

引文格式:马嘉辉,赵建强,彭纪伟,等. 基于数值模拟的变截面十字交叉隧道施工位移应力特征研究及支护优化[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(3): 660-669.

MA Jiahui, ZHAO Jianqiang, PENG Jiwei, et al. Displacement and stress characteristics of criss-cross tunnels with different sizes based on numerical simulation and their support optimization[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(3): 660-669.

基于数值模拟的变截面十字交叉隧道施工位移 应力特征研究及支护优化

马嘉辉¹, 赵建强², 彭纪伟², 武仁杰¹, 王潇璇¹, 郭育霞¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原; 2. 中铁十二局集团第三工程有限公司, 山西 太原)

摘 要:【目的】建立三维数值模型揭示变截面十字交叉隧道施工变形受力特征。【方法】考虑喷射混凝土初期支护硬化特性, 分析不同开挖阶段隧道位移及应力演化情况, 提出初期支护优化措施。【结果】结果表明: 拱顶最大沉降及拱底最大隆起均位于距交叉几何中心 0.5 m 处, 最大水平位移位于距中心 4.5 m 的大断面主洞边墙处; 小断面前支洞开挖, 围岩位移增量不明显, 随后小断面左右支洞开挖, 位移突变明显; 围岩及初期支护在主洞与支洞相交处应力集中明显, 左右支洞开挖后, 交叉区附近塑性区范围、应力拱边界急剧扩大; 加厚初期支护有效控制了交叉区围岩变形, 控制效果随加固范围扩大呈先增大后逐渐趋于稳定, 综合考虑选择交叉区外拓 0.71 倍洞跨为最佳加固范围。研究成果可为类似隧道工程的安全快速施工及围岩稳定性控制提供指导。

关键词: 十字交叉隧道; 变截面; 围岩稳定性; 支护优化

中图分类号: U45 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240183 **文章编号:** 1007-9432(2026)03-0660-10

Displacement and Stress Characteristics of Criss-Cross Tunnels with Different Sizes Based on Numerical Simulation and Their Support Optimization

MA Jiahui¹, ZHAO Jianqiang², PENG Jiwei², WU Renjie¹, WANG Xiaoxuan¹, GUO Yuxia¹

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China; 2. China Railway 12th Bureau Group 3rd Engineering Co. Ltd., Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】To reveal the force and deformation characteristics of criss-cross tunnels with different sizes during the construction, a 3D numerical model is established. 【Methods】The displacement and stress evolutions of the tunnel in different excavation stages were investigated, and the hardening characteristics of shotcrete initial support were taken into account. According to analysis results, initial support optimization measures were proposed. 【Results】The results show that the maximum displacements of the vault and bottom are both located 0.5 m from the geometric center of the intersection, and the maximum horizontal displacement appears on the main tunnel sidewall 4.5 m

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-05-31

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2023-075)

第一作者: 马嘉辉, 硕士研究生, (E-mail) mjhpeter@126.com

通信作者: 郭育霞, 教授, 主要从事地下工程等相关研究, (E-mail) gyx771221@163.com

away from the center. The increment of displacement in the surrounding rock is not significant during excavating the small cross-section front branch tunnel, but the increment becomes obvious when the excavations of the small cross-section left and right branch tunnels are conducted. The stress concentration in the surrounding rock and initial support is significant at the intersection of the main tunnel and branch tunnels. After the excavation of left and right branch tunnels, the plastic zone range and stress arch boundary around the intersection area expand sharply. Thickening the initial support effectively controls the deformation of the surrounding rock in intersection area. The effect of deformation control first increases with the expansion of the reinforcement range and tends to be stable. Taking above factors into consideration, the optimal reinforcement area is 0.71 times the span of tunnel at the intersection. The research results can provide guidance for constructions of similar tunnel engineering projects.

Keywords: criss-cross tunnel; variable-section; stability of surrounding rock; optimization of support

交叉隧道是指走向不同且在空间上相互穿插的隧道,此类工程大量出现^[1-3]。而在施工中交叉区扩挖分叉,岩体和支护结构出现应力调整和重分布,力学特性发生复杂变化^[4-6],隧道出现变截面情况会使变化更为复杂。分析变截面交叉隧道施工难点并采取合理施工方式具有十分重要的理论价值与工程指导意义。

为分析与解决上述工程难题,国内外学者做了大量的工作。BIAN等^[7]采用数值模拟评估了不同厚度的混凝土支护对隧道下洞和分岔口稳定性的影响。LIU等^[8]研究了横通道和主隧道交叉口内塑性区的分布、掌子面及边墙变形及影响区域;JO-NEIDI等^[9]评价交叉口不同施工阶段对应力分布和地表变形的影响,并讨论了隧道不同掌子面距交叉口中心的有效后移距离以及隧道开挖对喷射混凝土衬砌内力的影响;林波等^[10]分析了开挖和支护过程中交叉区域围岩和初期支护结构变形及应力演化规律,并对交叉区域围岩的拱顶、仰拱、边墙、初期支护结构、系统锚杆等关键施工部分的稳定性进行了评估;安永林等^[11]分析不同开挖步下,不等跨分岔隧道位移及应力特性、中夹岩变形受力特征及压力拱三维特性;杜广印等^[12]采用模型试验针对黄土交叉隧道研究了开挖过程中支护结构应变变化特征和开挖影响范围;王景春等^[13]着重对比分岔隧道大包法和小包法施工引起的围岩位移、应力分布及塑性区范围,并进一步对小包法施工全过程进行动态力学行为研究。

目前针对十字交叉隧道,尤其是存在截面变化的隧道工程研究较少,使得在评估此类隧道施工稳定性时缺乏足够的文献支持。本文以中铁十二局

某变截面十字交叉段隧道为背景,建立三维数值模型,考虑喷射混凝土初期支护硬化特性,分析不同开挖阶段隧道的位移与应力特性,并提出初期支护加固措施,得到最优加固方案。

1 工程概况

该项目隧道为山岭隧道,隧区表覆第四系全新统残坡积碎石土(Q_4^{dl+el}),土质不均、层厚较薄。下伏基岩为侏罗系砂岩(J_3),层状构造,风化程度由新至老为强风化至中风化,节理裂隙发育,岩石质量等级为IV级,岩石密度 $2.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。该隧道内部有一变截面十字分叉段区域,该段埋深127 m,截面形状为直墙1/4圆拱结构,主洞跨度7 m,高9.05 m,前支洞及左右支洞其余尺寸与主洞相同,仅边墙高度相较主洞降低了1.5 m;前支洞长11.75 m,左支洞长21 m。初期支护厚0.15 m,采用C25湿喷混凝土施作;二次衬砌厚0.35 m。锚杆采用长3.5 m、间距 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的 $\Phi 22\text{ mm}$ 梅花布置砂浆锚杆。

2 数值模型建立

FLAC3D数值模型及测线位置如图1所示。锚杆采用锚结构单元,初期支护为壳单元,其余均为实体单元。根据圣维南原理,局部开挖仅在距隧道3到5倍跨度范围有影响^[14],故本数值模型尺寸取 $129\text{ m}\times 119.75\text{ m}\times 87\text{ m}$,记隧道拱底十字交叉几何中心为模型原点。设围岩为连续、均质、各项同性,遵循理想弹塑性模型,变形满足Mohr-Coulomb强度准则。模型边界条件设置为:侧面施加水平位移约束,底面施加竖直位移约束,上边界施加数值模型上方岩层自重引起的均布荷载1.6 MPa。

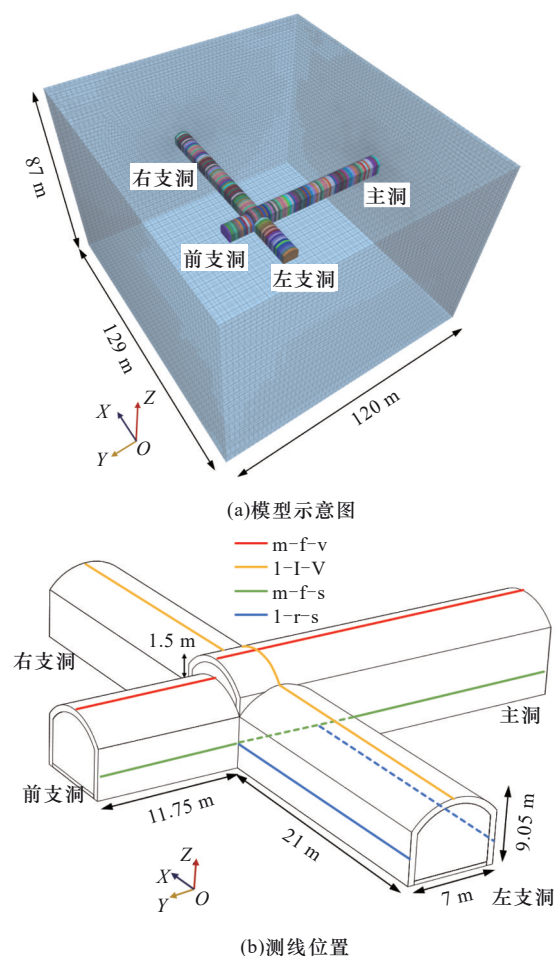


图1 数值模型及测线位置
Fig.1 Numerical model and survey lines

喷射混凝土早期硬化特性对围岩位移影响较大,既有研究表明时间指数函数能较好地表征喷射混凝土硬化特性^[15-16],根据现场喷射混凝土强度硬化设计要求及施工循环速度设计要求,将时间指数函数换算为位移指数函数:

$$E_{\text{shot},x}=E_{\text{shot},0}(1-e^{-\alpha x}). \tag{1}$$

式中 $E_{\text{shot},x}$ 为随着掌子面的推进原位置初期支护的弹性模量,单位GPa; $E_{\text{shot},0}$ 为初期支护最终弹性模量,本项目 $E_{\text{shot},0}=23\text{ GPa}$; α 为距离常数,根据推进速度算得 $\alpha=0.248\text{ m}^{-1}$; x 为掌子面推进距离,单位m。初期支护弹性模量如表1所示,根据隧道地质勘察资料以及围岩现场取样得到的室内试验结果,模型材料其余物理力学参数表2所示。

采用全断面法进行施工,每步1 m为一个循环,第68步主洞施工完毕,随后截面变化处打入横向超前锚杆,小断面开挖前支洞,第80步开挖前支洞至设计长度后,同时开挖左右支洞,左支洞开挖至设计长度后,右支洞继续开挖至模型贯通。

选取719洞室20.05 m处,即距原点6 m处的主

表 1 初支弹性模量

Table 1 Elasticity modulus of initial support

阶段	1	2	3	4	5	6	7
掌子面推进距离 x/m	2	6	10	14	18	22	≥ 26
原位初支弹性模量 $E_{\text{shot},x}/\text{GPa}$	8.99	17.81	21.07	22.29	22.74	22.90	23.00

表 2 数值模型物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of numerical model

模型材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
围岩	2.00	1.3	0.32	0.1	40
初期支护	2.30	见表1	0.2	—	—
锚杆	—	210	0.3	—	—
钢筋网	—	210	0.3	—	—

洞断面监测数据,验证数值模拟的正确性。断面拱顶沉降与拱腰收敛如图2所示,数值计算结果拱顶沉降为15.42 mm,边墙水平位移为13.56 mm,该断面处数值模拟计算结果与隧道现场实测数据有些许出入,但差值率不超过10%,证明数值模拟计算结果可靠有效。计算结果与实测数据存在误差的原因主要是在计算过程中做了一定假设及简化,故监测数据值偏大。

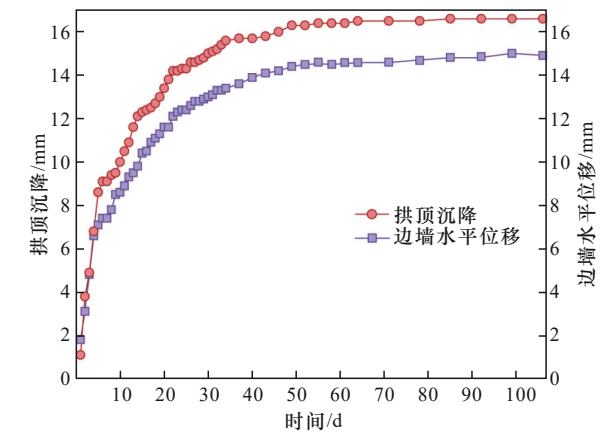


图2 监测断面位移
Fig.2 Deformations around monitoring section

3 围岩位移特征分析

m-f-v测线拱顶沉降演化曲线如图3所示。每步施工循环,拱顶沉降曲线基本呈“s”型分布,如第52施工步,此时主洞开挖掌子面距原点12 m,围岩变形先后经历4个阶段,从掌子面前方起始,沿开挖方向反向依次为缓慢变形、急剧变形、变形减缓和变形稳定阶段。开挖前支洞,主洞拱顶沉降增长不明显,前支洞拱顶沉降出现跳跃式增长。由于主洞

与支洞变截面处横向超前锚杆与支洞环向锚杆结构交叉,加强了支护,此处拱顶沉降得到一定程度的限制;前支洞继续开挖,围岩变形速率逐渐减小。当左右支洞开挖,围岩变形速率再次急剧增大,主洞与前支洞拱顶沉降曲线均跳跃式增长,随后变形速率再次逐渐减小,最终稳定。由于主洞为大断

面,前支洞为小断面,主洞最终最大拱顶沉降相较前支洞增加了17.65%,而开挖左右支洞前增量仅为8.93%,左右支洞开挖进一步扩大了大断面与小断面拱顶沉降差距;拱顶沉降最大值出现在距十字交叉几何中心0.5 m处,值为17.69 mm。

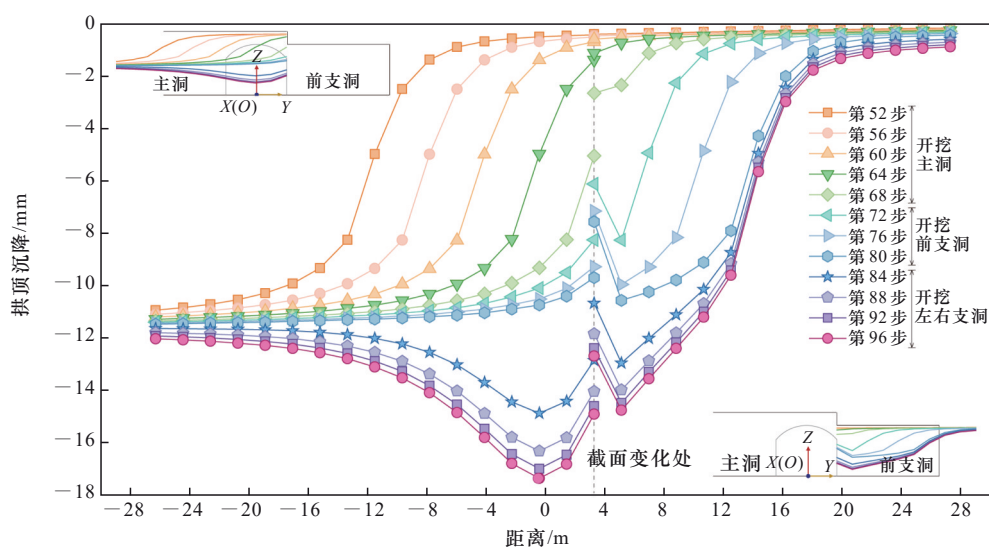


图3 m-f-v测线拱顶沉降

Fig. 3 Vault settlements at survey line m-f-v

l-r-v测线拱顶沉降演化曲线如图4所示,拱顶沉降曲线也呈“s”型分布;左右支洞同时开挖,位移分布关于主洞轴线对称。主洞拱部斜向锚杆与支洞锚杆交叉,加强了隧道上方围岩支护,隧道相交处拱顶沉降得到了一定限制。随着左右支洞继续

开挖,拱顶沉降变化速率逐渐减小,最终稳定。左右支洞拱顶沉降最大值为16.77mm,小于图3拱顶沉降最大值,故记图3沉降最大值为拱顶沉降特征点A1。

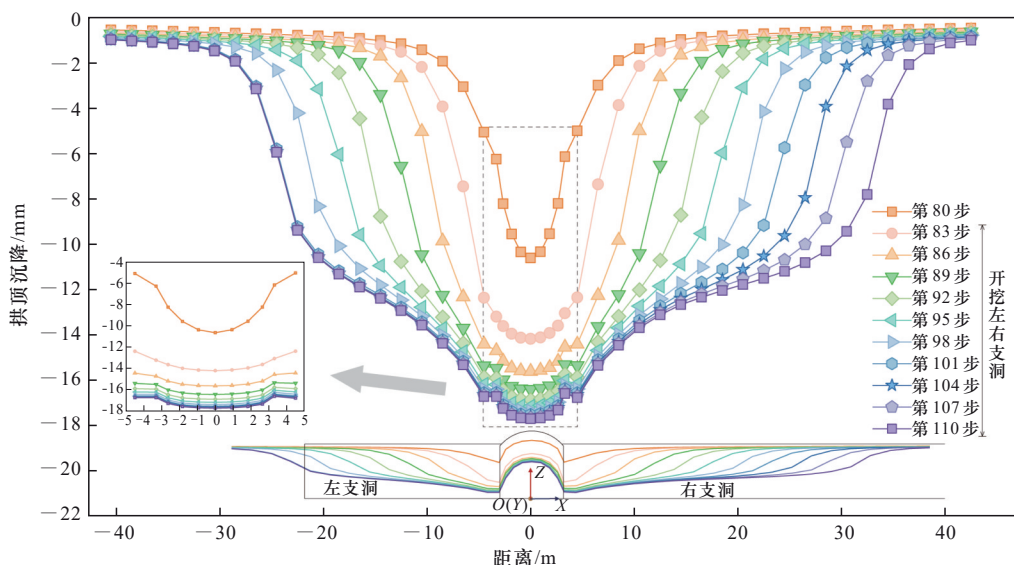


图4 l-r-v测线拱顶沉降

Fig. 4 Vault settlements at survey line l-r-v

m-f-s测线边墙水平位移演化曲线如图5所示。水平位移曲线与拱顶沉降曲线的形状相似,但在数

值和趋势上存在不同。前支洞为小断面,开挖时边墙水平位移减小,交叉区位移分布曲线放缓。开挖

左右支洞后,位移发生突变,其中主洞最大边墙位移相较支洞最大边墙位移增加了 35.05%,开挖左右支洞前增量仅为 32.79%,左右支洞开挖也进一步扩大了小断面与大断面边墙水平位移差距,扩大幅度

小于图 3 拱顶沉降的扩大幅度。水平位移最大值为 14.04 mm,位于距交叉几何中心 4.5 m 处,记为主洞-支洞方向边墙水平位移特征点 A2。

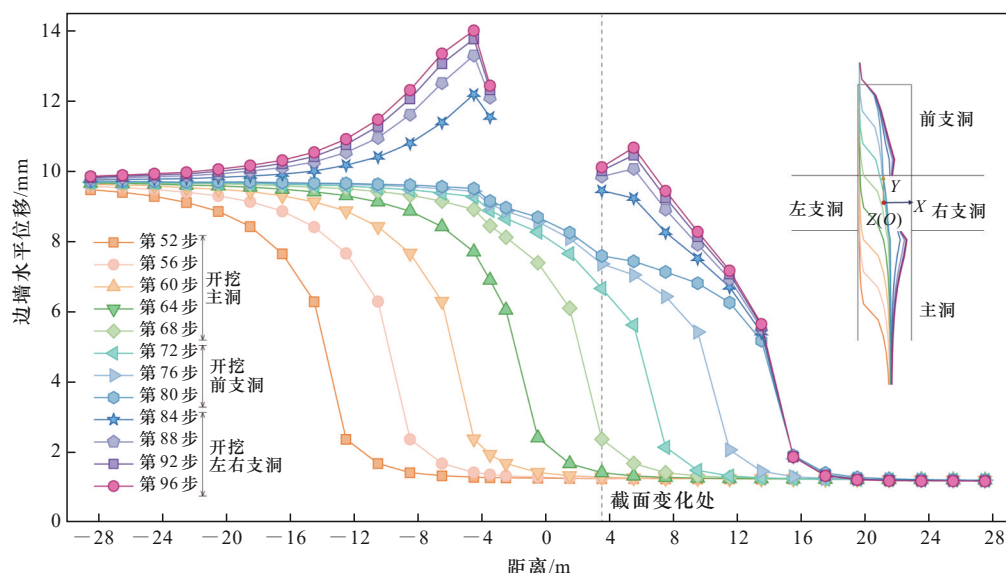


图 5 m-f-s 测线边墙水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of sidewall at survey line m-f-s

l-r-s 测线边墙水平位移演化曲线如图 6 所示,围岩变形先后经历 5 个阶段,以第 89 步为例,此时左右支洞开挖掌子面距原点 12 m,自掌子面前方开始,沿开挖方向反向依次为缓慢变形、急剧变形、变形减缓、变形稳定和交叉区位移锐减阶段,出现位移锐减存在两方面原因,一方面是因为交叉区域附近围岩位移方向发生了改变:随着靠近交叉区域,围岩水平位移 Y 方向分量(左支洞收敛方向)锐减, X 方向分量(主洞收敛方向)激增,左右支洞的开挖

改变了围岩的原水平位移方向并增大了主洞的变形量;另一方面由于梅花布置的主洞锚杆与支洞锚杆垂直交叉,围岩加固效应明显。随着支洞掌子面推进,水平位移变形曲线逐渐扩大至变形稳定。由于左右支洞开挖前,围岩已产生少量位移,在原变形基础上开挖左右支洞,最终使得靠近前支洞一侧的边墙最大水平位移较远离的增大了 3.03%,左支洞边墙最大水平位移为 8.62 mm,位于距几何交叉中心 7.5 m 处,记为左支洞方向边墙水平位移特征点 A3。

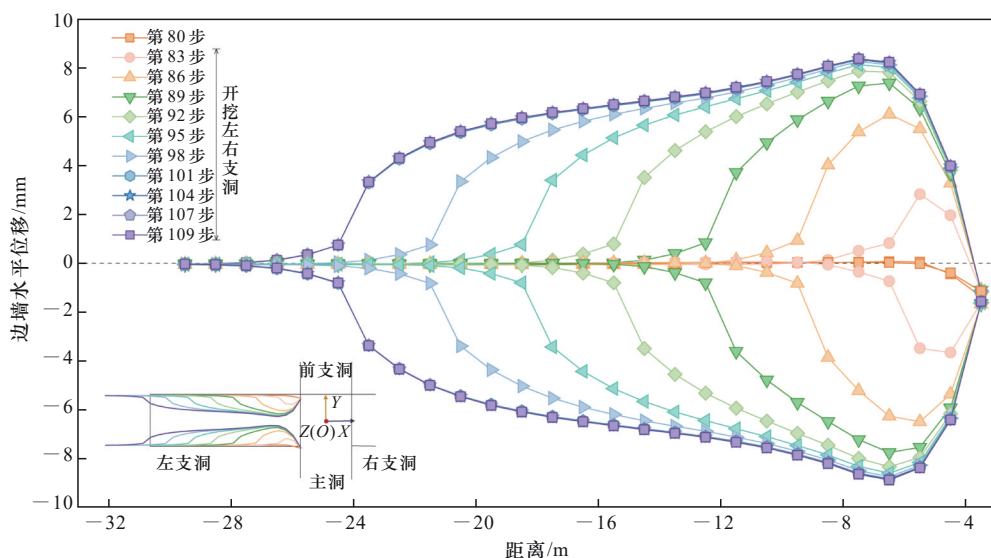


图 6 l-r-s 测线边墙水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of sidewall at survey line l-r-s

模型贯通后围岩位移云图如图7所示,可以看出,围岩变形主要发生在隧道交叉区的拱顶、边墙及拱底;相较于拱顶与边墙,拱底变形范围较小而最大变形量较大,其位移主要集中在交叉几何中心0.5 m处,位移最大值为25.07 mm,记此位置为拱底隆起特征点A4。

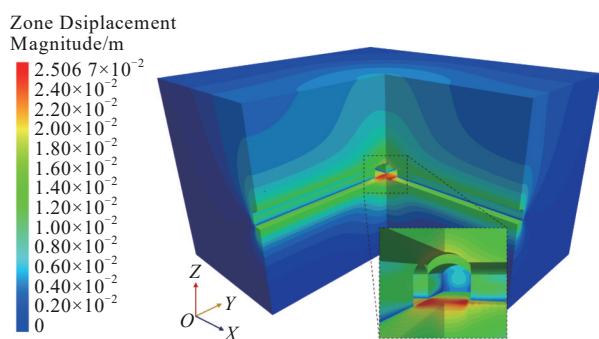


图7 围岩位移云图

Fig.7 Displacement cloud diagram of surrounding rock

4 围岩应力特征分析

围岩应力云图如图8、图9所示。主洞及前支洞开挖,最大主应力与最小主应力极值均位于主洞的拱肩与拱脚处,前支洞开挖后拱脚与拱肩最小主应力极值为 -3.94 MPa 和 -4.09 MPa ,主洞-前支洞变截面处应力集中相对不明显。当左右支洞开挖后,围岩最大及最小主应力极值位于隧道拱肩及拱脚相交处,分别为 -4.54 MPa 和 -4.92 MPa ;十字交叉隧道在开挖过程中交叉处的拱肩及拱脚应力集中现象越发显著,需着重监测其受力情况,预防围岩失稳。

塑性区分布情况能反映围岩稳定性状态,隧道围岩在不同施工阶段塑性区分布变化如图10所示,可以看出,隧道洞周围岩以剪切破坏为主,而张拉破坏主要集中在拱顶、边墙及拱底。随着前支洞开挖,边墙及拱底塑性区范围扩大;随着左右支洞的开挖,隧道塑性区范围再一次扩大,其中交叉区10 m范围内的塑性区面积增大更为明显。

5 应力拱分析

隧道开挖后,应力重分布,其周边围岩应力方向发生偏转,隧道周边围岩内产生拱效应,以围岩最小主应力恢复到原岩应力的90%的位置作为应力拱外边界^[11,17],不同开挖阶段下应力拱演化如图11所示。从掌子面前方开始,应力拱外边界范围逐渐扩大,最终保持恒定;应力拱截面近似呈现三圆

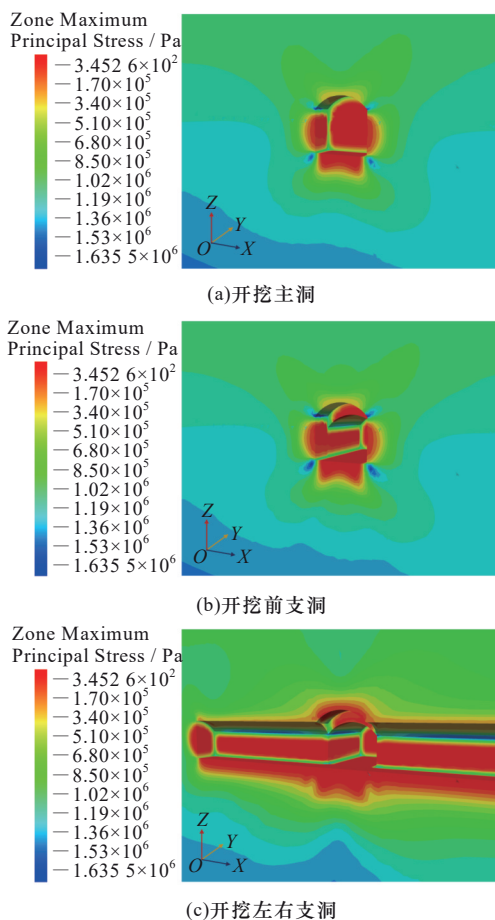


图8 围岩最大主应力

Fig.8 Maximum principal stress of surrounding rock

堆叠型,拱顶、边墙及拱底三个位置产生应力泡,拱顶与拱底范围大于边墙。前支洞开挖时,压力拱分布规律没有明显的改变;而当左右支洞开挖时,应力拱边界急剧扩大,交叉区边界扩大更为显著,形成了中间鼓,四边低的海星型,同时左右支洞应力拱边界大于同截面尺寸的前支洞。左右支洞的开挖使得围岩,尤其是交叉区的应力变化较剧烈,因此在隧道施工过程中应重点关注左右支洞施工情况,并对交叉区支护进行加强。

6 初期支护应力特征分析

初期支护最大及最小主应力云图见图12。从图中可以看出,最小主应力均为压应力;最大主应力为拉应力。最大主应力最大正值为 11.77 MPa ,位于隧道拱顶相交处,最小主应力最大负值为 -23.52 MPa ,位于隧道拱肩相交处。由于十字交叉段特殊结构,在施工时需要着重监测主洞与各支洞相交处支护受力情况,以防止此处初期支护破坏。

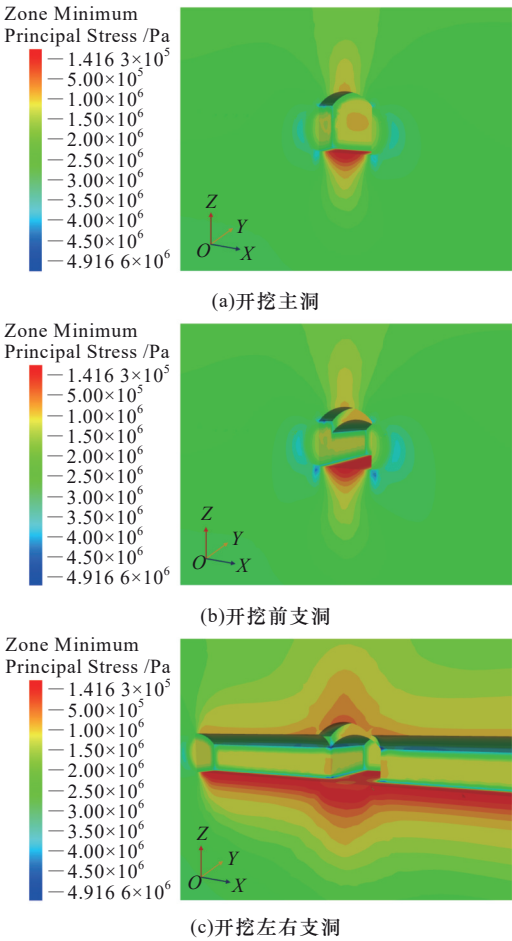


图 9 围岩最小主应力

Fig.9 Minimum principal stress of surrounding rock

7 初期支护参数优化

原初期支护采用钢筋网喷射混凝土支护,初期支护厚 0.15 m,现加固初期支护:交叉段附近区域初支加入 0.5 m 间距工 16 钢架,初支厚度增至 0.23 m。将喷射混凝土、钢筋网、钢拱架组成的结构体简化成混凝土和钢拱架的复合结构体,其弹性模量由式(2)计算。

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \tag{2}$$

式中, S_c 为混凝土面积, S_g 为工字钢面积, E_0 为喷射混凝土弹性模量, E_g 为工字钢弹性模量,折算后加固区初期支护弹性模量值如表 3 所示。

表 3 加固区初支弹性模量							
Table 3 Elastic modulus of initial support in reinforced area							
阶段	1	2	3	4	5	6	7
掌子面推进距离 x/m	2	6	10	14	18	22	≥ 26
原位初期支护弹性模量 $E_{shot,x}/GPa$	12.51	24.77	29.32	31.01	31.63	31.86	32.00

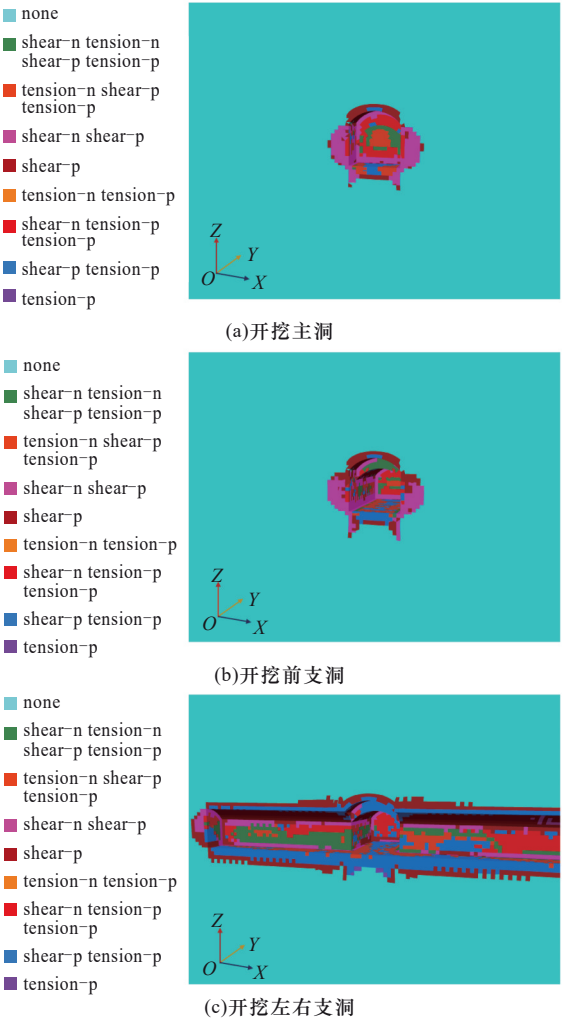


图 10 围岩塑性区

Fig.10 Plastic zone of surrounding rock

选用 6 种加固方案:不加固、仅交叉区范围、交叉区外拓 3 m(0.43 倍洞跨)范围内、外拓 5 m(0.71 倍洞跨)范围内、外拓 7 m(1 倍洞跨)范围内和外拓 9 m(1.29 倍洞跨)范围内加固。6 种施工方案下隧道特征点变形情况如图 13 所示。前支洞开挖为大断面至小断面开挖,围岩突变不明显,而左右支洞开挖割除了大断面主洞钢架并向主洞断面两侧进行扩挖,支护体系产生较大应力转换,围岩位移突变明显。初期支护加固后各特征点围岩位移控制效果大小排序为:左支洞边墙水平位移 A3(20.83%)>主洞边墙水平位移 A2(8.22%)>主洞拱顶沉降 A1(4.12%)>主洞拱底隆起 A4(3.06%);初期支护加固使围岩变形得到一定限制,而随着初期支护加固区范围的增加,围岩位移限制效果区域稳定,同时喷射混凝土成本随加固范围的增大呈线性增加的趋势,综合考虑加固效果及经济效益,选交叉区外拓 5 m(0.71 倍洞跨)范围为初期

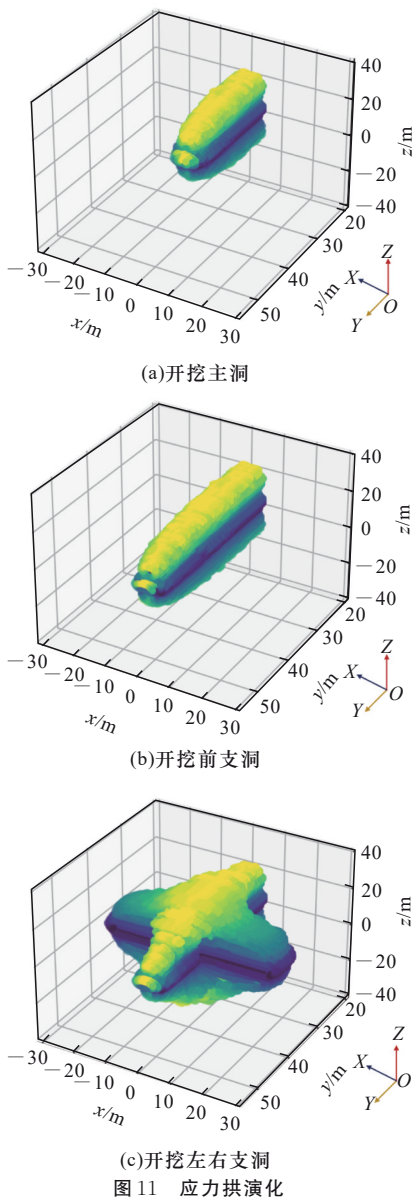


图 11 应力拱演化

支护最佳加固范围。

8 结论

1) 围岩变形主要发生在隧道交叉区的拱顶、边墙及拱底;相较于拱顶与边墙,拱底变形范围较小而最大变形量较大;拱底隆起最大值位于隧道交叉区,拱顶沉降最大值位于十字交叉几何中心附近,水平位移最大值位于交叉区附近的主洞边墙上;前支洞小断面开挖,围岩位移增量不明显,而随着左右支洞开挖,不仅位移发生突变而且扩大了小断面与大断面变形差距,同时左右支洞的开挖改变了围岩的水平位移方向。项目施工时着重注意监测左

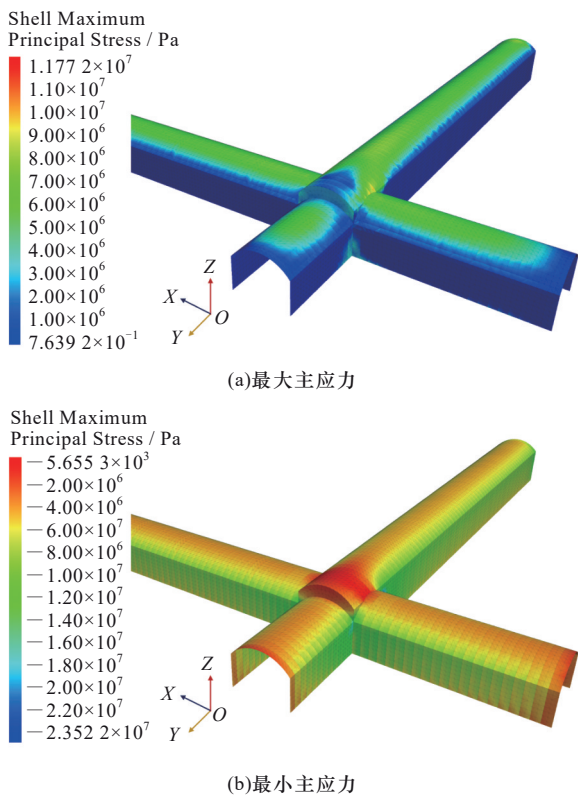


图 12 初期支护应力云图

Fig.12 Stress cloud diagram of initial support

右支洞开挖时围岩变形情况。

2) 围岩及初期支护在主洞与支洞相交处应力集中明显,隧道围岩以剪切破坏为主,张拉破坏则主要出现在拱顶、边墙和拱底。随着施工进展,塑性区范围会进一步扩大,交叉区附近塑性区面积更大。掌子面前方开始应力拱外边界逐步扩大并最终稳定,形成三圆堆叠型。开挖前支洞几乎不改变应力拱分布情况,开挖左右支洞时,应力拱边界急剧扩大,交叉区增幅显著,项目施工时着重注意监测左右支洞开挖时围岩应力变化及初期支护在隧道相交处的受力情况。

3) 通过加厚初期支护进行加固,围岩位移控制效果大小排序为:左支洞边墙水平位移(20.83%)>主洞边墙水平位移(8.22%)>拱顶沉降(4.12%)>拱底隆起(3.06%);加固初期支护有效地控制了围岩变形,但随着加固范围继续扩展,位移控制效果趋于稳定,而喷射混凝土成本随加固范围的增大呈线性增加的趋势。综合考虑加固效果及经济效益,确定在交叉区外围加固 5 m 为最佳范围,以此初期支护优化方案进行施工,能够确保变截面十字交

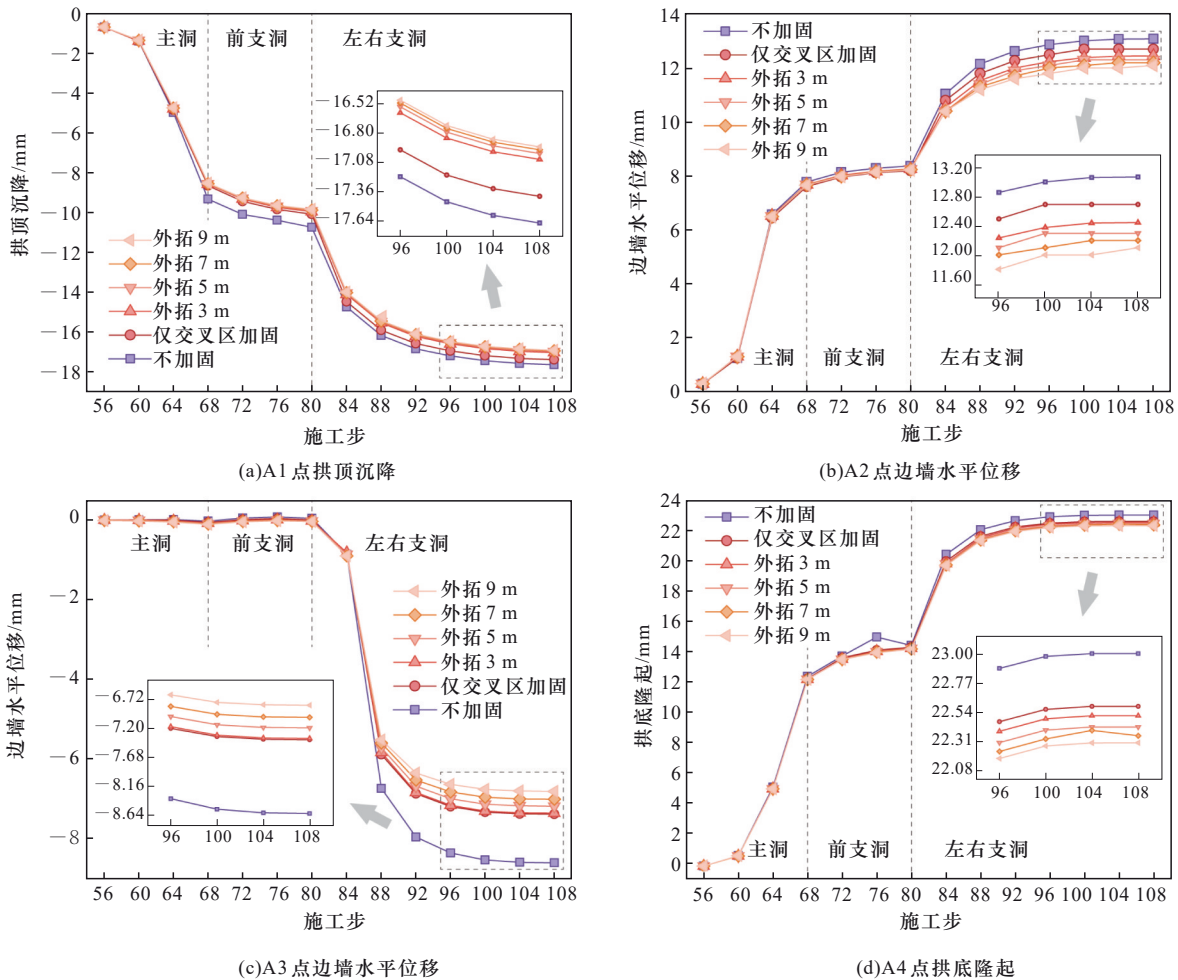


图 13 特征点位移曲线

Fig.13 Deformation curves at characteristic points

叉隧道的快速安全施工,为类似的隧道工程建设提 供参考。

参考文献:

- [1] 靳晓光,李晓红.深埋交叉隧道动态施工力学行为研究[J].重庆建筑大学学报,2008(2):32-36.
JIN X G,LI X H.Dynamic construction mechanical behavior of a deeply-buried intersection tunnel[J].Journal of Chongqing Jian-zhu University,2008(2):32-36.
- [2] 游步上,陈尧中.隧道交叉段变形机制之探讨[J].隧道建设,2007(S2):109-113.
YOU B S,CHEN Y Z.The deformation mechanism of tunnel intersection[J].Tunnel Construction,2007(S2):109-113.
- [3] 李玉峰,彭立敏,雷明锋.交叉隧道工程设计施工技术研究进展[J].铁道科学与工程学报,2014,11(1):67-73.
LI Y F,PENG L M,LEI M F.Resarch progress in the design and constraction technology of crossing tunnels[J].Journal of Rail-way Science and Engineering,2014,11(1):67-73.
- [4] 逢铁铮.地下十字交叉隧道的设计与施工技术[J].公路,2013(8):310-313.
PENG T Z.Design and construction of criss-cross tunnel[J].Higway,2013(8):310-313.
- [5] 饶军应,谢财进,赵霞,等.深埋隧洞三岔口围岩稳定性计算理论[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(8):1949-1959.
RAO J Y,XIE C J,ZHAO X,et al.Theoretical stability calculation of surrounding rocks in divergence of deep tunnel[J].Journal of Central South University(Science and Technology),2019,50(8):1949-1959.
- [6] 张顶立.隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J].力学学报,2017,49(1):3-21.
ZHANG D L.Essential issues and their research progress in fannel and underground engineering[J].Chinese Journal of Teorctical and Applied Mechanical,2017,49(1):3-21.
- [7] BIAN K,LIU J,XIAO M,et al.Cause investigation and verification of lining cracking of bifurcation tunnel at Huizhou Pumped Storage Power Station[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2016,54:123-134.

- [8] LIU H, LI S, LI L, et al. Study on deformation behavior at intersection of adit and major tunnel in railway[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(6): 2459-2466.
- [9] JONEIDI M, GOLSHANI A, NAEIMIFAR I. Progressive deformation and mechanical behaviour of intersecting tunnels in soft ground[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2019, 172(4): 285-296.
- [10] 林波, 谢文博, 刘磊, 等. 平面交叉隧道围岩及初期支护结构稳定性研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(7): 115-122.
LIN B, XIE W B, LIU L, et al. Study on stability of surrounding rock and primary support structure of grade cross tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(7): 115-122.
- [11] 安永林, 李佳豪, 周进, 等. 某不等跨分岔隧道力学特性与三维空间压力拱分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3705-3714.
AN Y L, LI J H, ZHOU J, et al. Mechanical characteristics and three-dimensional pressure arch of a branch-out tunnel with unequal-span[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3705-3714.
- [12] 杜广印, 武军, 夏涵, 等. 黄土十字交叉隧道开挖下支护结构变形特性研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 475-483.
DU G Y, WU J, XIA H, et al. Study on deformation characteristics of supporting structure under loess criss-cross tunnel excavation[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 475-483.
- [13] 王景春, 张天陆, 王炳华, 等. 施工通道与站台隧道三岔口段施工方法及力学行为研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(10): 2694-2702.
WANG J C, ZHANG T L, WANG B H, et al. Research on construction method and dynamic mechanical behavior of three-fork section of construction passage and station tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2694-2702.
- [14] 曹日红, 曹平, 张科, 等. 考虑应变软化的巷道交叉段稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1760-1765, 1821.
CAO R H, CAO P, ZHANG K, et al. Stability analysis of roadway intersection considering strain softening[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1760-1765, 1821.
- [15] 张德华, 刘士海, 任少强. 隧道喷射混凝土强度增长规律及硬化速度对初期支护性能影响试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1707-1713.
ZHANG D H, LIU S H, REN S Q. Experimental study of effects of strength increase and hardening rate of shotcrete on its early supporting performances in tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1707-1713.
- [16] 孙振宇, 张顶立, 房倩, 等. 隧道初期支护与围岩相互作用的时空演化特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3943-3956.
SUN Z Y, ZHANG D L, FANG Q, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of interaction between primary support and tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 3943-3956.
- [17] 安永林, 李佳豪, 刘文娟, 等. 隧道压力拱边界统一判定方法及其空间演化特征[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 84-90.
AN Y L, LI J H, LIU W J, et al. Unified boundary determination method of pressure arch in tunnels and its spatial evolution characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 84-90.

(编辑: 万 佳)