

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.012

黏土半巷道围岩模型过巷道轴线平面破坏 过程实验观测*

王学滨^{1,2}, 曹思雯², 董伟², 侯文腾²

(1. 辽宁工程技术大学计算力学研究所, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了观测过巷道轴线平面上应变局部化带及裂纹的发展演化规律, 开展了黏土半巷道围岩模型三轴压缩实验研究。半巷道围岩模型的观测表面处于平面应变状态, 且分步开挖巷道。在每次巷道开挖之前, 对半巷道围岩模型卸荷。每次巷道开挖之后, 再对半巷道围岩模型加荷。采用数字图像相关方法观测了观测表面的最大剪切应变场, 并统计了裂纹面积百分比随纵向应变的演化规律。得到以下结论: 当纵向应变较高时, 在半巷道围岩模型的观测表面上, 出现了由巷道两帮或两帮与掌子面交点处发展出的应变局部化带; 另外, 还出现了距离巷道表面较远的应变局部化带。由此可以推出, 垂直于巷道轴线平面上将会出现分区破裂化。裂纹面积百分比随纵向应变的增加而增加; 随着阈值(可识别的裂纹面积的最小值)的增加, 裂纹面积百分比降低, 但降低的速度越来越慢。剪裂纹主要位于巷道的两帮; 拉裂纹遍布各处, 呈现一定的等间距性。

关键词: 巷道围岩; 巷道轴线; 平面应变; 分区破裂化; 应变局部化; 数字图像相关方法; 裂纹

中图分类号: TD315; TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0404-08

Experimental Observation of Failure Processes of Clay Semi-models of the Tunnel Surrounding Rock at the Plane Going Through the Tunnel Axis

WANG Xuebin^{1,2}, CAO Siwen², DONG Wei², HOU Wenteng²

(1. Institute of Computational Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To observe the evolution of strain localization bands and cracks of the tunnel surrounding rock at the plane going through the tunnel axis, experimental studies of clay semi-models of the tunnel surrounding rock in triaxial compression have been conducted. The measured surface of the semi-model was in a plane strain condition and the tunnel was excavated in stages. Before an excavation step, the semi-model was unloaded. After an excavation step, the semi-model was reloaded. The maximum shear strain of the measured surface was obtained by use of the digital image correlation method. The statistical analysis of percentages of cracking areas with an increase of longitudinal strain was conducted. The results show that when the longitudinal strain reached a certain value, strain localization bands originated from both sides of the tunnel or originated from intersection points of two sides of the tunnel. In addition, some strain localization bands far away from the tunnel surface were observed. There-

* 收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51874162)、辽宁省百千万人才工程项目(2017)资助

作者简介: 王学滨(1975-), 男, 教授, 博士。主要从事工程材料变形、破坏及稳定性方面的研究。Email: wxbbb@263.net

fore, the zonal disintegration of the tunnel surrounding rock at planes orthogonal to the tunnel axis would emerge. Percentages of cracking areas increased with an increase of longitudinal strain. With an increase of the threshold value (the minimum identifiable cracking area), percentages of the cracking areas decreased, and the decreasing velocity slowed down. Shear cracks were located mainly at both sides of the tunnel, while tensile cracks were scattered, whose spacing was approximately identical to some extent.

Keywords: tunnel surrounding rock; tunnel axis; plane strain; zonal disintegration; strain localization; digital image correlation method; crack

引言

对于巷道围岩破坏形态的长期传统认识是由近及远依次是破裂区、塑性区和弹性区。也就是说,只有一个破裂区或塑性区。然而,随着开采深度的增加,巷道围岩破坏形态呈现了奇怪的现象,即由近及远交替呈现多个圆环形的破裂区和弹性区。这种奇怪的现象一般被称为分区破裂化,其最早在南非的金矿中被发现。俄罗斯学者在分区破裂化研究方面开展了先驱性、长期性的工作^[1-5]。

国内学者关注分区破裂化已有十多年时间,在分区破裂化的数值模拟研究和理论研究方面,已取得了不少研究成果^[6-12]。本文第1作者及合作者在数值模拟研究的基础上,提出了分区破裂化的空间局部化机理^[7,9]。该认识与过去的许多认识不同:分区破裂化是一种空间现象,而不是一种平面现象,垂直于巷道轴线平面上不同破裂区是不同的空间剪切带发展而产生的。换言之,不同破裂区的起源不同,外围破裂区不是内部破裂区跳过弹性区发展出来的。相比之下,实验研究方面的成果并不多见^[13-18]。在有些实验结果中,一些作者所谓的分区破裂化离分区破裂化的原义还有一定距离。例如,在分区破裂化的原义中,若干基本呈圆环形的破裂区的中心与巷道的中心几乎重合,而在一些实验结果中,在垂直于巷道轴线平面上,裂纹就像塑性力学中的滑移线一样,没有连接成圆环形,甚至没有连接成圆环形的趋势。一些作者将实验后巷道围岩模型沿巷道轴线剖开,观察到了过巷道轴线平面上裂纹的分布形态^[16-18],进而可推出垂直于巷道轴线平面上分区破裂化,但是这些凭肉眼的观察都是事后的,可获知的信息有限,不是在实验过程中的实时观测。应当指出,这些实验结果表明,过巷道轴线平面上裂纹基本上呈倾斜状。也就是说,垂直

于巷道轴线的不同平面上裂纹形态是不同的,这与本文第1作者及合作者提出的分区破裂化的空间局部化机理^[7,9]相符。

为了观测过巷道轴线平面上应变局部化带及裂纹的发展演化规律,本文开展了半巷道围岩模型三轴压缩实验研究。半巷道围岩模型的观测表面处于平面应变状态,且分步开挖巷道。在每次巷道开挖之前,对半巷道围岩模型卸荷。在每次巷道开挖之后,再对半巷道围岩模型加荷。采用数字图像相关方法观测了观测表面的最大剪切应变场,并统计了裂纹面积百分比随纵向应变的演化规律。

1 实验过程

模型制备采用泥浆固结法^[19]。实验用土取自辽宁省阜新市某建筑工地,距地表1~2 m,为低液限黏土,液限 $w_L=56.85\%$,塑限 $w_P=29.07\%$ 。模型制备过程如下:

(1)将土烘干后破碎过孔径1 mm的筛子。

(2)将土和水按照质量比1:3混合,并搅拌均匀,将土水混合物倒入模具中(图1(a)),用0.004 MPa的应力压实,待模型干燥至一定程度后(图1(b)),取出模型,适当修平。

(3)在模型面积最大的平面(观测表面)上制作人工散斑(图1(c))。

(4)测量模型的尺寸及重量。

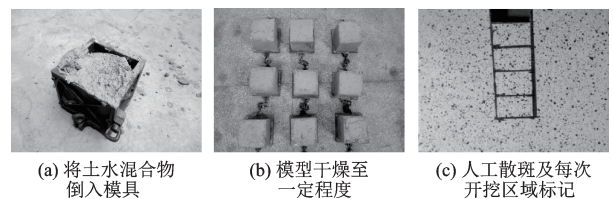


图1 半巷道围岩模型的制作过程

Fig.1 Production process of semi-models of the tunnel surrounding rock

(5)在制作了人工散斑的观测表面上标记每次开挖区域(图1(c))。每次开挖区域的长度×高度×厚度=3 cm×2 cm×2 cm,用钢尺实现第一次开挖。此后的模型即为半巷道围岩模型。

半巷道围岩模型的实验过程如下:

(1)将制成的半巷道围岩模型置于自主研发的加载装置内,并将加载装置置于试验机的平台上。该加载装置是一个箱型体,半巷道围岩模型与箱型体的左侧、右侧及后侧之间留有空隙,在此3处空隙设置气囊。通过对气囊充气实现对半巷道围岩模型施加围压。箱型体的前方设置有一块透明平板,该透明平板与半巷道围岩模型的观测表面贴合,限制观测表面的法向变形。透明平板固定在箱型体上。这样,观测表面将处于平面应变状态。半巷道围岩模型的垂直方向压力(轴压)由试验机施加(图2),试验机上压头下方放置一个垫块,垫块的尺寸

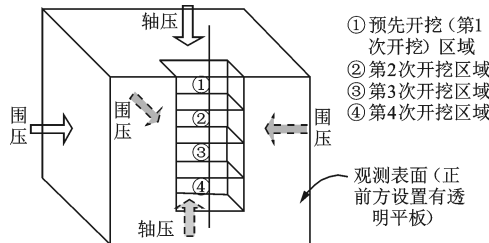


图2 半巷道围岩模型的受力及巷道开挖示意

Fig.2 Schematic of the semi-model of the tunnel surrounding rock under loading and excavation

略小于半巷道围岩模型上表面的尺寸。

(2)适当调整加载装置的位置,使试验机上压头的中心线通过半巷道围岩模型上表面和垫块上表面的形心。在透明平板前方,布置光学测量系统。

(3)通过对气囊充气,实现对半巷道围岩模型施加围压。启动试验机,以应力控制加载方式对半巷道围岩模型施加轴压。同时,启动光学测量系统,拍摄半巷道围岩模型变形破坏过程中观测表面

的图像。当轴压达到一定值后,停止试验机加载和光学观测,将气囊中气体排空,拆除透明平板,进行下一次巷道开挖。随后,重复本步骤,直至实验结束。

应当指出:

(1)每次对气囊充气要求气压相同。

(2)本文半巷道围岩模型中巷道的断面形状为矩形(3 cm×2 cm)。在受载条件下,难以采用有关工具(例如钻头)实现巷道自动开挖。因此,在下次巷道开挖之前,拆除半巷道围岩模型前方的透明平板、将气囊中气体排空和采用人工方式开挖巷道是不得已而为之。

(3)本文半巷道围岩模型为通常巷道围岩模型的一半,观测表面即为前、后对称面,此对称面的左、右对称线即为巷道轴线。采用半巷道围岩模型是为了便于观测过巷道轴线平面破坏过程。对于受载的通常的巷道围岩模型,当巷道的断面形状为圆形时,巷道的自动开挖一般不存在困难。

(4)收集破坏后的半巷道围岩模型(包含挖去的部分),烘干后称重,以测量半巷道围岩模型实验过程中的含水率(图3)。共开展了8个半巷道围岩模型的三轴压缩实验,表1给出了其中4个的基本信息及实验条件。



图3 实验后的半巷道围岩模型

Fig.3 Experimental results of semi-models of the tunnel surrounding rock

表1 半巷道围岩模型的基本参数及实验条件

Table 1 Basic parameters of semi-models of the tunnel surrounding rock and test conditions

编号	高度×宽度×厚度/ (cm×cm×cm)	容重/ (kN·m ⁻³)	湿密度/ (kg·m ⁻³)	含水率/ %	加载时间/s			
					开挖次数			
					1	2	3	4
#7	14.0×14.2×11.9	15.77	2.13×10 ³	21.6	52	54	—	—
#2	14.0×14.0×12.8	14.41	1.95×10 ³	19.8	55	83	86	—
#5	13.9×14.2×11.7	15.40	2.01×10 ³	16.5	52	117	120	—
#4	14.0×13.8×11.9	14.71	1.94×10 ³	19.1	55	80	98	80

2 实验结果分析

2.1 纵向应力—纵向应变曲线

图4(a~d)分别给出了#2、#4、#5和#7半巷道围岩模型的纵向应力 σ_a —纵向应变 ϵ_a 曲线。#2和#5半巷道围岩模型经历3次加载，#4和#7半巷道围岩模型分别经历4次及2次加载。图中的虚线是上一次加载结束至下一次加载开始的连线。由图4可以发现，下一次加载的 σ_a — ϵ_a 曲线不能通过上一次加载结束时 σ_a — ϵ_a 曲线上的点，这应与半巷道围岩模型较软，加载过程中试验机的应力加载速度发生变化有关。应当指出，实验过程中试验机的加载速度设置为0.052 kN/s，但是试验机记录的应力加载速度却是变化的，为-0.061 5~0.184 6 kN/s。

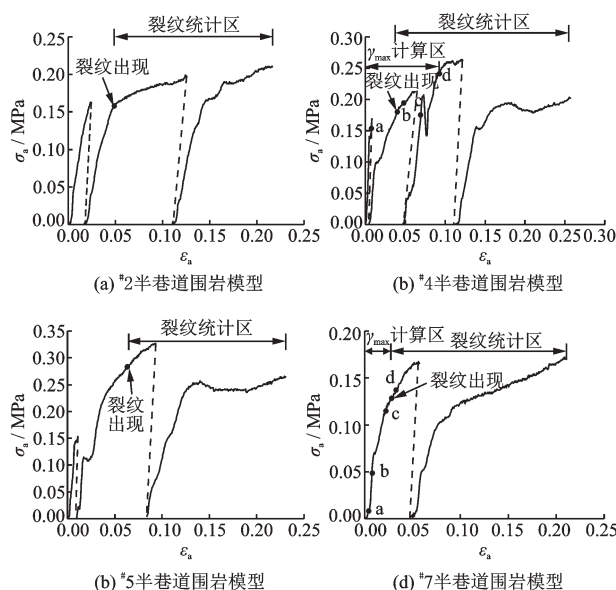


图4 半巷道围岩模型开挖过程中的 σ_a — ϵ_a 曲线

Fig.4 σ_a — ϵ_a curves of semi-models of the tunnel surrounding rock during the excavation process

2.2 最大剪切应变的分布及演化

图5和图6分别给出了#4和#7半巷道围岩模型开挖过程中不同 ϵ_a 时最大剪切应变 γ_{max} 的分布。利用数字图像相关方法程序^[20-22]计算时，样本子区取31×31像素，中心点间隔取31像素，1像素=0.09 mm。各子图下方和左方的数字分别代表测点的列数和行数，各子图中白色区域代表巷道。图5(a~d)和图6(a~d)分别与图4(b)和图4(d)中a~d点相对应。

由图5(a)可以发现，在第1次加载过程中，#4半巷道围岩模型的 γ_{max} 基本上是均匀的，在掌子面前方且半巷道围岩模型左、右对称线右侧出现了1条较宽阔的 γ_{max} 高值区。由图5(b)可以发现，在第2次加载过程中，上述 γ_{max} 高值区继续发展；与此同时，在半巷道围岩模型上端面附近 γ_{max} 也较高。由图5(c)可以发现，在第3次加载过程中，由半巷道围岩模型巷道的两帮都发展出了若干清晰且狭窄的应变局部化带，有的应变局部化带距离巷道表面较远；此外，半巷道围岩模型上端面附近也出现了若干交叉的剪切带(倾斜的应变局部化带)。

由图6(a~d)可以发现，对于#7半巷道围岩模型，在第1次加载过程中， γ_{max} 由均匀向不均匀转变，最终形成了若干应变局部化带。其中，有的应变局部化带呈垂直，这应与半巷道围岩模型的劈裂有关；有的应变局部化带呈倾斜，其由巷道的两帮与掌子面交点处发展出来，这与半巷道围岩模型的剪切破坏有关。应当指出；有的应变局部化带距离巷道表面较远。

为了清楚地了解 γ_{max} 的分布及演化规律，在图5和图6中各布置了一条水平测线，坐标 s 的原点位于测线的左端。为了使图5和图6清晰，仅在图5(d)和图6(d)中显示了测线的位置。#4和#7半巷道围岩模型测线上 γ_{max} — s 曲线的分布及演化规律分别

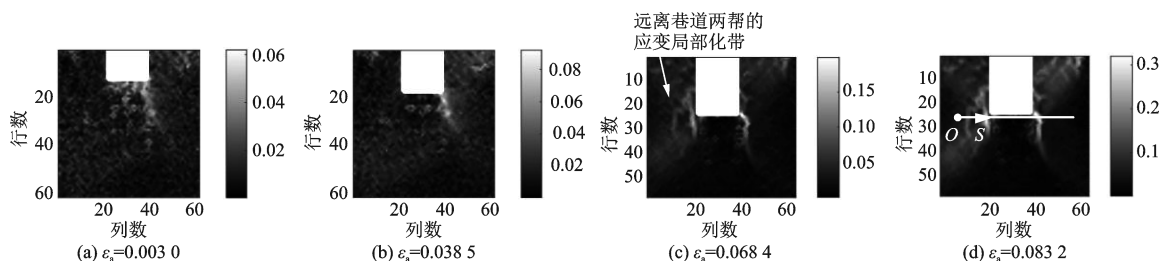


图5 #4半巷道围岩模型开挖过程中不同 ϵ_a 时 γ_{max} 的分布及测线位置

Fig.5 Distributions of γ_{max} in the #4 semi-model of the tunnel surrounding rock during the excavation process for different ϵ_a and the position of the monitoring line

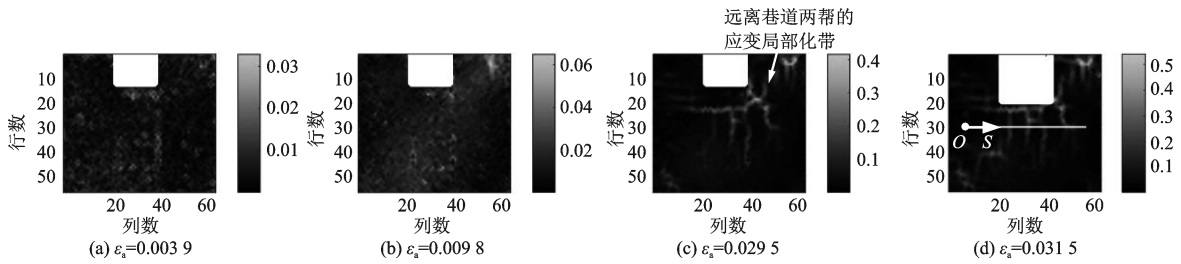


图6 #7半巷道围岩模型开挖过程中不同 ϵ_a 时 γ_{max} 的分布及测线位置

Fig.6 Distributions of γ_{max} in the #7 semi-model of the tunnel surrounding rock during the excavation process for different ϵ_a and the position of the monitoring line

见图7(a)和图7(b)。

由图7(a)可以发现,当 ϵ_a 较低时($\epsilon_a \leq 0.0385$), γ_{max} 的分布较均匀, $0.0017 \leq \gamma_{max} \leq 0.0659$; 当 ϵ_a 较高时($\epsilon_a \geq 0.0684$), γ_{max} 的分布出现若干峰值, 例如, 当 $\epsilon_a = 0.0832$ 时, γ_{max} 的局部峰值分别位于 $s = 155, 403$ 和 1085 像素处, 对应的 γ_{max} 分别为 $0.1318, 0.3222$ 和 0.2684 , 这些峰值位置正是图5中应变局部化带所处位置。由图7(b)可以发现, 当 ϵ_a 较低时($\epsilon_a \leq 0.0039$), γ_{max} 的分布较均匀, $0.0011 \leq \gamma_{max} \leq 0.0216$; 当 ϵ_a 较高时($\epsilon_a \geq 0.0295$), γ_{max} 分布出现若干峰值, 例如, 当 $\epsilon_a = 0.0315$ 时, γ_{max} 的局部峰值分别位于坐标 $558, 806, 992$ 和 1271 像素处, 对应的 γ_{max} 分别为 $0.1371, 0.1464, 0.1468$ 和 0.1961 , 这些峰值

位置正是图6中应变局部化带所处位置。根据各峰值的位置, 可以获得局部化带的间距, 间距从左向右依次为: $248, 186$ 和 279 像素, 即局部化带具有一定的等间距性。

综上所述, 当 ϵ_a 较高时, 在#4半巷道围岩模型的测线上, 由巷道的两帮发展出了较为对称的应变局部化带, 而在#7半巷道围岩模型的测线上, 发展出的应变局部化带呈一定的等间距性。有的应变局部化带距离巷道表面较远, 由此可以推出, 垂直于巷道轴线平面上将出现若干圆环形的应变局部化带。应变局部化带位置将发展成破裂区, 非应变局部化带位置是非破裂区。因此, 垂直于巷道轴线平面上将出现分区破裂化。

2.3 裂纹面积百分比统计分析

本文采用的数字图像相关方法适用于裂纹出现之前及刚出现不久应变场的计算。为了了解裂纹的发育情况, 下文对半巷道围岩模型裂纹面积百分比随 ϵ_a 的演化规律进行了统计。首先, 将所选择的图像二值化。所选择图像为试验机上压头下方垫块正下方的图像, 该图像的垂直方向的尺寸在半巷道围岩模型受载过程中被压缩, 而水平方向的尺寸稍小于半巷道围岩模型的宽度。在受载过程中, 半巷道围岩模型在水平方向上膨胀。这样, 所选择图像仅是半巷道围岩模型观测表面图像的一部分, 但其为绝大部分。应当指出, 二值化后的裂纹、开挖区域和部分散斑等区域被显示成白色, 而其余部分被显示成黑色。可通过阈值(可识别的裂纹面积的最小值)控制白色裂纹区域的大小。阈值越大, 识别出的白色裂纹越粗大, 细小的裂纹将被忽略(图8)。然后, 计算裂纹所占的像素数目与所选择图像的像素数目之比, 即为裂纹面积百分比。

图9给出了#2、#4、#5和#7半巷道围岩模型不同阈值时裂纹面积百分比随 ϵ_a 的演化规律。可以

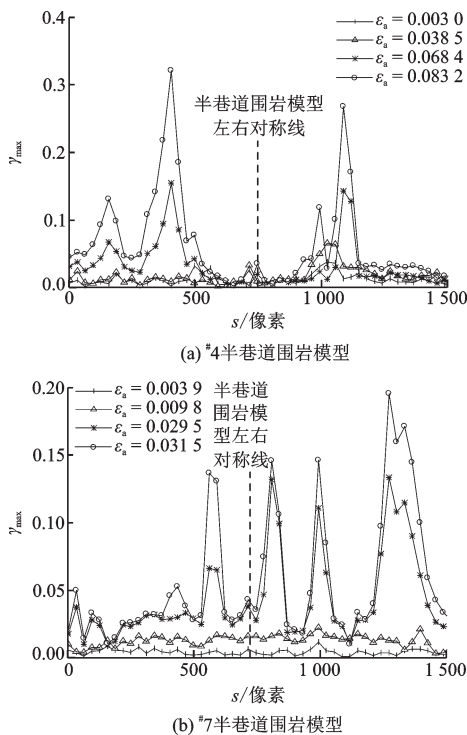


图7 不同 ϵ_a 时半巷道围岩模型测线上 γ_{max} 的分布

Fig.7 Distributions of γ_{max} at the monitoring lines of the semi-models of the tunnel surrounding rock for different ϵ_a

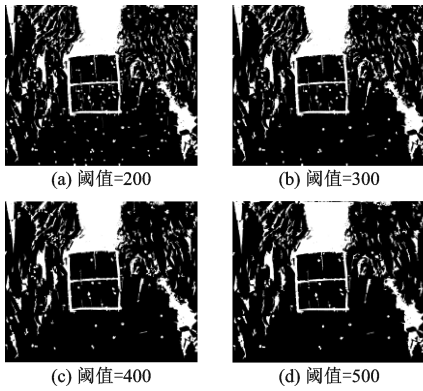


图8 不同阈值时#2半巷道围岩模型的裂纹的分布($\epsilon_a=0.2269$)
Fig.8 Distributions of cracks in the #2 semi-model of the tunnel surrounding rock ($\epsilon_a=0.2269$) for different threshold values

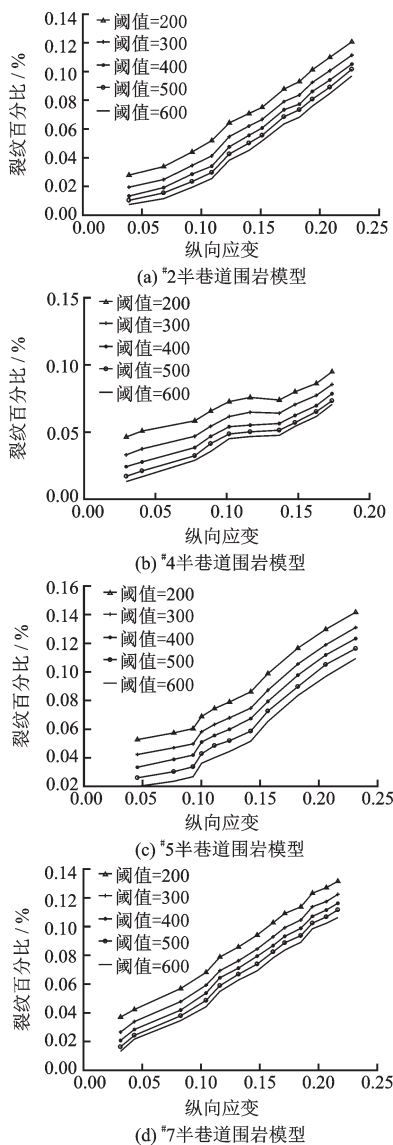


图9 不同阈值时裂纹面积百分比随纵向应变的演化规律
Fig.9 Evolution of percentages of cracking areas with an increase of longitudinal strain for different threshold values

发现:

(1) 裂纹面积百分比随 ϵ_a 的增加而增加。

(2) 阈值的选取不会影响裂纹面积百分比随 ϵ_a 增加的发展趋势。随着阈值的增加,裂纹面积百分比降低,但降低的速度越来越慢。裂纹面积百分比降低的速度越来越慢的原因是细小裂纹的数量比粗大裂纹的多,其总面积比粗大裂纹的大。

(3) 随着 ϵ_a 的增加,不同阈值时裂纹面积百分比- ϵ_a 曲线间距离保持不变,这意味着在 ϵ_a 增加的过程中细小裂纹的数量基本保持不变,这不意味着细小裂纹没有发展,而意味着若干细小裂纹可以聚合成粗大裂纹,与此同时,新的细小裂纹萌生。细小裂纹面积处在动态平衡的过程中。

上述统计只能统计裂纹面积,不能区别裂纹的类型。图10和图11给出了不同 ϵ_a 时半巷道围岩模

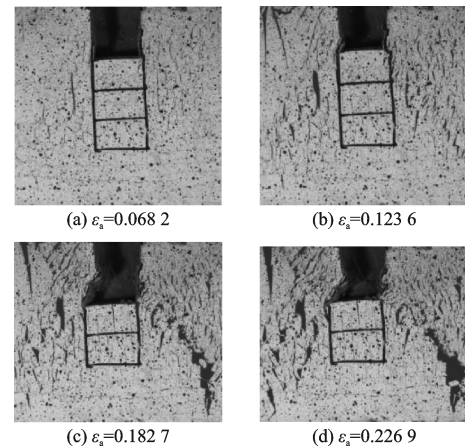


图10 #2半巷道围岩模型裂纹随纵向应变的演化规律
Fig.10 Evolution of cracks in the #2 semi-model of the tunnel surrounding rock with an increase of longitudinal strain

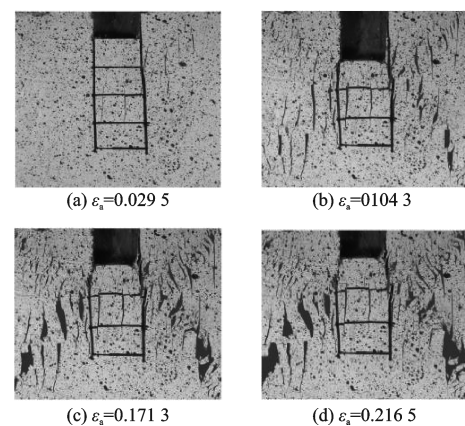


图11 #7半巷道围岩模型裂纹随纵向应变的演化规律
Fig.11 Evolution of cracks in the #7 semi-model of the tunnel surrounding rock with an increase of longitudinal strain

型裂纹的分布情况,其中,部分主要裂纹已标记为深色。由此可以发现:

(1)裂纹主要包括倾斜的剪裂纹和垂直的拉裂纹。

(2)剪裂纹主要位于半巷道围岩模型巷道的两帮;拉裂纹遍布各处,呈现一定的等间距性。

3 结 论

为了观测过巷道轴线平面上应变局部化带及裂纹的发展演化规律,开展了半巷道围岩模型三轴压缩实验研究。半巷道围岩模型的观测表面处于平面应变状态,且分步开挖巷道。在每次巷道开挖之前,对半巷道围岩模型卸荷。在每次巷道开挖之后,再对半巷道围岩模型加荷。采用数字图像相关方法观测了观测表面的最大剪切应变场,并统计了裂纹面积百分比随纵向应变的演化规律。结论如下:

(1)当纵向应变较高时,在半巷道围岩模型的观测表面上,出现了由巷道的两帮或两帮与掌子面交点处发展出的应变局部化带;另外,还出现了距离巷道表面较远的应变局部化带。由此可以推出,垂直于巷道轴线平面上将会出现分区破裂化。

(2)裂纹面积百分比随纵向应变的增加而增加;随着阈值(可识别的裂纹面积的最小值)的增加,裂纹面积百分比降低,但降低的速度越来越慢。裂纹面积百分比降低的速度越来越慢的原因是细小裂纹的数量比粗大裂纹的多,其总面积比粗大裂纹的大。

(3)剪裂纹主要位于半巷道围岩模型巷道的两帮;拉裂纹遍布各处,呈现一定的等间距性。

参考文献:

[1] Adams G R, Jager A J. Petroscopic observations of rock fracturing ahead of stope faces in deep-level gold mines[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1980, 80(6): 204-209.

[2] Shemyakin E I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part I: data of in situ observations[J]. Journal of Mining Science, 1986, 22(3): 157-168.

[3] Shemyakin E I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground work-

ings, part II: rock fracture simulated in equivalent materials[J]. Journal of Mining Science, 1986, 22(4): 223-232.

[4] Shemyakin E I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground mines, part III: theoretical concepts[J]. Journal of Mining Science, 1988, 23(1): 1-6.

[5] Shemyakin E I, Kurlenya M V, Oparin V N, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part IV: practical applications[J]. Journal of Mining Science, 1990, 25(4): 297-302.

[6] 宋义敏,王振武.深埋洞室围岩破坏区域碎裂化的非均匀弹性分析[J].北华航天工业学院学报,2008,18(2):1-4.

Song Y M, Wang Zh W. Mechanics study on zonal disintegration of deep rock mass[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2008, 18(2): 1-4. (in Chinese)

[7] 王学滨,潘一山,张智慧.基于加荷和卸荷模型的分区破裂化初步模拟及空间局部化机理[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(1):1-7.

Wang X B, Pan Y Sh, Zhang Zh H. Preliminary numerical simulation of zonal disintegration phenomenon based on loading and unloading models and the mechanism of spatial strain localization[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(1): 1-7. (in Chinese)

[8] 陈旭光,张强勇,李术才,等.基于扩展有限元的深部岩体分区破裂化现象初步数值模拟[J].岩土力学,2013,34(11):3291-3298.

Chen X G, Zhang Q Y, Li Sh C, et al. Preliminary numerical simulation of zonal disintegration phenomenon in deep surrounding rock mass based on extended finite elements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3291-3298. (in Chinese)

[9] 王学滨,张智慧,潘一山,等.岩石峰后脆性对圆形巷道围岩破坏及能量释放影响的数值模拟——兼谈滑移线与分区破裂化现象的差别[J].防灾减灾工程学报,2013,33(1):11-17.

Wang X B, Zhang Zh H, Pan Y Sh, et al. Numerical simulation of the influence of post-peak brittleness on the failure and energy liberation in the surrounding rock of a circular tunnel——discussion on the difference between slip lines and zonal disintegration[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1): 11-17. (in Chinese)

[10] 苏仲杰,钱七虎.深部洞室围岩分区破裂化现象数值模拟研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(2):

- 89-94.
- Shu Zh J, Qian Q H. Numerical simulation research on zonal disintegration phenomenon of rock mass around deep grotto[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(2): 89-94. (in Chinese)
- [11] 张绪涛, 张强勇, 向文, 等. 基于应变梯度理论的分
区破裂机制分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 724-734.
Zhang X T, Zhang Q Y, Xiang W, et al. Zonal disinte-
gration mechanism based on strain gradient theory[J].
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 724-734. (in Chinese)
- [12] 陈昊祥, 戚承志, 李凯锐, 等. 深部巷道围岩分区破裂
的非线性连续相变模型研究[J]. 岩土力学, 2017, 38
(4): 1 032-1 040.
Chen H X, Qi Ch Zh, Li K R, et al. Nonlinear continu-
ous phase transition model for zonal disintegration of
rock masses around deep tunnels[J]. Rock and Soil Me-
chanics, 2017, 38(4): 1 032-1 040. (in Chinese)
- [13] 李树忱, 钱七虎, 张敦福, 等. 深埋隧道开挖过程动态
及破裂形态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28
(10): 2 104-2 112.
Li Sh Ch, Qian Q H, Zhang D F, et al. Analysis of dyn-
amic and fractured phenomena for excavation process
of deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics
and Engineering, 2009, 20(10): 2 104-2 112. (in Chi-
nese)
- [14] 张智慧, 王学滨, 潘一山, 等. 分区破裂相似材料分层
观测试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21
(5): 1-5.
Zhang Zh H, Wang X B, Pan Y Sh, et al. Experiment
on layered observation of zonal disintegration of split
similar material[J]. Journal of Water Resources & Wa-
ter Engineering, 2010, 21(5): 1-5. (in Chinese)
- [15] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层
断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学
报, 2008, 27(3): 433-438.
Gu J C, Gu L Y, Chen A M, et al. Model test study
on mechanism of layered fracture within surrounding
rock of tunnel in deep stratum[J]. Chinese Journal of
Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433-
438. (in Chinese)
- [16] 张智慧, 王学滨, 潘一山. 利用多种相似材料模拟分
区破裂现象的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 22-24.
Zhang Zh H, Wang X B, Pan Y Sh. Experiment on uti-
lizing multi-kinds of similar materials to simulate zonal
disintegration phenomenon [J]. Journal of Water Re-
sources & Water Engineering, 2011, 22(3): 22-24.
(in Chinese)
- [17] 张强勇, 张绪涛, 向文, 等. 不同洞形与加载方式对
深部岩体分区破裂影响的模型试验研究[J]. 岩石力学
与工程学报, 2013, 32(8): 1 564-1 571.
Zhang Q Y, Zhang X T, Xiang W, et al. Model test
study of zonal disintegration in deep rock mass under dif-
ferent cavern shapes and loading conditions[J]. Chinese
Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32
(8): 1 564-1 571. (in Chinese)
- [18] 徐颖, 袁璞. 爆炸荷载下深部围岩分区破裂模型试
验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2):
3 844-3 851.
Xu Y, Yuan P. Model test of zonal disintegration in
deep rock under blasting load [J]. Chinese Journal of
Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 2):
3 844-3 851. (in Chinese)
- [19] Geiser F, Laloui L, Vulliet L. Elasto-plasticity of un-
saturated soils: laboratory test results on a remoulded
silt[J]. Soils and Foundations, 2006, 46(5): 545-556.
- [20] 王学滨, 杜亚志, 潘一山, 等. 基于DIC粗-细搜索方法
的单向压缩土样的侧向变形观测研究[J]. 工程力学,
2013, 30(4): 184-190.
Wang X B, Du Y Zh, Pan Y Sh, et al. Lateral defor-
mation measurements for soil specimens under uniaxial
compression based on digital image correlation with
coarse-fine search method[J]. Engineering Mechanics,
2013, 30(4): 184-190. (in Chinese)
- [21] 王学滨, 冯威武, 杜亚志, 等. 单轴压缩土样剪切带上
主应变轴偏转角分布及规律统计[J]. 防灾减灾工程
学报, 2016, 36(6): 853-860.
Wang X B, Feng W W, Du Y Zh, et al. Distributions
of principal strain axis rotational angles at shear bands of
soil specimens in uniaxial compression and statistical
analyses[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitiga-
tion Engineering, 2016, 36(6): 853-860. (in Chinese)
- [22] 杜亚志, 王学滨. 基于Newton-Raphson迭代与PSO数
字图像相关方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48
(34): 184-189.
Du Y Zh, Wang X B. Digital image correlation method
based on Newton-Raphson method and particle swarm
optimization algorithm [J]. Computer Engineering and
Applications, 2012, 48(34): 184-189. (in Chinese)

(本文责编:池营营)