

不同填塞材料对爆生裂纹分形特征及岩石损伤影响研究

石彬 陈辉 张兴航 李仕超

新疆大学地质与矿业工程学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830047

摘要: 为探讨不同填塞材料对爆破裂纹扩展特征及岩石损伤程度的影响, 采用岩石试件相似爆破试验, 在相同装药量和填塞长度条件下, 分别以钻屑、黏土和水为填塞介质进行对比研究。通过裂纹图像二值化处理, 运用盒计数法计算爆生裂纹网络分形维数, 并结合连续损伤理论分析分形维数与损伤变量之间的关系。结果表明: 不同填塞材料对爆破能量传递效率具有显著影响, 水填塞条件下裂纹发育最充分, 其分形维数最大(1.24655), 黏土次之(1.20302), 钻屑最小(1.16207)。分形维数随填塞介质致密性与不可压缩性增强而增大, 可有效表征岩石损伤程度。

关键词: 爆破裂纹; 填塞材料; 分形维数; 岩石损伤

Study on the Influence of Different Stemming Materials on Fractal Characteristics of Blasting Cracks and Rock Damage

Shi Bin, Chen Hui, Zhang Xinghang, Li Shichao

School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, China Xinjiang Urumqi 830047

Abstract: To investigate the influence of different stemming materials on the propagation characteristics of blasting cracks and the degree of rock damage, comparative blasting experiments were carried out on rock-like specimens under the same charge weight and stemming length. Drill cuttings, clay and water were used as stemming media respectively. After binary processing of crack images, the box-counting method was adopted to calculate the fractal dimension of the blasting-induced crack network. Combined with the continuum damage theory, the relationship between fractal dimension and damage variable was analyzed. The results show that different stemming materials have a significant effect on the energy transfer efficiency of blasting. Crack propagation is the most sufficient under water stemming, with the largest fractal dimension (1.24655), followed by clay (1.20302) and drill cuttings (1.16207). The fractal dimension increases with the improvement of compactness and incompressibility of the stemming media, which can effectively characterize the degree of rock damage.

Keywords: Blasting crack; Stemming material; Fractal dimension; Rock damage

0 引言

炮孔填塞是露天爆破设计中的关键参数, 直接影响爆破能量利用率及岩体破碎效果。研究表明, 填塞材料和结构对爆轰气体作用时间及能量耦合效率具有显著影响^[1,2]。黏土因塑性好、渗透性低, 可形成致密封堵层, 提高能量利用率^[3]; 钻屑孔隙率高, 易造成气体泄散^[4]。近年来, 水填塞因其近似不可压缩性, 在冲击波传递和裂纹扩展方面表现出良好效果^[5]。不同填塞介质条件下裂纹扩展形态存在明显差异^[6]。然而, 针对典型填塞材料在相同装药条件下裂纹网络复杂程度及损伤演化规律的系统对比研究仍较少。为此, 本文基于室内相似爆破试验, 结合分形理论, 对不同填塞材料条件下爆生裂纹特征进行定量分析, 以揭示其对岩体损伤的影响机制。

1 实验装置和实验方法

1.1 实验材料

本试验选用砂岩作为研究对象。砂岩具有均质性好、孔隙结构稳定等特点, 在爆破试验研究中被广泛采用。试验所用砂岩取自新疆某矿区, 岩体完整性好, 无明显节理裂隙发育, 颗粒较为均匀力学实验如图1所示经测试砂岩试样的物理力学参数表1所示。试件加工采用专业岩石加工设备, 首先将砂岩原石切割成规则块体, 随后利用岩芯钻机钻取直径160mm、高度180mm的圆柱形试样, 并从端面沿轴向钻取直径10mm、深度120mm的中心盲孔以模拟炮孔结构。加工过程中严格控制精度, 试件端面不平度不大于0.02mm, 直径偏差不大于0.3mm, 中心孔偏心距不大于0.5mm。

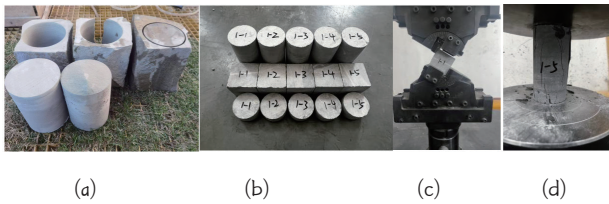


图1 实验材料

表1 砂岩试样的物理力学参数

密度 ρ (kg/m^3)	抗压强度 (Mpa)	抗拉强度 (Mpa)	抗剪强度 (Mpa)	弹性模量 (Gpa)	泊松比
2568	98.5	12.4	11.4	12.5	0.23

1.2 实验方案

本实验采用室内相似爆破模拟试验方法，选取加工完成的砂岩圆柱试件（ $\phi 160 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ ），在轴向中心预制盲孔（孔径 10 mm、孔深 120 mm），统一装填 1 g PETN 炸药进行起爆。在保持装药量、填塞长度及试件尺寸等条件一致的前提下，分别采用钻屑、黏土和水三种材料进行炮孔填塞，对不同填塞材料的爆破效果进行对比研究。

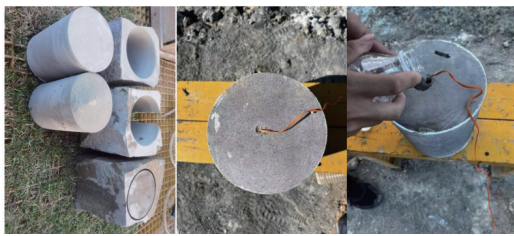


图2 现场实验

2 结果与讨论

经过初步测试后，发现装药量为 1gPETN 炸药时，岩石试件表面产生清晰可辨的爆生裂纹，既能满足损伤特征观测的需要，又不会造成试件的完全破碎，有利于后续裂纹形态的完整采集与分析，因此在爆破试验中统一采用 1gPETN 炸药。为全面获取爆破损伤的空间分布特征，分别从截面和侧面两个方向对爆后试件进行图像采集，结果如图 3 所示。



图3 实验结果

根据实验结果，钻屑、黏土、水、3 种填塞条件下岩石试件截面裂纹数量分别为 2 条、2.5 条、3 条整体呈现增加的规律。但裂纹条数仅能反映损伤的宏观特征，无法精细刻画裂纹的曲折程度、分叉形态及空间填充能力等几何细节，作为损伤评价指标较为粗略。为此，根据分形几何

理论，采用计盒维数法对爆生裂纹网络的复杂程度进行定量表征。分形理论由 Mandelbrot 提出，用以描述具有自相似特征的不规则几何形态，其核心参数为分形维数。岩石裂隙结构具有明显分形特征，爆破作用下微孔隙与微裂纹不断扩展演化，可视为分维增长过程，因此可用分形维数定量表征裂纹网络复杂程度。盒计数法是常用的分形维数计算方法，其原理为利用不同尺度网格覆盖裂纹图像，通过统计网格数与尺度之间的关系求取分形维数。分形维数越大，表明裂纹发育程度越高、岩石损伤越严重。结合连续损伤理论，可建立分形维数与损伤变量之间的对应关系，实现对爆破损伤程度的定量评价。

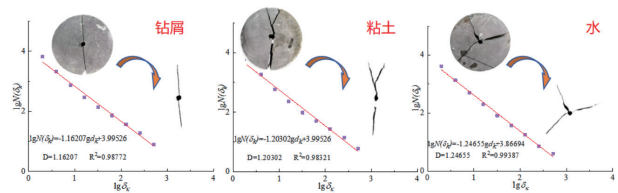


图4 分形维数结果

图 4 为钻屑、黏土、水 3 种不同填塞条件下爆生裂纹网络的分形维数计算结果，分形维数分别为 1.16207、1.20302、1.24655。各工况拟合曲线的决定系数 R^2 均大于 0.989，分形维数 D 是分形几何学中用于描述不规则几何体复杂程度的基本度量参数，与传统欧氏几何中维数必须为整数，分形维数可以取非整数值，用以刻画具有自相似特征的复杂几何形态。对于试件岩石截面裂纹，分形维数反映了裂纹网络的发育程度与损伤演化状态，其数值越大，表明裂纹扩展越充分、贯通程度越高，岩石所受损伤越严重。对于二维平面分形分析，D 的取值范围介于 1 至 2 之间。当 D 接近下限值 1 时，表明裂纹以离散的线性形态分布，裂纹密度较低且相互独立，岩石整体损伤程度低；当 D 接近上限值 2 时，岩石结构遭受严重破坏趋于失效。本试验中，四种填塞条件下所对应的分形维数均分布于 1.0~1.3 区间，在分形维数的理论取值域^[1,2] 区间。

上述分形维数的规律性差异可从填塞介质的物理属性及其对爆破能量传递效率的影响进行分析。钻屑为松散颗粒堆积体，高孔隙率导致爆轰气体过早沿颗粒间隙逸散，能量利用率最低；黏土凭借高塑性性与低渗透性形成致密封堵层，有效延长了峰值压力作用时间；水介质基于其近似不可压缩特性，实现了爆轰能量向孔壁的高效耦合传递。

3 结语

(1) 在相同装药量和填塞长度条件下，不同填塞材料对爆破裂纹扩展形态具有显著影响。水填塞条件下岩石截面裂纹数量最多、贯通程度最高；黏土填塞次之；钻屑填

塞条件下裂纹发育程度最低,说明填塞材料的物理性质直接影响爆破能量的传递与利用效率。

(2) 基于盒计数法计算得到三种填塞条件下爆生裂纹分形维数分别为: 钻屑 1.16207、黏土 1.20302、水 1.24655。分形维数整体呈递增趋势,且各工况拟合相关系数 R^2 均大于 0.989,表明分形维数能够较好地表征爆破裂纹网络的复杂程度和空间占据特征。

(3) 填塞介质的致密性与不可压缩性对爆破能量耦合作用具有重要影响。钻屑为松散颗粒体,易产生气体泄散;黏土具有较好塑性和封堵性能;水介质因近似不可压缩特性,可有效延长爆轰气体作用时间并提高冲击波传递效率,从而增强裂纹扩展与岩石损伤程度。研究结果为优化露天爆破填塞材料选择及提高爆破能量利用率提供了理论依据。

参考文献:

[1] 王继红,李海波,张志强等.炮孔填塞对爆破效果

影响的试验研究[J].爆破,2018,35(3):12-18.

[2] 张志强,刘伟,陈建国.露天爆破填塞参数优化及其作用机制分析[J].中国矿业,2020,29(10):115-121.

[3] 刘伟,孙晓东,黄明.不同填塞材料对岩石爆破破碎效果的影响[J].岩土力学,2019,40(6):2315-2322.

[4] 陈建国,王继红,李强.钻屑填塞条件下爆破能量利用率及块度分布研究[J].爆炸与冲击,2017,37(4):645-652.

[5] 赵鹏飞,李海波,张磊.水填塞爆破技术及其工程应用分析[J].工程爆破,2021,27(2):78-84.

[6] 李强,刘伟,孙晓东.不同耦合介质条件下爆破裂纹扩展特征试验研究[J].振动与冲击,2022,41(15):230-238.

作者简介:石彬(2000.11-),男,汉族,江西九江人,硕士研究生在读,研究方向:矿山爆破及安全方向的研究。