

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.012

爆破作业下黄土围岩的破碎特征及响应规律^{*}

张文杰¹, 邓龙胜^{1,2}, 于渤¹, 杨洲¹, 杜中东³, 宋方述³, 邹煜³

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054;

2. 地质灾害成因机理与风险防控陕西省高等学校重点实验室, 西安 710054;

3. 中国石油东方地球物理公司, 西安 710021)

摘要: 在黄土地区进行爆破施工时, 爆破对黄土围岩的破碎效应和挤密效应, 对工程施工质量及爆破施工设计至关重要。为探究在爆破作用下黄土围岩的破碎效应和挤密效应, 进行现场爆破试验, 并采用数字图像处理技术, 提取爆腔围岩表面的裂隙和块体的特征, 分析围岩的破碎特征。同时测量爆腔轮廓及周围裂隙, 并进行室内试验, 确定爆破土体分区及各分区范围。在现场实验基础上, 利用 LS-DYNA 建立数值模型, 并改变炸药长度, 进行不同炸药量的黄土爆破模拟。结果表明: 爆破后黄土可细分为5个区, 分别为空腔区、破碎区、裂纹区、挤密区和弹性变形区, 且每个区形状均为椭圆形。其中破碎区土体同时发育宽大的贯通裂隙与“细短型”裂隙, 裂隙多以“T”型节点相交, 块体多为不规则四边形, 且块体形态复杂内部发育大量裂隙。而裂纹区裂隙以“细长型”为主, 裂隙多以“Y”型节点相交, 块体多为不规则五边形和六边形。在不同炸药量爆破作用下, 爆腔与影响范围的径向半径与炸药量呈双曲线函数关系, 两者的轴向半径与炸药量呈一次函数关系。

关键词: 现场爆破试验; 破碎特征; 爆破土体分区; 黄土爆破模拟; 不同炸药量; 影响范围

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0109-14

Fragmentation Characteristics and Response Behavior of Loess Surrounding Rock under Blasting Operations

ZHANG Wen-jie¹, DENG Long-sheng^{1,2}, YU Bo¹, YANG Zhou¹,

DU Zhong-dong³, SONG Fang-shu³, ZOU Yu³

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Geological Hazards Mechanism and Risk Control of Shaanxi Higher

Education Institutes, Xi'an 710054, China; 3. BGP Inc., CNPC, Xi'an 710021, China)

Abstract: In loess region blasting operations, the fragmentation and compaction effects on surrounding loess significantly influence both construction quality and blast design optimization. Field blasting experiments were conducted to examine these effects, utilizing digital image processing techniques to extract cavity surface crack and clod charac-

收稿日期 (Date of reception): 2025-07-02

网络首发日期 (Published online): 2025-10-23

作者简介: 张文杰 (1999-), 男, 湖南溆浦人, 硕士研究生, 主要从事黄土爆破的研究, (E-mail) zhangwenj@chd.edu.cn.

通信作者: 邓龙胜 (1981-), 男, 云南镇雄人, 教授、博士研究生导师, 主要从事黄土微结构、黄土力学和地质灾害等方面的研究, (E-mail) dlsh@chd.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3003403); 国家自然科学基金 (42472348); 中央高校基本科研业务费资助 (300102265502)

About the author: ZHANG Wen-jie (1999-), male, born in Xupu city, Hunan province, postgraduate, mainly engaged in the research of loess blasting, (E-mail) zhangwenj@chd.edu.cn.

Corresponding author: DENG Long-sheng (1981-), male, born in Zhenxiong city, Yunnan province, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in the research of loess microstructure, loess mechanics and geological disasters, (E-mail) dlsh@chd.edu.cn.

Fund Programs: National Key Research and Development Project of China (2022YFC3003403), National Natural Science Foundation of China (42472348), Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102265502)

teristics for loess fragmentation analysis. Concurrent measurements of blast cavity profiles and peripheral cracks were combined with laboratory testing to determine blast-affected soil zoning boundaries. Numerical modeling was implemented in LS-DYNA based on field data, with explosive length variations simulating different charge weights for loess blasting scenarios. The experimental results demonstrate that the post-blast loess exhibits five distinct elliptical zones: cavity zone, crushed zone, cracked zone, compacted zone, and elastic deformation zone. Within the crushed zone, the soil develops both wide fractures and short, thin cracks, predominantly interconnected through T-shaped nodal intersections. The resulting clods primarily display irregular quadrilateral morphology with complex geometries and extensive internal cracking networks. In contrast, the cracked zone predominantly develops elongated, narrow cracks interconnected through Y-shaped nodal intersections, exhibiting irregular pentagonal and hexagonal morphologies. Experimental analysis reveals a hyperbolic correlation between explosive weight and both the radial dimensions of the blast cavity and its influence range. In contrast, axial dimensions demonstrate linear proportionality to explosive mass.

Key words: on-site blasting experiment; fragmentation characteristics; blast soil zoning; simulate blasting in loess; different charge weights; influence range

近年来,随着“一带一路”与“西部大开发”等国家战略的持续实施推进,黄土高原工程建设项目急剧增加,而爆破施工以高效率、低成本和技术成熟的等优点被越来越多地应用于地基处理、调节农业蓄水、地下空间开挖以及地下掘进施工等工程项目中^[1-3]。此外,黄土高原矿产资源丰富,爆破技术也常被用于地下矿产资源的勘探中^[4,5]。爆破后土体性质发生剧烈改变,从而引起一系列的地质问题。在密闭土体中爆破时,土体在爆破冲击波以及爆生气体的作用下被迅速挤密形成空腔。土体在被挤密成腔的同时,腔体周围土体在爆破压力与径向拉应力的作用下发生破碎开裂^[6]。

爆破后腔体表面的裂隙会破坏腔体的完整性,引起腔体的失稳,从而引起地面塌陷^[7]。同时,爆腔周围的裂隙会成为水的优势渗流通道,从而影响工程施工质量和减少工程的使用年限。因而在爆破施工后需对破碎开裂的围岩体进行评估和加固处理。而爆破对土体的挤密作用,则是在进行爆破施工设计时所必须考虑的要素^[1]。因此,研究爆破作业下黄土围岩的破碎特征及响应规律,可以为黄土地区爆破施工设计以及爆破围岩稳定性评价和围岩加固提供理论依据。

试验是研究爆破对土体影响的最有效的方法。目前,爆破试验多是基于相似理论和缩放定理进行缩小尺度的模型试验^[8,9]。然而,由于现场地质环境的复杂性,因此现场爆破试验仍是进行爆破研究最直接的方法。在已有的现场爆破试验研究中,研究多关注于爆破对土体的成腔挤密作用以及爆破对围岩土体性质的改变^[10-12],而忽视爆破对土体的破碎效应。目前关于土体破碎的研究多采用数字图像处理技术,通过提出一系列量化指标,量化研究

土体破碎特征,从而揭示土体破碎机理^[13-16]。

随着计算机技术的发展,同时由于爆破试验的诸多限制,采用数值模拟技术进行土体爆破模拟已越来越广泛^[17,18]。同时,已有研究表明数值模拟技术进行黄土爆破模拟的可行性^[9,19]。本文通过现场黄土爆破试验结合数字图像处理技术,获取爆腔围岩土体的破碎特征。爆破结束后,在爆腔水平方向上进行取样,进行室内试验获取爆破的影响范围,并对现场爆腔与裂隙进行实测,获取爆破土体分区范围。同时结合数值模拟,获取不同炸药量黄土爆破的影响范围。研究结果为黄土高原爆破施工设计以及爆破围岩稳定性评价和围岩加固提供理论依据。

1 基于现场爆破的黄土围岩体破碎特征

1.1 现场爆破试验设计

现场土中爆破试验主要包括试验场地选择、打孔、装药、填埋、起爆、开挖、取土和室内试验等步骤^[12]。

现场试验选择在宁夏回族自治区彭阳县小石沟村(106°50'34.07" E, 36°1'8.16" N)。彭阳县地处宁夏回族自治区南部,县境内出露地层以白垩系、新近系和第四系为主^[20],其中马兰黄土在区内分布最为广泛。本次试验所涉及地层为马兰黄土(图1)。

试验开始前采用洛阳铲在场地中开挖一个直径为6.5 cm,深3 m的炮眼。将炸药放入圆孔底部后,利用成孔时的挖出的土对炮眼进行填埋,最后采用电子雷管进行引爆。在爆炸结束后对爆腔土体进行开挖,并在水平方向上距爆腔不同距离的地方进行取土,带回室内进行室内土工试验。

本次试验使用乳化震源炸药^[21],炸药的主要成分为硝酸铵和亚硝酸钠,炸药筒直径为6 cm,长为

33 cm。炸药的密度为 1.05 ~ 1.25 g/cm³,爆速约 4800 m/s,爆破所用炸药量为 1 kg。

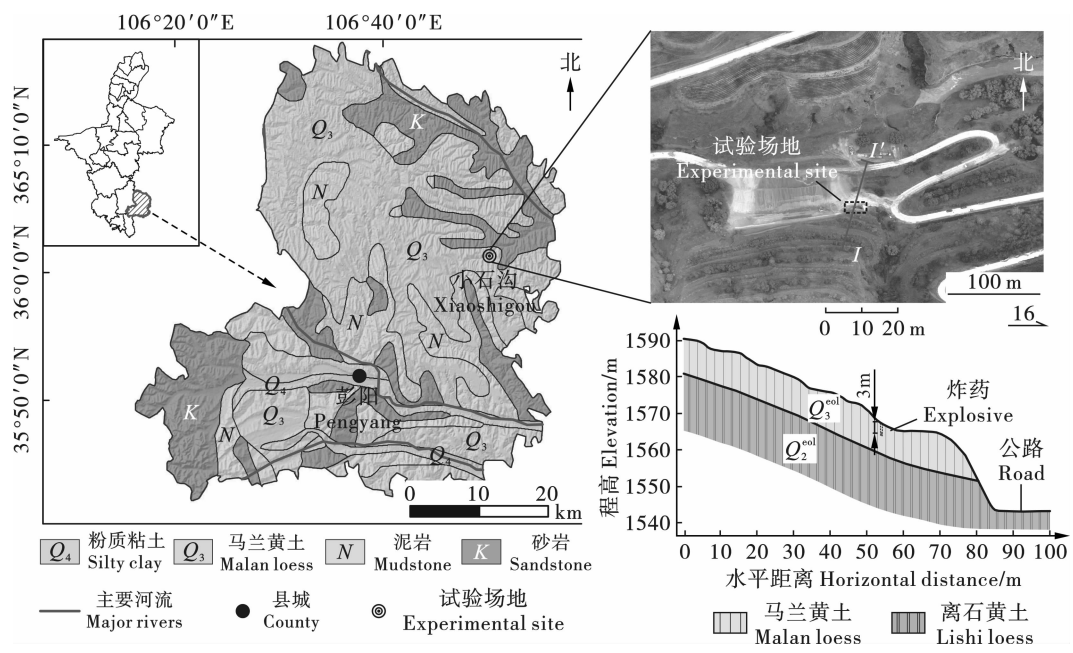


图 1 试验场地概况
Fig. 1 Overview of the experimental site

1.2 爆腔周缘黄土体破碎特征

1.2.1 表征参数的确定

为研究爆破作用下黄土的破碎特征,在爆破结束后对场地进行开挖,将爆腔从侧面逐步剖开。在

剖开爆腔的过程中,发现爆腔表面土体存在掉落现象,掉落的黄土体堆积在爆腔内部。将爆腔内部掉落土体进行清除,暴露出爆腔全貌(图 2)。

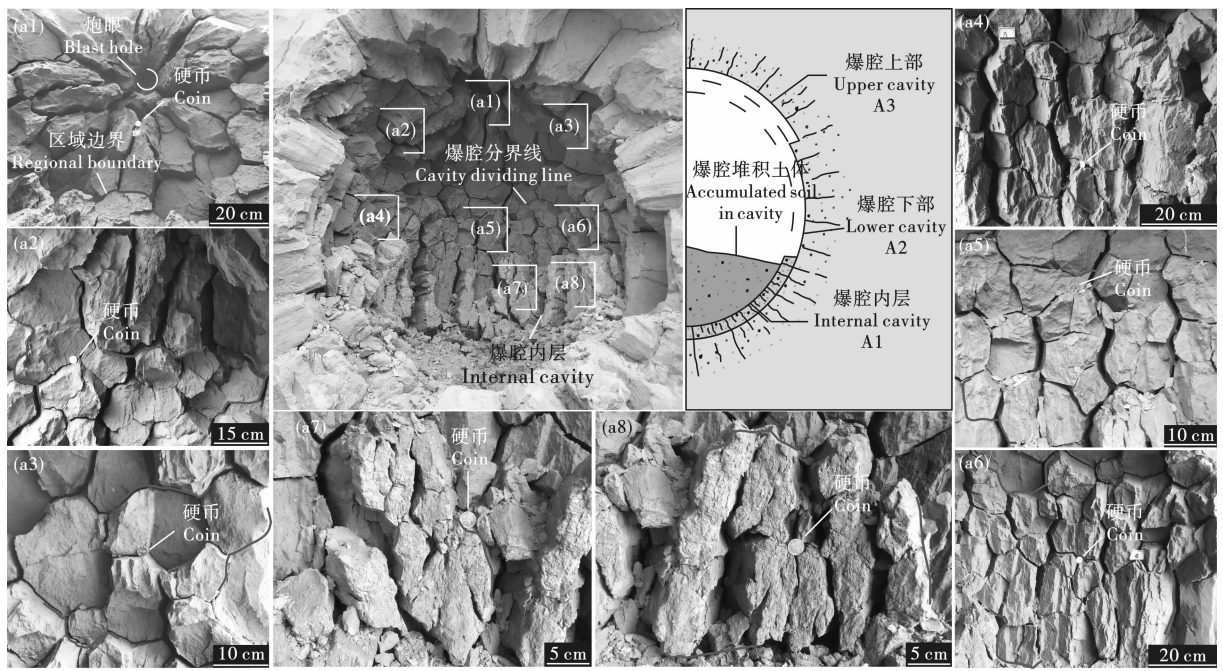


图 2 爆腔分区及分区局部放大图
Fig. 2 Cavity partitions and partial enlargement of the partitions

观察剖开后的爆腔发现,爆腔下部有一层土体紧挨爆腔,土体表面裂隙发育,且土体表面可见烧焦

痕迹,推测为爆腔内层土体。爆腔上部土体在重力作用下发生掉落,爆腔整体呈“上大下小”的趋势。

因此,根据爆腔整体形态将爆腔分为三部分,分别为爆腔内层 A_1 ,爆腔下部 A_2 和爆腔上部 A_3 。

采用手持摄像机对爆腔表面进行拍摄,并放置参照物以固定相片比例。由于爆腔内层土体较为破碎,其与后部土体已发生分离,因此在拍摄完爆腔内层土体后对其进行清理,再对爆腔下部进行拍摄。此次共拍摄筛选局部爆腔照片 8 张,对拍摄的相片

按照爆腔不同区域进行分类,其中照片 a1、a2、a3 属于爆腔上部 A_3 ,照片 a4、a5、a6 属于爆腔下部 A_2 ,照片 a7、a8 属于爆腔内层 A_1 (图 2)。将所拍摄的爆腔表面裂隙进行人工勾画,勾画的二值化局部爆腔图像见图 3。将二值化处理后的图像导入 ImageJ 中进行参数提取。

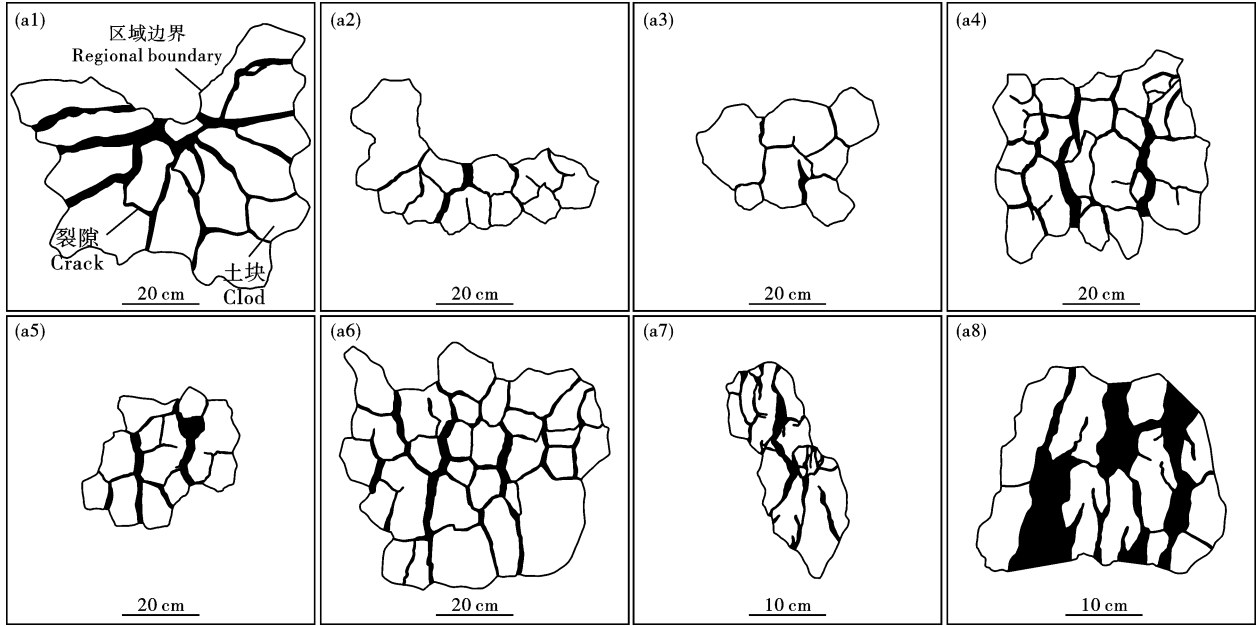


图 3 爆腔各区域二值化图

Fig. 3 Images Binarization diagram of each area of the explosion cavity

针对爆腔表面图像的构成要素,结合前人对裂隙网络图像的研究成果^[14],本文选取表 1 所示的基本度量指标进行定量分析。

1.2.2 爆腔土体破碎特征

基于数字图像处理技术,对爆腔三个区域裂隙图像进行定量化参数提取,各定量化指标所对应的具体数值绘制于图 4 中。现对定量分析结果进行讨论。

表面裂隙率、单位面积节点数与单位面积裂隙段数是反映土体开裂程度的重要指标^[13],由图 4a 可以看出区域 A_1 、 A_2 、 A_3 的表面裂隙率依次增加,由图 4(b)与图 4(c)可以看出区域 A_1 、 A_2 、 A_3 的单位面积节点数与单位面积裂隙段数依次减少,表明区域 A_1 、 A_2 、 A_3 的开裂程度依次降低。这是由于区域 A_1 、 A_2 、 A_3 距爆炸中心的距离依次增加,而引起土体开裂的切向应力随着距炸药的距离增加而不断衰减,因此径向裂隙呈内密外稀的规律分布^[22]。区域 A_1 的裂隙平均长度最小,见图 4(d),同时区域 A_1 的裂隙平均宽度最大,见图 4(e)。最大块体面积与单位面积块体数都是描述土块性质的基本指标,其中最

大块体面积与裂隙发育过程及裂隙网络的形态存在一定关联^[13],而单位面积块体数则与土体的破碎程度有关。 A_1 的最大块体面积最小而 A_2 的最大块体面积最大,见图 4(f)。区域 A_1 、 A_2 、 A_3 单位面积块体数依次减小,见图 4(g)。Costa 等指出块体尺寸与拉应力的平方成反比^[16],由图 4(h)可以看出区域 A_1 、 A_2 、 A_3 平均块体面积依次增加。这是由于随着与炸药距离的增大土体所受拉应力不断减小导致的。

分形理论已被广泛应用于土体裂纹表征中^[13,14],且已有研究表明块体的分形维数与块体断裂的能量耗散密切相关^[23]。因此本文提出采用块体分形维数来表征各区域的分形维数。根据分形理论,几何图形的周长与面积存在以下关系^[24]

$$c = \frac{P_a^{1/D_R}}{A_a^{1/2}} \quad (1)$$

式中: c 为常数; A_a 为块体面积; P_a 为块体周长; D_R 为块体的分形维数。

对上式两边求导数可得

$$D_R = 2k \quad (2)$$

式中, k 为直线 $\lg(P_a) - \lg(A_a)$ 的曲线斜率。

表 1 爆腔裂隙网格量化参数及定义

Table 1 Quantization parameters and definitions of cavity crack network

量化对象 Quantifiable object	几何参数 Parameter	符号 Symbol	公式 Formula	说明 Explanation
裂隙 Cracks	裂隙长度 Crack length	L_c		L_c 为两个节点之间的裂隙迹线长度 L_c is the crack trace length between two nodes
	裂隙宽度 Crack width	W_c	$W_c = \frac{A_c}{L_c}$	A_c 为单个裂隙面积, L_c 为单个裂隙长度。 A_c is the area of a single crack, and L_c is the length of a single crack.
	裂隙交角 Crack intersection angle	Θ		两个相交的裂隙间的夹角。 The angle between two intersecting cracks
	表面裂隙率 Surface crack ratio	R_{sc}	$R_{sc} = \frac{A_{csum}}{A}$	A_{csum} 为裂隙总面积, A 为区域总面积。 A_{csum} is the total area of cracks, and A is the total area of the region.
	单位面积节点数 Number of nodes per unit area	N_{pn}	$N_{pn} = \frac{N_{pn}}{A}$	N_n 为节点数, A 为区域总面积。 N_n is the number of nodes, and A is the total area of the region.
	单位面积裂隙段数 Number of crack segments per unit area	N_{pseg}	$N_{pseg} = \frac{N_{seg}}{A}$	N_{seg} 为裂隙段数, A 为区域总面积。 N_{seg} is the number of crack segments, and A is the total area of the region.
	裂隙平均长度 Average length of cracks	L_{cavg}	$L_{cavg} = \frac{L_{csum}}{N_{seg}}$	L_{csum} 为裂隙总长度, N_{seg} 为裂隙段数。 L_{csum} is the total length of cracks, and N_{seg} is the number of crack segments.
	裂隙平均宽度 Average width of cracks	W_{cavg}	$W_{cavg} = \frac{A_{csum}}{L_{csum}}$	A_{csum} 为裂隙总面积, L_{csum} 为裂隙总长度。 A_{csum} is the total area of cracks, and L_{csum} is the total length of cracks.
	块体边数 Number of clod edge	N		组成封闭块体的裂隙段数 Number of crack segments forming the enclosed clod.
	单位面积土块个数 Number of clods per unit area	N_{pa}	$N_{pa} = \frac{N_a}{A}$	N_a 为土块个数, A 为区域总面积。 N_a is the number of clods, and A is the total area of the region.
土块 Clods	最大土块面积 Maximum clod area	A_{amax}		土块面积的最大值。 Maximum area of clods.
	土块平均面积 Average area of clods	A_{aavg}	$A_{aavg} = \frac{A_{asum}}{N_a}$	A_{asum} 是土块总面积, N_a 是土块个数。 A_{asum} is the total area of clods, and N_a is the number of clods.
	土块分形维数 Fractal dimension of clods	D_R	$c = \frac{P_a^{1/D_R}}{A_a^{1/2}}$	c 为常数, A_a 单个土块面积, P_a 单个土块的周长。 c is a constant, A_a is the area of a single clod, P_a is the perimeter of a single clod.

图 5 给出了爆腔三个区域块体的周长和面积对数关系分形维数值,图 4(i)进一步给出了爆腔三个区域分形维数的变化趋势。由图可以看出区域 A_1 、 A_2 、 A_3 的分形维数依次降低,表明区域 A_1 、 A_2 、 A_3 块体轮廓的复杂程度依次降低,由现场照片(图 2a7、a8)也可直观看出,爆腔内层块体形状更为复杂,其块体内部发育有大量裂隙。由于爆破能量随着与爆炸中心距离增大而不断衰减,根据材料断面分形维

数与材料的断裂能研究结果,表明材料的断面分形维数的增加,则材料破坏所消耗的能量越多^[23],因此 A_1 、 A_2 、 A_3 的块体分形维数依次减小。

由于裂隙长度、裂隙宽度、裂隙交角和块体边数等指标在尺度上变化较大,若仅获取这些指标的平均值,很难客观地描述裂隙网格的特征。因此采用分布比例,从统计学的角度对相关指标的分布特征进行分析。

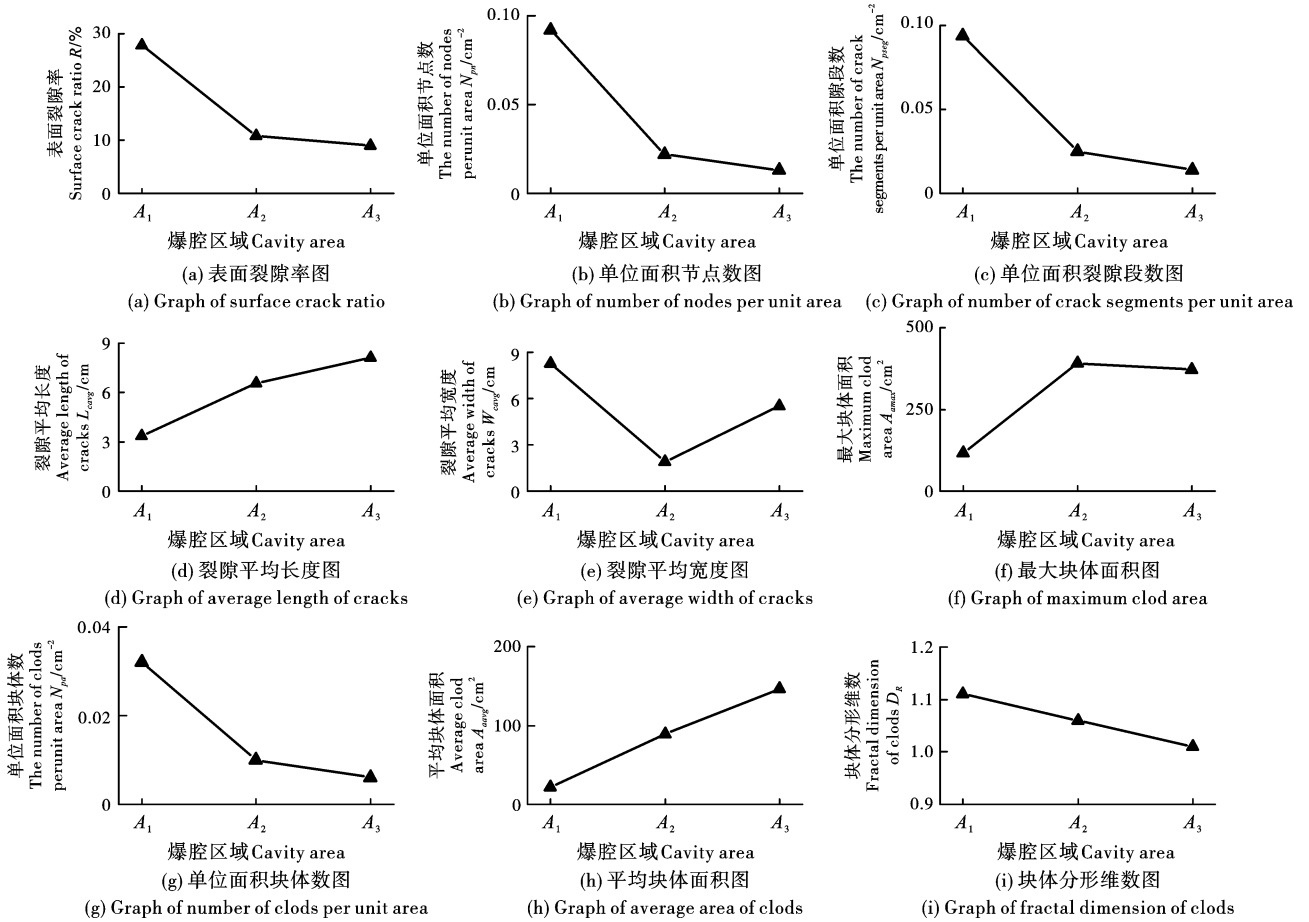


图 4 裂隙网络量化分析结果

Fig. 4 Results of quantitative analysis of the crack network

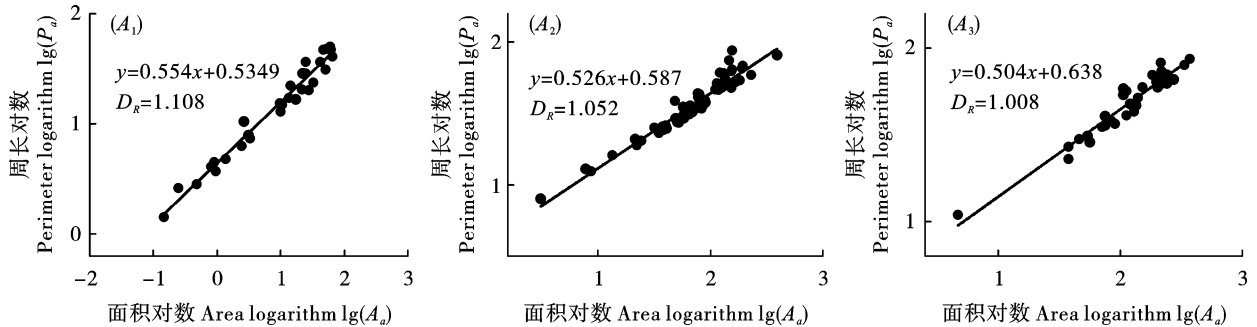


图 5 分形维数拟合结果

Fig. 5 Fractal dimension fitted results

图 6 分别给出了爆腔三个区域的裂隙长度、裂隙宽度、裂隙交角和块体边数的分布特征。由图 6a 可以看出, 区域 A_1 的裂隙长度主要集中于 $0 \sim 3$ cm, 而区域 A_2 和 A_3 则主要集中于 $3 \sim 9$ cm。表明区域 A_1 和 A_2 的裂隙比区域 A_1 长。由图 6b 可以看出, 区域 A_1 的裂隙宽度的分布范围最大, 同时裂隙宽度约 70% 分布于 $0 \sim 0.5$ cm。表明区域 A_1 同时发育宽大裂隙与“细短型”裂隙, 而“细短型”裂隙占比更高。这是由于, 爆腔内层土体破碎程度较高, 在土块间形成的大贯通裂隙时, 土块会在重力作用下

发生掉落, 仅有少部分被保留。而区域 A_2 和 A_3 裂隙宽度集中于 $0 \sim 1$ cm, 表明区域 A_2 和 A_3 多为“细长型”裂隙。由图 6(c) 可以看出区域 A_1 的裂隙交角在 $80 \sim 100^\circ$ 的范围内的占比较高, 而区域 A_2 和 A_3 裂隙交角在 $110 \sim 130^\circ$ 范围内的占比较高, 即在区域 A_1 中“T”型节点占比较高, 而区域 A_2 和 A_3 中“Y”型节点占比较高。这表明区域 A_1 的裂隙正交断裂最多, 而区域 A_2 和 A_3 非正交断裂的比例占比最多。由图 6(d) 可以看出, 区域 A_1 四边形块体占比较多, 而区域 A_2 和 A_3 的五边形和六边形块体占

比较高,这与图6(c)所反映的结果一致。Person等对于土体的破裂模式的研究表明^[15],非正交破裂是最为节能的破裂模式,即形成相同大小块体,非正交破裂所消耗的能量最少,而随着爆炸距离的增加,爆破能量不断衰减,因此导致 A_1 、 A_2 、 A_3 的非正交破裂

比例依次增加,即区域 A_2 、 A_3 中五边形与六边形块体占比最高,而区域 A_1 中四边形占比较高。由上可以看出,区域 A_2 、 A_3 的裂隙与块体特征较为相似,而与区域 A_1 的裂隙和块体特征有较大区别。

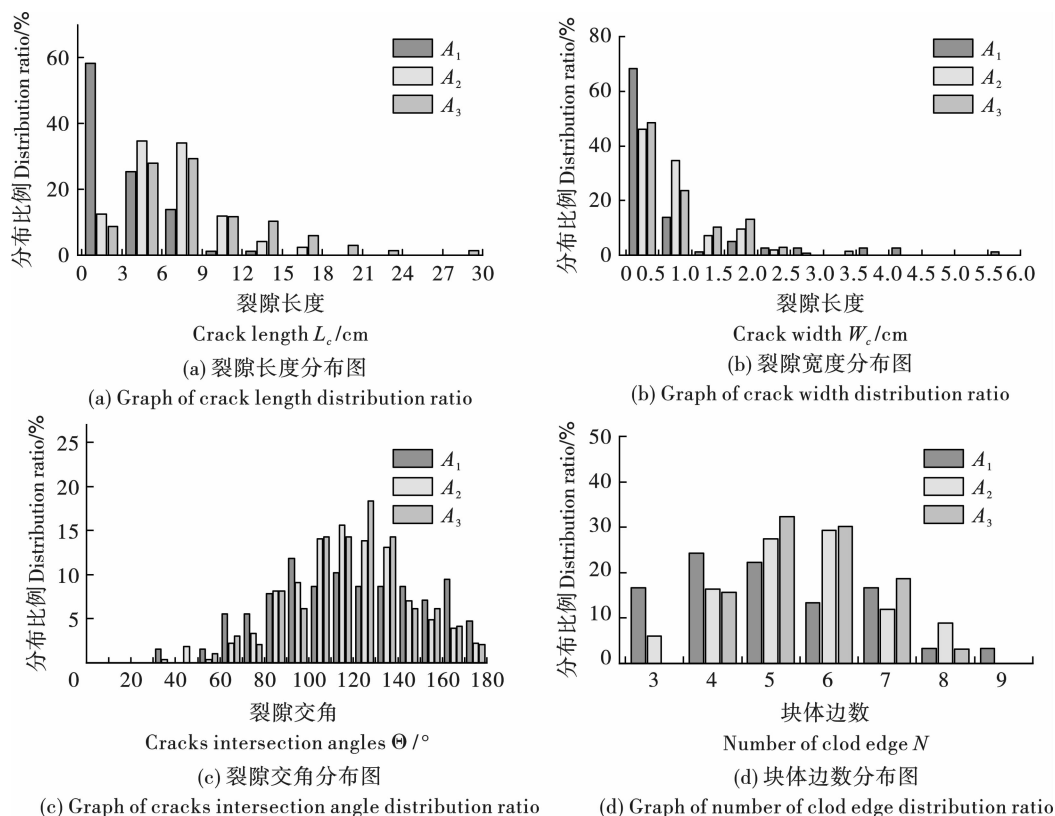


图6 裂隙网格度量指标的分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of quantized parameters of the fracture mesh crack network

1.3 爆破土体分区及土体破裂机制

土体在爆破冲击波及爆生气体的作用下发生剧烈变形,土体的物理力学性质发生改变,而随着与炸药距离的增加,爆破冲击波及爆破能量不断衰减,爆破对土体的影响程度不断减轻。根据爆破对土体的影响程度,结合前人的研究成果可将爆破后土体大致分为空腔区、破碎区、塑性变形区与弹性变形区^[6,10]。

为确定爆破后土体分区范围,首先应确定爆破后土体的影响范围。王海亮等通过大量的现场土体爆破试验^[12],发现爆破对土体的含水率、天然密度和饱和度等物理指标的影响规律明显。因此为确定此次爆破的影响范围,在爆破结束后以爆腔内层土体为起点,沿水平方向进行取样,分别测量不同水平距离处土体的天然密度与孔隙比,并将距爆腔内层不同距离定义为爆腔距,得出不同爆腔距与土体的天然密度和孔隙比的关系图(图7a)。由图7a可以

看出,随着爆腔距的增加土体的天然密度逐渐减小,而土体的孔隙比逐渐增大,这表明越靠近爆腔土体越密实。

由于土体的非均质性,即使同一地层不同位置的土体,其物理力学性质也有一定差异,因此为减少土体非均质性的影响,确定爆破的影响范围,本文引入变化率函数 $f'(x)$, $f'(x)$ 的定义为

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (3)$$

式中, $f'(x + \Delta x)$ 与 $f'(x)$ 分别表示爆腔距为 $x + \Delta x$ 与 x 所对应的天然密度或孔隙比值。

图7(b)给出了爆腔距与天然密度和孔隙比的变化率函数值变化图。由图可以看出,天然密度变化率为负值,且随着爆腔距的增加变化率绝对值不断减小,孔隙比的变化率为正值,且随着爆腔距的增加不断减小,且当爆腔距为70 cm时天然密度变化率与孔隙比变化率均趋于0,因此确定本次爆破的

水平方向影响范围为距爆腔 70 cm 处。由于在竖直方向取样具有许多局限性,因此此次室内试验仅测量水平方向爆破影响范围,根据李鹏毅等的研究结果表明^[25],采用等半径的球形炸药替换柱状炸药,

在不考虑柱状炸药的叠加效应进行理论计算时,计算与实际的塑性区范围误差小于 10%,因此假设此次爆破在水平方向与竖直方向的影响范围相同。

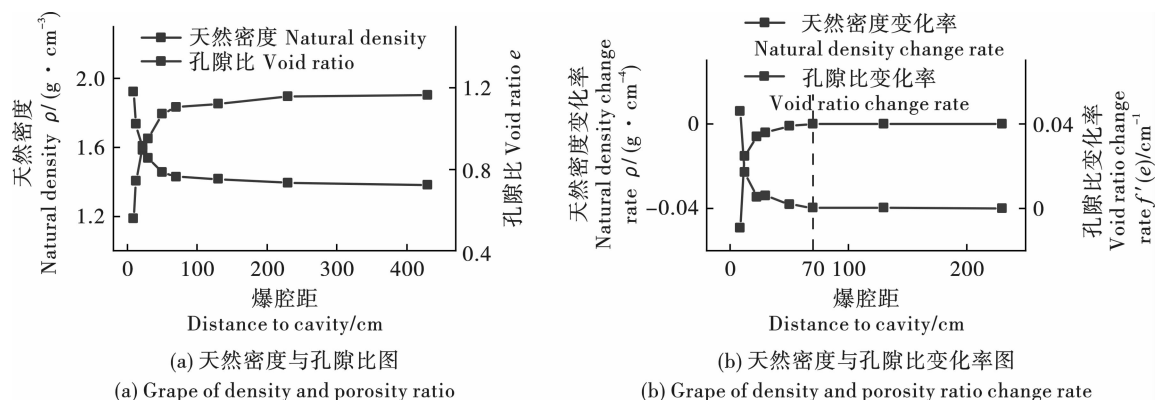


图 7 不同爆腔距天然密度与孔隙比图

Fig. 7 Density and porosity ratio plots at different distance to cavity

根据现场土体的破坏特征,采用测量统计法是确定土体爆破分区常用的方法^[10]。在爆破结束后,对开挖后的剖面进行测量,并还原爆破后土体剖面图,从而确定爆破后土体分区。分别测量了爆腔围岩轮廓与裂隙产状以及爆腔内层土体的厚度(图 8),并以剖面水平方向为 x 轴,剖面垂直方向为 z 轴,将测量的爆腔围岩轮廓与裂隙产状绘制于图中。

李鹏毅等指出柱状炸药爆破形成的爆腔在平面上近似为椭圆形^[25],由于爆腔整体呈“上大下小”的形态,因此对实测爆腔轮廓别按上下爆腔进行椭圆拟合。根据测量爆腔内层土体厚度约 10 cm,在爆腔下部椭圆拟合的基础上增加爆腔内层土体厚度,并按椭圆轮廓拟合,由此还原了爆破后土体剖面图。

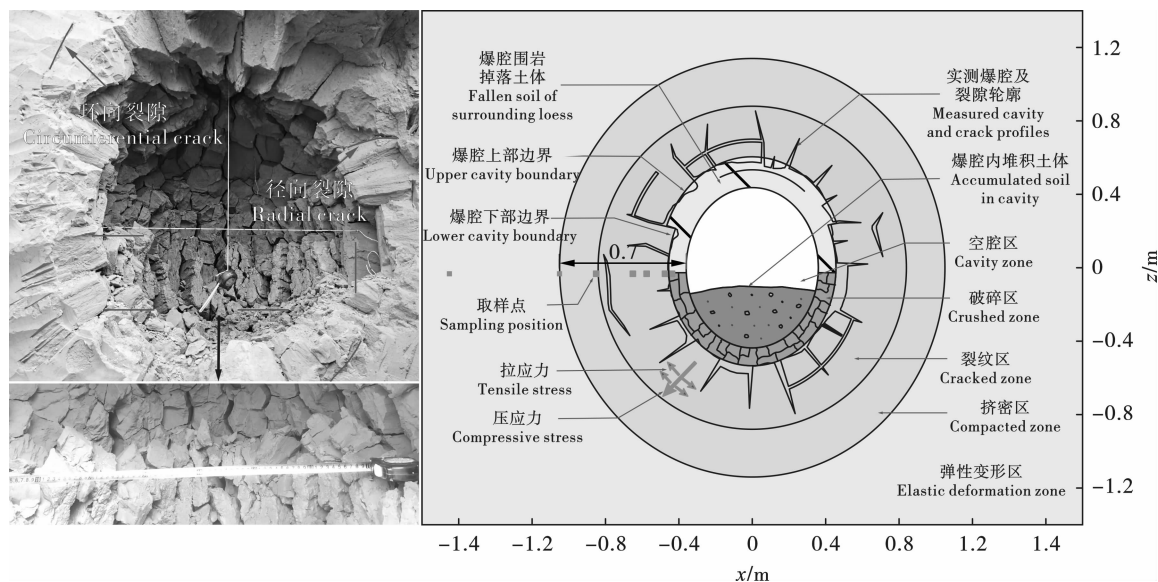


图 8 爆破黄土围岩土体分区图

Fig. 8 Zoning graph of surrounding loess after explosion

根据还原的爆破后土体剖面图,结合现场土体破坏特征与定量化统计结果,从而对爆破后土体进行分区。空腔区是土体在爆破时周围土体被挤出,从而在土体中形成的空腔。根据还原的土体剖面可

以看出,空腔区近似为椭圆形,空腔区 x 方向(径向)半径为 0.35 m, z 方向(轴向)半径为 0.43 m。破碎区位于空腔区外层,破碎区土体距爆炸中心最近,土体最为破碎。根据现场土体破坏特征以及定

量化统计结果可以看出,爆腔内层土体破碎程度高,土体发育有宽大贯通裂隙(图 2a8),土体表面有烧焦痕迹,且土体与爆腔下部土体分离,由此推断该层土体为破碎区土体。因此破碎区 x 方向(径向)半径为 0.45 m, z 方向(轴向)半径为 0.53 m。

破碎区外层是塑性变形区,根据土体的破坏特征又可进一步细分为裂纹区与挤密区^[10]。裂纹区土体在爆破时发生开裂和挤密,裂纹区土体可见径向裂隙与环向裂隙,裂纹区 x 方向(径向)半径为 0.84 m, z 方向(轴向)半径为 0.88 m。挤密区位于裂纹区外层,挤密区土体仅在爆破作用下发生挤密,挤密区 x 方向(径向)半径为 1.05 m, z 方向(轴向)

半径为 1.13 m。在塑性变形区外层时弹性变形区,该区土体在爆破作用下发生弹性变形。

2 不同炸药量下的影响规律及范围的确定

2.1 有限元模型及材料参数的确定

由于现场爆破试验周期长、成本高以及试验条件有限,为了探究爆破过程中力的传播与衰减和不同炸药量对黄土爆破的影响,采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件建立有限元模型。在现场试验的基础上建立不同炸药量的计算模型,为减少计算时间考虑模型的对称性,仅建立 1/2 模型,如图 9 所示。

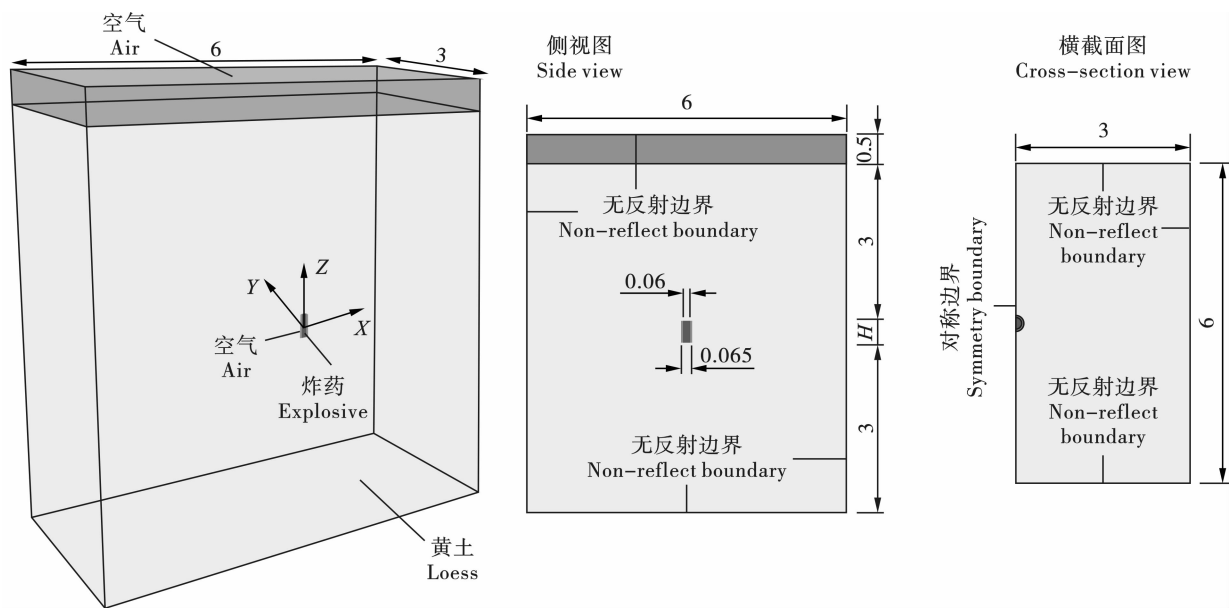


图 9 有限元模型及边界条件(单位:m)
Fig. 9 Finite element model and boundary condition(单位:m)

模型仅改变炸药长度,以模拟不同炸药量,图中 H 表示炸药长度, H 分别为 0.165 m、0.33 m、0.66 m、0.99 m、1.32 m 与 1.65 m,分别对应 0.5 kg、1 kg、2 kg、3 kg、4 kg 和 5 kg 的炸药。炸药长度与炸药量的关系为

$$H = 0.33w \tag{4}$$

在土体以上添加空气域,以观测爆破时土体是否会膨胀进入空气中。模型底部以及模型外侧施加非反射边界条件,以模拟无限域,在对称面设置为对称边界(图 9)。炸药、土壤和空气均采用 EULER 网格划分,采用多物质 ALE 算法进行模拟。由于炸药

埋深较浅,计算时不考虑重力的影响。

有限元模型所涉及材料包括空气、炸药和黄土。空气采用 MAT_NULL 材料模型,并使用 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 作为其状态方程,用来描述其压力的变化,状态方程表达式为

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \tag{5}$$

式中: $\mu = \frac{1}{v'} - 1$, v' 为相对体积; E 为单位体积内能; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 与 C_6 均为状态方程参数。空气所用参数具体数值见表 2。

表 2 空气材料参数
Table 2 Parameters of air

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	V_0
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	250	1

炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,并采用 JWL 状态方程描述爆破过程中爆破压力的变化,JWL 状态方程的表达式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

表 3 炸药材料参数

Table 3 Parameters of the explosive

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$
1080	4800	6.6	143	2.15	4.7	1.034	0.25	3×10^6

土壤采用 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型, MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型已被广泛应用于土体的冲击爆破模拟中。该模型所需主要参数包括土的密度 ρ 、剪切模量 G 、卸载体积模量 K 、极限拉伸应力 PC 和土的屈服面函数,该模型的屈服函数为^[17]

$$f = J_2 - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) \quad (7)$$

式中: J_2 为第二偏应力不变量; p 为土样所受静水压力; a_0 、 a_1 和 a_2 为拟合参数。由室内试验可知本次爆破影响范围为距爆腔 0.7 m。因此距爆腔 1 m 处可视为未扰动土体,取距爆腔 1 m 处土样进行三轴试验。得到土体参数见表 4。

表 4 黄土材料参数

Table 4 Parameters of the loess

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G/kPa	K/kPa	a_0/kPa^2	a_1/kPa	a_2	PC/kPa
1420	2.4×10^4	1.2×10^5	4.532×10^4	6.712	0.2054	-50

2.2 数值模拟及现场试验的对比分析

图 10 给出 1 kg 炸药量模拟的不同时刻土体压力云图,如图 10(a),以及不同时刻 x 轴与 z 轴上不同爆心距处(距离爆炸中心的距离)的压力,如图 10(b)。由图可以看出,爆破作用下土体中的压力波呈椭圆形向外扩散,且随着时间的增加,土体中的应力峰值减小,而爆破压力的作用范围变大,且在压力传播过程中 x 轴土体压力峰值大于 z 轴土体压力,如图 10(b),这是由于爆破压力在炸药的径向上存在叠加效应,这与潘强所观测的结果相似^[27]。在 8 ms 以后,压力云图已趋于稳定,土体中仅在爆腔周围保留有 400 kPa 左右的压力,见图 10(a)。

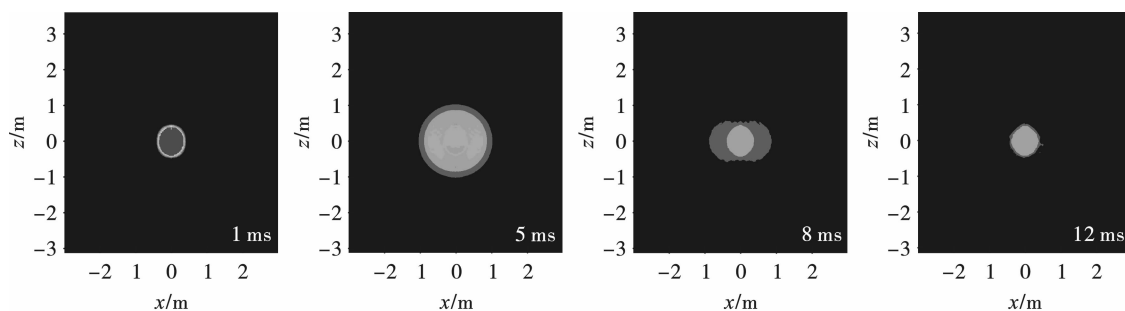
图 11 给出了 1 kg 炸药量模拟的不同时刻土体密度图,如图 11(a),以及 x 轴与 z 轴上不同爆心距的土体密度变化图,如图 11(b),而采用 ale 算法仅可反映出爆破后爆破空腔与影响范围的大小。在图中采用 r_{cx} 、 r_{cz} 、 r_{ix} 和 r_{iz} 分别代表爆破空腔的 x 方向(径向)半径、爆破空腔 z 方向(轴向)半径、影响范围 x 方向(径向)半径和影响范围 z 方向(轴向)半径,并给出不同时刻的 r_{cx} 、 r_{cz} 、 r_{ix} 和 r_{iz} 的具体数值表征爆腔及影响范围的尺寸变化。

由图 11(a)可以看出,8 ~ 12 ms 影响范围尺寸有部分收缩,这是由于土体中应力卸载所致。由图

11(b)可以看出,在最靠近爆腔存在低密度点,这一现象与许多研究者所发现的一致^[1,27],这是由于软件测得的密度为网格单元平均密度,因此在靠近爆腔处由于部分土体被挤出,从而导致低密度区的产生^[27]。12 ms 时模型 z 轴的土体密度发生明显波动,这是由于模型网格尺寸和长径比的关系,导致模型计算不稳定。模拟结束时未观测到土体有隆起现象,与现场试验所观测现象一致。

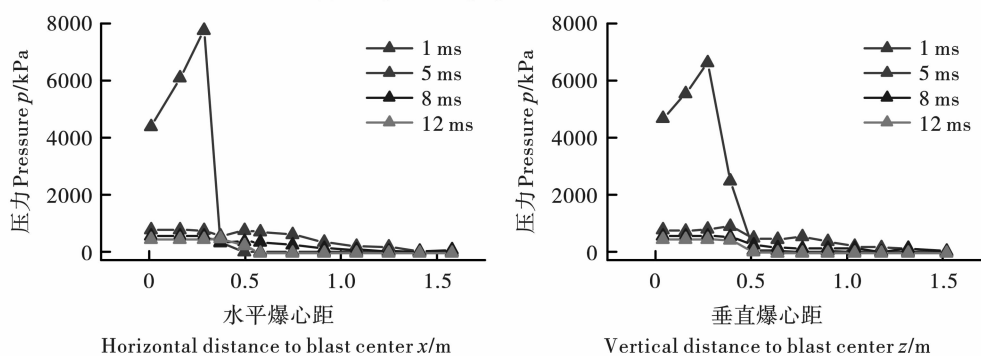
为更直观地看出土体扩腔过程中爆腔与影响范围的尺寸变化,图 12(a)给出了不同时刻的 r_{cx} 、 r_{cz} 、 r_{ix} 和 r_{iz} 的变化曲线图。由图可以看出爆腔尺寸随时间增大,并在 8 ms 时基本达到稳定,影响范围尺寸则先增大后减小,在 8 ms 后变化较小。由于 8 ms 土体爆腔与影响范围的尺寸已基本达到稳定,且模型土体密度在 8 ms 以后产生波动,模型变得不稳定。综合考虑,取 8 ms 作为本次模拟的结束时间。本次模拟所得爆腔尺寸 r_{cx} 为 0.38 m, r_{cz} 为 0.45 m,影响范围尺寸 r_{ix} 为 1.01 m, r_{iz} 为 0.95 m,爆腔相对误差分别为 r_{cx} 为 8.5%、 r_{cz} 为 4.6%,影响范围相对误差分别为 r_{ix} 为 -3.8%、 r_{iz} 为 -15.9%。其中 r_{cx} 、 r_{cz} 和 r_{ix} 误差均在 10% 以内,而 r_{iz} 的相对误差较大。这是由于现场试验并未测量垂直方向的土体密度,而是假设水平方向与垂直方向影响范围是等厚的,

因此导致 r_{iz} 的相对误差较大。



(a) 不同时刻土体压力图

(a) Soil pressure graphs at different times

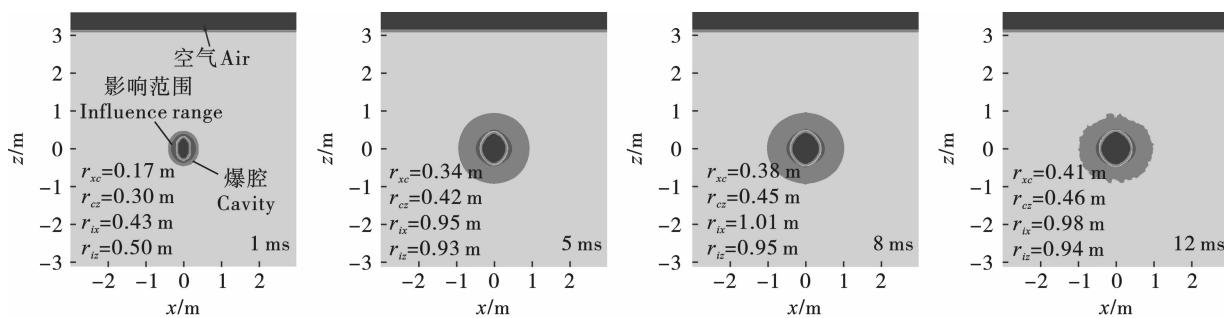


(b) 不同距离土体压力图

(b) Soil pressure graphs at different distances

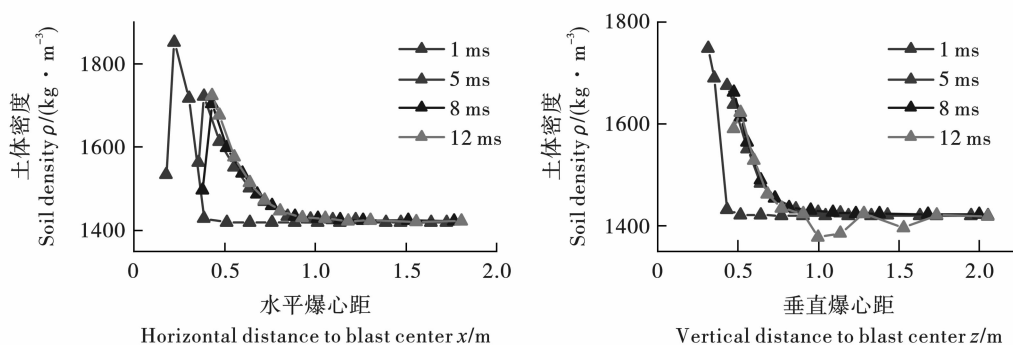
图 10 爆破压力演化过程图

Fig. 10 Graph of the evolution process of blasting pressure



(a) 不同时刻土体密度图

(a) Soil density graphs at different times



(b) 不同距离土体密度图

(b) Soil density graphs at different distances

图 11 土体密度演化过程图

Fig. 11 Graph of the evolution process of soil density

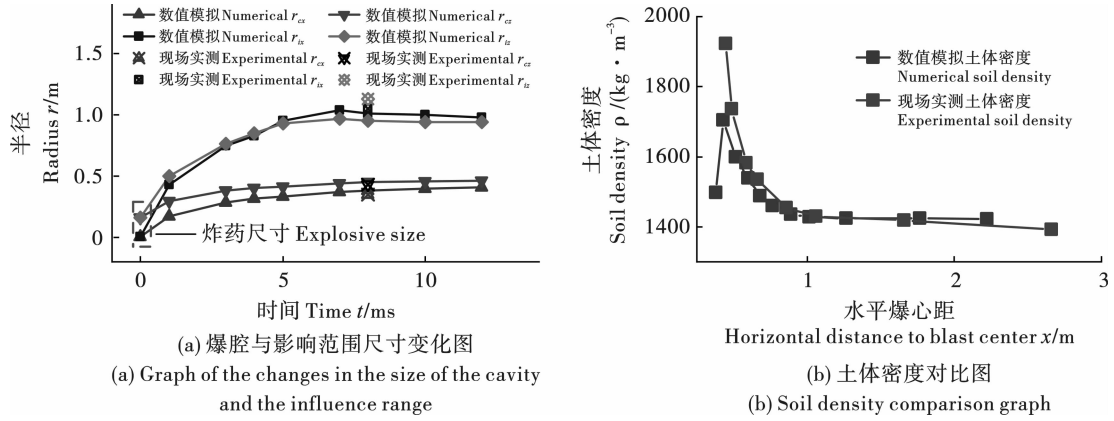


图 12 数值模拟与现场试验结果对比图

Fig. 12 Comparison graphs of numerical simulation and experimental results

为比较数值模拟与现场试验对土体挤密的效果,图 12(b)给出了数值模拟与现场试验 x 轴上不同爆心距下的土体密度变化曲线。由图可以看出,由于数值模拟软件限制,导致土体密度在爆腔处降低。在低密度区以外,数值模拟与现场实测土体密度衰减规律基本一致。而数值模拟与现场实测土体密度在离爆腔较近的部分相差较大,这是由于在靠近爆腔区域土体破碎,土体裂隙发育而现场测量土体密度时所取土样为不含裂隙的完整土样,因此未考虑裂隙对土体密度的影响,而采用数值模拟所测

量的土体密度为土体的平均密度,因此导致现场实测土体密度大于数值模拟所得到的土体密度。综合考虑,认为此次模拟具有一定参考性。

2.3 不同炸药量下的影响规律及范围确定

图 13 给出了不同炸药量下土体沿 x 轴和 z 轴不同爆心距土体密度变化图。由图 13(a)可以看出,当炸药量由 0.5 kg 增加到 2 kg 时影响范围有明显增加,当炸药量大于 2 kg 后影响范围随着炸药量的增加而增长缓慢。由图 13(b)可以看出,土体爆腔与影响范围随着炸药量的增加而增大。

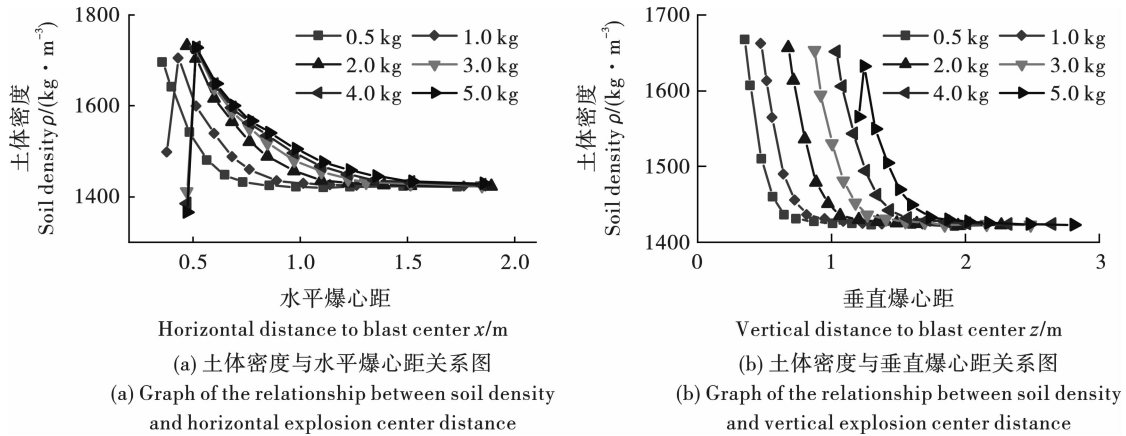


图 13 不同炸药量土体密度与爆心距关系图

Fig. 13 Relationship between soil density and distance to blast center under different explosive weight

图 14 分别给出了不同炸药量下爆破空腔与影响范围尺寸的变化图。由图可以看出爆腔 x 方向(径向)半径 r_{cx} 与影响范围 x 方向(径向)半径 r_{ix} 均与炸药量呈双曲线函数关系,这是由于随着炸药长度的增加炸药在径向的应力叠加效应不断减弱。当炸药长度为足够长时,土体爆破在径向上便可简化为一平面应变问题,此时爆腔与影响范围在 x 方向半径只与地质条件、爆源参数和装药半径有关^[10]。

由于炸药长度与炸药量关系为 $\frac{H}{2} = 0.165w$,又由图可以看出爆腔 z 方向(轴向)半径 r_{cz} 和影响范围 z 方向(轴向)半径 r_{iz} 均与炸药量 w 呈线性关系,且斜率均接近 0.165,表明炸药顶部到爆腔顶部 $r_{cz} - \frac{H}{2}$ 与炸药顶部到影响范围顶部 $r_{iz} - \frac{H}{2}$ 随炸药量增加基本保持不变。

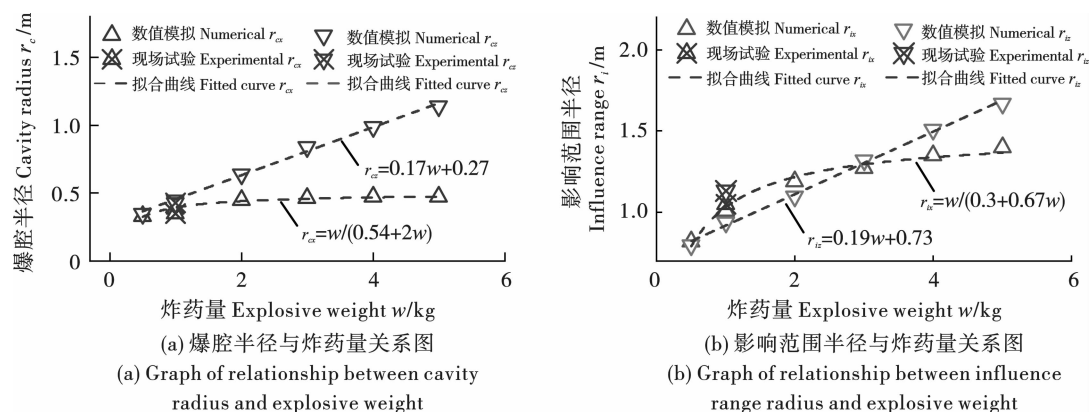


图14 爆破空腔与影响范围尺寸与炸药量关系图

Fig. 14 Graph of blasting cavity and influence range radius with explosive weight

3 结论

通过现场爆破试验和数字图像处理,获得了爆破后爆腔不同区域土体的破碎特征,并进行室内试验确定了爆破的分区范围。对比现场试验与数值模拟结果,验证了数值模拟方法的合理性,并进行不同炸药量的爆破数值模拟,获取了不同炸药量下的黄土爆破影响规律。获得如下结论:

1) 基于1 kg柱状炸药的现场黄土爆破试验,确定了爆破后土体分区与各分区范围。爆破后土体可以细分为空腔区、破碎区、裂纹区、挤密区和弹性变形区,各分区形状近似为椭圆形。空腔区径向半径为0.35 m,轴向半径为0.43 m;破碎区径向半径为0.45 m,轴向半径为0.53 m;裂纹区径向半径为0.84 m,轴向半径为0.88 m;挤密区径向半径为1.05 m,轴向半径为1.13 m。

2) 基于数值图像处理技术,确定了爆腔不同区域的块体与裂隙特征。爆破后破碎区土体同时发育有宽大的贯通裂隙和大量“细短型”裂隙,裂隙多以“T”型节点相交,块体多为不规则四边形,且块体形态复杂,内部发育大量裂隙。而裂纹区土体裂隙则多为“细长型”,且裂隙则多以“Y”型节点相交,块体多为不规则五边形和六边形。

3) 基于数值模拟技术,在仅改变炸药长度条件下确定了不同炸药量下爆破的影响范围。不同炸药量爆破作用下,爆腔与影响范围的径向半径与炸药量呈双曲线关系,爆腔与影响范围的轴向半径与炸药量呈线性关系。

参考文献 (References)

[1] LI Hai-chao, TAO Jun-liang, WEI Lian-yu, et al. Explosive compaction technology for loess embankment settlement control: numerical simulation and field implementa-

tion [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(4): 975-997.

[2] 党进谦, 严宝文, 李 靖, 等. 爆破成腔技术在旱作农业中的应用 [J]. 水利学报, 2002(10): 103-106, 112.

[2] DANG Jin-qian, YAN Bao-wen, LI Jing, et al. Application of cavity-making by explosion in arid-agricult [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(10): 103-106, 112. (in Chinese)

[3] 张文轩. 坚硬黄土层立井掘进施工技术研究与应用 [D]. 西安: 西安科技大学, 2015.

[3] ZHANG Wen-xuan. Research and application on excavation construction technology of vertical shaft in hard loess layer [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[4] 王大兴. 鄂尔多斯盆地黄土塬三维地震勘探进展、难点及技术需求 [J]. 石油物探, 2024, 63(3): 517-534.

[4] WANG Da-xing. Progress, challenges, and technical requirements of 3D seismic exploration in the loess tableland of the Ordos Basin, China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(3): 517-534. (in Chinese)

[5] 胡超俊, 侯 艳, 徐礼贵, 等. 鄂尔多斯盆地深部煤层气地震勘探关键技术进展与应用成效 [J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1903-1917.

[5] HU Chao-jun, HOU Yan, XU Li-gui, et al. Research progress and application effect of key seismic exploration technologies of deep coalbed methane in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1903-1917. (in Chinese)

[6] 亨利奇 (Henrych J). 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 179-183.

[7] 徐舜华, 孙军杰, 王兰民. 爆破场地黄土震陷空间分布特征研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2073-2078.

[7] XU Shun-hua, SUN Jun-jie, WANG Lan-min. Distribution characteristics of seismic subsidence of in-test field by explosion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2073-2078. (in Chinese)

[8] WANG Ming-yang, QIU Yan-yu, YUE Song-lin. Similitude

- laws and modeling experiments of explosion cratering in multi-layered geotechnical media [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 117: 32-47.
- [9] 王志鹏, 李海超, 周双涛, 等. 黄土中爆炸空腔体积规律的数值模拟[J]. *爆破*, 2016, 33(4): 73-77, 126.
- [9] WANG Zhi-peng, LI Hai-chao, ZHOU Shuang-tao, et al. Numerical simulation of cavity volume rule of explosion in loess [J]. *Blasting*, 2016, 33(4): 73-77, 126. (in Chinese)
- [10] 黄承贤. 土中爆扩及其挤密效应的研究[J]. *爆炸与冲击*, 1996(4): 354-360.
- [10] HUANG Cheng-xian. Study of blast-enlargment and compaction in soil [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1996(4): 354-360. (in Chinese)
- [11] 王海亮, 冯长根, 王丽琼. 土中爆炸成腔的现场试验研究[J]. *火炸药学报*, 2001(2): 12-15.
- [11] WANG Hai-liang, FENG Chang-gen, WANG Li-qiong. Study on on-site experiment of explosion cavity in soil [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001(2): 12-15. (in Chinese)
- [12] 王海亮, 叶朝良. 爆炸成腔后土体物理力学性能的变化规律[J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2617-2622.
- [12] WANG Hai-liang, YE Chao-liang. Variation pattern of soil physico-mechanical performance by explosive enlargement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2617-2622. (in Chinese)
- [13] 唐朝生, 王德银, 施 斌, 等. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2298-2305.
- [13] TANG Chao-sheng, WANG De-yin, SHI Bin, et al. Quantitative analysis of soil desiccation crack network [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2298-2305. (in Chinese)
- [14] TANG Chao-sheng, ZHU Cheng, CHENG Qing, et al. Desiccation cracking of soils: A review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216: 103586.
- [15] PERON H, HUECKEL T, LALLOU L, et al. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(10): 1177-1201.
- [16] COSTA S, KODIKARA J K, SHANNON B. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments [J]. *Geotechnique*, 2013, 63(1): 18-29.
- [17] THOMAS M A, CHITTY D E. Constitutive soil properties for mason sand and Kennedy Space Center [R]. Albuquerque: NASA, 2011.
- [18] SALEH M, EDWARDS L. Evaluation of soil and fluid structure interaction in blast modelling of the flying plate test [J]. *Computers & Structures*, 2015, 151: 96-114.
- [19] 刘 琦, 翟超辰, 张跃飞, 等. 地面和埋置爆炸土中地冲击作用分区数值模拟及试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(8): 3-21.
- [19] LIU Qi, ZHAI Chao-chen, ZHANG Yue-fei, et al. Numerical simulation and test study on ground shock sub-zones in soil produced by ground and buried explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 3-21. (in Chinese)
- [20] 李文斌. 彭阳县志 [M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1996: 60-64.
- [21] 刘 蕊, 于 渤, 邓龙胜, 等. 爆炸作用下黄土介质损伤规律试验 [J]. *地球科学与环境学报*, 2025, 47(4): 1-13.
- [21] LIU Rui, YU Bo, DENG Long-sheng, et al. Experimental investigation on the damage of losses subject to blast loading [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2025, 47(4): 1-13. (in Chinese)
- [22] 戴 俊, 主编. *爆破工程* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 97-148.
- [23] 雷 振, 张智宇, 黄永辉, 等. 岩石爆破破碎能耗随抵抗线的变化规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(7): 151-160.
- [23] LEI Zhen, ZHANG Zhi-yu, HUANG Yong-hui, et al. An investigation of energy consumption variation in rock blasting breaking with the resistance line [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(7): 151-160. (in Chinese)
- [24] 王雪奎, 李东军, 朱耀庭, 等. 基于数字图像技术的黏性土颗粒形状分析 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(S2): 168-171.
- [24] WANG Xue-kui, LI Dong-jun, ZHU Yao-ting, et al. Particle shape analysis of clay based on digital image technology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(S2): 168-171. (in Chinese)
- [25] 李鹏毅, 王仲琦, 徐 谦, 等. 有限长柱形药包土中爆腔特征尺寸的计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 100-108.
- [25] LI Peng-yi, WANG Zhong-qi, XU Qian, et al. Calculation methods for characteristic sizes of blasting cavities induced by finite-length cylindrical charges in soil [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 100-108. (in Chinese)
- [26] 崔 浩, 郭 锐, 宋 浦, 等. 基于遗传算法辨识炸药JWL状态方程参数的研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(9): 174-180, 209.
- [26] CUI Hao, GUO Rui, SONG Pu, et al. Identification of parameters of explosive JWL state equation based on genetic algorithm [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(9): 174-180, 209. (in Chinese)
- [27] 潘 强. 爆炸荷载作用下土体压密效应研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [27] PAN Qiang. Study of soil compaction effect by blast loading [D]. Chengdu: Southwest jiaotong university, 2010. (in Chinese)