

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0333

分段装药爆炸应变场与裂隙场分布规律*

左进京¹, 杨仁树¹, 龚敏¹, 谢全民², 赵勇¹, 尤元元³

- (1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
2. 江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室, 湖北, 武汉 430056;
3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 为探究分段装药爆炸应变场与裂隙场分布规律, 采用数字图像相关分析方法与电子计算机断层扫描实验方法, 分析了孔内分段装药爆炸全场应变传播规律, 建立了爆后“岩石—爆炸裂隙”的三维重构模型, 描述了爆炸裂纹位置与形态的空间分布情况, 得到岩石材料爆炸裂隙的分形维数与损伤度。研究表明: 分段装药改变了连续装药对介质的全场应变形态, 由一次应变改变为两次应变, 在满足第一段炸药对介质的破坏作用下, 同时加大了第二段炸药对介质的作用效应; 上分段装药占比 0.4 时, 下分段介质受爆炸作用应变峰值更大, 更好满足工程实践中下半段岩体对爆炸能量的需求; 相同装药系数下, 连续装药结构爆炸裂纹没有贯穿试件整体, 炮孔封堵段的爆炸裂纹较少, 分段装药结构下, 由于提高了炸药的位置, 使得上部分岩体能够更好地利用炸药爆炸的能量破碎岩石; 分段装药岩石整体损伤度较连续装药提高了 23.5%, 其中上分段岩石损伤差异较大, 分段装药上分段损伤度比连续装药提高 46.4%。

关键词: 爆炸; 分段装药; 应变场; 裂隙场; 三维重构

中图分类号: O384; O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

On the distribution of explosion strain field and fracture field in segment charge

ZUO Jinjing¹, YANG Renshu¹, GONG Min¹, XIE Quanmin², ZHAO Yong¹, YOU Yuanyuan³

- (1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, Hubei, China;
3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the distribution of the explosion strain field and fracture field of segmented charge explosion, used digital image correlation analysis (DIC) and computerized tomography (CT) scanning experiment analyzed the distribution of the explosion strain field and fracture field of the segment charge, established three-dimensional reconstruction model of “rock-explosion crack”, described the spatial distribution of the location and shape of the explosion crack, and obtained the fractal dimension and damage degree of the explosion crack. The research results show that: the segment charge changes the full-field strain morphology of the medium caused by continuous charge. Under the condition of satisfying the damage effect of upper sublevel explosive on medium, the effect of lower sublevel explosive on medium is increased, at the same time, the time of blast stress wave is prolonged. It can be seen from the three-dimensional cracks of segmented charge and continuous charge explosion, the explosion crack mainly expands along the radial direction, the annular crack formed by axial stress and strain is not obvious, and the radial direction is the main direction of rock failure. When the charge ratio of the upper segment is 0.4, the strain peak value of the lower segment is larger, which better meets the demand of the rock mass for

* 收稿日期: 2022-08-07; 修回日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金(52208384, 51934001); 中国博士后基金(2020TQ0032); 中央高校基本科研业务专项(FRF-TP-20-037A1, FRF-IDRY-20-019); 江汉大学爆破工程湖北省重点实验室联合开放基金(PBSKL2022C05)

第一作者: 左进京(1990—), 男, 博士, 讲师, cumtbzjj@163.com

通信作者: 杨仁树(1963—), 男, 教授, 博士生导师, cumtbyrsz@163.com

explosion energy in the lower segment in engineering practice. Under the same charging coefficient, the explosive cracks in the continuous charging structure do not run through the whole specimen, and the explosive cracks in the plugging section are less, under the segment charge structure, the upper sublevel of rock mass can better use the energy of explosive explosion to break rock because the position of explosive is improve. The overall damage degree of rock in segment charge is 23.5% higher than that in continuous charge, and the damage degree of rock in upper sublevel is 46.4% higher than that in continuous charge.

Keywords: explosion; segment charge; full-field strain; fracture field; three dimensional reconstruction

立井井筒开挖主要施工方式钻爆法中, 随着立井井筒施工综合机械化水平提升, 炮孔深度随之不断增加。炮孔深度超过 5 m 时, 现有的孔内连续装药的形式难以满足高效掘进^[1-2]。为此, 本文针对孔内分段装药结构, 开展爆炸应变场以及裂隙场研究。

针对条形柱状药包爆炸研究, 颜事龙等^[3]采用高速摄影对有机玻璃中条形药包破碎区分布特征进行研究, 认为条型药包粉碎区可分为柱部和端部两个区域, 端部的破坏效应比柱部弱, 并且从中部到端部发展速度逐渐减弱。龚敏等^[4-5]运用三维动态光弹性爆破模型实验系统, 首次对条型药包端部、中间及两端同时起爆条件下物理模型应力场进行研究, 发现两端同时起爆及中间起爆的应力场强度的分布比较均匀。郭洋等^[6]以高速摄影和数值模拟为手段, 研究不同位置起爆柱状药包爆生裂纹扩展和损伤破碎特征, 得出正反向起爆时炮孔周围产生多条径向裂纹, 爆生裂纹面经历了“密集波纹状→光滑平坦→少量径向微裂纹→密集径向裂纹”的逐步转变的四个典型过程。杨仁树等^[7]结合动态焦散线、超动态应变测试系统和数值计算对中间起爆柱状药包的应力应变场演化规律进行研究, 得出中间起爆可以显著改善沿炮孔轴线爆炸应力场的均匀程度, 有效减少岩石爆破大块率的产生。向文飞等采用 Starfield 迭加法与动力有限元法, 研究起爆点数量与起爆点位置对条形药包爆炸应力场影响规律, 认为合理安排起爆点的数量及位置、缩小条形药包完成爆轰的时间有利于改善爆破效果^[8]。李启月等^[9]通过数值计算和现场试验, 发现合理分段装药高度和空孔参数, 能够有效提高深孔爆破一次成井爆破效果。杨国梁等^[10]提出了三种轴向分段装药结构, 分别对正向、反向和两端起爆时的应力波传播规律进行研究, 认为增加分段装药上分层药量应力分布更加均匀并且平均压力最大。胡涛等^[11]利用数值计算对比深孔爆破连续装药结构和分段装药结构有效应力、自由面有效应力峰值及孔壁压力, 结果表明分段装药结构降低了压缩应力波和爆轰气体产物作用于孔壁的初始压力及周围点振动速度。杨仁树等^[12-13]将分段装药应用于井巷掘进掏槽爆破, 提出了先裂后掏的分段装药爆破核心, 认为上段炸药爆破后下段爆破提供新的自由面及补偿空间, 从而减低炮孔底部岩石夹制作用, 增加岩石的破碎程度, 改善了掏槽爆破效果, 提高井巷掘进效率。上述研究成果多是集中在连续装药数值计算、模型试验及现场试验等, 少见基于分段装药条件下全场应变以及三维裂隙场及损伤特性, 因此开展分段装药爆炸应变场与裂隙场分布规律研究, 为深井开挖爆破参数优化提供理论指导与科学依据。

本文针采用数字图像相关(digital image correlation, DIC)分析方法, 探讨分段装药下全场应变的演化过程, 分析不同分段装药比例下爆炸全场应变传播规律; 采用大型工业电子计算机断层扫描仪(CT)研究手段, 建立连续装药、分段装药爆破前后“岩石-爆炸裂纹”三维重构模型, 获得岩石爆炸三维裂隙网络位置、形态的空间分布情况, 分析爆后岩石三维裂隙场的体分形维数与损伤度, 探索分段装药对岩体损伤破裂程度的影响。

1 分段装药全场应变特征分布研究

1.1 数字图像相关法实验系统

数字图像相关法(digital image correlation, DIC)是通过待测介质受力变形前后的灰度矩阵进行相关计算, 通过对测点位置受力变形前后的空间位置信息计算, 获得试件分析点处表面位移与变形应变的光学方法^[14]。

实验所采用的实验设备为超高速数字图像相关实验系统, 如图 1 所示。该实验系统主要包含超高速摄像机、爆炸与摄像同步控制系统、补光与拍摄同步控制系统、VIC-2D 分析软件。超高速相机采集

幅数为 180 幅, 每秒最高可拍 500 万幅图片, 完全满足爆炸荷载应变监测过程, 本实验采样频率为 $200\ 000\ \text{s}^{-1}$ 。同步控制系统为自主开发的多通道电火花发爆器, 能够精准控制起爆时间, 同时可以与照明系统、高速相机相连, 调控三者的启动顺序, 满足多通道同时、微差爆破。

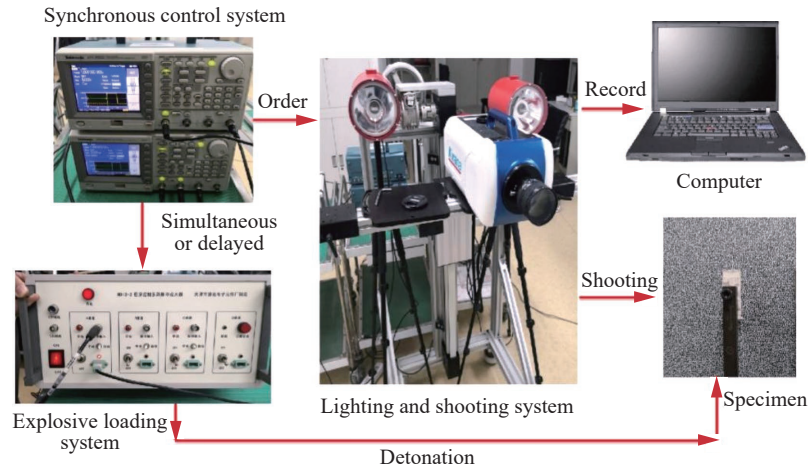


图 1 超高速数字图像相关实验系统

Fig. 1 The ultra high speed digital image correlation system

1.2 分段装药实验模型设计

本实验旨在研究孔内分段装药全场应变特征, 分段掏槽的目的是缓解炮孔底部岩体所受的夹制力作用。考虑在工程实践中, 当上分段装药比例过小时, 上部岩体类似浅孔爆破, 下部岩体还处于高夹制作用状态, 不符合设计初衷; 当上分段比例过大, 小分段比例过小时, 下分段炸药能量有限, 不能很好地把炮孔底部岩体抛掷出来。为此, 本实验设计上分段装药占比 0.4、0.6 两种方案。

试件采用聚碳酸酯(PC)板。试件尺寸为 $400\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$, 柱状药包尺寸为 $100\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$, 炸药为叠氮化铅, 爆速为 $4\ 600\ \text{m/s}$, 密度为 $4.71 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$, 装药量为 $160\ \text{mg}$ 。设计上分段装药占比为 0.4、0.6 两种方案, 第一种方案, 上分段炸药长 $L_1=40\ \text{mm}$, 如图 2(a) 所示, 第二种方案, 上分段炸药长 $L_1=60\ \text{mm}$, 如图 2(b) 所示, 装药实物如图 2(c) 所示。对于两分段微差起爆时间的确定, 在实验过程中, 发现如果微差时间过大, 那么两分段相互作用明显减弱; 微差时间过小, 两分段爆炸应力场的相互影响增大, 不利于分析各分段产生的爆炸应力应变状态, 根据前期实验调试结果, 确定两段间隔起爆时差为 $20\ \mu\text{s}$ 。沿炮孔上部 $10\ \text{mm}$ 处, 间隔 $20\ \text{mm}$ 布置 6 个测点测点, E_1 对应下分段 L_2 起爆端 ($0\ \text{mm}$), E_6 位于上分段顶端 ($100\ \text{mm}$), 对比分析其全场应变的演化规律, 采用孔底起爆的方式。

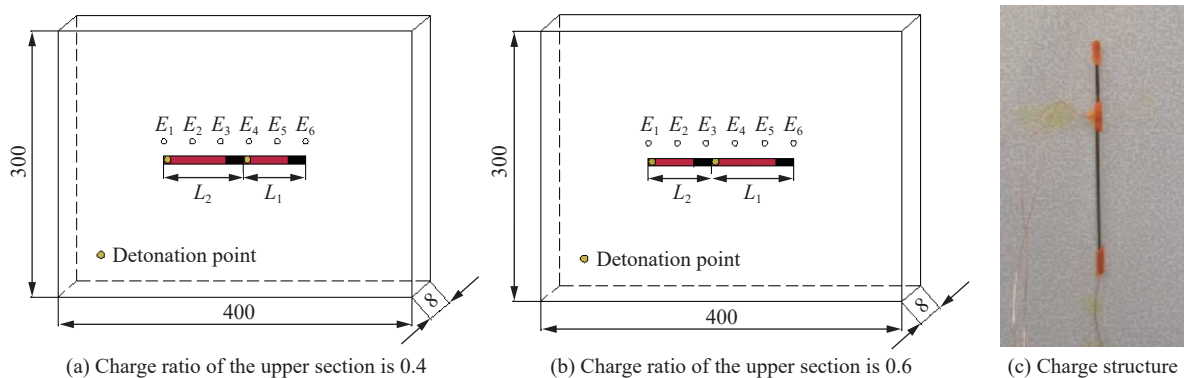


图 2 模型加工示意(mm)

Fig. 2 Schematic diagram of model processing (mm)

1.3 分段装药全场应变分析

图 3~4 分别为两种分段装药的全场应变, 分别选取径向应变 (ε_{yy}) 和轴向应变 (ε_{xx}) 演化过程进行分析。图 3(a) 为分段装药上分段占比 0.6 的径向全场应变, 由于炸药起爆和传爆过程在炮孔中完成, 高速相机无法记录此过程, 实验捕捉到的应变过程为爆炸应力波开始作用介质的时刻。 $t=30 \mu\text{s}$ 时, 炮孔上下两侧受爆炸应力波作用表现为压应变, 此时上分段炸药对下分段炸药及介质没有产生影响; $t=40 \mu\text{s}$ 时, 随上分段炸药爆轰的传递, 压应变作用区域增大; $t=50 \mu\text{s}$ 时, 下分段炸药起爆, 炮孔两侧同样表现为压应变, 这时上分段炸药爆轰传播完成; $t=70 \mu\text{s}$ 时, 上分段炸药起爆时产生的压应变继续向外传播, 同时在炮孔周围形成第二组压应变场, 两组压应变场之间为拉应变场, 下分段压应变场作用范围增大, 两组应变场之间开始相互作用; $t=80 \mu\text{s}$ 时, 上分段炮孔周围压应变场增大, 下分段炮孔周围压应变场范围有所减小, 这是由于下分段炸药起爆形成的爆炸应力波向上分段传递, 造成上分段应变区域增大, 说明两者在此区间内有应变场的相互叠加; $t=100 \mu\text{s}$ 时, 全场应变的分布状态以上分段为主。

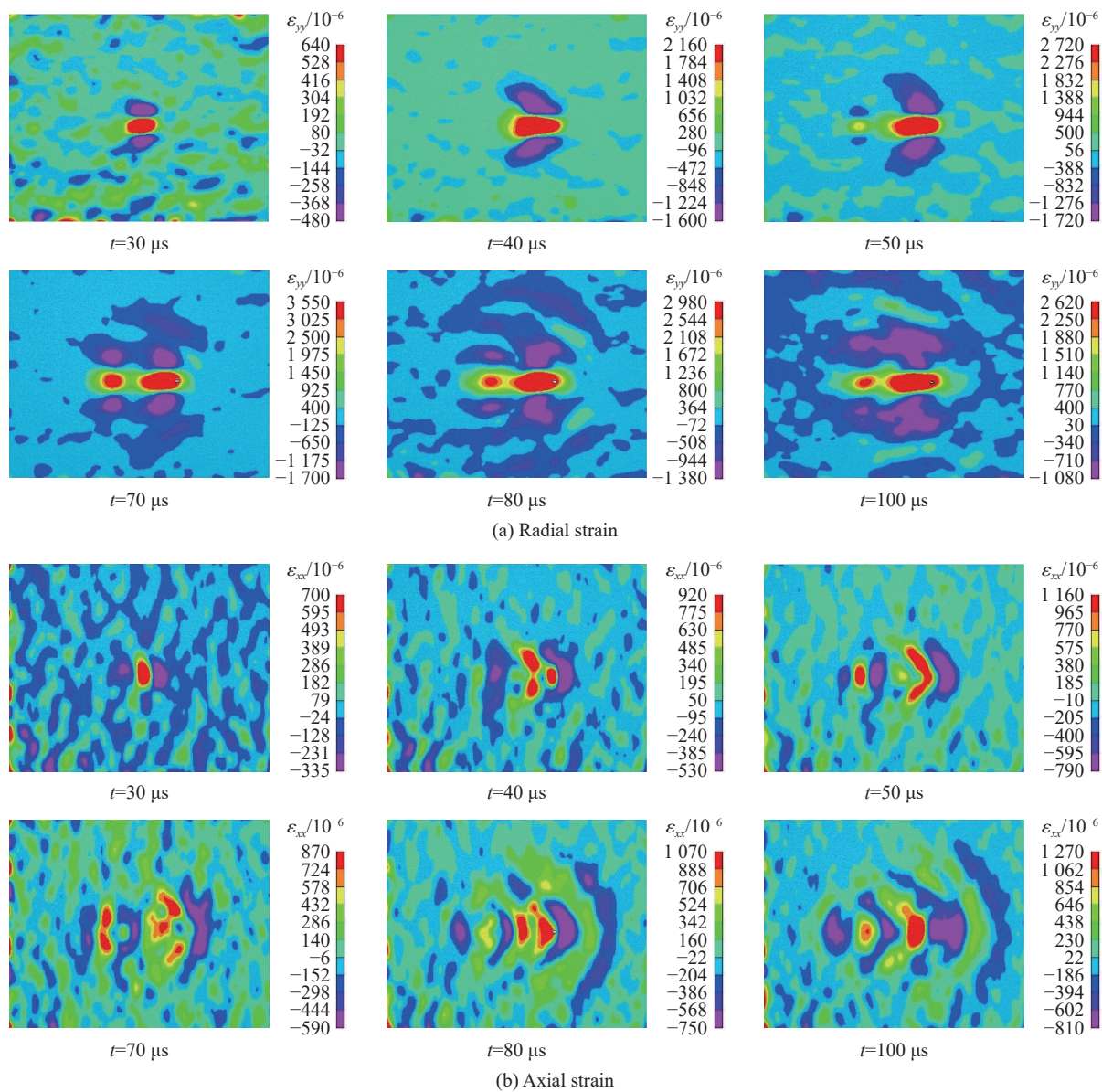


图 3 上分段装药占比 0.6 的全场应变

Fig. 3 Whole field strain with the upper section charge ratio of 0.6

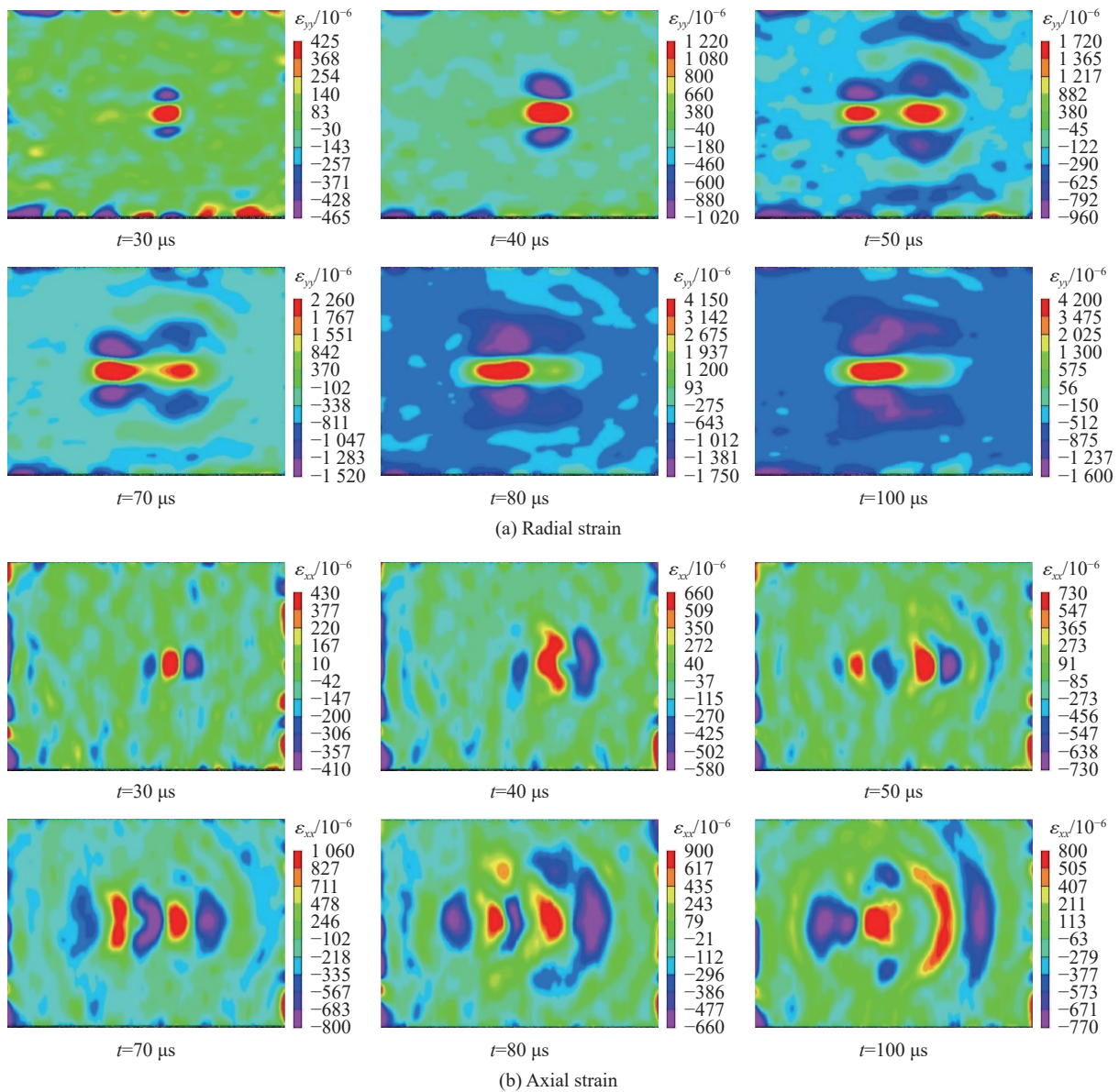


图 4 上分段占比 0.4 的全场应变

Fig. 4 Whole field strain with the upper section charge ratio of 0.4

图 3(b) 为上分段占比 0.6 的轴向全场应变, $t=30 \mu\text{s}$ 时, 炮孔左右两侧受爆炸应力波作用表现为压应变; $t=40 \mu\text{s}$ 时, 随上分段炸药爆轰的传递, 压应变作用范围逐渐扩大; $t=50 \mu\text{s}$ 时, 下分段炸药起爆, 炮孔两侧同样表现为压应变, 下分段压应变场与上分段压应变场在连接处发生叠加; $t=70 \mu\text{s}$ 时, 在各分段的两端形成压应变场, 其余炮孔位置表现为拉应变, $t=100 \mu\text{s}$ 时, 上分段产生的压应变在介质中继续传播, 随后紧跟的是拉应变作用。炮孔中由于分段装药形式, 产生了三组压应变作用区域, 分别为炮孔两端位置以及上下分段的连接处。这就表明在分段装药结构下, 下分段堵塞区域主要为压应变作用区域。

图 4(a) 为分段装药上分段占比 0.4 的径向全场应变, $t=30 \mu\text{s}$ 时, 炮孔受爆炸应力波作用表现为压应变, 此时上分段炸药对下分段炸药及介质没有产生影响; $t=40 \mu\text{s}$ 时, 随着上分段炸药爆轰的传递, 压应变作用区域增大; $t=50 \mu\text{s}$ 时, 下分段炸药起爆, 炮孔两侧表现为压应变, 这时上分段炸药爆轰传播完成; $t=70 \mu\text{s}$ 时, 下分段应变场压应变作用区域增大, 上分段应变场作用强度随着应力波的向外传递而减小;

$t=80\ \mu\text{s}$ 时, 炮孔应变场主要集中在下分段装药处, 应变场的作用范围较上分段大, 直至 $100\ \mu\text{s}$ 时, 由于下分段爆炸应力波的传播, 全炮孔周边应变场作用范围扩大, 但主要集中在下半段装药位置。

图 4(b) 为分段装药上分段占比 0.4 的轴向全场应变, $t=30\ \mu\text{s}$ 时, 炮孔左右两侧受爆炸应力波作用表现为压应变; $t=40\ \mu\text{s}$ 时, 随上分段炸药爆轰的传递, 压应变作用范围同样逐渐增大; $t=50\ \mu\text{s}$ 时, 下分段炸药起爆, 炮孔两端表现为压应变, 下分段压应变场与上分段压应变场发生叠加; $t=70\ \mu\text{s}$ 时, 在各分段的两端形成压应变场, 其余炮孔位置表现为拉应变, 此时下分段形成的压应变场作用强度最大; $t=100\ \mu\text{s}$ 时, 和上分段装药 0.6 相比, 此时炮孔的两端表现为压应变, 中间区域则为拉应变。介质在此分段比例下炮孔周边区域沿装药方向主要受拉伸应变的作用, 更有利于介质的破坏。

图 5 为孔内分段装药测点径向应变时程曲线, 针对分段装药形式, 无论上下分段占比如何, 这种装药形式改变了炸药的爆炸应力波传播形式。针对上分段占比 0.6 的情况, 上分段爆破的介质产生的压应变作用大于下分段, 同时下分段产生的爆炸作用对上分段会产生二次应变, 这种作用形式会加大对介质的破坏能力。但由于下半段炸药对介质产生的应变强度小, 在工程实践中掏槽区域往往下半段岩石受夹制作用更大, 岩石更难抛掷, 所需的爆破能量更多。从介质的应变曲线可以看出, 对于上分段装药 0.4 的情况, 下分段介质受爆炸作用应变峰值更大, 更好满足工程实践中下半段岩体对爆炸能量的需求。与文献 [15] 中连续装药爆炸应变场结论进行对比, 分段装药改变了连续装药对介质的全场应变形态, 由原来对介质产生一次应变改变为两次应变。在满足第一段炸药对介质的破坏作用下, 同时加大了第二段炸药对介质的作用效应。

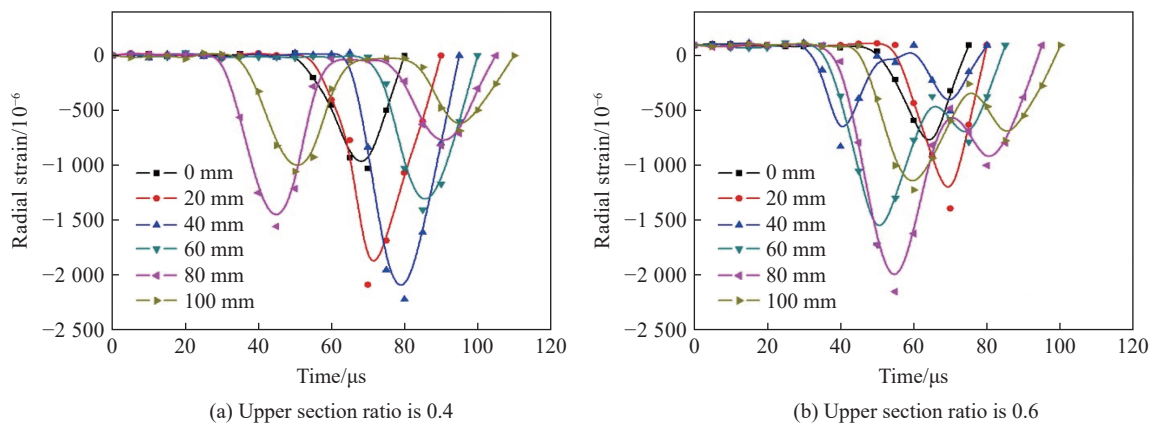


图 5 分段装药径向应变时程曲线

Fig. 5 Time history of the radial strains of segment charges

2 孔内分段装药三维裂隙场的分布

2.1 孔内分段岩石爆破实验方案

为了探究分段装药爆炸裂隙场, 采用红砂岩作为实验材料, 红砂岩的单轴抗压强度为 $68.30\ \text{MPa}$, 单轴抗拉强度为 $5.95\ \text{MPa}$, 密度为 $2.48 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$, 如图 6 所示, 红砂岩试样直径为 $50\ \text{mm}$, 高为 $150\ \text{mm}$ 。在试件中心轴线钻取直径为 $4\ \text{mm}$, 高度为 $120\ \text{mm}$ 的炮孔。连续装药时, 采用装药系数 66.7% , 即柱状药包装药高度为 $80\ \text{mm}$, 封堵为 $40\ \text{mm}$ 。采用分段装药时, 根据以上研究结果, 着重分析上分段装药占比为 0.4 的情况, 即上分段装药中, 炸药为 $30\ \text{mm}$, 封堵为 $20\ \text{mm}$, 下分段装药中, 炸药为 $50\ \text{mm}$, 封堵为 $20\ \text{mm}$ 。炸药装药直径为 $3\ \text{mm}$ 的细管, 炸药为叠氮化铅。分段装药时, 上段先爆, 下段后爆, 两者间隔 $20\ \mu\text{s}$ 。

红砂岩样品放置在内径 $50\ \text{mm}$ 的被动围压装置内, 装置如图 7 所示, 被动围压装置分内外两层, 外层为法兰; 里层为内胆装置, 用于放置试件; 把试件放置在内胆后, 上部用法兰盖拧紧。

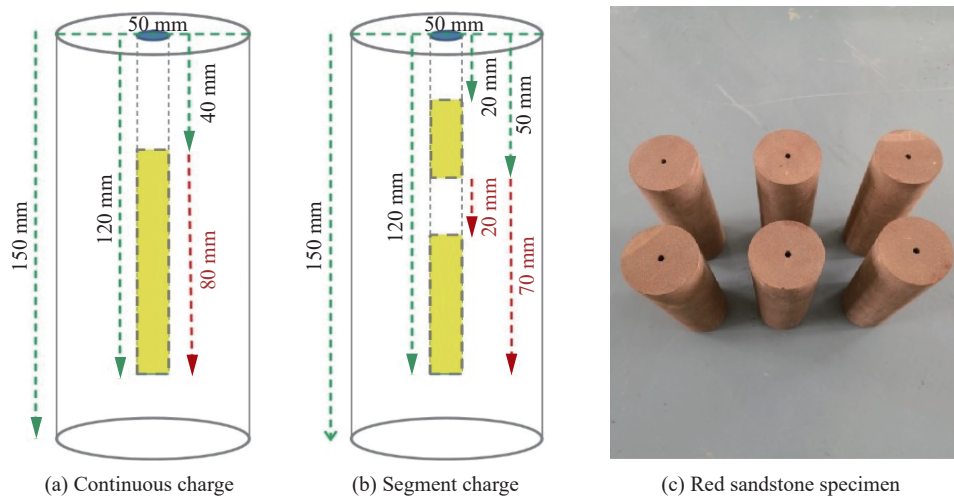


图 6 岩石分段装药示意

Fig. 6 Schematic of rock segment charges

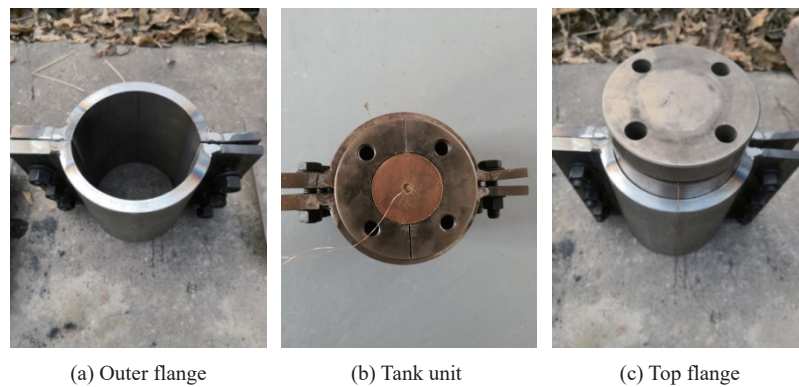


图 7 被动围压装置

Fig. 7 Passive confining pressure device

2.2 分段爆破岩石 CT 扫描与三维重构

CT 扫描仪器型号 ACTIS300-320/225, 扫描电压为 280 kV, 试样扫描区段为 0~150 mm, 每隔 0.15 mm 扫描一层, 共扫描 1 000 张图片, CT 扫描输出图像的尺寸为 55 mm×55 mm, 像素数量为 1 024×1 024。

图 8 为不同层位的扫描原图和灰度处理图像, 连续装药表面没有产生爆炸裂隙, 分段装药试件表面产生了爆炸裂隙, 从直观上看, 分段装药对岩体的破碎程度更大一些。这是由于深孔装药下, 在装药系数以及炸药量一定的情况下, 连续装药封堵段长, 炸药爆炸能量对封堵段破坏小, 造成炸药的能量利用效率降低。由于分段装药改变了炸药在炮孔中的分布形式, 使得炸药在炮孔中分布的更为均匀。

图 9 和图 10 分别为两种装药形式下岩体的三维裂隙重构图, 由图可知, 爆炸裂纹主要沿径向扩展, 轴向应力应变所形成的环向裂纹不明显, 径向是岩石破坏的主要方向。连续装药结构下, 爆炸裂纹没有贯穿试件整体, 距孔口 20 mm 内爆炸裂隙较少, 这也说明在工程实践中, 由于装药深度的增大, 非装药段岩体破碎效果差, 更容易产生大块。分段装药结构下, 由于提高了炸药的位置, 使得上部分岩体能够更好地利用炸药爆炸的能量破碎岩石。

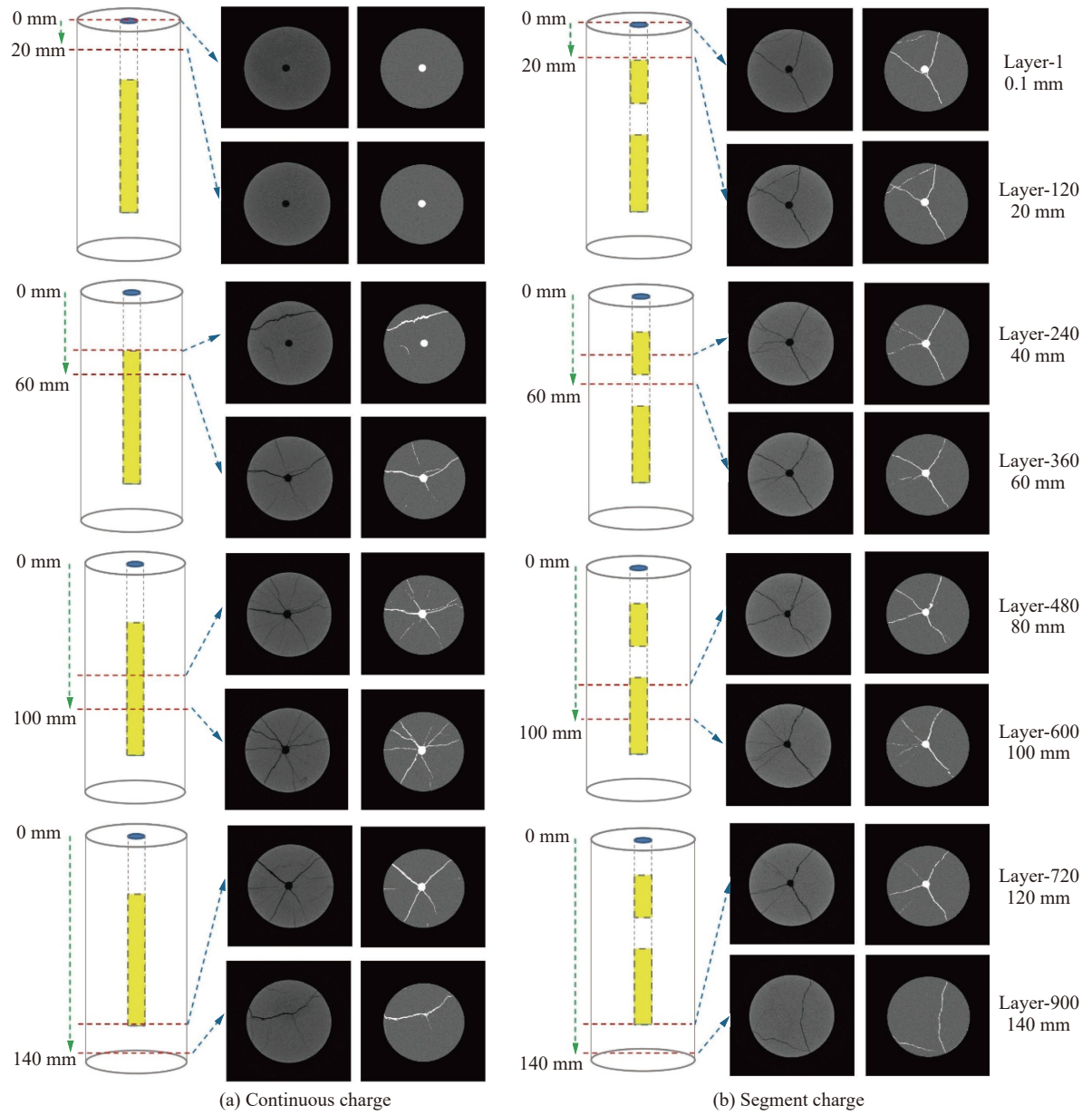


图 8 连续装药与分段装药 CT 扫描原图与灰度处理图
Fig. 8 CT scan of continuous charge and segmented charge and gray-scale processing diagram

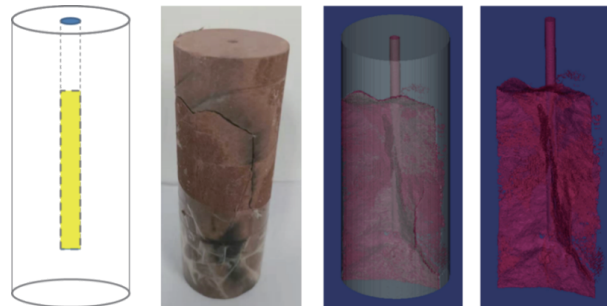


图 9 连续装药三维裂隙重构
Fig. 9 Three-dimensional fracture reconstruction of continuous charge



图 10 分段装药三维裂隙重构

Fig. 10 Three-dimensional fracture reconstruction of segmented charge

2.3 分形维数计算与分析

目前对于分形维数的计算方法有计盒维数、相似维数、信息维数等, 其中计盒维数计算简单, 能够直观反映介质所选区域目标的占有情况。计盒维数表达式为^[16]:

$$\lg N_{\delta_k} = -D_f \lg \delta_k + b \tag{1}$$

式中: N_{δ_k} 为含有裂纹区域的盒子数目, D_f 为区域裂纹场的分形维数, δ_k 为裂纹区域分割小方网格边长, b 为拟合参数。计盒维数的计算方法为: 建立一个边长为 δ_k 的小立体盒; 然后改变不同边长对应形成若干小盒子, 计算覆盖集的小盒子数 N_{δ_k} , 经过转换得到 $\delta_k - N_{\delta_k}$ 数据; 最后取对数, 采用最小二乘法求斜率, 即为计盒维数。

材料损伤度 ω 与分形维数的关系表达式为^[17]:

$$\omega = \frac{D_t - D_0}{D_t^{\max} - D_0} \tag{2}$$

式中: D_t 为介质爆后内部造成损伤面积的分形维数; D_0 为介质爆前内部初始损伤面积的分形维数; D_t^{\max} 为介质达到最大损伤面积时的分形维数, 对于平面问题 $D_t^{\max} = 2$; 对于三维问题 $D_t^{\max} = 3$ 。

图 11 为连续装药与分段装药爆后岩体的分形维数图, 从图中可以看出: 分段装药分形维数为 2.5073, 对岩体造成的损伤度为 0.84; 连续装药岩体的分形维数为 2.0258, 对岩体造成的损伤度为 0.68; 分段装药下岩石的损伤度提高 23.5%。

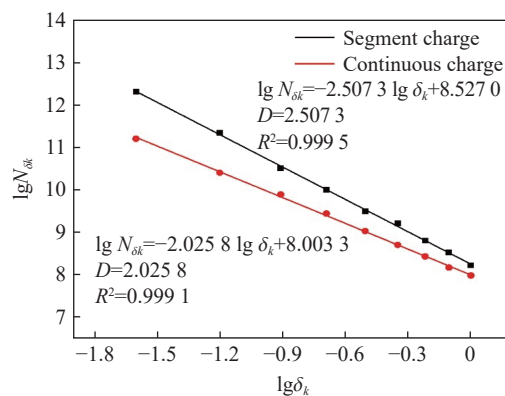


图 11 连续装药与分段装药三维体分形维数 D

Fig. 11 Three-dimensional fractal dimension D of continuous charge and sectional charge

由于岩石上分段装药长度为 50 mm, 以上分段 50 mm、下分段 100 mm 分别作对比, 分别重构出裂隙的三维分布图, 如图 12 所示。上分段岩体爆炸裂隙差别最大, 分别计算上下分段两种装药结构的分形维数和损伤度, 如图 13 所示, 连续装药上分段分形维数为 1.6889, 损伤度为 0.56; 分段装药上分段分形维

数为 2.4693, 损伤度为 0.82, 比连续装药上分段提高了 46.4%; 连续装药下分段分形维数为 2.6679, 损伤度为 0.89; 分段装药上分段分形维数为 2.5228, 损伤度为 0.84, 下半段连续装药损伤度大于分段装药, 这是由于连续装药炸药集中在下部, 单位体积的炸药比分段装药大, 单两者从对岩体的损伤角度来看差别不大。

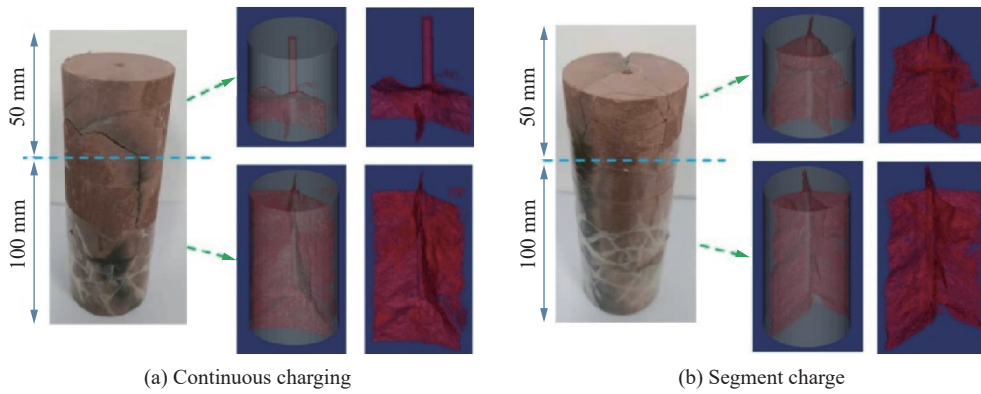


图 12 各装药分段三维裂隙重构

Fig. 12 Three-dimensional fracture reconstruction of each charge segment

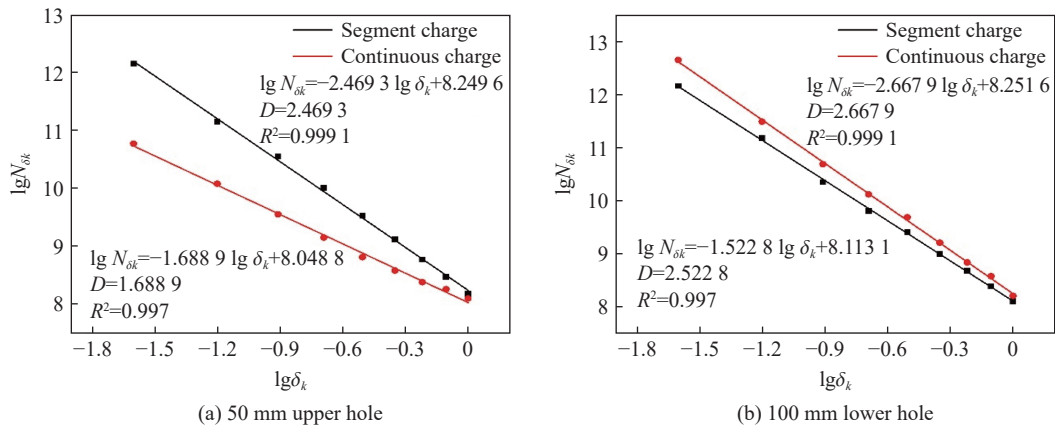


图 13 上/下分段岩体三维体分形维数

Fig. 13 Fractal dimension of upper/lower sublevel rock mass

3 结 论

本文分析了孔内分段装药结构下爆炸全场应变传播规律, 建立了爆后“岩石-爆炸裂隙”的三维重构模型, 精准描述了爆炸裂纹位置与形态的空间分布情况, 结合分形理论, 得到岩石材料爆炸裂隙的分形维数与损伤度, 定量研究岩石在爆炸作用下的三维裂隙场与损伤程度, 得到以下结论:

(1) 分段装药改变了连续装药对介质的全场应变形态, 由原来对介质产生一次应变改变为两次应变; 通过装药比例的改变, 上分段装药占比 0.4 时, 下分段爆破对介质产生的压应变作用效应大于上分段, 在满足第一段炸药对介质的破坏作用下, 加大了第二段炸药对介质的作用效应, 同时延长了介质受爆炸应力波作用时间;

(2) 连续装药结构下, 爆炸裂纹没有贯穿试件整体, 炮孔封堵段内的爆炸裂纹较少, 更容易产生大块; 分段装药结构下, 由于提高了炸药的位置, 使得上部分岩体能够更好的利用炸药爆炸的能量破碎岩石;

(3) 分段装药对岩体造成的损伤度为 0.8401, 连续装药对岩体造成的损伤度为 0.6802, 分段装药岩

石的损伤度较连续装药提高了 23.5%, 其中上分段岩体两者的差异性分析显示, 上分段 50 mm、下分段 100 mm 清醒, 上分段爆炸产生的裂隙差别最大, 分段装药上分段损伤度比连续装药提高 46.4%。

参考文献:

- [1] MA X M, WANG Y, LIN T S, et al. Intelligent decision system for vertical shaft blasting scheme based on knowledge base and its application [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 163831–163842. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3128550.
- [2] MA Q Y, YUAN P, ZHANG J S, et al. Blast-induced damage on millisecond blasting model test with multicircle vertical blastholes [J]. *Shock and Vibration*, 2015, 2015: 504043. DOI: 10.1155/2015/504043.
- [3] 颜事龙, 冯叔瑜, 金孝刚. 有机玻璃中条形药包爆炸破碎区发展过程的高速摄影研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1998, 18(3): 262–267.
YAN S L, FENG S Y, JIN X G. Study on fracture region of cylindric exploding in PMMA by high speed photograph [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(3): 262–267.
- [4] 龚敏, 黎剑华. 延长药包不同位置起爆时的应力场 [J]. *北京科技大学学报*, 2002, 24(3): 248–253. DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2002.03.047.
GONG M, LI J H. A research on stress field of column and strip-shaped charge in different detonated points [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(3): 248–253. DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2002.03.047.
- [5] 龚敏, 王德胜, 黎剑华. 全息干涉法在条形药包离面位移场研究中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(3): 227–231. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0227-05.
GONG M, WANG D S, LI J H. Application of holographic interferometry to study vertical displacement field in linear charge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 227–231. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0227-05.
- [6] 郭洋, 李清, 杨仁树, 等. 三维模型柱状药包爆生裂纹扩展规律研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(10): 133–140, 184. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.10.018.
GUO Y, LI Q, YANG R S, et al. Study on crack propagation law of cylindrical charges in three-dimensional models [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(10): 133–140, 184. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.10.018.
- [7] 杨仁树, 郭洋, 李清, 等. 中间起爆柱状药包爆炸应力应变场演化规律 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3423–3431. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1673.
YANG R S, GUO Y, LI Q, et al. Evolution law on explosive stress and strain field of column charges at middle detonation position [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3423–3431. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1673.
- [8] 陈士海, 胡帅伟, 初少凤. 微差时间及柱状装药特征对爆破振动效应影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(S2): 3974–3983. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1163.
CHEN S H, HU S W, CHU S F. Study on the blasting vibration effect influenced by millisecond time and cylindrical charging characteristics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S2): 3974–3983. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1163.
- [9] 李启月, 李夕兵, 范作鹏, 等. 深孔爆破一次成井技术与应用实例分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(4): 664–670. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.04.003.
LI Q Y, LI X B, FAN Z P, et al. One time deep hole raise blasting technology and case study [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(4): 664–670. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.04.003.
- [10] 杨国梁, 杨仁树, 姜琳琳. 轴向间隔装药爆破沿炮孔的压力分布 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(6): 653–657. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)06-0653-05.
YANG G L, YANG R S, JIANG L L. Pressure distribution along borehole with axial air-deck charge blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(6): 653–657. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)06-0653-05.
- [11] 胡涛, 李祥龙, 关思, 等. 分段装药结构爆破效果的数值模拟研究 [J]. *中国工程科学*, 2014, 16(11): 36–41. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2014.11.005.
HU T, LI X L, GUAN S, et al. Numerical simulation of structure performance under blasting with piecewise charge [J]. *Strategic Study of CAE*, 2014, 16(11): 36–41. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2014.11.005.

- [12] 杨仁树, 鲍舟琦, 王雁冰, 等. 数码电子雷管在高瓦斯矿井岩巷爆破掘进中的应用 [J]. *金属矿山*, 2022(7): 27–34. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202207004.
YANG R S, BAO Z Q, WANG Y B, et al. Application of digital electronic detonator in blasting excavation of rock roadway in high gas mine [J]. *Metal Mine*, 2022(7): 27–34. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202207004.
- [13] 杨仁树, 王雁冰, 张召冉, 等. 井巷工程掏槽爆破新技术及应用 [J]. *中国科学基金*, 2022, 36(1): 120–127. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.01.028.
YANG R S, WANG Y B, ZHANG Z R, et al. New technology and application of cutting blasting in shaft and roadway engineering [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(1): 120–127. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.01.028.
- [14] GONZÁLES G L G, GONZÁLES J A O, DE CASTRO J T P, et al. Measuring elastoplastic strain loops in the near crack-tip region using a stereo microscope DIC system [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 133: 105427. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105427.
- [15] 左进京, 杨仁树, 汪文良, 等. 条形药包爆炸全场应变以及裂纹动态断裂特性研究 [J]. *工程科学学报*, 2022, 44(8): 1306–1314. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.10.19.003.
ZUO J J, YANG R S, WANG W L, et al. Explosive full-field strain and crack dynamic fracture characteristics of a linear shaped charge [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(8): 1306–1314. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.10.19.003.
- [16] JU Y, ZHENG J T, EPSTEIN M, et al. 3D numerical reconstruction of well-connected porous structure of rock using fractal algorithms [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, 279: 212–226. DOI: 10.1016/j.cma.2014.06.035.
- [17] CHEN H D, CHENG Y P, ZHOU H X, et al. Damage and permeability development in coal during unloading [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(6): 1377–1390. DOI: 10.1007/s00603-013-0370-2.

(责任编辑 王小飞)