破效果的影响作用, 同时通过模型试验验证空孔的存在有效提升爆破效果。

试验分三组进行, 每组依次进行单孔和双孔爆破试验, 空孔与装药孔相等, 装药情况双孔与单孔保持一致。三组实验分别设置不同的填塞长度, 最大填塞长度应设置为不超过药卷中心与自由面距离, 其余两组分别做不填塞和填塞长度为最大填塞长度二分之一的模型试验。

确定药卷合理埋藏深度<sup>[16]</sup>

$$W_j = \Delta_j E_s \sqrt[3]{Q} \quad (15)$$

式中:  $Q$  为药卷重量, kg;  $E_s$  为应变能系数,  $m/kg^{1/3}$ ;  $W_j$  为最佳深度;  $\Delta_j$  为最佳深度比, 由试验

测得。经过之前多次爆破漏斗试验求得  $\Delta_j = 0.48$ ,  $E_s = 1.13$ , 确定最佳埋深为 56 mm。药卷长度约为 30 mm, 故设置雷管底端距底部自由面 40 mm, 使药卷中心处于 55 mm 处。

代入炸药和混凝土试块参数, 计算出能够被拉裂破坏最远距离  $S = 132$  mm。在模型试验时选择两孔中心间距需要小于计算能够被拉裂的最远距离, 并且不大于抵抗线长度, 故在此次试验中选择两孔中心间距为 40 mm。

### 3.3 试验结果分析

模型爆破试验完成之后, 在混凝土试块底部炸药自由面可以观察到明显的爆破漏斗情况, 收集爆后产生爆堆碎块, 对其进行分析称重和筛分。如图 3 和图 4 分别为形成漏斗和爆堆情况。

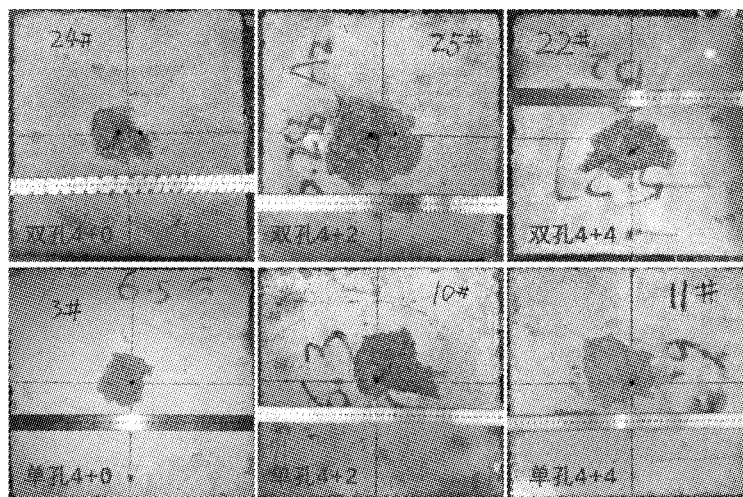


图 3 爆破后漏斗情况图

Fig. 3 Diagram of the funnel after blasting

#### (1) 爆破漏斗尺寸分析

对爆破后的地面漏斗口面积进行统计, 其漏斗面积大小及变化情况如图 5 所示。分析漏斗面积变化曲线可知, 在单孔实验中, 随着填塞长度的增加,

爆破漏斗半径呈增大的趋势, 但是继续增加填塞长度, 其漏斗面积没有太大变化。在有空孔存在时, 由图中可以明显看出, 填塞 2 cm 时的爆破漏斗面积远大于不填塞和填塞 4 cm 时的漏斗面积, 说明较为合

适的上部堵塞长度,存在于2 cm至4 cm之间,使产生最优的爆破效果。

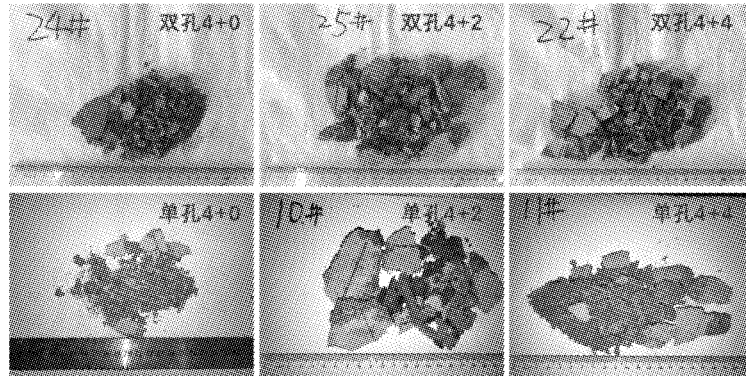


图4 爆破后爆堆情况图

Fig. 4 Diagram of blast pile after blasting

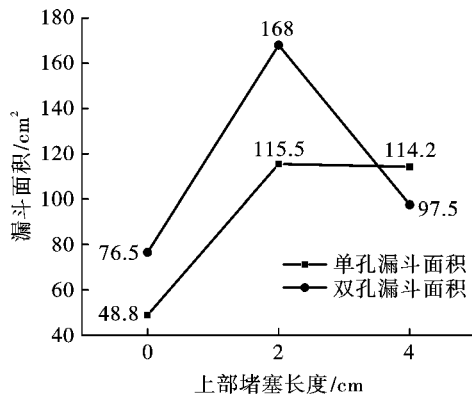


图5 漏斗面积变化曲线图

Fig. 5 Curve of funnel area change

(2) 爆堆质量分析

对试块炸下的爆堆称重,两组质量数据绘制成曲线呈现在图6中。从图中可以看出,单孔试验中爆堆质量随着堵塞长度的增加基本趋于稳定,而在有空孔时,同样梯度增加堵塞长度,爆堆质量呈现出先增后减的情况,爆堆质量的变化趋势同爆破漏斗面积变化趋势一致,在2 cm至4 cm中间存在着一

个上限值使产生最佳爆破质量。

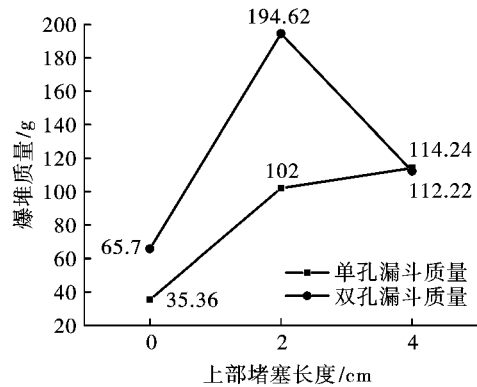


图6 漏斗质量变化曲线图

Fig. 6 Curve of funnel mass change

(3) 对爆堆块度分析

使用格筛对块度进行筛分统计,得到如表2所示结果。名称中“双4”表示双孔模型试验上部堵塞4 cm情况,“单4”表示单孔模型试验上部堵塞4 cm情况,以此类推。

表2 爆堆块度筛分统计表

Table 2 The sieving statistics of blast pile fragmentation

名称	爆堆块度不大于 X/mm 的岩石占比/%									
	31.5	25	20	16	10	5	2.5	1.25	0.63	0.315
双4	100.0	100.0	91.0	75.6	65.9	42.5	23.3	12.5	6.6	3.2
双2	86.7	77.5	59.7	44.8	30.8	14.0	6.4	3.3	1.6	0.7
双0	100.0	83.1	83.1	83.1	58.6	32.0	15.8	8.5	4.5	2.0
单4	100.0	100.0	100.0	79.4	75.7	47.4	26.6	12.7	6.3	2.9
单2	100.0	100.0	49.2	49.2	42.2	19.0	9.4	3.9	2.0	1.0
单0	100.0	100.0	100.0	100.0	80.6	51.6	27.7	13.1	7.1	3.9

采用 Rosion-Rammler 分布对爆破块度的分布进行描述<sup>[17]</sup>,其函数形式如下

$$y = 1 - e^{-(\frac{x}{x_c})^n} \quad (16)$$

式中:y 为累计筛分百分比;x<sub>c</sub> 为分布参数表示

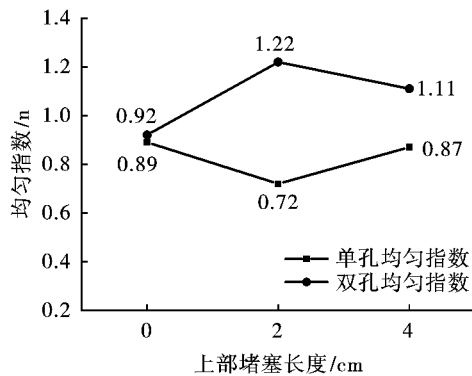
特征块度大小; $n$ 为拟合曲线形状指数,表示分布的均匀指数,较高的 $n$ 值表示更均匀的块度分布。通过使用python编程对统计数据拟合,得到六块混凝土试样爆后块度的分布结果如表3所示。

表3 块度分布拟合结果

Table 3 Fitting results of block size distribution

名称	均匀指数	特征块度/mm
单0	0.89	6.76
单2	0.72	37.79
单4	0.87	10.66
双0	0.92	10.85
双2	1.22	20.47
双4	1.11	9.77

分析拟合结果,均匀指数 $n$ 随抵抗线的变化如图7所示。

图7 均匀指数 $n$ 变化曲线图Fig. 7 Variation curve of uniformity index  $n$ 

爆堆质量整体较小,其中部分较大块的破碎试块会降低其均匀性,两组试验均在填塞物2 cm时出现了较大块度的破碎石块,使特征块度在此处出现了较为明显起伏趋势,在双孔模型试验中,特征块度表征的平均块度的变化情况随填塞长度而先增后减,能够证明在2 cm与4 cm之间存在最优的填塞长度使得得到较好的均匀程度。

### 3.4 验证分析

将模型试验中的相关参数代入推导的合理填塞长度计算公式中进行计算验证,计算得出在模型试验中的条件中,其合理的填塞长度下限值为19.86 mm,上限的计算值为22.07 mm。模型试验中选取20 mm填塞长度时对应的试验现象与理论计算结果吻合,证明了理论计算式的合理性。

无填塞时,一部分爆轰气体迅速从炮孔上部冲出,使这一部分能量流失。在之后的填塞试验中,填塞过大,又会造成爆轰气体从装药孔与导向空孔之间的裂隙冲出,填塞长度的过长与过短都会导致能

量的利用率降低。因此,在矿山进行深孔直眼掏槽时,应该选择合理的上部填塞长度,使产生最佳填塞效果。同时,为了防止装药孔填塞长度过长导致爆轰气体在装药孔产生后,穿过装药孔与空孔之间贯通裂隙,从空孔冲出而导致爆破效果不佳的情况发生,可以在实际过程中对空孔上下两头进行堵塞,尽量减少和减缓爆轰气体从空孔上下两端冲出,得到更好的爆破效果。

## 4 结论

(1)基于空孔效应和炮孔填塞机理,分析了深孔直眼掏槽时空孔的存在对于填塞长度的作用关系,当炮孔上部填塞长度过长,会使爆轰气体大部分作用于装药孔与空孔连线处已经被拉裂的裂缝中,造成爆轰气体从裂缝中过早冲出,减少其对自由面方向的作用时间和效果,减弱爆破效果。

(2)通过分析填塞物冲出时运动状态和岩石破碎所需时间关系,考虑满足气体充分发挥气楔作用的条件,给出确定抵抗线情况下合理填塞长度的上限值和下限值的求解计算式,并通过模型试验验证了其合理性。

(3)通过模型试验证明了在其他条件一致时,深孔直眼掏槽时空孔的存在,能够有效地提升爆破效果,其爆破漏斗大小、爆堆质量和破碎均匀程度均远优于无空孔情况下的爆破效果。

(4)针对过度填塞导致爆生气体穿过装药孔与空孔之间贯通裂隙,从空孔过早冲出的情况,在实际工程中可对空孔上下两端进行小范围堵塞来减缓爆轰气体的过早冲出,来减弱过度填塞降低爆破效果的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈秋宇,李海波,夏祥,等. 爆炸荷载下空孔效应的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2749-2755.
- [1] CHEN Qiu-yu, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Research and application of void effect under explosive load[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2749-2755. (in Chinese)
- [2] 张召冉,陈华义,矫伟刚,等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 791-800.
- [2] ZHANG Zhao-ran, CHEN Hua-yi, JIAO Wei-gang, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight hole cutting with empty-hole[J]. Journal of China

- Coal Society, 2020, 45(S2):791-800. (in Chinese)
- [3] 柴修伟, 李建国, 习本军, 等. 等体积空孔直眼掏槽槽腔形成过程及其分析[J]. 爆破, 2020, 37(4):48-52.
- [3] CHAI Xiu-wei, LI Jian-guo, XI Ben-jun, et al. Formation process and analysis of cavity by burn cut with equal volume empty hole[J]. *Blasting*, 2020, 37(4):48-52. (in Chinese)
- [4] 李志宏. 爆生气体作用下岩石裂纹扩展机理与数值模拟[D]. 西安:西安理工大学, 2006.
- [4] LI Zhi-hong. Rock crack propagation mechanism and numerical simulation under the action of explosive gas[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [5] 钟波波, 李宏, 张永彬. 爆炸荷载作用下岩石动态裂纹扩展的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(6):825-831.
- [5] ZHONG Bo-bo, LI Hong, ZHANG Yong-bin. Numerical simulation of dynamic crack propagation in rock under explosive load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6):825-831. (in Chinese)
- [6] 李启月, 徐敏, 范作鹏, 等. 直眼掏槽破岩过程模拟与空孔效应分析[J]. 爆破, 2011, 28(4):23-26.
- [6] LI Qi-yue, XU Min, FAN Zuo-peng, et al. Simulation of rock breaking process with straight cut and analysis of hole effect[J]. *Blasting*, 2011, 28(4):23-26. (in Chinese)
- [7] 李延龙, 史秀志, 刘博, 等. 水炮泥合理填塞长度的试验研究[J]. 爆破, 2015, 32(2):11-16, 38.
- [7] LI Yan-long, SHI Xiu-zhi, LIU Bo, et al. Experimental research on reasonable filling length of water cannon mud[J]. *Blasting*, 2015, 32(2):11-16, 38. (in Chinese)
- [8] 郝亚飞, 李海波, 刘恺德, 等. 单自由面爆破振动特征的炮孔堵塞长度效应[J]. 岩土力学, 2011, 32(10):3105-3110, 3142.
- [8] HAO Ya-fei, LI Hai-bo, LIU Kai-de, et al. Blast hole plugging length effect based on vibration characteristics of single free surface blasting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10):3105-3110, 3142. (in Chinese)
- [9] 王洋, 史秀志, 苟永刚, 等. 平行双自由面岩体爆破炮孔堵塞效应研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15):80-85.
- [9] WANG Yang, SHI Xiu-zhi, GOU Yong-gang, et al. Research on the blocking effect of blast holes in parallel double free-surface rock blasting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(15):80-85. (in Chinese)
- [10] 满轲, 刘晓丽. 周边空孔效应对爆破振速及围岩损伤的影响研究[J]. 工程力学, 2020, 37(11):127-134, 184.
- [10] MAN Ke, LIU Xiao-li. The effect of surrounding empty holes on the blasting velocity and damaged zones[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(11):127-134, 184. (in Chinese)
- [11] 林大能. 平巷掏槽爆破空孔尺寸效应及围岩频繁震动损伤累积特性研究[D]. 长沙:中南大学, 2006.
- [11] LIN Da-neng. Study on the size effect of the blast hole in the roadway cut and the cumulative characteristics of the surrounding rock frequent vibration damage[D]. Changsha:Central South University, 2006. (in Chinese)
- [12] YILMAZ O, UNLU T. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38:266-278.
- [13] 刘博. 水炮泥堵塞作用机理模型试验及应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [13] LIU Bo. Model test and application study on blocking mechanism of water cannon mud[D]. Changsha:Central South University, 2014. (in Chinese)
- [14] 梁瑞, 吕亚茹, 周文海, 等. 地下采场爆破炮孔堵塞效应及长度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5):1546-1554.
- [14] LIANG Rui, LV Ya-ru, ZHOU Wen-hai, et al. Study on blockage effect and the stem length in underground stope blasting[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(5):1546-1554. (in Chinese)
- [15] 李廷春, 刘洪强. 一次成井掏槽爆破炮孔合理封堵长度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3):384-389.
- [15] LI Ting-chun, LIU Hong-qiang. Research on reasonable plugging length of blast hole in one-time well-cut blasting[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(3):384-389. (in Chinese)
- [16] 李夕兵. 凿岩爆破工程[M]. 长沙:中南大学出版社, 2011.
- [17] J Aler, J Du Mouza, M Arnould. Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(2):125-139.