

包龙生,刘德罡,齐阳,等.上覆采空区隧道注浆加固参数设计与应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):385-394.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240363

BAO Longsheng,LIU Degang,QI Yang,et al.Design and application of grouting reinforcement parameters for overlying goaf tunnel [J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(4):385-394.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240363

上覆采空区隧道注浆加固参数设计与应用

包龙生¹,刘德罡¹,齐阳²,吴凤元¹

(1. 沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110100;

2. 辽宁省城乡建设规划设计院有限责任公司,辽宁 沈阳 110100)

摘要: 针对隧道上覆采空区岩体引发冒顶、坍塌等工程安全问题,以本桓高速长梁子隧道上覆采空区为工程背景,通过数值模拟方法分析不同注浆加固范围和厚度对隧道围岩的影响。研究表明:上覆采空区改变了隧道围岩应力分布。与无采空区工况相比,拱底隆起位移增加12.6%,拱脚收敛位移增加14.3%,拱顶沉降位移虽减少13.4%,但塑性区发展贯通的可能性增大。采用注浆加固可有效减小围岩变形。注浆范围为150°、注浆厚度为2 m时,加固效果最佳。加固后,拱底隆起、拱脚收敛和拱顶沉降位移分别下降33.2%、35.7%和36.1%,拱顶处主应力下降44.9%,塑性区范围显著缩小。研究结论为上覆采空区隧道的设计与施工提供依据。

关键词: 上覆采空区;隧道围岩;注浆加固;超前管棚;围岩变形;围岩应力

中图分类号:TD824.7

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)04-0385-10

Design and application of grouting reinforcement parameters for overlying goaf tunnel

BAO Longsheng¹, LIU Degang¹, QI Yang², WU Fengyuan¹

(1. School of Transportation and Surveying Engineering, Shenyang Architecture University, Shenyang 110100, China; 2. Liaoning Urban and Rural Construction Planning and Design Institute Limited Liability Company, Shenyang 110100, China)

Abstract: Aiming at the engineering safety problems such as roof fall and collapse caused by the rock mass in the overlying goaf of the tunnel, taking the overlying goaf of Changliangzi Tunnel of Benhuan Expressway as the engineering background, the influence of different grouting reinforcement scope and thickness on the surrounding rock of the tunnel is analyzed by using numerical simulation method. The results show that the overlying gob changes the stress distribution of tunnel surrounding rock. Compared with no goaf area, arch bottom uplift displacement increases by 12.6% and arch toe convergence displacement increases by 14.3%. Although the arch settlement displacement is reduced by 13.4%, the possibility of penetration in plastic zone is increased. Grouting reinforcement can effectively reduce the deformation of surrounding rock. By comparison, when the grouting range is 150° and the grouting thickness is 2 m, the reinforcement effect is the best. After reinforcement, arch bottom uplift, arch foot convergence and arch top settlement displacement decrease by 33.2%, 35.7% and 36.1%, respectively. The principal stress at the arch top decreases by 44.9%, and the range of plastic zone decreases significantly. The research results can provide a basis for the design and construction of overlying gob tunnel.

Keywords: overlying goaf; tunnel surrounding rock; grouting reinforcement; lead pipe shed; surrounding rock deformation; surrounding rock stress

0 引言

中国煤炭资源丰富,长期开采遗留下大量煤矿采空区。地下采空区具有隐伏性强、空间分布

复杂、规律性差、岩体不稳定等特点。由于整体规划和路线线形的限制,公路隧道在设计时不可避免需要穿越地下采空区。公路隧道穿越煤层

收稿日期:2024-10-28 修回日期:2024-11-29 接受日期:2024-12-09 责任编辑:朱含露

基金项目:国家自然科学基金项目(42202319);沈阳市科技计划项目基金项目(23-407-3-19)

作者简介:包龙生(1971-),男,江苏南通人,博士,教授,主要从事桥隧工程结构方面的研究。E-mail: 13516094255@163.com

采空区会对地层产生扰动,破坏采空区原有的平衡状态,进而导致隧道出现不均匀沉降、围岩大变形、衬砌结构侵入建筑限界,以及衬砌开裂等问题。因此,采空区治理对隧道的前期建设和后期运营维护具有重要工程意义^[1]。

近年来,国内多个穿越采空区隧道的成功修建,为采空区下隧道施工积累了重要经验。针对此类条件下隧道围岩稳定性控制问题,科研工作者开展了相应研究,具体研究手段主要分3类。一是以数值分析为主。袁崇洋等^[2]依托某高速公路隧道浅埋段,通过数值模拟分析了各施工阶段初期支护的位移变化。董鹏程^[3]采用理论分析与数值模拟相结合的方法,通过研究采空区煤柱下方巷道围岩的变形特征,总结了巷道围岩失稳机理。陈锐等^[4]利用FLAC^{3D}对节理岩体小净距隧道施工进行模拟,通过分析不同埋深和隧道净距的综合系数,推导出岩体稳定性公式。闫祥等^[5]采用MIDAS/GTS NX有限元软件建立隧道穿越煤层采空区群的三维实体模型,研究隧道穿越采空区群在未加固和加固条件下的围岩位移、塑性区变化规律及稳定状态。二是以地质力学模型试验为主。吴波等^[6]采用动力强度折减分析法,观察爆破开挖后围岩状况,并研究围岩塑性区变化规律。MA等^[7]通过搭建微震监测系统,研究断层与地下洞室围岩稳定性的距离效应,分析距离相关损伤分布及其机理。KIM等^[8]研究表明,大量地下水流入后,断层破裂带的挤压作用导致围岩急速变形,最终引发支护和隧道底部破坏。XUE等^[9]通过建立不同支护结构和参数条件下的数值计算模型,对比分析不同支护方式下围岩塑性区特征和变形特征。史英伯^[10]通过对采空区残留煤柱开展单轴压缩试验和分级加载蠕变试验,揭示了煤柱的力学特性及其在载荷作用下的蠕变规律,进而得到了不同建筑载荷下采空区覆岩及地表的竖向位移和水平位移变化规律。WU等^[11]以压力拱理论为基础,探讨不同埋深软弱围岩中双洞隧道的合理净距,得到双线隧道的危险净距范围。代聪等^[12]研究高地应力软岩隧道在不同开挖方法下的围岩响应特征。ZHU等^[13]利用自行设计的模型试验箱,研究不同地应力条件下软岩隧道岩体的变形规律。三是现场治理为主。李济良等^[14]研究表明,距离隧道3倍洞径以内的采空区会导致隧道围岩失稳,为安全通过采空区,应采用合理的超前支护方案并对采空区围岩进行注浆加固处理。韩宇峰^[15]以某矿区内下伏采空区建筑场地为背景,研究老采空区上覆岩层的应力分布特征及地表移动变形规律,并提

出注浆充填治理方法。曾力等^[16]以某地铁站为例,探究岩土参数变化对隧道变形的影响规律。

综上,针对上覆采空区的研究多集中于采空区安全距离和围岩变形影响规律等方面,但在采空区治理,尤其是注浆加固参数优化方面仍有待深入。本文以本桓高速长梁子隧道为工程背景,研究拱顶上覆采空区的处治措施,通过对比不同加固参数下隧道围岩的受力、变形及塑性区范围,提出既能满足技术指标又经济实用的注浆加固参数,为类似隧道工程施工提供参考。

1 工程概况

1.1 地质条件

本桓高速长梁子隧道位于辽宁省本溪市本溪满族自治县小市镇长梁子村,呈近东西向展布。长梁子隧道为分离式隧道,左线洞长为1 530 m,右线洞长为1 573 m,属长隧道。隧址区属剥蚀构造中低山地貌,地势起伏较大。隧道穿过山体最大标高为591.3 m,最低标高为462.71 m,在隧道右线入口,相对高差为128.59 m。隧道进口端山坡坡度较缓,自然坡度为10°~17°;出口端山坡坡度较陡,自然坡度为31°~37°。区域内植被发育良好,水土保持状况较佳。

1.2 采空区分布情况

以长梁子右线隧道为研究对象,桩号为K49+400、K49+500。该段围岩为中风化砾岩,灰色,砾状结构,中厚层状构造,钙质胶结,母岩成分为石英岩、岩浆岩,节理裂隙发育局部夹粉砂岩、细砂岩。岩石单轴饱和抗压强度 R_c 为34.2 MPa,岩石完整性系数 K_v 计算值为0.48。洞身处围岩为较坚硬岩,岩体较破碎,结构面发育,碎裂状结构,地下水修正系数 K_1 为0.3,软弱结构面修正系数 K_2 为0.2,不存在高应力,计算岩体基本质量指标 $[BQ]$ 为272.6,属IV级围岩。地质钻探发现隧道内采空区位置见图1。



图1 隧道内采空区位置

Fig.1 location of the goaf in the tunnel

根据地质勘察资料可知,隧址周围存在无序开采的小煤窑群。其中,靠近隧道区域的采空区高度为1~2.5 m,宽度为3~9.6 m,开采长度为40~205 m。根据采煤坑口开挖方向推测,采煤方向多为北东向10°~40°,与隧道走向近似平行,采空区与隧道距离最近处约为隧道跨度的一半。在数值模拟中,按照最不利工况,将采空区的长度设定为10 m,厚度设定为3 m。房柱式和长壁式是目前煤层地下开采的常用方式^[17],且两种开采方式形成的采空区形态近似为矩形,因此本文假定采空区形态为矩形。隧道与采空区相对位置关系见图2。

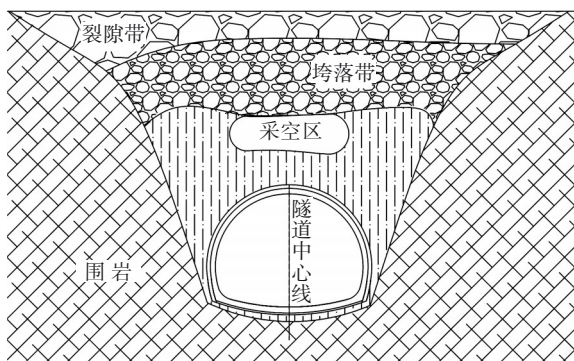


图2 上覆采空区横断面

Fig.2 cross section of tunnel overlying goaf

1.3 隧道开挖支护方案

采用台阶法开挖时,每循环开挖进尺小于2榀钢架间距,若上台阶爆破后发现围岩条件变差,可根据实际需要在上台阶底部设置临时仰拱。施工以新奥法原理为指导,采用复合式衬砌,即以系统锚杆(或注浆钢花管)、钢筋网、喷射混凝土、工字型钢拱架作为初期支护,并根据不同的围岩级别辅以大管棚、超前小导管等超前支护措施。

二次衬砌采用模筑混凝土或钢筋混凝土,在初期支护与二次衬砌之间敷设1.5 mm厚防水板及20 kN/m无纺布作为防水层。超前小导管采用 $\Phi 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的热轧无缝钢管或D22锚杆,钢管及锚杆环向间距为40 cm,外插角控制在10°~15°,尾端支撑于钢架外侧,每排钢管或锚杆纵向搭接长度不小于1.0 m。V、IV级围岩段隧道系统锚杆选用 $\Phi 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 中空注浆锚杆,中空注浆锚杆垫板尺寸为150 mm×150 mm×10 mm,锚杆砂浆强

度等级不低于M20。喷射混凝土采用湿喷工艺。

2 数值模拟方案

2.1 建立数值模型

数值模型的范围为沿隧道中线向两侧各延伸65 m,拱顶向上延伸60 m,拱底向下延伸60 m,模型沿隧道开挖方向取50 m。开挖过程共分25个进尺(每进尺2 m),上下台阶间距为12 m(即一个隧道宽度)。隧道初期支护为锚杆和喷射混凝土,其中,喷射混凝土C30厚为0.25 m,锚杆长约4 m,直径为22 cm,二次衬砌厚度为0.35 m。为研究采空区对隧道的影响,根据现场实际和工程勘察资料建立采空区模型,按照最不利工况条件,将采空区置于拱顶以上0.5D(D为隧道跨度)处,并简化为10 m×3 m的矩形空腔。上覆采空区隧道数值模型见图3。

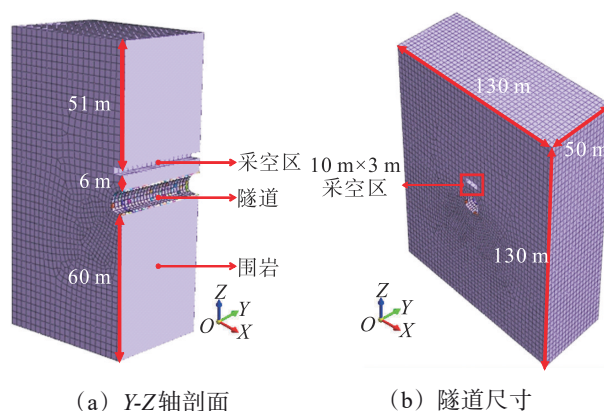


图3 上覆采空区隧道数值模型

Fig.3 numerical model of the overlying goaf tunnel

2.2 模型参数选取

数值模型采用Mohr-Coulomb屈服准则,围岩及支护结构参数根据《本溪至集安高速公路本溪至桓仁(辽吉界)段第二合同段》施工图设计确定,具体参数见表1。模型中的注浆加固层通过改变材料参数的方式模拟,注浆加固区的等效弹性模量为

$$E_2 = \rho E_g + (1 - \rho) E_w, \quad (1)$$

式中: $\rho = (0.6 \sim 0.7)\eta$ (η 表示围岩孔隙率); E_g 为浆液凝固时的弹性模量, GPa; E_w 为拟加固岩土体的弹性模量, GPa。

表 1 隧道围岩及支护结构材料参数

Tab.1 material parameters of tunnel surrounding rock and supporting structure

材料类型	弹性模量 E/GPa	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
围岩	1.7	23.0	0.40	30	150
喷射混凝土	23.0	22.0	0.20		
锚杆	210.0	78.5	0.30		
超前小导管	200.0	78.5	0.22		
注浆加固层	3.6	24.0	0.32	34	360

2.3 采空区下围岩变形与塑性分析

上覆采空区对隧道围岩稳定性存在显著影响，主要体现在围岩位移变化和塑性区分布两个方面。有无采空区时竖向位移、横向位移、塑性区的分

布情况见图 4~图 6。通过对比可知，采空区的存在改变了位移场的分布和变化趋势，破坏了无采空区时围岩的受力平衡状态，使围岩应力重新分布。

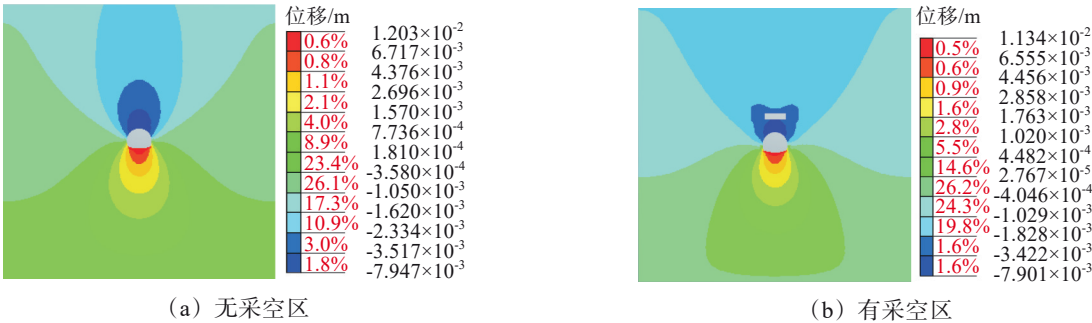


图 4 竖向位移场对比
Fig.4 vertical displacement field comparison

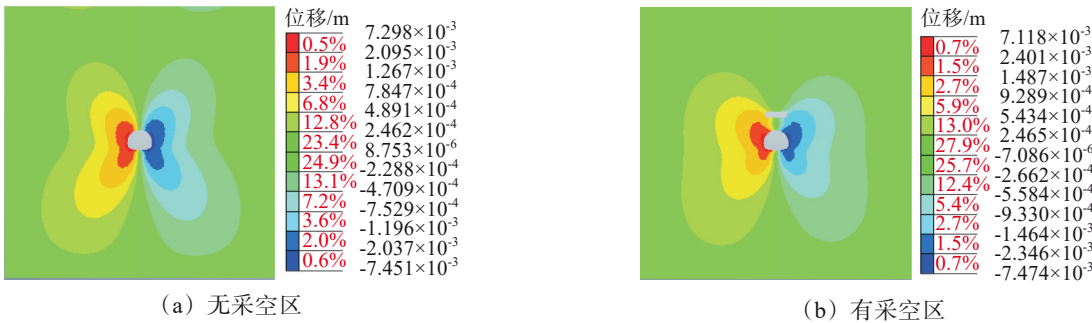


图 5 横向位移场对比
Fig.5 lateral displacement field comparison

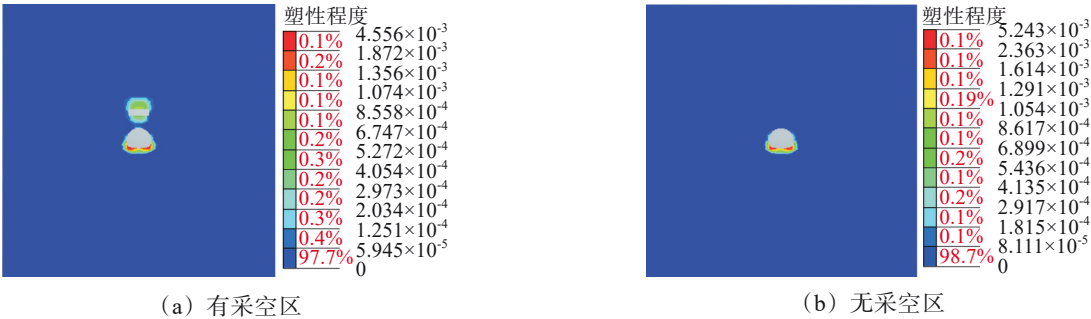


图 6 塑性区对比
Fig.6 plastic zone comparison

拱顶沉降随施工工序的变化情况见图7。上覆采空区工况下拱顶沉降位移为-6 mm,较无采空区时减小13.4%,表明采空区的存在对拱顶沉降有抑制作用。这是由于上部采空区相当于卸载了部分围岩,围岩径向挤压力降低,使拱顶沉降位移减小。但需注意采空区周边围岩因前期开采已受到扰动,形成了塑性区,这种位移减小可能带来安全隐患。因此,随着隧道开挖,两部分塑性区极易贯通,引发隧道围岩失稳等问题。

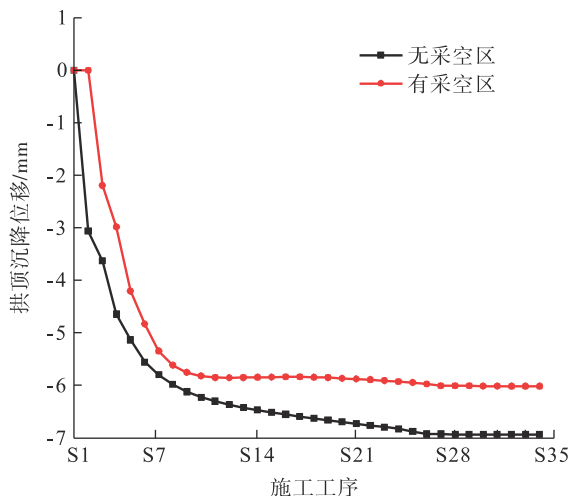


图7 拱顶沉降随工序变化

Fig.7 settlement of the vault varies with the process

拱底隆起和拱脚收敛随施工工序的变化情况分别见图8和图9。可知无采空区时,拱底隆起位移和拱脚收敛位移分别为10.3 mm和7.0 mm;当存在上覆采空区时,拱底隆起位移和拱脚收敛位移分别增至11.6 mm和8.0 mm,较无采空区时分别增加12.6%和14.3%。这是由于采空区的存在破坏了围岩原有的应力平衡状态,使应力重新分布。

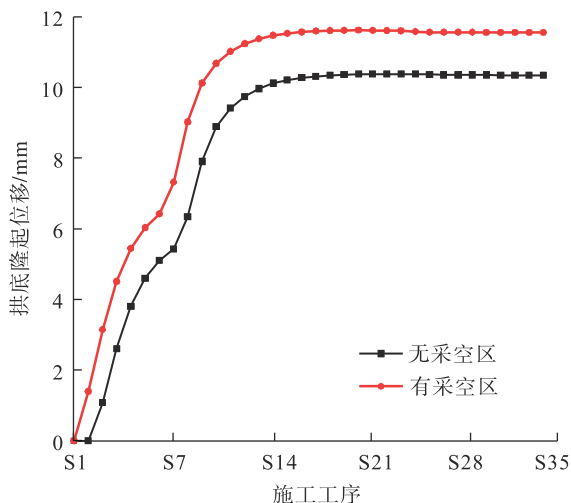


图8 拱底隆起随工序变化

Fig.8 arch bottom uplift varies with the process

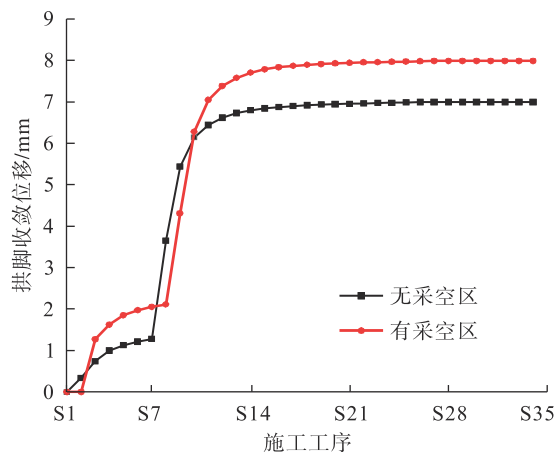


图9 拱脚收敛随工序变化

Fig.9 arch foot convergence changes with the process

3 不同加固参数围岩稳定性分析

为确保上覆采空区影响下隧道围岩的稳定性,在隧道开挖过程中应采用超前管棚或超前小导管等超前支护措施,并结合注浆加固工艺,在隧道周边形成加固护拱。该方案可增加围岩强度,减小采空区对围岩位移的影响,防止采空区与隧道围岩塑性区贯通,从而控制围岩变形并提高稳定性。为评价注浆加固对围岩位移的控制效果,参照《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)^[18]中国岩位移管理等级的相关规定建立注浆加固作用评价标准,见表2。

表2 加固作用效果分类

Tab.2 classification of grouting reinforcement effect

加固效果	位移判定标准	塑性区改善情况
无作用	$U = U_0$	塑性区无明显改变
作用一般	$0.7U_0 \leq U < U_0$	塑性区面积减小,但仍存在贯通
作用显著	$U < 0.7U_0$	塑性区面积减小,贯通现象消失

注: U_0 为极限位移; U 为注浆加固后的位移。

3.1 位移场分析比较

基于所建模型及参数进行隧道开挖支护模拟,对比分析各项加固措施的效果,具体工况见表3。

表3 数值计算工况

Tab.3 numerical calculation condition

工况	注浆加固层参数	
	加固角度/(°)	加固层厚度/m
1	0	0
2	120	1.5
3	120	2.0
4	150	1.5
5	150	2.0

注: 工况1为未加固。

(1) 拱顶沉降位移比较

各工况下围岩沉降位移(稳定值)变化情况

见图 10, 可知工况 2 的拱顶沉降位移较工况 1 减小 17.5%。随着加固层范围和厚度的增加, 加固层对围岩沉降位移的抑制作用更加显著, 表明扩大加固层范围并增加厚度可有效控制围岩位移。工况 5 的沉降位移为 -3.84 mm, 较工况 1 减少 36.1%, 表明工况 5 对控制围岩变形、提升围岩稳定性具有显著效果。

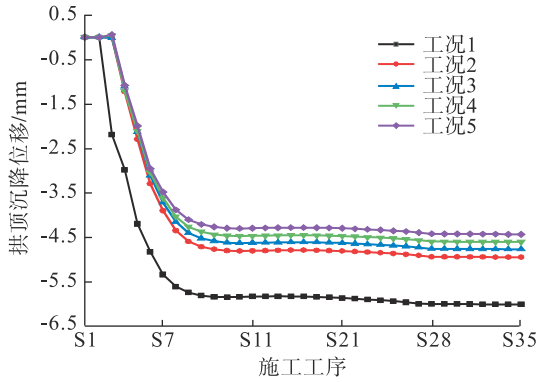


图 10 不同工况下拱顶沉降位移对比

Fig.10 comparison of arch roof settlement and displacement under different working conditions

(2) 拱底隆起位移比较

不同工况下围岩拱底隆起位移的变化情况见图 11, 可知, 工况 2 和工况 4 的拱底位移与工况 1 相比差异较小, 表明当加固层厚度较小时, 扩大加固范围对控制围岩位移的效果有限。工况 3 和工况 5 的围岩位移较工况 1 分别减小 20% 和 33.2%, 表明只有当加固层达到一定厚度时, 才能有效抑制围岩变形, 且加固范围越大, 效果越显著。因此, 工况 5 满足围岩稳定性评定标准, 具有显著的加固效果。

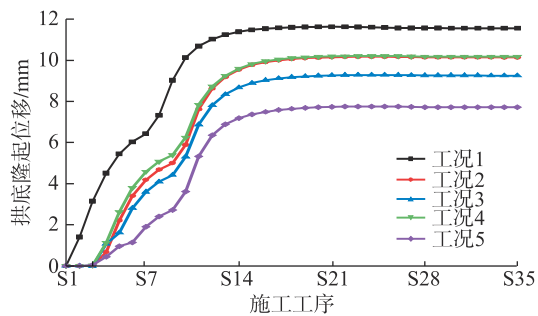


图 11 不同工况下拱底隆起位移对比

Fig.11 comparison of arch bottom uplift displacement under different working conditions

(3) 拱脚收敛位移比较

不同工况下围岩拱脚收敛位移变化见图 12, 可知, 当加固范围为 120° 时, 加固层对围岩横向收敛位移具有一定的控制作用。在 1.5 m 和 2 m 两种加固厚度工况下, 拱脚收敛位移较未加固工况分别减小 16.1% 和 14.9%, 表明在保持 120° 加固范

围不变的情况下, 改变加固层厚度对横向位移的改善效果不明显。而当加固范围增大至 150° 时, 加固层对围岩横向位移的控制作用显著增强。当加固厚度分别为 1.5 m 和 2 m 时, 拱脚收敛位移较工况 1 分别减小 31.7% 和 35.7%。由此可见, 扩大加固范围对改善收敛位移效果显著。

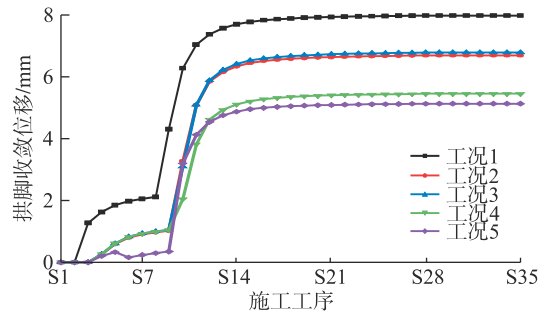


图 12 不同工况下拱脚收敛位移对比

Fig.12 comparison of arch foot convergence displacement under different working conditions

(4) 不同工况下位移变化情况的分析

不同工况下围岩最大位移变化情况见表 4。可知注浆加固可有效控制上覆采空区隧道围岩的竖向和横向位移。具体表现为: 对于围岩竖向位移, 注浆层厚度的控制效果优于注浆范围; 对于横向位移, 注浆范围的影响更为显著。产生这一现象的原因如下: 增加加固层厚度可提高保护层的弹性模量, 使垂直方向承担变形的岩体体积增大, 从而有效减小竖向位移; 扩大注浆范围能增强围岩的横向约束, 降低拱脚向中心的挤压力, 进而减小横向位移。

表 4 不同加固措施下监测点最大位移统计

Tab.4 maximum displacement statistics of monitoring points under different reinforcement measures

工况	拱顶		拱脚		拱底	
	沉降位 移/mm	较工况 1 下 降幅度/%	收敛位 移/mm	较工况 1 下 降幅度/%	隆起位 移/mm	较工况 1 下 降幅度/%
1	-6.00		7.98		11.56	
2	-4.95	17.5	6.69	16.2	10.13	12.4
3	-4.77	20.5	6.79	14.9	9.25	20.0
4	-4.60	23.3	5.45	31.7	10.18	11.9
5	-3.84	36.0	5.13	35.7	7.72	33.2

3.2 应力场分析比较

因篇幅所限, 本文仅比较采空区围岩注浆加固前后的第一主应力大小。由图 13 可见, 隧道通过采空区时, 围岩失去原有应力平衡, 导致隧道周边和采空区附近出现明显的应力集中现象。采空区上覆岩体的应力向下传递, 使下部岩体的垂直应力值较大, 拱顶和仰拱部位以拉应力为主, 而拱腰及边墙以压应力为主。不同工况下隧道围岩的主应力值见表 5。

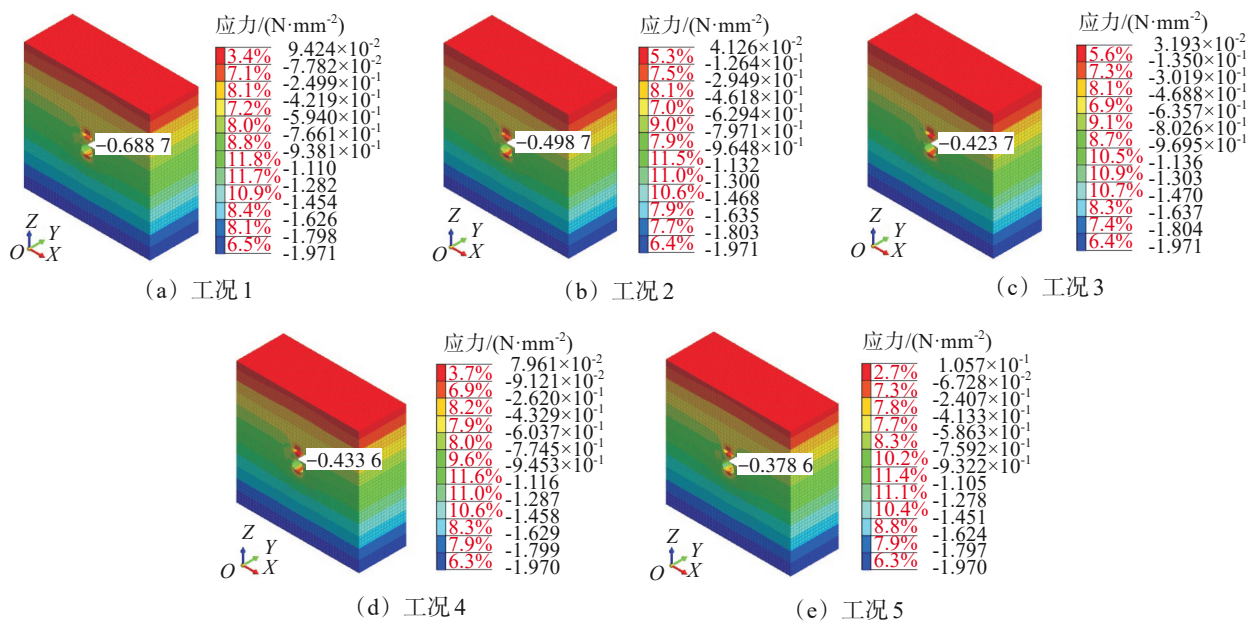
图 13 注浆加固前后围岩第一主应力 σ_1 云图Fig.13 cloud map of the first principal stress σ_1 of surrounding rock before and after grouting reinforcement

表 5 不同工况隧道围岩第一主应力比较

Tab.5 comparison of the first principal stress under different working conditions in tunnel

工况	拱顶应力值/MPa	较工况 1 下降幅度/%
1	-0.69	
2	-0.50	27.54
3	-0.42	39.13
4	-0.43	37.68
5	-0.38	44.93

3.3 塑性区分析比较

不同工况下围岩横截面塑性区云图见图 14, 可知塑性区随隧道开挖进程逐渐扩展, 在未采用加固措施仅施作初期支护 (工况 1) 的情况下, 塑性区整体呈“X”形分布于隧道周边, 其中拱腰及拱脚区域塑性程度较高, 拱顶与采空区塑性区存在贯通趋势, 隧道两端拱脚部位可能出现整体失稳剪切破坏。

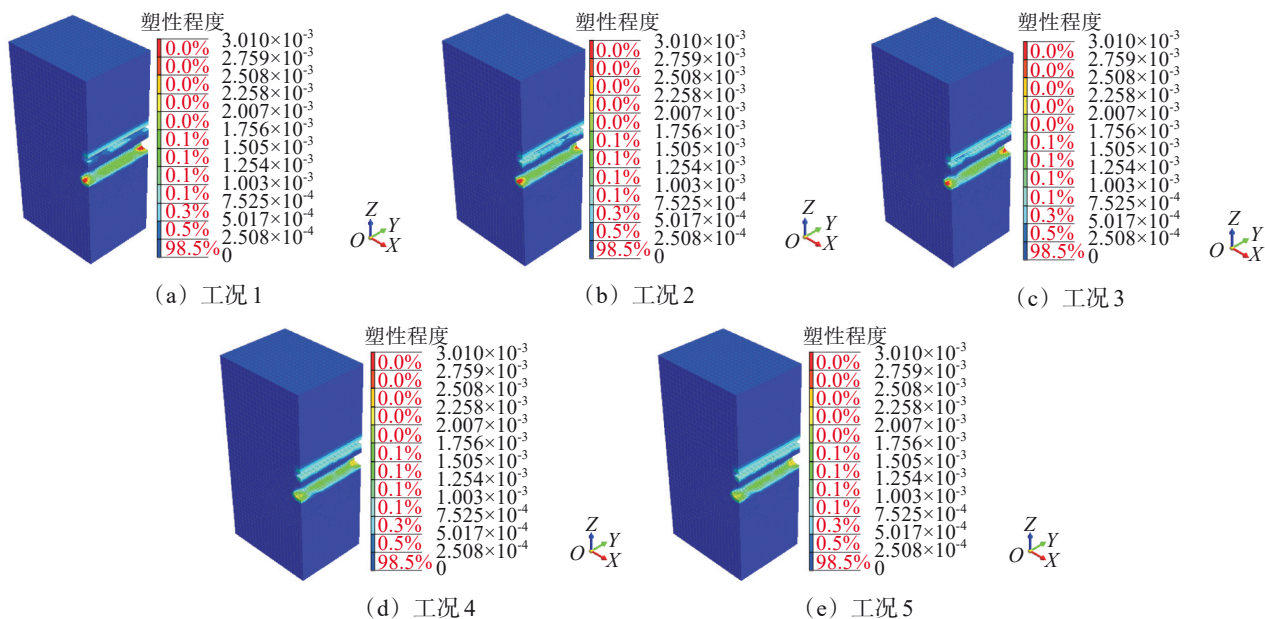


图 14 不同工况下塑性区对比

Fig.14 comparison of plastic zone under different working conditions

采用注浆加固后,当加固范围为120°时,塑性区范围较未加固工况略有减小,但改善效果有限,且不同加固厚度对塑性区的控制效果差异不显著。当加固范围扩大至150°时,塑性区范围明显缩小且塑性程度降低。对比分析表明,2 m厚加固层的控制效果优于1.5 m厚加固层,说明增加加固层厚度可有效抑制塑性区扩展。

在未采取加固措施的情况下,拱腰和拱脚区域表现出较高的塑性程度。当加固范围为120°时,由于仅覆盖拱顶和拱肩部位,对拱腰和拱脚的加固效果有限,因此塑性区的改善效果不显著;而当加固范围扩大至150°后,加固层能够有效覆盖拱腰和拱脚区域,使得塑性程度显著降低,塑性区范围明显缩小。对比分析表明,仅在适当的加固范围内,增加注浆层厚度才能有效控制塑性区的扩展。通过综合比较加固前后围岩位移变化量和塑性区范围的变化规律,可以确定当加固范围为150°且加固层厚度为2 m时,围岩的加固效果最佳。

4 应用

基于上述位移场和塑性区分析结果,结合长梁子隧道实际水文地质条件,针对上覆采空区的工程特点,现场采用超前管棚加固方案。具体实施时,在隧道拱部150°范围内布设单排Φ76 mm×6 mm超前管棚,通过注浆工艺对松散岩体进行加固支护,实现“先支护、后开挖”的施工目标。

4.1 管棚超前注浆

管棚施工布置方式见图15,隧道通过上覆采空区时主要处置流程见图16。

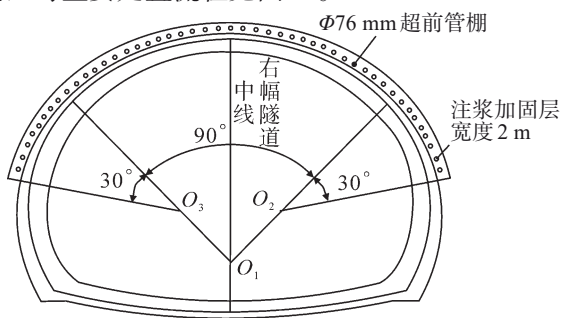


图15 管棚超前注浆横断面

Fig.15 cross section of grouting in advance pipe shed

管棚法中注浆量为

$$Q=\pi r^2 L n \alpha \beta, \quad (2)$$

式中: r 为水泥浆扩散半径, m; L 为注浆总长度, m; n 为地层孔隙率; α 为地层填充系数; β 为水泥浆消耗系数。

单排注浆加固圈厚度为

$$H=2\sqrt{r^2-(l/2)^2}, \quad (3)$$

式中, l 为相邻钢管中心距, m。

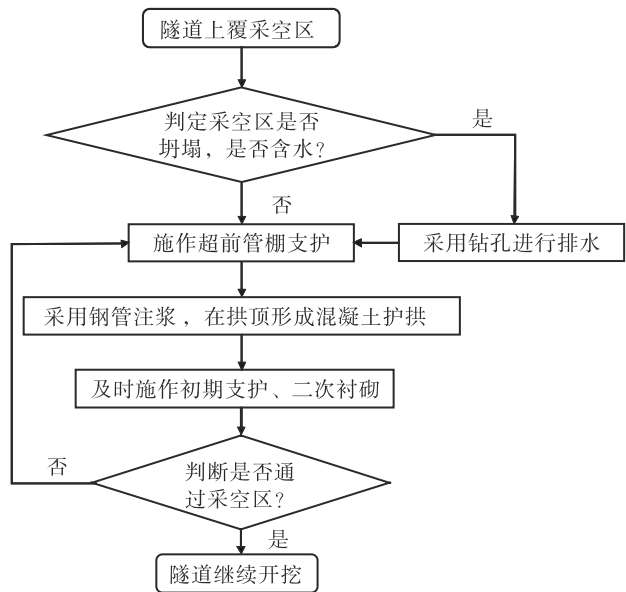


图16 隧道上覆采空区处置流程

Fig.16 flow of treatment of gob over tunnel

管棚支护施工采用与钢架协同作业模式,每循环布设10根钢架,注浆量为21.24 m³。水泥浆液水灰比(质量比)按1:1控制,注浆初始压力为0.5~1.0 MPa,终止压力设定为2.0 MPa。注浆作业严格遵守“先两侧后中间、跳孔注浆、由稀到浓”的原则。施工前须进行现场原位注浆试验,根据试验结果优化注浆参数。注浆过程中,当达到设计注浆量或注浆压力达到终止压力并稳定10 min时,应立即停止注浆,并详细记录每根管棚的注浆参数。注浆完成后,采用M20水泥砂浆充填钢管以增强管棚结构性能。管棚支护施工结束后,在拱顶按5~10 m的间距布设检查孔并取芯,检测围岩注浆效果及岩体力学参数。施工全过程需强化监控测量工作。

管棚注浆沿隧道开挖轮廓线,在拱顶设计范围内布设管棚,利用钢管注浆,在掌子面周边形成加固保护圈,其作用机理主要体现在结构支护和岩体改良两方面。一方面,管棚钢管发挥类似锚杆的支护功能,与钢拱架形成协同受力体系,将上部围岩荷载有效传递至钢拱架,降低掌子面前方岩土体的应力集中程度,提升围岩整体稳定性。同时钢管一端锚固于钢拱架,另一端嵌入岩体形成简支梁结构,有效承担部分上覆岩土压力。另一方面,通过钢管注浆孔向围岩裂隙压注浆液,提高围岩弹性模量和抗压强度,改善围岩物理力

学性能,增强拱顶围岩密实度,从而确保掌子面岩土体的稳定状态。

4.2 加固后位移监测结果

为验证加固措施的实施效果,现场采用全站仪对隧道典型断面进行围岩变形监测。依据规范,围岩监测断面间距设为10 m,各监测点分别在对应台阶开挖围岩暴露后布置,持续监测30 d。长梁子隧道采空区段2个监测断面(桩号为K49+400、K49+500)开挖30 d后的拱顶沉降位移见图17,水平收敛位移见图18。

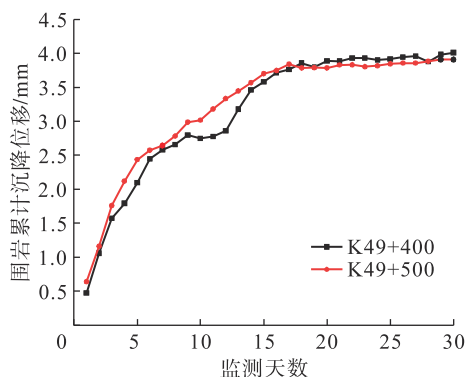


图17 监测断面沉降位移

Fig.17 settlement displacement of monitoring section

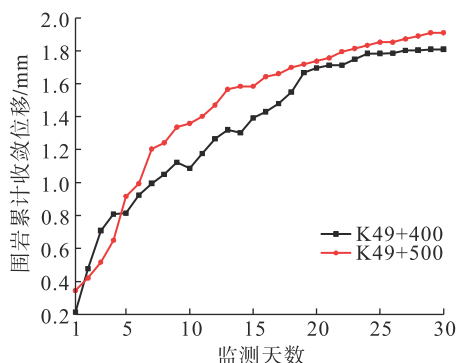


图18 监测断面收敛位移

Fig.18 convergent displacement of monitoring section

由图17、图18可见,监测断面的拱顶沉降位移自第18 d起趋于稳定,最终稳定值约为4.6 mm;拱脚收敛位移在第20 d后逐渐稳定,最终稳定值约为5.6 mm。各监测断面的围岩位移虽存在差异,但均未超出设计极限值,证明采用管棚注浆加固上覆采空区的措施有效控制了围岩变形,确保了隧道施工安全。

数值模拟结果与现场监测结果对比见表6,可知现场实测结果均大于模拟结果。这是由于模型中隧道开挖后立即施作初期支护,支护结构能够

及时抑制围岩变形;而现场施工受外界因素影响,初期支护存在时间滞后,无法即时发挥支护效果。此外,数值建模过程中未考虑节理、裂隙、破碎带及地下水等地质因素的影响。结合图17、图18可知,数值模拟可以较准确反映采空区隧道围岩的变形规律和特征。

表6 数值模拟结果与现场监测结果对比

Tab.6 comparison of numerical simulation results with field monitoring results

监测项目	数值模拟/mm	现场监测/mm	差值/mm
拱顶下沉	3.84	4.65	0.81
拱脚收敛	5.13	5.62	0.49

5 结论

(1) 数值计算结果表明,对于上覆采空区的隧道工程,仅采用初期支护时,围岩的拱底隆起位移和横向收敛位移较无采空区工况显著增加。具体表现为:拱底隆起位移增加11.7%,拱脚收敛位移增加15.7%。虽然拱顶沉降位移有所减小,但采空区导致拱顶塑性区范围扩大,围岩稳定性降低,可能引发隧道整体失稳。因此,必须采取有效的加固措施保障隧道施工安全。

(2) 超前管棚注浆加固能有效控制围岩位移并提高稳定性。当加固范围为120°、厚度为1.5 m时,拱顶沉降位移和拱脚收敛位移均得到显著改善。增加加固层厚度可提高围岩等效弹性模量,从而减小拱顶沉降和拱底隆起位移;扩大加固范围则能增强围岩横向约束,有效控制拱脚收敛位移。

(3) 对比分析5种工况的位移场和塑性区分布表明,工况5的综合表现最优。实施管棚注浆加固后,围岩拱顶沉降位移降低36.1%,拱底隆起位移减小33.2%,拱脚收敛位移减少35.7%。所有位移指标均满足稳定性要求,塑性区范围和塑性程度也得到明显改善。综合考虑技术效果与经济性,推荐采用工况5的加固方案。

参考文献(References):

- [1] 张彩亮,张玉芳,姜惠峰.中国既有隧道下伏煤矿采空区问题研究现状及进展[J].科学技术与工程,2021,21(7): 2575-2585.
ZHANG Cai liang, ZHANG Yufang, JIANG Huifeng. Research status and progress of problems associated with coal mine goaf under existing tunnels in China[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2575-2585.
- [2] 袁素洋,彭飞,詹伟,等.公路隧道洞口浅埋段初支位移控制基准

- 研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 242-246.
- YUAN Dongyang, PENG Fei, ZHAN Wei, et al. Study on control benchmark of primary support displacement in shallow buried section of highway tunnel entrance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 242-246.
- [3] 董鹏程. 采空区煤柱下方巷道围岩变形失稳规律及巷道支护技术[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022:44-59.
- [4] 陈锐, 陈高生, 杨静, 等. 节理岩体小净距地铁隧道暗挖施工响应数值分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(增刊1): 232-239.
- CHEN Rui, CHEN Gaosheng, YANG Jing, et al. Numerical analysis of construction response of mined metro tunnel with small clear distance in jointed rock mass[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(Suppl.1): 232-239.
- [5] 闫祥, 张成良, 庞鑫, 等. 公路隧道穿越采空区群稳定性分析及加固措施研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(15): 111-117.
- YAN Xiang, ZHANG Chengliang, PANG Xin, et al. Stability analysis and reinforcement measures of highway tunnel crossing goaf group[J]. Construction Technology, 2023, 52(15): 111-117.
- [6] 吴波, 兰扬斌, 杨仕升, 等. 基于强度折减动力分析法的围岩稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(3): 56-64.
- WU Bo, LAN Yangbin, YANG Shisheng, et al. Study on stability of surrounding rock based on strength reduction dynamic analysis method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(3): 56-64.
- [7] MA K, FENG B, ZHUANG D Y, et al. Distance effects of the fault on the surrounding rock mass stability of the main powerhouse at the Huanggou pumped-storage power station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103568.
- [8] KIM N Y, PARK D H, JUNG H S, et al. Deformation characteristics of tunnel bottom after construction under geological conditions of long-term deformation[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 21(2): 171-178.
- [9] XUE Y, ZHOU B, WU Z, et al. Mechanical properties of support forms for fault fracture zone in subsea tunnel[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, 56(6): 436-444.
- [10] 史英伯. 老采空区煤柱蠕变特性与建筑荷载下地表移动规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023:39-49.
- [11] WU F Y, HE C, KOU H, et al. Discussion on reasonable clear spacing of twin-tunnels in weak surrounding rock: analytical solution and numerical analysis[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(5): 2428-2442.
- [12] 代聪, 何川, 刘川昆, 等. 开挖工法对高地应力场软岩隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 141-149.
- DAI Cong, HE Chuan, LIU Chuankun, et al. Model test study on influence of excavation methods on stability of surrounding rocks of the soft rock tunnel in high geostress field[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4): 141-149.
- [13] ZHU Z G, FANG Z C, XU F, et al. Model test study on the rock mass deformation law of a soft rock tunnel under different ground stresses[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 962445.
- [14] 李济良, 吴华, 胡迪川, 等. 高速铁路隧道穿越采空区处治措施探讨[J]. 现代交通技术, 2022, 19(6): 45-49.
- LI Jiliang, WU Hua, HU Dichuan, et al. Discussion on treatment measures for high-speed railway tunnel which cross the coal mined area[J]. Modern Transportation Technology, 2022, 19(6): 45-49.
- [15] 韩宇峰. 浅部多煤层开采后老采空区稳定性分析及注浆充填治理技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020:42-45.
- [16] 曾力, 杨景辉, 李明宇, 等. 土岩组合地层基坑开挖对下卧隧道变形影响模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 879-887.
- ZENG Li, YANG Jinghui, LI Mingyu, et al. Numerical analysis of influence of foundation pit excavation on deformation of underlying tunnel in soil-rock combination stratum[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(5): 879-887.
- [17] 蒋德武. 穿越煤系采空区地层的隧道围岩稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017:26-27.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG/T 3660—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020:199-201.