

DOI: 10.11779/CJGE202001010

# 马蹄形隧道拱脚裂纹对围岩稳定性的影响

周 磊, 朱哲明\*, 刘 邦, 邱 豪, 董玉清

(四川大学建筑与环境学院深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 详细研究了隧道拱脚处裂纹对围岩稳定性及破坏模式的影响, 裂纹分两组进行设置: 一是裂纹以拱脚交界点为圆心逆时针方向分布在  $A(0^\circ < \alpha \leq 90^\circ)$ ,  $B(90^\circ < \alpha \leq 180^\circ)$  及  $C(180^\circ < \alpha \leq 270^\circ)$  区域, 且与隧道底板面成夹角  $\alpha$ ; 二是裂纹倾角  $\alpha$  为  $127^\circ$ , 与隧道跨度成不同裂纹长度比  $\beta$ 。采用物理模型试验和数值模拟对比分析拱脚裂纹的不利因素, 随后选择砂岩材料制作隧道模型试件进行室内试验, 得到裂纹因素对围岩强度的影响。数值模拟采用有限元程序分别计算裂纹尖端的应力强度因子与围岩损伤演化云图。通过两者对比论证可以得到如下结论: ①裂纹在隧道拱脚位置处成不同倾角  $\alpha$  时, 裂纹分布区域的危害程度可依次排列为  $B > C > A$ ; ②裂纹倾角  $\alpha$  在  $120^\circ \sim 135^\circ$  时, 裂纹对隧道整体的稳定性影响最大; ③在双轴压缩载荷作用下, 围岩的破坏行为主要是裂纹尖端与边墙的拉剪破坏及局部的拉伸破坏; ④裂纹长度比  $\beta$  对围岩整体稳定性影响表征为线性反比例函数关系。

**关键词:** 隧道; 裂纹倾角; 数值模拟; 拱脚裂纹; 围岩

中图分类号: TU45; U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)01-0091-09

作者简介: 周 磊(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事岩石断裂力学的研究工作。E-mail: zhoulitkx@126.com。

## Influence of arch foot crack on stability of surrounding rock mass in horseshoe-shaped tunnels

ZHOU Lei, ZHU Zhe-ming, LIU Bang, QIU Hao, DONG Yu-qing

(MOE Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, College of Architecture and Environment, Sichuan University,

Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to clearly investigate the effect of a crack at the tunnel arch foot on the stability and failure patterns of horseshoe-shaped tunnels, the cracks are classified into two categories: one is that the cracks are distributed counterclockwise in the areas of  $A(0^\circ < \alpha \leq 90^\circ)$ ,  $B(90^\circ < \alpha \leq 180^\circ)$  and  $C(180^\circ < \alpha \leq 270^\circ)$  with the arch foot junction as the center, and the other is that the crack dip angle  $\alpha$  is fixed as  $127^\circ$  between the tunnel bottom and the crack, and the ratio of crack length  $\beta$  is different. The disadvantageous factors of the arch foot crack are analyzed by comparing the laboratory test results with the numerical simulation ones, and then green sandstone is chosen to make tunnel model samples to obtain the effect of crack on the stability of the surrounding rock mass. The stress intensity factor at crack tip and the damage evolution nephogram of the surrounding rock mass are calculated by finite element program. The following significant conclusions are drawn: (1) When a crack is located at the tunnel arch foot with different angles of  $\alpha$ , the damage degrees of the tunnel model failure distribution zones can be arranged in a sequence:  $B > C > A$ . (2) As the dip angle  $\alpha$  ranges from  $120^\circ \sim 135^\circ$ , the stability of the tunnel is the weakest. (3) For a tunnel model sample under biaxial compression loading, the failure modes are mainly the tensile and shear failures at the crack tip and sidewall as well as the tensile failure at vault. (4) The influences of crack on tunnel stability are inversely proportional to the crack length ratio  $\beta$ .

**Key words:** tunnel; crack dip angle; numerical simulation; arch foot crack; surrounding rock mass

## 0 引言

围岩岩体属于天然的脆性非均匀材料的一种, 其中分布着许许多多的微裂隙, 而围岩的破坏行为本质上是微裂隙的损伤演化、形成与扩展、贯通直至围岩整体坍塌的过程。隧道含裂隙岩体的破坏也主要是由于裂纹尖端的应力集中现象造成围岩的拉伸与剪切破

坏, 为了确定含裂隙围岩岩体的强度、变形及破坏形式, 分析评价其强度质量, 故本文选择拱脚处裂纹缺

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672194); 四川省安全监管局安全生产科技项目(aj20170515161307); 四川省科技计划项目(2018JZ0036)

收稿日期: 2019-04-04

\*通信作者(E-mail: zhemingzhu@hotmail.com)

陷对围岩强度的影响作为研究对象, 对隧道工程实践中增强围岩结构的稳固性及整体性具有较大的工程实际意义。

目前, 隧道围岩内不同方位的节理及裂纹缺陷对围岩的强度影响及破坏形式的研究已经数不胜数, 并且取得了不错的研究成果<sup>[1-4]</sup>。杨忠民等<sup>[5]</sup>采用块体离散性软件分析了双连拱隧道单侧开挖对临洞拱顶沉降及围岩节理破坏范围的影响。Jia 等<sup>[6]</sup>选择采用有限元分析程序分析了层状节理不同方位和侧压力系数对含节理岩体隧道稳定性的削弱作用。Li 等<sup>[7]</sup>采用数学物理模型表征了脆性岩体在静地应力与动载荷作用下的破坏模式, 研究了地下洞穴在不同侧压力系数下的应变能密度与破裂带特征。Zhu 等<sup>[8]</sup>研究了主应力方向对完整隧道模型与含裂纹隧道模型稳定性的影响, 指出裂缝与围岩拱肩成  $135^\circ$  夹角时, 相应的围岩强度质量评价指标最弱。Liu 等<sup>[9]</sup>采用声发射技术与矩阵张量分析研究了含隧道断面的粗粒花岗岩试件在单轴压缩载荷作用下的破坏行为, 分析了隧道破坏时剪切裂纹与拉伸裂纹在围岩中的微观分布。国内外许多研究学者<sup>[10-13]</sup>也探究了裂隙位于隧道衬砌等部位时, 裂隙不同方位、深度、距离等变量因素对隧道围岩的损伤机理及稳固性的影响作用。

在数值分析方法方面, Zhu 等<sup>[14]</sup>、Haeri 等<sup>[15]</sup>、Fan 等<sup>[16]</sup>提出裂纹尖端的应力强度因子对岩体中岩爆的判断有很大作用, 并采用复变函数分析了有限元体介质中裂纹在双轴压缩载荷作用下裂纹尖端应力强度因子的边界配位计算法则, 提出了双轴压缩断裂准则。Wang 等<sup>[17]</sup>分析了隧道围岩内部裂缝的位置与方位对应力强度因子 (SIF) 的影响, 结果表明, 隧道的裂缝方向与荷载条件对应力强度因子有显著影响。Fan 等<sup>[18]</sup>采用复变函数得到了马蹄形隧道径向裂纹的应力强度因子解析解, 并对隧道围岩稳定性的影响进行了相应地评价。康勇等<sup>[19]</sup>采用有限元模拟软件研究了深埋隧道围岩的破坏行为顺序, 得出主要是从拱顶开裂至拱肩裂纹扩展再到围岩深部裂纹聚集、扩展。

关于裂隙对隧道围岩稳定性的影响研究很多, 尤其是围岩内拱肩、拱脚等处裂隙对隧道模型强度的削弱较大<sup>[20-21]</sup>, 而对于拱脚裂纹缺陷的倾斜角、位置、深度等变量因素对围岩稳定性影响的分析屈指可数。为了深入分析拱脚裂隙对隧道破坏行为的影响, 本文选择裂隙分布在隧道的底板位置不同区域, 与隧道底板成不同的倾角  $\alpha$ , 采用数值模拟分析和模型试验对比分析得到拱脚处最不利裂纹倾角与长度因素。模型试验采用砂岩作为模型材料, 数值模拟采用有限元分析软件进行, 对比论证试验数据结论的可靠性, 得到

拱脚处裂纹对隧道整体稳定性及破坏模式的影响。

## 1 试验模型设计

根据前人的研究成果, 马蹄形隧道的拱肩与拱脚处裂纹对隧道围岩的稳定性影响较大<sup>[22-24]</sup>, 故本文裂纹设置分布于马蹄形隧道底板、边墙位置, 裂纹设置如图 1 所示。本文以四川宜宾某段隧道工程项目为实际研究背景, 隧道高度 6 m, 宽度 5 m, 圆拱直径 5 m, 以该实际工程隧道剖面按比例 100:1 进行缩小设置。隧道剖面高度为 60 mm, 宽度  $w$  为 50 mm, 隧道圆拱直径为 50 mm。第 1 组长  $l$  为 50 mm 的裂纹从隧道底板至边墙以每  $15^\circ$  为梯度增量设置, 逆时针方向从  $15^\circ \sim 255^\circ$  围绕拱脚交界点处为圆心进行设置, 分布在拱脚的  $A$  ( $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ )、 $B$  ( $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ ) 及  $C$  ( $180^\circ < \alpha \leq 270^\circ$ ) 3 个区域, 设置 18 组试验模型 (含 1 组无裂纹隧道模型试件); 第 2 组裂纹倾角  $\alpha$  设为  $127^\circ$ , 裂纹长度  $L$  以 10 mm 为梯度增量, 长度范围分布在 10~100 mm, 且与隧道底板宽度  $w=50$  mm 成不同长度比 ( $\beta=L/w=0.2 \sim 2$ ), 设置 10 组试验模型, 每组试验模型制作 3 个隧道模型试件, 随后继续制作一组无裂纹巷道模型砂岩试件, 作为标准模型试件组进行对比分析。

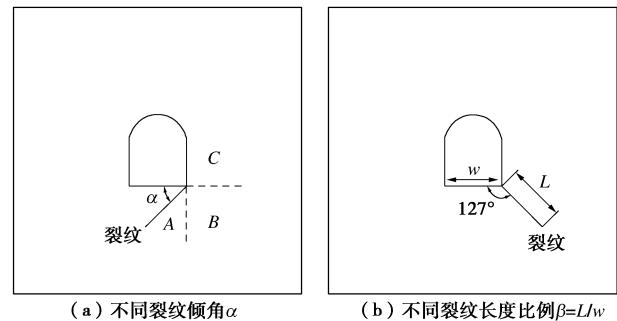


图 1 裂纹分布示意图

Fig. 1 Sketch map of crack distribution

### 1.1 试验模型制作与加载

试件采用脆性的四川青砂岩作为试验材料, 将隧道模型理想化为连续介质力学模型, 青砂岩力学性质参数根据国际岩石力学学会 (ISRM) 建议的静态抗压强度试验与静态劈裂试验等进行测试, 该青砂岩弹性模量  $E$  为 4.2 GPa, 泊松比  $\nu$  为 0.25, 密度  $\rho$  为 2350 kg/m<sup>3</sup>, 黏聚力  $c$  为 1.5 MPa, 内摩擦角  $\varphi$  为  $35^\circ$ , 抗压强度  $\sigma_c$  为 22.08 MPa, 抗拉强度  $\sigma_t$  为 2.08 MPa。隧道模型试件高度为 350 mm, 宽度为 350 mm, 厚度为 60 mm, 裂纹首先采用 0.5 mm 厚的拉花锯条进行加工, 形成 0.5 mm 的贯穿裂纹, 随后裂尖选择 0.1 mm 厚的美工刀片进行裂尖锐化处理, 使得裂尖的破坏行为更为准确, 如图 2 所示。

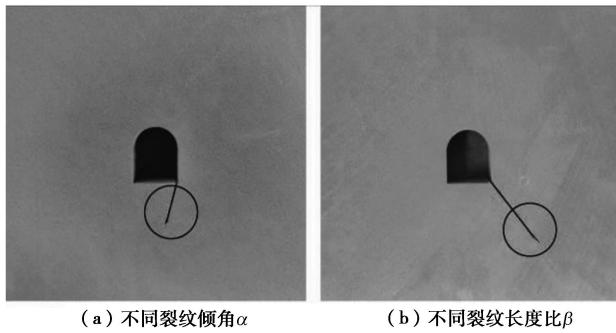


图 2 隧道模型试样

Fig. 2 Tunnel model specimens

由于在隧道开挖过程中复杂的地质条件下, 自重应力场和构造应力场是隧道初始应力场最重要的两类。在隧道的实际工程中, 有的围岩结构以自重应力为主, 有的围岩结构以构造应力为主。按线弹性力学理论可知, 构造应力场方向的最小主应力  $\sigma_3$  与自重应力场方向的最大主应力  $\sigma_1$  关系如下<sup>[25]</sup>:

$$\sigma_3 = \kappa \sigma_1, \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{\mu}{1-\mu}.$$

式中  $\mu$  为泊松比;  $\sigma_1$  为试件达到完全破坏状态下抗压强度值;  $\sigma_3$  是水平方向的侧压力,  $\kappa$  为试件的侧压力系数。

为了防止试件与四周加载及固定装置之间摩擦效应对试验测试结果的影响, 对试件四周涂抹少量黄油作为润滑剂进行润滑处理。在隧道模型试件的加载过程中, 首先采用液压千斤顶加载一定的侧压值, 使其固定为 5.0 MPa, 随后采用电液伺服压力机缓慢加载, 加载速率选择为 0.5 kN/s, 直至模型试件的失稳破坏, 采用此加载速率能够更好地反映围岩岩体的应力状态, 加载方式如图 3 所示。

## 1.2 试验结果

对含裂纹的砂岩隧道模型试样进行双轴压缩加载试验, 得到不同倾斜角  $\alpha$  下的应力 - 应变曲线如图 4 所示, 纵坐标  $y$  为测试电脑自动记录下的竖向应力  $\sigma_1$  值, 横坐标  $x$  为竖向应变  $\varepsilon_y$  值:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta H}{H}, \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_y$  为竖向应变,  $\Delta H$  为竖向位移,  $H$  为隧道模型竖向高度。

从图 4 的应力 - 应变曲线可以看出, 砂岩材料作为隧道围岩介质具有较大脆性特性, 与隧道工程中的许多实际工程概况相吻合, 随后将每组的 3 个模型试件的破坏峰值应力  $\sigma_1$  求平均值, 得到隧道模型破坏应力峰值的趋势线, 其试验结果如图 5, 6 所示。

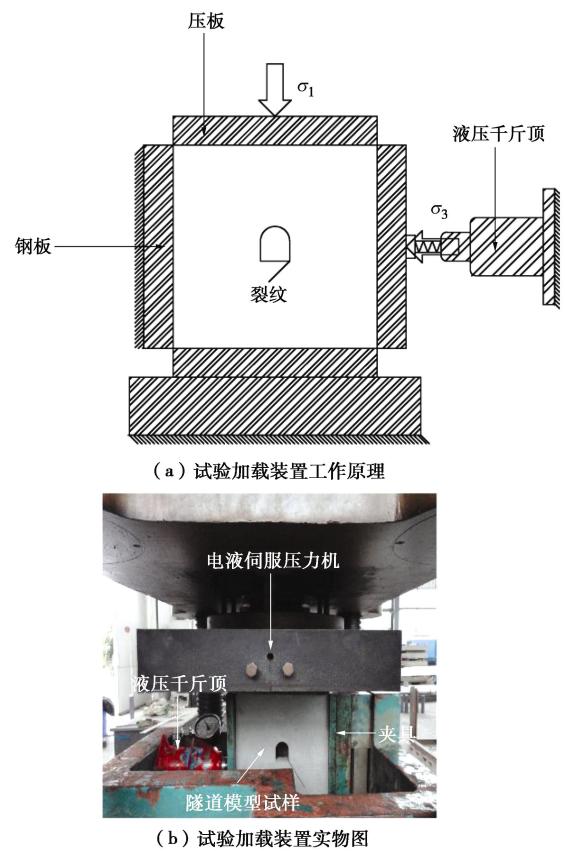


图 3 试验模型加载设备

Fig. 3 Model test loading devices

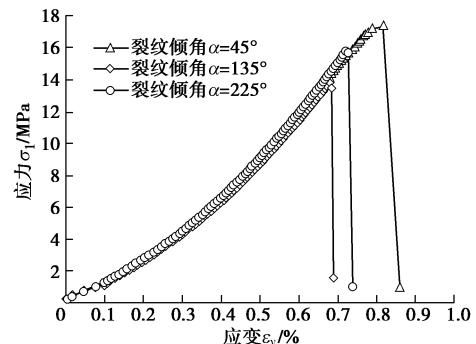
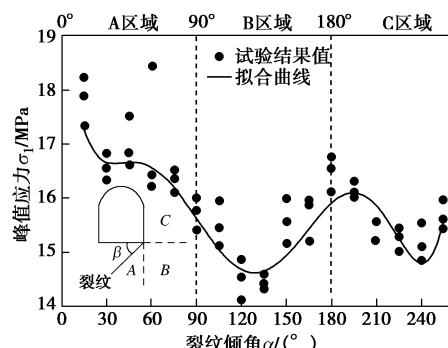


图 4 模型试件加载的应力 - 应变时程曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of cracked tunnel specimens

图 5 裂纹倾角  $\alpha$  与试件峰值应力的变化趋势线Fig. 5 Strength history of the tunnel model specimens with crack dip angle  $\alpha$

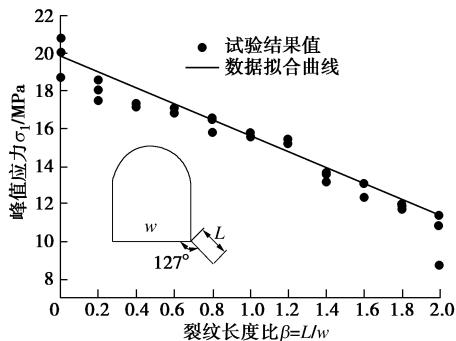


图 6 裂纹长度比  $\beta$  与试件峰值应力的变化趋势线

Fig. 6 Variation of strength of tunnel model specimens with crack length ratio  $\beta$

从图 5 的峰值应力趋势线可以看出, 当裂纹倾角  $\alpha \leq 90^\circ$  时, 隧道模型的峰值应力值最大, 说明  $A$  区域的裂纹对隧道模型的稳定性影响较小。当裂纹倾角  $\alpha$  在  $120^\circ \sim 135^\circ$  时, 达到第一个破坏峰值应力的极小值, 说明裂纹在  $B$  区域内裂纹倾角  $\alpha$  对隧道模型的强度影响最大。当  $\alpha \geq 135^\circ$  时, 隧道模型试件的峰值应力呈先增大再减小的趋势; 当裂纹倾角  $\alpha = 225^\circ \sim 240^\circ$  时, 达到第 2 个破坏的峰值应力极小值, 说明  $C$  区域的裂纹缺陷对隧道模型的整体稳定性也有较大的影响。

从图 6 的峰值应力趋势线可以知道, 裂纹长度比  $\beta$  越大, 隧道模型试件的峰值应力越低。从拟合曲线可以看出, 隧道模型试样的抗压强度与裂纹长度比  $\beta$  表征为线性反比例函数关系。由于当  $\beta > 2.0$  时, 隧道模型试件的边界效应较大, 因此裂纹长度比  $\beta > 2.0$  对隧道围岩稳定性的影响未进行研究, 需要下一步进行深入的研究分析。

由此可以得出初步结论: ①从隧道模型的峰值应力变化趋势线可以看出, 裂纹在底板、边墙各区域对隧道围岩稳定性的影响作用大小可依次排列为  $B$  ( $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ )  $> C$  ( $180^\circ < \alpha \leq 270^\circ$ )  $> A$  ( $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ ); ②裂纹倾角  $\alpha = 120^\circ \sim 135^\circ, 210^\circ \sim 240^\circ$  对隧道围岩稳定性影响较大。③裂纹长度比值  $\beta$  越大, 隧道模型试件的峰值应力越低, 由此可以说明裂纹长度比对隧道模型的影响关系表征为线性反比例函数关系。

## 2 数值损伤模拟试验

为了进一步分析隧道围岩在压缩载荷作用下的破坏行为, 本文采用有限元分析软件进行数值演化损伤模拟试验, 研究隧道围岩各位置局部的破坏特性。针对岩石类脆性材料的非线性、非均匀性和不连续性等特点, Niu 等<sup>[26]</sup>、Wang 等<sup>[27]</sup>、Zuo 等<sup>[28]</sup>研究开发了 rock failure process analysis (RFPA) 程序, 并在岩石

等脆性材料研究领域已经获得了不错的研究成果。RFPA 系统程序基于连续介质力学计算方式求解物理非连续介质问题, 能够较好地模拟岩石 (体) 材料在静载荷与动载荷作用下破裂过程中的破坏局部化及其衍变过程。其计算原理以有限单元法来计算细观基元体的应力状态来分析岩体的受力状况, 判断模型失稳的两个强度准则分别是最大拉应力准则与 Mohr-Coulomb 准则, 当仿真模型中的网格单元符合两者其中之一的强度失效准则时, 网格单元将发生初始损伤破坏:

$$\sigma_1 \geq \sigma_T \quad , \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad . \quad (5)$$

式中  $c$  为黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角;  $\sigma_T$  为单轴拉伸强度;  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力。其中,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \text{ (单轴拉伸)} \\ \sigma_c &= \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \text{ (单轴压缩)} \end{aligned} \right\} \quad . \quad (6)$$

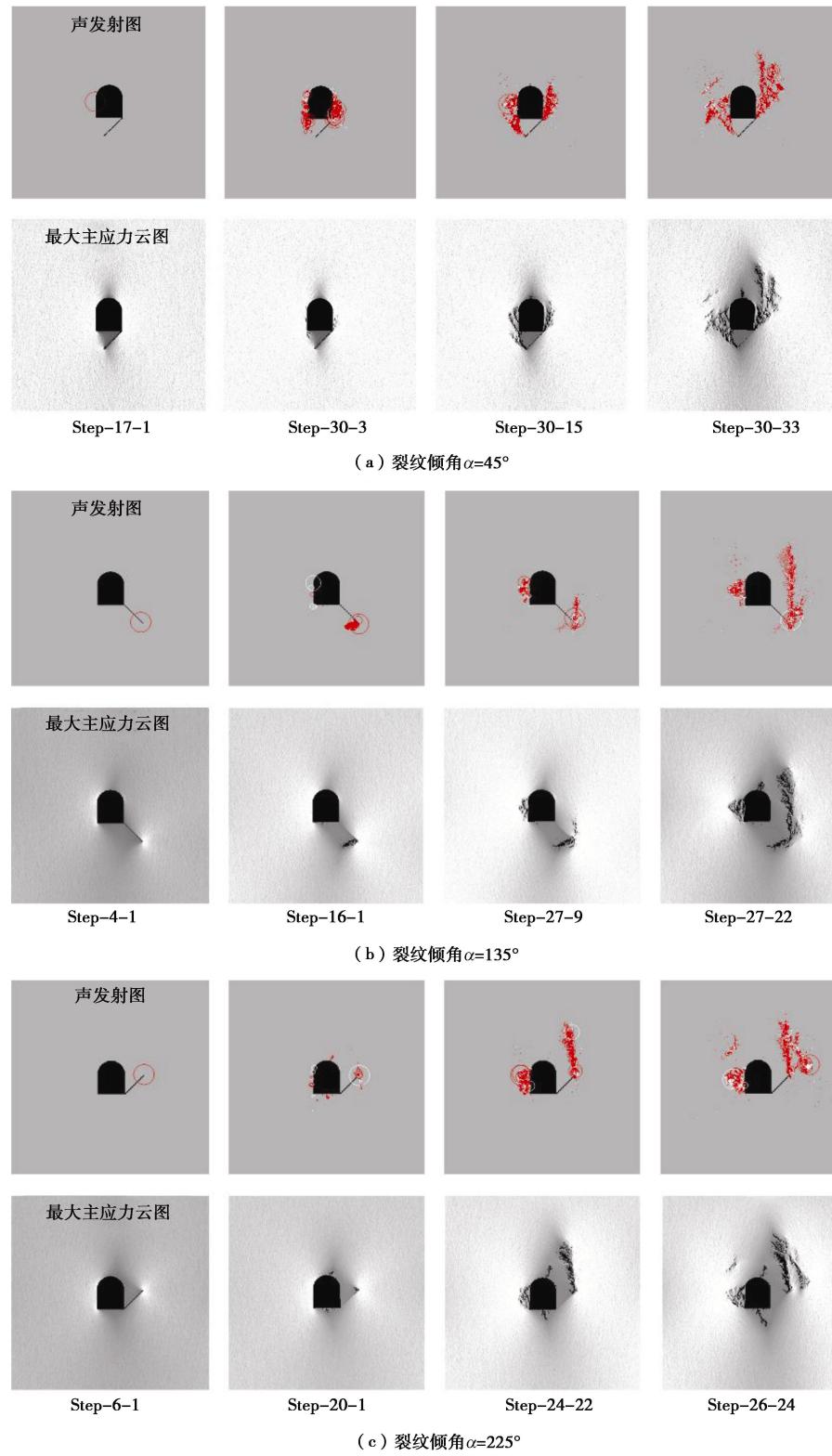
式 (4) 为最大拉应力准则, 式 (5) 为 Mohr-Coulomb 准则; 最后基元单元的变形及破坏的个体行为聚集表征为数值模型在压缩载荷作用下发生宏观的拉伸或者剪切的物理破坏。

### 2.1 模型的建立

数值模型尺寸与模型试验尺寸设置相同, 为  $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ , 隧道剖面尺寸与模型试验剖面尺寸设置也相同。网格划分采用正方形单元网格, 划分为  $500 \times 500$  单元格, 划分较密的网格单元有利于隧道围岩内部形成更小的裂纹间隙值, 使得数值模拟试验计算的损伤演化过程更为精确, 细观单元服从 Weibull 赋值函数。隧道模型参数设置与试验模型标准测试的参数相同, 如 1.1 节所述。加载方式采用双轴压缩加载, 垂直方向  $\sigma_1$  加载值设置为  $22.08 \text{ MPa}$ , 水平方向  $\sigma_3$  加载设置为  $5.0 \text{ MPa}$ , 下边界限无垂直与水平方向位移。采用与模型试验相同的加载方式, 对比在相同应力条件作用下的破坏形式, 使得数值模拟结果具有更好的可比性。

### 2.2 数值损伤模拟结果

根据裂纹位于隧道底板的不同区域, 取隧道模型开始发生初始损伤阶段至隧道模型发生失稳破坏阶段得出隧道模型不同损伤演化阶段的声发射图与最大主应力分布图 (这里的初始损伤是指隧道模型在压缩载荷作用下, 首次有声发射现象出现时的损伤状态, 与模型未加载前由于裂纹缺陷造成的损伤有所不同), 如图 7 所示。由于试验数据组数为 17 组, 选择  $A$ 、 $B$  及  $C$  区域各一组典型的数值分析数据进行对比分析, 故

图 7 裂纹倾斜角  $\alpha$  下的声发射图与最大主应力云图Fig. 7 Diagrams of acoustic emission and clouds of shear stress of crack dip angle  $\alpha$ 

选取裂纹倾角  $\alpha=45^\circ$ ， $135^\circ$ ， $225^\circ$  三者数值模拟数据，分析裂纹在隧道底板、边墙不同围岩区域的破坏行为。

从图 7 声发射图可以看出，当裂纹倾角  $\alpha=45^\circ$ ，隧道模型的初始损伤发生在拱肩区域；当裂纹倾角  $\alpha=135^\circ$ ， $225^\circ$  时，隧道模型的初始损伤发生在裂

纹尖端区域，这间接地表征了裂纹缺陷分布在 B 与 C 区域对隧道模型的破坏强度有很大的影响；当裂纹倾角  $\alpha=135^\circ$ ，在第 4 步就出现了初始拉伸损伤，但当裂纹倾角  $\alpha=45^\circ$ ， $225^\circ$  时，分别在第 17 步与第 6 步开始出现初始拉伸损伤，说明 B 区域的裂纹对围岩的强度影响最大，与图 5 的试验结果较为吻合。

从声发射图也可以知道, 裂纹尖端初始损伤发散的能量远大于后期裂纹继续扩展释放的能量, 裂纹损伤释放的能量圆圈大小逐渐变小, 但能量圆圈密度逐渐增大。当裂纹倾角  $\alpha=45^\circ$  时, 围岩的拉伸与剪切损伤主要在两侧的边墙、拱肩部位, 最后远场损伤裂纹聚集, 与裂纹尖端贯通, 导致隧道的物理失稳和破坏。当裂纹倾角  $\alpha=135^\circ$ ,  $225^\circ$  时, 围岩单元拉伸与剪切损伤主要发生在裂纹尖端区域, 随后左侧的边墙、拱肩远场区域也开始出现拉伸与剪切损伤, 最后在围岩顶部区域出现损伤单元聚集形成裂纹贯通导致隧道模型的破坏。

根据数值损伤演化过程图可以看出, 隧道模型在双轴压缩载荷作用下, 当裂纹倾斜角  $\alpha=45^\circ$  时, 围岩应力较大主要是在两侧拱脚、边墙、拱肩区域, 而拱底、拱顶的应力较小; 当裂纹倾斜角度  $\alpha=135^\circ$ ,  $225^\circ$  时, 围岩应力较大的区域为左侧拱脚、边墙、拱肩区域, 而右侧的边墙区域应力值较小。

### 3 数值分析结果

#### 3.1 试验结果与数值模拟结果对比分析

为了进一步分析隧道围岩拱脚裂纹在不同倾角  $\alpha$  下的破坏行为, 本文采用了有限元分析软件计算了隧道模型的最大主应力云图与应力强度因子。为了充分考虑到裂纹尖端奇异性的影响, 将裂纹尖端区域选择 C3D15 十五节点二次三棱柱单元进行离散, 裂纹尖端其他区域选择 C3D20 二十节点二次六面体单元进行离散, 整个数值模型含有 557139 个网格单元, 含有 2304509 个单元节点, 网格单元示意图如图 8 所示, 数值模型参数如 1.1 节青砂岩物理参数进行设置。随

后分别通过试验破坏照片与最大主应力云图、数值损伤最大主应力云图相互对比, 如图 9 所示, 得出隧道围岩在双轴压缩载荷作用下的破坏形式。

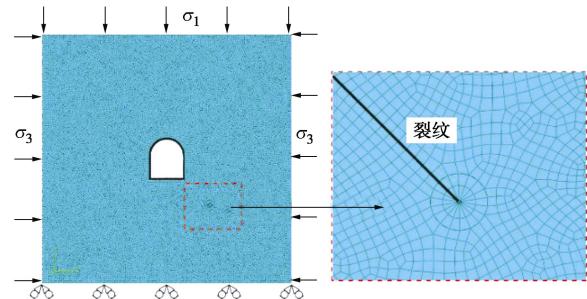
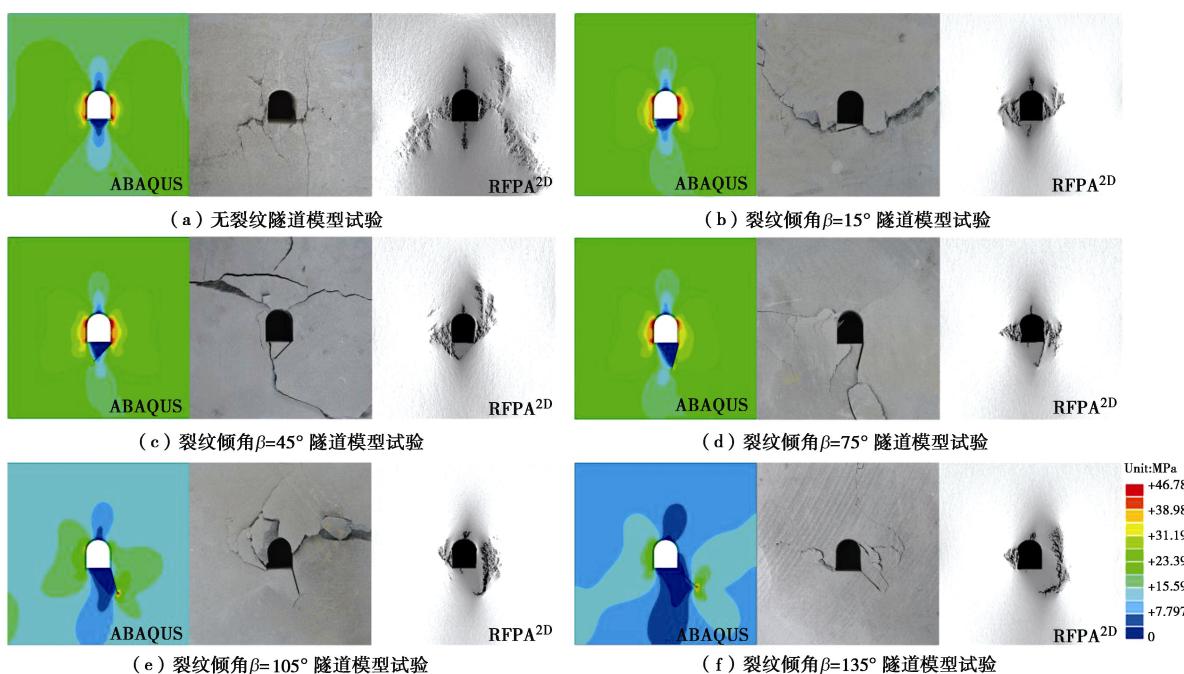


图 8 隧道试件有限元模型

Fig. 8 Finite element model for tunnel specimen

图 9 从左至右依次为有限元程序计算的最大主应力云图、试验破坏结果及 RFPA 数值模拟的损伤分布图。当裂纹倾角  $\alpha=0^\circ$  (即围岩内无裂隙), 从最大主应力云图可以看出, 围岩应力集中主要在两侧拱脚、边墙、拱肩区域, 且较为对称。从试验照片破坏情况可知, 模型破坏主要也是两侧的拱脚、边墙、拱肩, 与应力云图结果相一致。而从数值损伤分布图可知, 围岩的破坏主要是拱脚、边墙、拱肩的拉剪破坏及拱底、拱顶的拉伸破坏。

从裂纹隧道模型左侧的最大主应力云图中可以看出, 当裂纹倾斜角  $\alpha \leq 90^\circ$  时, 应力值较大区域在隧道两侧的拱脚、边墙、拱肩, 裂纹尖端区域应力相对较小。当裂纹倾角  $\alpha=90^\circ$  为最大主应力值, 为 24.46 MPa。当裂纹倾斜角  $\alpha > 90^\circ$  时, 应力值较大区域在隧道的左侧边墙与裂纹尖端, 隧道右侧边墙区域的应力集中较小。当裂纹倾角  $\alpha=135^\circ$  时, 最大主应力值



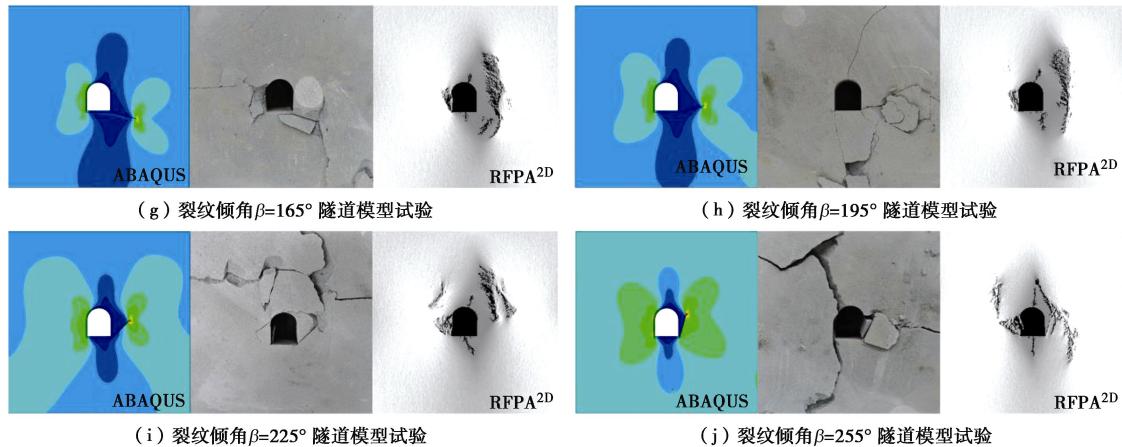


图9 隧道模型的最大主应力云图、试验照片及数值损伤分布图

Fig. 9 Clouds and test photos of maximum principal stress and distribution map of numerical damage

为 46.78 MPa, 大于裂纹位于 A 区域应力集中的最大值, 表征出裂纹缺陷分布在 B 区域与 C 区域应力集中现象较为严重, 对围岩的稳定性影响较大, 与试验结果、数值损伤破坏结果基本吻合。

从最右侧图的数值损伤情况可知, 当裂纹倾斜角度  $\alpha \leq 90^\circ$  时, 隧道剖面主要是两侧的拱脚、边墙、拱肩的拉伸与剪切破坏及拱顶的拉伸破坏, 远场损伤裂纹聚集最后与裂纹尖端贯通导致隧道模型的破坏。当裂纹倾角  $\alpha > 90^\circ$  时, 隧道模型的破坏主要是左侧边墙、拱肩的拉伸剪切破坏及裂纹尖端的起裂、扩展, 而右侧的边墙、拱肩区域比较完整。

从中间的试验结果照片可以看出, 隧道模型试件的破坏主要是边墙、拱肩、拱脚及裂纹尖端, 破坏形式也主要是边墙、拱肩的脱落及裂纹尖端的起裂、扩展。当裂纹倾角  $\alpha \leq 90^\circ$  时, 隧道模型主要是两侧边墙的破坏, 最后与裂纹尖端贯通导致隧道模型的破坏。当裂纹倾角  $\alpha > 90^\circ$  时, 隧道模型的破坏主要是左侧边墙、拱肩及裂纹尖端的破坏, 右侧边墙、拱肩比较完整。试验结果破坏区域与最大主应力云图中的应力集中区域及数值损伤演化的破坏结果基本相吻合。由于砂岩材料的不均匀性等因素影响, 围岩在拱顶、拱底的拉伸破坏裂纹较小, 不易肉眼看出。但裂纹倾角  $\alpha = 45^\circ$  右侧的边墙区域、 $\alpha = 75^\circ$  的右侧拱肩区域、 $\alpha = 105^\circ$  裂尖区域破坏情况与数值分析结果不相一致, 这也表征出试验结果具有一定的偶然性和离散性。离散性与偶然性的结果主要表现为摩擦效应及试验岩石材料的不均匀性等因素影响, 故在以后隧道模型试验研究中一定需要非常注意这些因素对试验测试结果的影响作用。

### 3.2 裂纹尖端应力强度因子的计算

岩石裂纹尖端的应力强度因子是评价岩石抵抗裂纹动态起裂和扩展性能的一个重要参数, 同时也是在静荷载作用下作为岩石突发断裂的一个重要阈值<sup>[29-32]</sup>。

为了验证试验结果的准确性, 借助于有限元软件采用  $J$  积分算法计算出每组裂纹尖端的应力强度因子。有限元数值模型基于图 1 (a) 与 (b) 所示的构型尺寸, 随后建立三维模型对隧道模型试件进行数值计算。为了进一步充分考虑试验加载过程的边界条件, 将图 4 的试验载荷曲线加载于数值模型上端, 下端设置成无位移边界条件, 随后得到裂纹倾角  $\alpha$  与裂纹长度比  $\beta$  的模型试样裂纹尖端的应力强度因子  $K_I$  和  $K_{II}$  值变化趋势线如图 10, 11 所示。

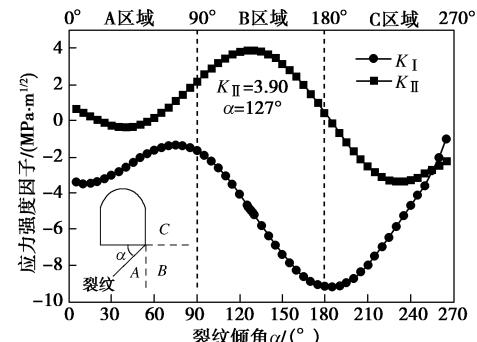


图 10  $K_I$ 、 $K_{II}$  值随裂纹倾角  $\alpha$  变化趋势线  
Fig. 10 Trendline of stress intensity factor with crack angle  $\alpha$

从图 10, 11 的应力强度因子曲线可以看出,  $K_I$  几乎全部小于零, 表示双轴压缩载荷作用下在裂纹尖端造成的基本都是压应力, 从而进一步影响着裂纹尖端与围岩内部的应力状态变化, 因此  $K_I$  值对隧道模型的稳定性也有较大的影响, 但具体的影响作用大小需要进一步研究。随着裂纹倾角  $\alpha$  的变化, 裂纹尖端的应力强度因子  $K_{II}$  值也产生了较大的变化。 $K_{II}$  可以取正值, 也可以取负值, 符号仅表示上下裂纹面错动的相对方向, 这也直接说明在裂纹尖端发生的破坏主要是由压应力和剪应力造成拉伸与剪切破坏。

从图 10 可以知道, 当裂纹倾角  $\alpha$  为  $120^\circ \sim 135^\circ$  (即  $\alpha = 127^\circ$ )  $K_{II}$  达到最大的正值, 裂纹尖端的应力集中系数最大, 表明此倾斜角裂纹对隧道模型试件的抗压强度影响最大; 当裂纹倾角  $\alpha$  在  $225^\circ \sim 240^\circ$  范

围内时,  $K_{II}$  达到负的最大值(绝对值), 说明此时裂纹对隧道模型的稳定性也有较大的影响。但当裂纹倾角  $\alpha \leq 90^\circ$  时,  $K_{II}$  值始终处于较小值, 说明 A 区域间的裂隙对隧道模型的强度影响较小。这也与图 5 的试验结果, 裂纹在各区域对隧道稳定性的影响性危害程度可依次排列为:  $B > C > A$  比较的吻合; 当裂纹倾角  $\alpha = 120^\circ \sim 135^\circ$  对隧道围岩的影响最大。

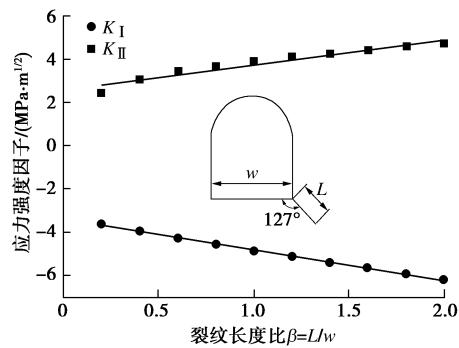


图 11  $K_I$ 、 $K_{II}$  值随裂纹长度比  $\beta$  变化趋势线

Fig. 11 Variation of stress intensity factor with crack length ratio  $\beta$

从图 11 的曲线可以知道, 当裂纹长度比  $\beta$  值越大时, 应力强度因子  $K_I$ 、 $K_{II}$  值越大, 说明裂纹长度越长, 对隧道围岩的稳定性影响越大。当裂纹长度  $\beta > 0.6$  时,  $K_{II}$  值基本以线性增大, 表明裂纹长度达到一定长度时, 裂纹对隧道模型的影响作用表征为线性反比例关系, 数值计算结果与试验结果图 6 曲线比较吻合。

## 4 结 论

本文通过物理模型试验与数值模拟对比分析研究了拱脚裂纹缺陷对隧道围岩的稳定性影响, 并对围岩在压缩载荷作用下的破坏方式进行了详细分析, 主要得以下 4 点结论。

(1) 裂纹缺陷与隧道拱底夹角  $\alpha = 120^\circ \sim 135^\circ$  时, 隧道模型的峰值应力最低, 裂纹对隧道模型的稳定性影响最大。裂纹在隧道侧墙区域时, 当裂纹倾角  $\alpha = 225^\circ \sim 240^\circ$  时, 裂纹尖端的应力强度因子  $K_I$  与  $K_{II}$  值也较大, 应力集中较为严重, 隧道模型的强度较低, 说明此范围内的倾斜裂隙对隧道的稳定性削弱也较大。

(2) 拱脚处裂纹在隧道底板、边墙位置的不同区域内时, 对围岩稳定性的危害程度大小可依次排列为  $B (90^\circ < \alpha \leq 180^\circ) > C (180^\circ < \alpha \leq 270^\circ) > A (0^\circ < \alpha \leq 90^\circ)$ 。在隧道的初期设计与维护方面, 应特别注意侧墙 B 区域内裂纹缺陷对隧道围岩稳定性的影响。

(3) 隧道在双轴压缩载荷作用下, 围岩的主要破坏形式为边墙与裂纹尖端的拉剪破坏及拱顶、底板的拉伸破坏。边墙、拱顶主要形成围岩脱落式破坏, 裂纹尖端及其他部位主要形成的是滑移式破坏。

(4) 隧道围岩内裂纹长度比越大, 对围岩整体稳定性削弱越大; 当裂纹长度比  $\beta > 0.6$  时, 裂纹长度对围岩稳定性的影响作用表征为线性反比例函数关系; 同时可以得到, 随着围岩内各种裂隙深度的加大, 隧道衬砌的锚固措施也应逐渐加强。

## 参 考 文 献:

- 1] CHU B L, HSU S C, CHANG Y L, et al. Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(3): 351 - 362.
- [2] WANG S Y, SLOAN S W, SHENG D C, et al. Numerical study of failure behaviour of pre-cracked rock specimens under conventional triaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(5): 1132 - 1148.
- [3] ZHOU X, QIAN Q, YANG H. Rock burst of deep circular tunnels surrounded by weakened rock mass with cracks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2011, 56(2): 79 - 88.
- [4] 郭东明, 闫鹏洋, 杨仁树, 等. 爆破开挖中巷道围岩缺陷扩展的动焦散模型试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5): 728 - 734. (GUO Dong-ming, YAN Peng-yang, YANG Ren-shu, et al. Dynamic caustics model experimental study on the defects extension of roadway surrounding rock when blasting excavation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(5): 728 - 734. (in Chinese))
- [5] 杨忠民, 高永涛, 吴顺川, 等. 节理岩体中纵向间距对连拱隧道稳定性的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 167 - 176. (YANG Zhong-min, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Influence of longitudinal spacing of double-arch tunnel on tunnel stability in jointed rock mass[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 167 - 176. (in Chinese))
- [6] JIA P, TANG C. Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(5): 500 - 507.
- [7] LI X, LEI W. Numerical investigation on fracturing behaviors of deep-buried opening under dynamic disturbance[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 54: 61 - 72.
- [8] ZHU Z, LI Y, XIE J, et al. The effect of principal stress orientation on tunnel stability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 279 - 286.
- [9] LIU J P, LI Y H, XU S D, et al. Cracking mechanisms in granite rocks subjected to uniaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015, 75(6): 151 - 159.
- [10] CHEN S Z. The application of fracture mechanics in highway tunnel lining cracking[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 580: 1377 - 1381.

[11] PARK S W, PARK S S, HWANG I B, et al. A case study on cause analysis for longitudinal crack of duct slab in tunnel[J]. Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection, 2012, **16**(5): 19 – 28.

[12] SUN X, QIANG Y, ZHAO M J, et al. Research on fractal crack propagation mechanism of hydraulic tunnel concrete lining[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, **353**: 1704 – 1708.

[13] WANG N, CHEN P H, WANG J C, et al. Crack propagation detection and simulation research of Jiulong tunnel[J]. Advanced Materials Research, 2012, **446**: 2256 – 2261.

[14] ZHU Z, WANG L, MOHANTY B, et al. Stress intensity factor for a cracked specimen under compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, **73**(4): 482 – 489.

[15] HAERI H, MARJI M F, SHAHRIAR K. Simulating the effect of disc erosion in TBM disc cutters by a semi-infinite DDM[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, **8**(6): 3915 – 3927.

[16] FAN Y, ZHU Z, ZHAO Y, et al. The effects of some parameters on perforation tip initiation pressures in hydraulic fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, **176**: 1053 – 1060.

[17] WANG M, ZHU Z M, LIU J H. The photoelastic analysis of stress intensity factor for cracks around a tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, **142**: 197 – 200.

[18] FAN Y, ZHAO Y, ZHU Z, et al. Stress intensity factors for a tunnel containing a radial crack under compression[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, **9**(12): 1 – 14.

[19] 康 勇, 李晓红, 杨春和. 深埋隧道围岩损伤破坏模式的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 1): 3578 – 3583. (KANG Yong, LI Xiao-hong, YANG Chun-he. Numerical tests of damage failure mode of surrounding rock damage in deep tunnels[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S1): 3578 – 3583. (in Chinese))

[20] 李元鑫, 朱哲明, 刘 凯, 等. 裂纹方向对隧道稳定性影响规律的研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 1): 189 – 194. (LI Yuan-xin, ZHU Zhe-ming, LIU Kai, et al. Study of effect of cracking orientation on tunnel stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S1): 189 – 194. (in Chinese))

[21] 周 磊, 朱哲明, 刘 邦. 隧道周边不同位置径向裂纹对隧道围岩稳定性影响规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(7): 1230 – 1237. (ZHOU Lei, ZHU Zheming, LIU Bang. Influence of radial cracks on stability of surrounding rocks at different locations around tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(7): 1230 – 1237. (in Chinese))

[22] ZHANG L F, YI Z L, DENG Y J. The crack limit analysis based on the fracture mechanics of the main arch of the stone arch bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, **361**: 1155 – 1159.

[23] ZHOU L, ZHU Z, LIU B, et al. The effect of radial cracks on tunnel stability[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, **15**(2): 721 – 728.

[24] 周 磊, 朱哲明, 刘 邦. 裂纹对直墙拱形隧道围岩损伤破坏模式的影响规律研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(12): 3688 – 3697. (ZHOU Lei, ZHU Zhe-ming, LIU Bang. Influence of cracks on surrounding rock damage-failure mode of straight wall arch tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(12): 3688 – 3697. (in Chinese))

[25] 徐志英. 岩石力学[M]. 3 版. 北京: 中国水利电力出版社, 2007. (XU Zhi-ying. Rock Mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))

[26] NIU L, ZHU W, ZHEN C, et al. Numerical simulation on excavation-induced damage of rock under quasi-static unloading and dynamic disturbance[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(17): 1 – 14.

[27] WANG Q, ZHU W, XU T, et al. Numerical simulation of rock creep behavior with a damage-based constitutive law[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **17**(1): 1 – 14.

[28] ZUO Y, ZHANG Q, XU T, et al. Numerical tests on failure process of rock particle under impact loading[J]. Shock and Vibration, 2015: 1 – 12.

[29] WANG Q Z, YANG J R, ZHANG C G, et al. Sequential determination of dynamic initiation and propagation toughness of rock using an experimental-numerical-analytical method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, **141**: 78 – 94.

[30] WEN H, DONG S, YANG F, et al. Investigation on the correlation of mode II fracture toughness of sandstone with tensile strength[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, **184**: 249 – 258.

[31] XU Y, DAI F, ZHAO T, et al. Fracture toughness determination of cracked chevron notched Brazilian disc rock specimen via griffith energy criterion incorporating realistic fracture profiles[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, **49**(8): 3083 – 3093.

[32] 李地元, 韩震宇, 孙小磊, 等. 含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(12): 2872 – 2883. (LI Di-yuan, HAN Zheng-yu, SUN Xiao-lei, et al. Characteristics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split Hopkinson pressure bar tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(12): 2872 – 2883. (in Chinese))