

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0214

岩石爆破破碎能耗随抵抗线的变化规律*

雷 振¹, 张智宇², 黄永辉³, 周继国², 白 莹⁴

(1. 贵州理工学院矿业工程学院, 贵州 贵阳 550003;

2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

3. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500;

4. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司实验中心, 云南 昆明 650051)

摘要: 针对爆炸荷载下岩体破碎块度和有用功能耗及能耗利用率问题, 运用断裂力学、分形基础理论分析和模型实验等方法, 对爆炸荷载下岩体破碎块度和能耗利用率随最小抵抗线的变化规律开展了系统的分析研究。研究表明: 在模型实验条件下, 破碎块度分形维数在 1.2~1.7 之间, 随最小抵抗线增大呈现较好的线性衰减趋势; 破碎能耗随最小抵抗线呈现先增加后降低的趋势, 爆炸能量利用率在 4.57%~12.51% 之间, 趋势与能耗值一致, 模型实验中能耗利用率存在最大值; 破碎块度与能耗利用率变化趋势相反, 说明在最小抵抗线变化过程中存在一个最佳值, 使得破碎块度和能耗利用率均处于最优状态, 模型实验中这一最佳值为 160 mm, 是装药直径的 26.7 倍。该研究结果可为提高爆炸能利用率理论分析及工程中降低大块率的设计和施工提供理论依据。

关键词: 破碎块度; 爆炸能; 能耗利用率; 分形维数

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

An investigation of energy consumption variation in rock blasting breaking with the resistance line

LEI Zhen¹, ZHANG Zhiyu², HUANG Yonghui³, ZHOU Jiguo², BAI Ying⁴

(1. Institute of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, Guizhou, China;

2. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;

4. Experimental Center, Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd. Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: The topics such as fragmentation degree, active energy consumption and energy consumption efficiency of rock mass under explosive load have attracted increasing attention in recent years. However, it is very difficult to conduct such research due to its instantaneity, high temperature and high pressure characteristics. Systematic analysis and research on broken blocks of rock mass and the variation of energy utilization under explosion load with the different minimum resistance lines have been carried out. Plain concrete material was used to construct the model and carry out the model experiment. Theory of energy consumption in fracture mechanics was used to calculate the crushing energy. The basic fractal theory was used to calculate and analyze the fragmentation distribution law. Research results indicate that: the fractal dimension of broken blocks is between 1.2 and 1.7, exhibiting a good linear attenuation trend with the increase of the minimum resistance line from

* 收稿日期: 2020-06-28; 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(52064025, 51664007)

第一作者: 雷 振(1975—), 男, 博士, 研究员, 52337741@qq.com

通信作者: 黄永辉(1981—), 男, 博士, 讲师, 8176309@qq.com

120 mm to 200 mm; the crushing energy consumption increases first and then decreases. More specifically, the crushing energy consumption is 440.0 J at 120 mm, and increases to the maximum of 1 106.5 J at 180 mm, and then decreases to 1 084.8 J at 200 mm. The explosive energy utilization rate is between 4.57% and 12.51% and the maximum value corresponds to the minimum resistance line of 180 mm, the variation trend is consistent with that of the energy consumption value. The trend of broken fragmentation and utilization rate of energy consumption is opposite. There is an optimum minimum resistance line, corresponding to the optimized fragmentation degree and energy consumption utilization rate, in the model experiment is 160 mm which is 26.7 times the diameter of the charge. The research results can provide a theoretical basis for improving the explosive energy utilization rate and guide the design and construction processes in future engineering applications.

Keywords: fragmentation; energy explosion; energy efficiency; fractal dimension

随着国民经济的高速发展,工程爆破技术在矿山开采、水电、道桥等工程中得以广泛应用。爆破破碎的主要原理是利用炸药爆炸瞬间的高温高压条件对周边岩体等介质产生破坏性的结果,破碎过程中作为能量唯一来源的爆炸能转化为岩土介质的破碎能、运动的动能、振动能、冲击波能、爆破噪声能等,其中仅破碎能为有效功。由于爆炸瞬间属于极端态,如何精准获得炸药爆炸破碎过程中的破碎能耗,提高有效功,是学术界公认的难题。

Whittles 等^[1]通过对岩石破碎特性进行实验研究与数值模拟,分析了应变率、冲击能、破碎度和破碎能效率之间的关系。Hamdi 等^[2]对石灰岩台阶爆破试验所获得的破碎岩块微观裂隙能耗与宏观断面能耗进行了计算,发现宏观破碎能可占理论爆炸能的 6%。Grady^[3]对动荷载下断裂处裂纹扩展的长度和尺寸进行了系统研究。Daryadel 等^[4]利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验设备研究了低速冲击荷载高应变率下玻璃的动态力学性能。杨仁树等^[5-6]、李清等^[7]利用分形理论和动焦散线实验等方法对爆破损伤破坏进行了研究,并对富铁矿爆破开展了实验研究,获得了破碎块度与分形维数之间的关系。吴亮等^[8]、冷振东等^[9]从爆破能量整体分布角度出发,对柱状药包临界埋深以下和侧向起爆条件下的爆破能量做功分布占比分别进行了计算。胡振中等^[10]、李祥龙等^[11]、甘德清等^[12]、武仁杰等^[13]、叶洲元等^[14]分别采用 SHPB 装置研究了冲击荷载下不同介质的动态力学特性和破碎能耗等。祝文化等^[15]运用分析理论研究了爆炸荷载下的岩体损伤破坏。于永江等^[16]通过试验对煤体爆堆块度分布进行了测试。工程爆破中最小抵抗线是影响爆破效果的关键因素之一,然而对于爆炸时不同抵抗线情况下破碎能耗变化规律方面的研究并不多见。

基于上述原因,本文中,采用断裂力学能耗理论和分析理论,在模型实验的基础上,围绕爆炸荷载下破碎区域岩石破碎能耗计算方法及不同抵抗线破碎能的变化规律开展研究,该研究对有效提高破碎效果,改善爆破块度等爆破理论和技术的应用具有实际意义。

1 爆破破碎能及利用率计算方法

炸药爆炸荷载下,岩石表现出应变率达到 10^4 及以上量级的动力学特性,产生了内部状态失稳现象,使岩体内部原有缺陷发生改变并产生新缺陷致使岩石发生破坏。岩石受爆轰能量作用产生破坏损伤是一个能量耗散与释放的超动态反应过程,该过程中炸药内能瞬间释放产生的冲击波与爆轰气体作用于岩石,其内能急剧升高偏离初始平衡状态而发生状态失稳,致使能量发生不可逆的耗散与释放。

在 Rittinger 断裂力学中,岩石破碎功耗与破碎过程中岩石新增面积成正比,根据 Rittinger 理论导出岩石在破碎过程中产生的新断面能耗^[17]:

$$E_v = 2K_{IC}^2 A_b / E \quad (1)$$

式中: E_v 为岩石产生新断面所需功耗,即炸药用于岩石破碎的能量, J; K_{IC} 为岩石的断裂韧性系数, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; A_b 为岩石破裂过程中新增表面积, m^2 ; E 为岩石的弹性模量, GPa。

破碎块度是对破碎能量的宏观体现,不同的岩石块度具有不同大小的新生表面积,根据 Rittinger 理论,岩石破碎块度与破碎能量之间可通过具体的数学计算模型来换算。假设岩块数量若干,且 $f(x)$ 为爆

破关于岩石块度 x 的累计质量概率密度函数, 将岩块视作块度大小为 x 的正方体, 则全部岩石的表面积可表示为:

$$A = 6 \int_0^{\infty} \frac{Vf(x)}{\rho x} dx \quad (2)$$

式中: V 为破碎岩块总体积, m^3 ; ρ 为破碎岩块密度, kg/m^3 。

若关于块度的质量概率密度函数是不连续的, 可以将岩石块度进行分级, 将岩石块度分为 n 个等级, 分别为 $0 \sim x_1$ 、 $x_1 \sim x_2$ 、 $x_2 \sim x_3$ 、 \dots 、 $x_{i-1} \sim x_i$ 、 \dots 、 $x_{n-1} \sim x_n$, 则各级岩块质量概率密度 P_i 可表示为:

$$P_i = y_i - y_{i-1} \quad (3)$$

式中: y_i 、 y_{i-1} 分别为尺寸小于 x_i 、 x_{i-1} 的岩块累计质量占比, %。

利用各级岩块中间块度 $(x_{i-1} + x_i)/2$ 作为各级岩块块度值, 则各级岩石的表面积可表示为:

$$A_i = \frac{12V}{\rho} \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (4)$$

所有破碎岩块的表面积为:

$$A = \frac{12V}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (5)$$

假设 A_a 为岩石原表面积, A_b 通过爆破后台阶轮廓得到, 则岩石新生表面积为:

$$A_b = A - A_a \quad (6)$$

通过式 (1)、式 (5) 和式 (6) 可以得到岩石破碎能量 (不含破碎岩块内部裂隙所消耗的能量) 计算方法:

$$E_v = 2K_{IC}^2 \left(\frac{12V}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} - A_a \right) / E \quad (7)$$

根据式 (7) 可获得炸药岩石产生宏观断裂所需的能量, 岩块块度分布规律通过累计质量占比体现, 选用具体的概率密度函数可对岩块累计质量占比进行描述, 岩块块度分布规律确定后, 便可获得台阶爆破岩石破碎能量。该方法依据 Rittinger 理论, 利用破碎块度-新生表面-破碎能量三者的相互关系, 确定破碎块度分布规律-破碎能量的内在关系, 得到破碎能量, 对岩石断裂破碎的宏观体现进行量化。破碎能利用率计算公式为:

$$\eta = E_v / E_t \quad (8)$$

式中: E_t 为炸药总化学能, $E_t = SQ$, J , S 为炸药的做功能力, J/kg , Q 为炸药量。

单位体积所消耗的能量反映了岩石破碎过程的能耗程度与岩石破碎程度, 岩石破碎能耗密度计算公式为:

$$e = E_v / V \quad (9)$$

2 模型实验方案与基础力学测试

2.1 实验方案

模型实验以研究台阶爆破过程中破碎能耗随最小抵抗线的变化规律为目的, 因此前提条件假定为: 炮孔直径、装药量、装药长度、浇筑模型的材料配比和强度均不变。尽量保证实验工艺精细化, 每组实验浇筑 3 个模型, 统计结果取平均值, 以减小实验过程中的人为误差。最小抵抗线选取 120、140、160、180 和 200 mm 共 5 种情况进行模型实验。

浇筑模型采用普通硅酸盐水泥作为模型胶结材料, 选用粒径 0.35~0.50 mm 的石英砂作为模型骨料, 材料配比中水泥、石英砂、水的质量比为 1:5:1。根据 M.B.基尔比契夫建立的相似第三定理: 对于同一类物理现象, 如果单值量相似, 而且由单值量所构成的相似准则在数值上相等, 则现象相似。几

何和边界条件均满足单值条件, 在爆破模型实验中, 尺寸和边界条件均需满足非最小抵抗线面无裂纹和破坏现象, 通过实验结果分析, 确定炮孔至非最小抵抗线方向的距离不小于最小抵抗线的 1.5 倍时, 满足定理要求, 模型的长、宽、高分别为 600、600、650 mm, 炮孔直径为 10 mm。此外, 为减小实验误差, 每种最小抵抗线浇筑的模型数量超过 3 个, 确保在排除明显误差数据后, 还可以拥有足够的的数据; 模型采用一次性浇筑, 保证制作过程中模型材料力学性能一致。待模型制作完成且湿养 7 d, 并在自然环境下养护 28 d 后再开展实验。浇筑的实验模型如图 1 所示。

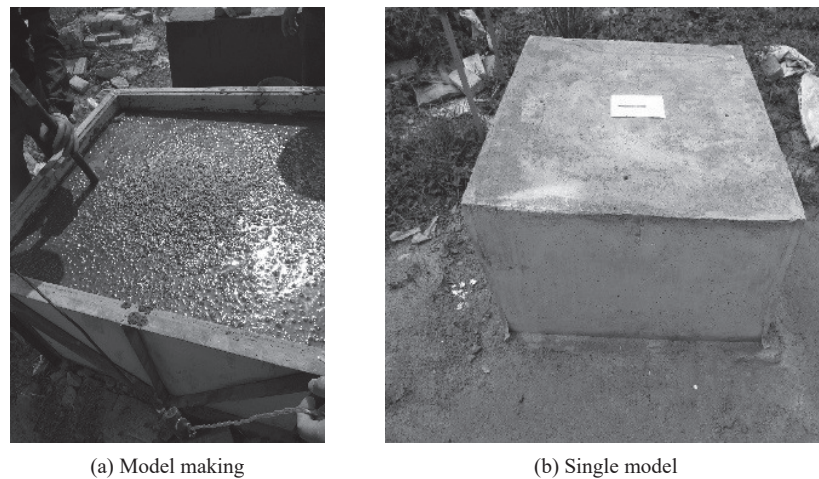


图 1 实验模型

Fig. 1 Experimental model

2.2 模型制作及材料性能测试

浇筑 15 个尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm、与模型材料配比、保养过程完全一致的试件进行基础力学性能测试, 测试过程如图 2 所示。材料的密度、纵波波速、单轴抗压强度、泊松比等主要物理力学参数的测试结果如表 1 所示。

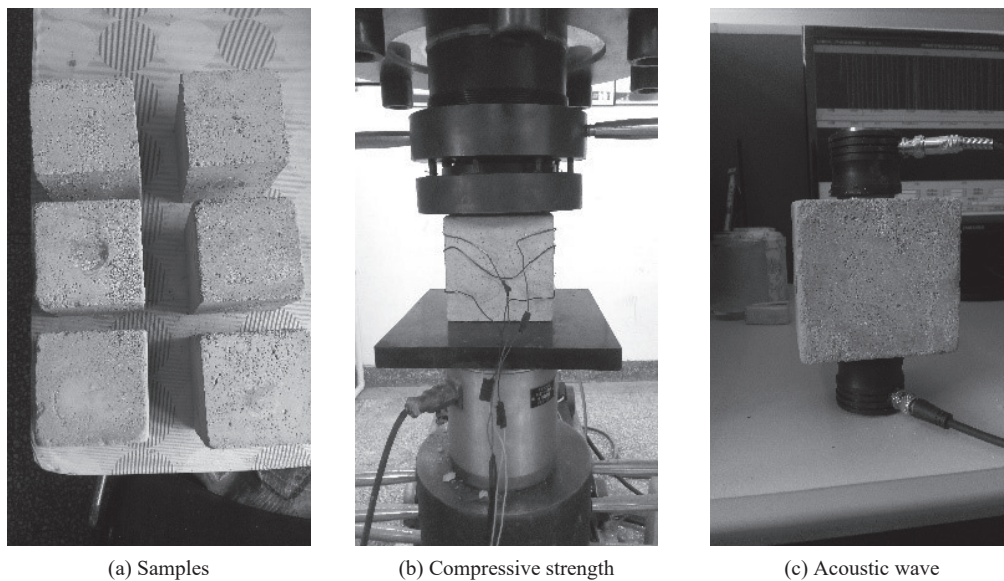


图 2 标准试件物理力学参数测试

Fig. 2 Measurements of physical and mechanical properties of standard samples

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纵波波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	泊松比	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂韧性/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
1 850	2 326	0.235	8.38	10.02	1.50

2.3 爆破参数

模型实验选在云南民爆集团安宁化工厂的实验场地进行,在浇筑模型时预留炮孔,孔深由装药长度、雷管长度和填塞长度 3 部分构成,其中雷管长 65 mm,装药长度 40 mm,填塞长度等于最小抵抗线;工业炸药采用药芯为黑索金的导爆索,导爆索每米装药量 25 g,炸药性能参数如表 2 所示。模型养护后进行反向装药爆破实验,雷管选用 8#瞬发电雷管,猛炸药量 0.58 g,爆破参数如表 3 所示。

表 2 炸药性能

Table 2 Explosive performance

炸药类别	线密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	爆热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	爆力/mL	爆速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
黑索金	0.025	5 600	480	8 300

表 3 爆破参数

Table 3 Parameters of blasting

编号	孔深/mm	药卷直径/mm	药量/g	装药长度/mm	单耗/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	最小抵抗线/mm
1	225				0.49	120
2	245				0.33	140
3	265	6	1.58	40	0.24	160
4	285				0.17	180
5	305				0.13	200

3 爆破破碎块度及能耗分析

3.1 破碎块度随抵抗线变化规律

为了精准获得爆破破碎岩块原表面积和破碎块度分布统计,模型浇筑之后在炮孔自由面上绘制 50 mm×50 mm 网格,爆破后可根据破碎区域包含的网格数量读出爆破轮廓区域的面积,该面积即为破碎岩块原表面积,为尽量减少实验误差,每种抵抗线情况下开展 3 次爆破实验,统计结果取平均值。以 120 mm 抵抗线为例,爆破区域轮廓如图 3 所示。

爆破破碎块度采用分形理论和方法,结合爆后实际情况,按照 0~50 mm、50~70 mm、70~90 mm、90~110 mm、110~130 mm 和

130~150 mm 这 5 种情况进行统计,抵抗线为 120 mm 的块度分布如图 4 所示。不同抵抗线下不同尺寸块度的累计占比统计结果如表 4 所示,爆堆质量(M)随最小抵抗线(W)的变化规律如图 5 所示。

实验统计结果表明:最小抵抗线在 200 mm 以内时,爆堆质量随最小抵抗线增大而逐渐增大。最小抵抗线在 120~180 mm 时,爆堆质量呈线性增大趋势;当抵抗线达到 180 mm 以后增速下降,爆堆质量增大并不明显。究其原因,最小抵抗线增大,炮孔最小抵抗线方向岩石厚度增大,因而爆破之后爆堆质量



图 3 爆破后轮廓

Fig. 3 Outline after blasting

增大, 当抵抗线达到 180 mm 以后爆堆质量未明显增大, 说明此时炮孔径向约束作用较强, 炸药能量对于岩石的崩落基本达到极限。

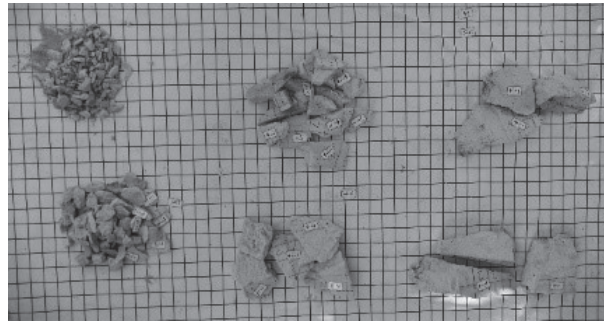


图 4 块度分布

Fig. 4 Distribution of fragmented rocks in blasting

表 4 岩块累计质量占比

Table 4 Cumulative mass ratio of rock blocks

抵抗线/mm	爆堆质量/kg	不同尺寸破碎块体长度分布占比					
		<50 mm	<70 mm	<90 mm	<110 mm	<130 mm	<150 mm
120	20.60	0.17	0.39	0.51	0.62	0.79	1
140	28.90	0.13	0.30	0.48	0.59	0.78	1
160	42.04	0.14	0.29	0.46	0.58	0.77	1
180	55.39	0.13	0.31	0.45	0.57	0.77	1
200	57.66	0.10	0.25	0.35	0.55	0.75	1

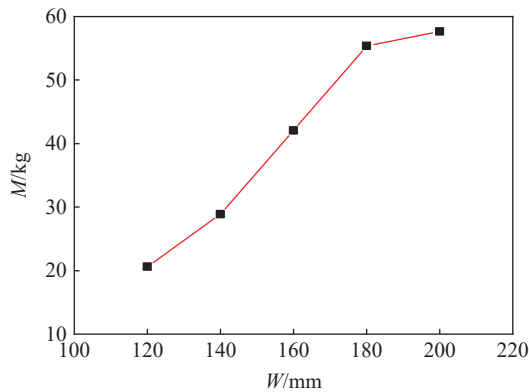


图 5 爆堆质量(M)随最小抵抗线(W)变化关系

Fig. 5 Variation of mass with minimum resistance line

3.2 爆破块度分形维数

根据不同模型爆堆块度分级结果可以看出, 各爆堆岩块尺寸均在 150 mm 以下。当药量相同、不同最小抵抗线爆破时, 岩块尺寸分布差异较大; 当最小抵抗线越小时, 小尺寸岩块数量越多并且分布较均匀; 随着最小抵抗线的增大, 破碎岩块块度逐渐增大, 岩石破碎效果越来越差; 当最小抵抗线增大到 200 mm 时, 大于 90 mm 的岩块比例达到 70% 以上。采用岩石力学实验研究的分形计算方法, 以岩块累计质量占比与特征尺寸关系进行岩块分形的统计, 岩块累计质量占比计算公式为^[18]:

$$y_i = \left(\frac{x_i}{x_m} \right)^{3-D} \quad (10)$$

式中: y_i 为特征尺寸小于或等于 x_i 的岩块累计质量占比, x_i 为破碎岩块特征尺寸, x_m 为最大破碎岩块的特征尺寸, D 为分形维数。将式 (10) 进行对数变化:

$$\ln y_i = (3 - D) \ln \left(\frac{x_i}{x_m} \right) \quad (11)$$

根据表 4 中的实验统计结果, 由不同尺寸岩块占比得到岩块累计质量占比, 运用最小二乘法对式 (11) 进行线性拟合, 拟合结果如图 6 所示。根据拟合图像, 可知相关性系数达到 0.96 以上, 表明选用分形维数对爆破破碎块度进行描述具有较高的可行性, 能够准确反映最小抵抗线不同时破碎块度分布的变化规律, 拟合结果得到了各模型爆破块度分布规律函数, 如表 5 所示。

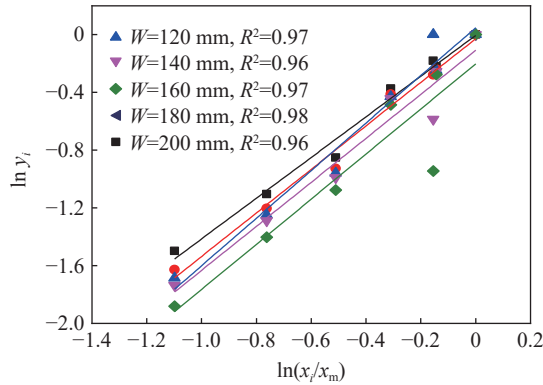


图 6 线性拟合曲线

Fig. 6 Linear fitting curves

拟合结果表明分形维数跟最小抵抗线近似呈线性关系, 如图 7 所示。运用分形理论对实验结果的研究表明。

(1) 当药量不变、最小抵抗线变化时, 不同模型的破碎块度分形维数各不相同, 介于 1.28~1.62 之间, 随最小抵抗线增大呈现近似线性降低趋势, 当最小抵抗线增大至 200 mm 时, 岩块分形维数达到 1.3 以下; 而当最小抵抗线缩小到 120 mm 时, 分形维数增大至 1.6 以上。分形维数越大, 岩石爆炸损伤过程中裂纹群充分发育, 产生较多的碎块, 被破碎概率更高, 爆破后小块度岩石质量占比越大, 破碎效果更优。

(2) 当装药量不变、最小抵抗线增大时, 实际炸药单耗会逐渐降低, 炸药能量对于岩石的作用效果会变得分散; 当最小抵抗线继续增大时, 岩石破碎效果会进一步下降; 当最小抵抗线增大至某一临界值时, 在炸药能量作用下最小抵抗线方向的介质可产生崩落, 但崩落岩石自身难以产生断裂破碎; 当最小抵抗线超过该临界值时, 岩石不会产生有效崩落。

3.3 破碎能耗随抵抗线变化规律

为了获得岩石破碎能耗, 统计得到不同模型破碎岩块的质量、原表面积、总表面积和新增表面积, 分别计算得到不同抵抗线模型实验的爆破破碎能、破碎能耗密度及破碎能利用率, 结果如表 6 所示。

3.3.1 破碎能耗与能耗密度

根据表 6 中的模型实验统计数据 and 计算结果, 获得了同一批实验中破碎能耗 (E_b) 和能耗密度 (e) 随最小抵抗线的变化规律, 如图 8 所示。破碎总能耗方面, 在爆破总药量不变的情况下, 随着最小抵抗线

表 5 拟合函数

Table 5 Fitting function

抵抗线/mm	拟合函数	D	R^2
120	$\ln y_i = 1.38 \ln(x_i/12)$	1.62	0.97
140	$\ln y_i = 1.49 \ln(x_i/12)$	1.51	0.96
160	$\ln y_i = 1.55 \ln(x_i/12)$	1.45	0.97
180	$\ln y_i = 1.59 \ln(x_i/12)$	1.41	0.98
200	$\ln y_i = 1.72 \ln(x_i/12)$	1.28	0.96

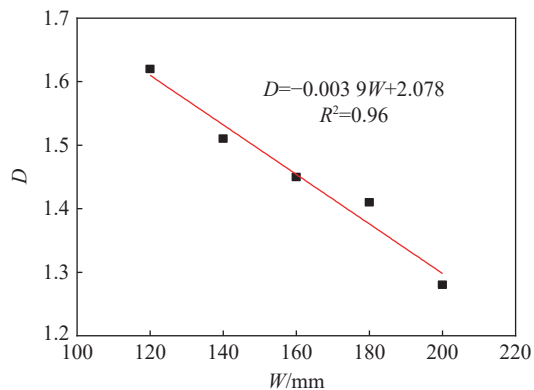


图 7 分形维数随最小抵抗线变化关系

Fig. 7 Variation of fractal dimension with minimum resistance line

长度的增大, 破碎能呈现逐渐增大最后又减小的趋势, 最小抵抗线为 120 mm 时, 破碎能耗为 440.0 J, 最小抵抗线达到 180 mm 时, 破碎能达到 1 106.5 J, 呈现最大值, 在此之后破碎能开始出现降低趋势。

表 6 破碎能分布参数

Table 6 Parameter of fragmentation energy

抵抗线/ mm	破碎质量/ kg	原表面积/ m ²	岩块表面积/ m ²	新增表面积/ m ²	破碎能/ J	破碎体积/ (10 ⁻³ m ³)	破碎能耗密度/ (kJ·m ⁻³)	破碎能利用率/ %
120	20.60	0.15	1.13	0.98	440.0	11.13	39.51	4.97
140	28.90	0.19	1.50	1.31	589.5	15.62	37.73	6.66
160	42.04	0.24	2.13	1.89	848.7	22.72	37.35	9.59
180	55.39	0.29	2.75	2.46	1 106.5	29.94	36.96	12.51
200	57.66	0.30	2.71	2.42	1 084.8	31.16	34.80	12.26

能耗密度方面, 随着最小抵抗线的增大, 能耗密度的变化趋势与破碎能相反, 呈现一直下降趋势, 由最大值 39.51 kJ/m³ 一直衰减到 34.80 kJ/m³, 其中两端衰减趋势明显, 当最小抵抗线介于 140~180 mm 时衰减趋势较缓。当最小抵抗线达到较大值时, 炸药能量对于岩石的破碎作用会变得分散, 单位体积岩石所受的炸药能量会逐渐降低, 可以预测当最小抵抗线继续增大时, 岩石破碎能密度会进一步降低。当最小抵抗线大到不合理时, 破碎能密度会降低到极小, 岩石难以获得有效破碎。

能耗利用率方面, 实验用于使岩石产生宏观断裂破碎的能量占炸药比例介于 5.0%~12.6% 之间, 当最小抵抗线为 180 mm 时, 能耗利用率最大值为 12.51%, 由于炸药量不变, 爆炸时产生的爆炸能不变, 随着最小抵抗线的增大, 破碎能耗利用率与破碎能耗变化规律一致。

3.3.2 破碎能耗密度与破碎块度分形维数

3.2 节研究表明, 分形维数越大, 岩块分布呈现为小尺寸岩块质量占比越大, 因而, 结合破碎能耗-尺寸关系可知, 分形维数会受到岩石破碎能耗密度变化的影响。图 9 展示了破碎能耗密度与分形维数的相互关系。分形维数与破碎能耗密度变化趋势基本一致, 随着最小抵抗线增大均表现出下降的趋势, 其中两端下降趋势明显, 中间部分下降趋势较缓, 说明破碎能耗密度越大, 炸药能量对于岩石的破碎作用更加集中, 破碎效果更优, 破碎岩块分形维数越大, 岩石破碎块度越合理, 岩块分形维数的变化由破碎能耗密度导致。

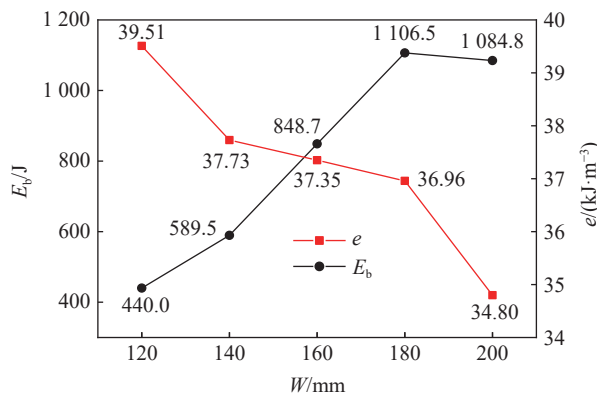


图 8 破碎能耗和能耗密度的变化规律

Fig. 8 Variations of fracture energy and energy density with minimum resistance line

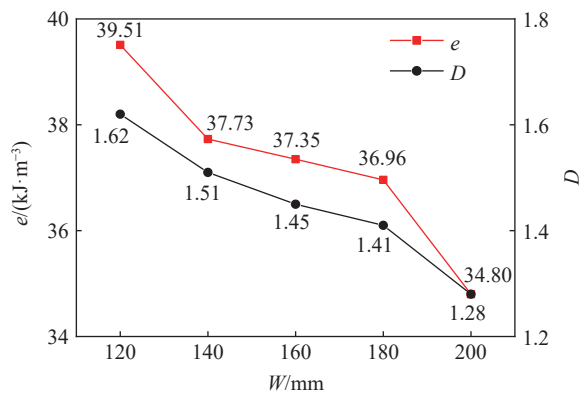


图 9 破碎能耗密度 e 和分形维数 D 的变化规律

Fig. 9 Variations of fracture energy (e) density and fractal dimension (D) with minimum resistance line

3.3.3 破碎块度和能耗利用率最优化

由图 8 可知, 在最小抵抗线为 160 mm 时, 破碎能耗和破碎块度均处于中间状态, 可通过增加最小抵抗线, 增加破碎能耗密度提高破碎效果, 也可以通过提高最小抵抗线增加破碎能耗利用率。模型实验结

果显示破碎能耗密度与分形维数随最小抵抗线增大变化趋势一致,两者共同决定了破碎块度;破碎总能耗与能耗利用率两者趋势同样一致,但是却直接反映了炸药爆炸过程中爆炸能转化为有用功的能量部分。由此可以确定在满足块度要求的前提下,通过改变最小抵抗线可以获得最大破碎能。

4 结 论

通过基础理论分析和大量的模型实验获得了炮孔内炸药爆炸荷载下破碎块体分布及破碎能随着最小抵抗线的变化规律。

(1)运用分形理论,获得了模型实验中最小抵抗线由120 mm增大至200 mm的过程中,分形维数在1.28~1.62范围内,随最小抵抗线增大近似呈线性下降趋势。

(2)随着最小抵抗线的增大,破碎区域整体能耗由开始的440.0 J增加到最小抵抗线180 mm时的最大值(1 106.5 J),增加了近2.5倍,之后呈现下降趋势;爆炸能量利用率在4.57%~12.51%之间,变化趋势跟破碎能耗基本一致,而破碎能耗密度随最小抵抗线增大则呈现一直下降的趋势,与分形维数变化规律相似。

(3)实际工程中可根据具体破碎块度需要,在孔径与装药量一定的前提下,通过破碎区能耗、能耗利用率和破碎能耗密度、分形维数变化规律的不同,确定最佳最小抵抗线长度,本实验条件下破碎块度和能耗利用率交叉点在最小抵抗线为160 mm时,可根据能耗利用或破碎块度需要进行调整。

工程爆破中在满足破碎块度需求的前提下,如何确定能耗的占比和提高破碎能有用功一直是难题,本文中仅研究了最小抵抗线的影响规律,未考虑其他影响因素。最小抵抗线和其他爆破参数以及岩石介质性质等多因素共同影响时的变化规律待进一步研究。

参考文献:

- [1] WHITTLES D N, KINGMAN S, LOWNDES I, et al. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(14): 1418–1429. DOI: 10.1016/j.mineng.2006.02.004.
- [2] HAMDI E, DU MOUZA J, FLEURISSON J A. Evaluation of the part of blasting energy used for rock mass fragmentation [J]. *Fragblast*, 2001, 5(3): 180–193. DOI: 10.1076/frag.5.3.180.7386.
- [3] GRADY D E. Length scales and size distributions in dynamic fragmentation [J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 163(1–2): 85–99. DOI: 10.1007/s10704-009-9418-4.
- [4] DARYADEL S S, MANTENA P R, KIM K, et al. Dynamic response of glass under low-velocity impact and high strain-rate SHPB compression loading [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, 432: 432–439. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2015.10.043.
- [5] 杨仁树, 许鹏. 爆炸作用下介质损伤破坏的分形研究 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(12): 3065–3071. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0107.
YANG R S, XU P. Fractal study of media damage under blasting loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12): 3065–3071. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0107.
- [6] 杨仁树, 李炜煜, 杨国梁, 等. 炸药类型对富铁矿爆破效果影响的试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(6): 065201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0396.
YANG R S, LI W Y, YANG G L, et al. Experimental study on the blasting effects of rich-iron ore with different explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 065201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0396.
- [7] 李清, 王平虎, 杨仁树, 等. 切槽孔爆破动态力学特征的动焦散线实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 413–418. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0413-06.
LI Q, WANG P H, YANG R S, et al. Experimental investigation on dynamic mechanical behaviors of cracks induced by V-notch borehole blasting with dynamic caustics [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 413–418. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0413-06.
- [8] 吴亮, 卢文波, 宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(5): 735–739. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2006.05.010.
WU L, LU W B, ZONG Q. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock [J]. *Rock and Soil*

- [Mechanics](#), 2006, 27(5): 735–739. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2006.05.010.
- [9] 冷振东, 卢文波, 范勇, 等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响 [J]. [爆炸与冲击](#), 2017, 37(4): 661–669. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0661-09.
LENG Z D, LU W B, FAN Y, et al. Explosion energy distribution by side initiation and its effects on rock fragmentation [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2017, 37(4): 661–669. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0661-09.
- [10] 胡振中, 庄亚明, 蔡天意, 等. 单颗粒煤岩冲击破碎能耗与粒度分布特性试验研究 [J]. [煤炭学报](#), 2015, 40(S1): 230–234. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1179.
HU Z Z, ZHUANG Y M, CAI T Y, et al. Experimental study on energy consumption and particle size distribution of single particle coal under impact crushing [J]. [Journal of China Coal Society](#), 2015, 40(S1): 230–234. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1179.
- [11] 李祥龙, 王建国, 张智宇, 等. 应变率及节理倾角对岩石模拟材料动力特性的影响 [J]. [爆炸与冲击](#), 2016, 36(4): 483–490. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0483-08.
LI X L, WANG J G, ZHANG Z Y, et al. Experimental study for effects of strain rates and joint angles on dynamic responses of simulated rock materials [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2016, 36(4): 483–490. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0483-08.
- [12] 甘德清, 刘志义, 李占金, 等. 冲击载荷作用下磁铁矿石破碎能耗特征 [J]. [岩石力学与工程学报](#), 2018, 37(S1): 3500–3506. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1150.
GAN D Q, LIU Z Y, LI Z J, et al. Broken energy dissipation characteristics of magnetite under impact loads [J]. [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2018, 37(S1): 3500–3506. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1150.
- [13] 武仁杰, 李海波, 李晓锋, 等. 冲击载荷作用下层状岩石破碎能耗及块度特征 [J]. [煤炭学报](#), 2020, 45(3): 1053–1060. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0266.
WU R J, LI H B, LI X F, et al. Broken energy dissipation and fragmentation characteristics of layered rock under impact loading [J]. [Journal of China Coal Society](#), 2020, 45(3): 1053–1060. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0266.
- [14] 叶渊元, 李夕兵, 万国香, 等. 受三维静载压缩岩石对冲击能的吸收效应 [J]. [爆炸与冲击](#), 2009, 29(4): 419–424. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0419-06.
YE Z Y, LI X B, WAN G X, et al. Impact energy-absorption property of rock under tri-axial compression [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2009, 29(4): 419–424. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0419-06.
- [15] 祝文化, 明锋, 宋成梓. 爆破荷载作用下岩体损伤破坏的分形研究 [J]. [岩土力学](#), 2011, 32(10): 3131–3135. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.10.040.
ZHU W H, MING F, SONG C Z. Fractal study of rock damage under blasting loading [J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2011, 32(10): 3131–3135. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.10.040.
- [16] 于永江, 王来贵, 何峰. 煤体爆堆块度分布的测试 [J]. [煤炭学报](#), 2005, 30(3): 337–339. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2005.03.015.
YU Y J, WANG L G, HE F. The fragmentation distribution testing of rock blasting [J]. [Journal of China Coal Society](#), 2005, 30(3): 337–339. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2005.03.015.
- [17] BAO R H, ZHANG L C, YAO Q Y et al. Estimating the peak indentation force of the edge chipping of rocks using single point-attack pick [J]. [Rock Mechanics and Rock Engineering](#), 2011, 44(3): 339–347. DOI: 10.1007/s00603-010-0133-2.
- [18] 许金龙, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析 [J]. [岩土力学](#), 2012, 33(11): 3225–3229.
XU J Y, LIU S. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2012, 33(11): 3225–3229.

(责任编辑 蔡国艳)