

偏压隧道的稳定性研究

代树林¹, 万怡祯¹, 张永春²

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中建三局工程设计有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 地表倾角不同是隧道形成偏压的一种原因。由于地表不对称, 隧道两侧受力状况不同, 从而容易对隧道衬砌产生破坏。采用有限元分析方法研究了不同地表倾角、隧道周围变形过程及隧道锚杆和塑性区分布特征, 得出了以下结论: 隧道围岩变形随着地表倾角增大而增大, 隧道深埋侧变形大和锚杆轴力大; 隧道在地表倾角 $> 30^\circ$ 时, 受地形偏压影响明显, 深埋侧塑性区扩大。这些研究可为受地形偏压的隧道设计提供一定的理论依据及施工建议。

关键词: 地表倾角; 隧道变形; 偏压隧道; 数值模拟

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)09-0099-05

Study on the stability of biased tunnel at topographical uneven pressure

DAI Shulin¹, WAN Yizhen¹, ZHANG Yongchun²

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Engineering Design Co., Ltd., China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: The different surface dip angle is one of the reasons for the biased tunnel. Due to the surface asymmetry, the force on the two sides of the tunnel is different from each other, leading to damage to the lining of the tunnel. The finite element analysis was used to study different surface dip angles, the deformation process around the tunnel and the distribution characteristics of tunnel bolts and the plastic zone. When the surface dip angle is greater than 30° , the tunnel is clearly affected by biased pressures and the plastic zone on the deeper side is enlarged, which can provide some theoretical basis and construction suggestions for the tunnel design under the topographic biased pressure.

Key words: surface dip angle; deformation; bias tunnel; numerical simulation

0 引言

在大部分隧道建设中, 由于施工技术和工程地质等原因, 致使左右围岩位移不一致, 造成隧道偏压。而偏压隧道是隧道工程中一种常见的隧道, 其偏压大多数出现在洞口处。隧道选址设计时, 地形出现左右不对称的现象是不可避免的, 不同的倾角使隧道围岩变形及衬砌和锚杆受力不同。因此, 研究地表倾角不同造成偏压隧道对工程具有实际意义。

国内外对偏压隧道研究有许多方面, 于清杨^[1]根据铁路双线隧道设计规范, 采用数值模拟的方法,

以拱肩的应力比判别偏压隧道; 聂建春等^[2]研究在不同的偏压状况下选择合适的开挖方法, 并优化台阶法; 董建华等^[3]提出一种洞口浅埋偏压隧道的新型防护结构并优化防护结构计算方法; 李伟瀚等^[4]研究了 Mohr - Coulomb 与 Hoek - Brown 强度准则在浅埋偏压隧道数值模拟中的不同处; 冯成奎等^[5]依托麻栗亚隧道建立施工风险评估体系, 为浅埋偏压隧道施工提供意见; Chehade 等^[6]模拟分析 3 种不同形式的隧道, 发现隧道施工受力的变化取决于施工方法和顺序的选择; 潘晓明^[7]用 FLAC^{3D} 分析有无行车荷载作用下对隧道施工的影响, 发现

收稿日期: 2019-03-05 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2019.09.013

基金项目: 吉林省科技厅科技项目“公路偏压隧道围岩稳定与施工方法研究”(编号: 2014-4-1-10-2)

作者简介: 代树林, 男, 汉族, 1968 年生, 吉林大学建设工程学院地下工程系主任, 教授, 博士, 主要从事隧道与地下工程设计、施工方面的研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, 594242274@qq.com。

通信作者: 万怡祯, 男, 汉族, 1993 年生, 硕士研究生在读, 主要从事隧道与地下工程设计、施工方面的研究, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, 970436346@qq.com。

引用格式: 代树林, 万怡祯, 张永春. 偏压隧道的稳定性研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(9): 99-103, 98.

DAI Shulin, WAN Yizhen, ZHANG Yongchun. Study on the stability of biased tunnel at topographical uneven pressure[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(9): 99-103, 98.

行车荷载对施工影响较小;S.L. Chen等^[8]采用数值分析的方法分析雪山隧道,发现洞室间距大于2倍洞径时围岩受邻近隧道开挖影响小;王佳欣等^[9]用ANSYS有限元软件分析偏压状态下非对称连拱隧道受力特征。刘远亮^[10]利用Maidas GTS分析基坑开挖对邻近隧道的影响,通过监测数据和模拟数据对比,指导工程施工。此外,有许多学者^[11-13]研究了偏压隧道围岩压力分布、衬砌结构内力变化及变形规律,提出了合理的荷载设计计算方法及隧道优化计算公式。

1 数值模拟

1.1 模型建立

隧道模型的建立依托鹤大高速公路中的朝阳隧道工程,对不同地表倾角进行数值模拟分析。朝阳隧道位于鹤大高速公路ZT16合同段,左线长3095 m,起讫桩号为LK319+510~LK322+605,右线长3070 m,起讫桩号为RK319+540~RK322+610;隧道断面净空最大宽度为12.76 m,隧道建筑界限宽度10.25 m,净高5.00 m。该工程位于辽东隆起地区的东部铁岭-靖宇隆起区南段,构造格架受燕山运动影响,北东、北北东向构造发育,控制了区域构造轮廓,穿越主要岩性为花岗片麻岩,洞口段围岩等级为V级,洞身段为III~V级^[14]。

利用AUTOCAD绘制隧道截面图,然后导入MAIDAS GTS NX进行有限元数值分析。岩体的初始应力为自重应力场。根据隧道衬砌断面,净宽为12.76 m,净高为5.00 m,依据圣维南原理,在弹性均匀和处于无限域的介质中开挖洞室,由于开挖扰动而应力重分布范围在3~5倍洞径,而在5倍范围外影响<1%,所以取隧道两侧及底部边界≥5倍洞半径,最终取得模型宽度为60 m,最大高度为80 m。结合隧址区工程地质概况,将围岩分为强风化角砾岩和强风化花岗片麻岩,其中强风化角砾岩层厚度为4 m。模型顶面为自由面,两侧为水平位移约束,底部为竖向位移和水平位移约束。强度准则选用莫尔-库伦弹性强度准则,初始应力场为围岩自重。

1.2 计算参数

在计算模型中假设岩石应力为大地重力场模型,在应力分析中不考虑地下水的影响,因初衬中存在管棚,因此需要对弹性模量进行折算,经查阅资料

得折算公式如下^[14]:

$$E = E_0 + S_g E_g / S_c \quad (1)$$

式中: E ——折算后初衬的弹性模量, GPa; E_0 ——初衬喷射混凝土的弹性模量, GPa; E_g ——型钢拱架的弹性模量, GPa; S_g ——型钢拱架的横截面积, m^2 ; S_c ——初衬喷射混凝土的横截面积, m^2 。

隧道在初衬前往围岩中植入注浆锚杆,长度3.5 m,环向间距1.0 m,纵向间距0.6 m。根据“钢管混凝土统一理论”^[15], D25中空注浆锚杆的容重计算公式为:

$$\gamma = \gamma_g - (R_2/R_1)^2 (\gamma_g + \gamma_s) \quad (2)$$

式中: γ ——折算后注浆锚杆的容重, kN/m^3 ; γ_g ——钢管的容重, kN/m^3 ; γ_s ——砂浆的容重, kN/m^3 ; R_1 ——钢管的直径, m; R_2 ——砂浆的直径, m。

通过现场勘查和后期室内试验及公式(1)、(2),确定各级围岩及支护材料参数如表1所示。

表1 围岩和衬砌物力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and tunnel lining

材料	容重/ ($kN \cdot m^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比	内摩擦 角/(°)	粘聚力/ kPa	本构 关系
角砾岩	18	0.2	0.40	35	0.01	弹塑性
强风化花岗岩	22	1.5	0.40	24	0.08	弹塑性
喷射混凝土	22	23.0	0.25			弹性
喷混硬化	22	25.0	0.20			弹性
D25中空注浆锚杆	78	210.0	0.30			弹性

1.3 计算工况

朝阳隧道采用台阶法施工,因此数值模拟分析采用相同的工法进行模拟。隧道在开挖过程中会破坏围岩原始地应力,开挖后的临空面周围会产生位移,当围岩应力释放完成后,形成新的应力场,隧道开挖过程中的围岩应力按系数为0.4、0.3、0.3释放^[16],以此符合实际施工过程中围岩应力释放规律。为了研究地表倾角与隧道受力的关系,依次设计地表倾角0°、5°、10°、15°、20°、25°、35°、40°、45°,网格示意图见图1。

2 数值模拟结果分析

在对比9种不同地表倾角模拟分析后,发现在地表倾角45°时隧道开挖发生边坡失稳,各角度位移云图如图2所示。

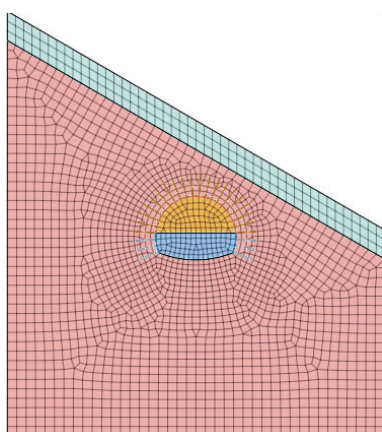
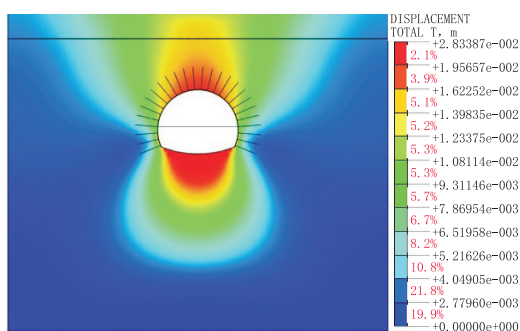
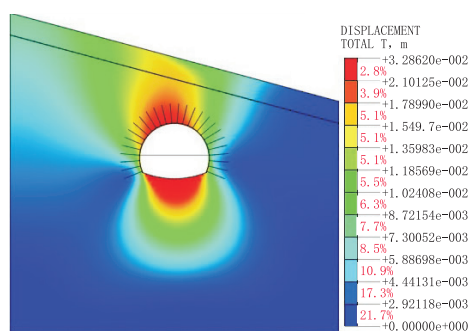


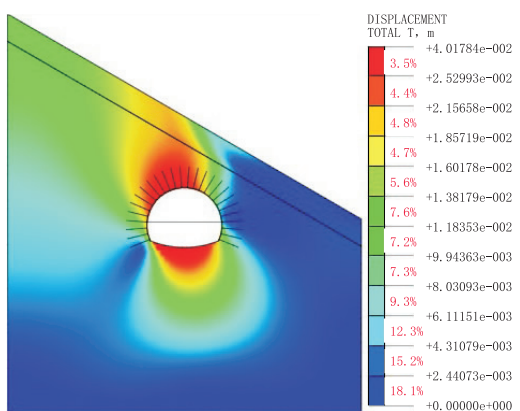
图 1 部分网格示意图
Fig.1 Partial grid diagram



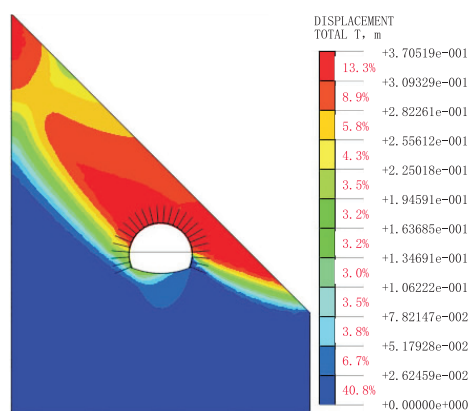
(a) 地表倾角0°



(b) 地表倾角15°



(c) 地表倾角30°



(d) 地表倾角45°

图 2 部分围岩总位移云图

Fig.2 Partial total displacement nephogram of surrounding rock

位移值增加 3 cm, 而从变化规律来看从地表倾角 $> 10^\circ$ 开始, 有明显的隧道偏压情况出现。仰拱整体增长规律和拱顶相似, 但是仰拱位移值变化不大, 位移增大明显在地表倾角 30° 后, 说明地表倾角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时对仰拱隆起变形影响较小, 在 30° 后偏压对仰拱隆起明显。因此, 地表倾角 $> 10^\circ$ 时应重视地形偏压造成的隧道偏压影响; 当地表倾角 $> 35^\circ$ 时, 要注意监测拱顶和仰拱变形情况。

从图 2 中可以看出, 总位移随倾角增大而增大, 深埋侧变形范围越来越大。在地表倾角 45° 时, 隧道开挖完成后位移无法合理有效的收敛, 由图中显示可以看出隧道两侧形成位移贯通面, 表示围岩整体发生了向右的移动, 说明隧道开挖过程的扰动致使地表边坡失稳, 所以当地表倾角 $> 45^\circ$ 时, 应当对地表边坡及围岩进行加固, 控制变形。

2.1 位移分析

2.1.1 隧道拱顶沉降和仰拱隆起分析

从图 3 中可以看出拱顶位移值随着地表倾角的增大而增大, 其中在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 增长缓慢, 在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 增长加速, 在 30° 后面出现大幅度增加, 从 $0^\circ \sim 40^\circ$,

2.1.2 隧道周边收敛分析

从图 4 中可以看出右侧拱肩随着地表倾角增大而增大, 增长幅度很小, 但是右侧拱腰不断减少, 在 35° 时出现拐点开始增加; 右侧拱肩和拱腰均随着地表倾角增大而增大, 且拱肩增长速率大于拱腰处, 最大值 0.0252 m; 可以得出在地表倾角增大过程中, 隧道在自重应力大的一侧衬砌受到的影响大于另一侧; 同时发现, 当倾角 $> 35^\circ$ 变形速率增大, 隧道左侧

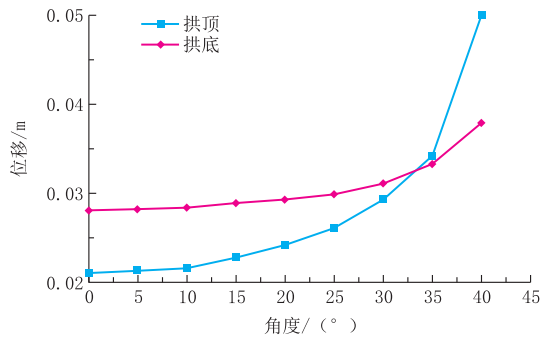


图3 不同地表倾角隧道拱底和仰拱位移量

Fig.3 The arch floor and invert roof displacement of the tunnel at different surface dip angles

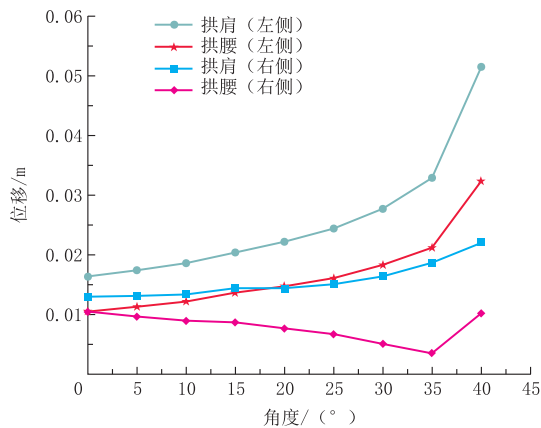


图4 不同地表倾角隧道周边收敛量

Fig.4 Tunnel peripheral convergence displacement at different surface dip angles

变形增大,和拱顶变形规律相同。因此,在偏压隧道施工时要注意自重应力大的一侧的支护。

2.2 内力分析

2.2.1 锚杆轴力分析

从图5中可以看出,随着地表倾角的增大,锚杆的最大轴力不断增大,在地表平坦时,最大轴力在拱腰处,轴力为173 kN左右;在地表倾角40°时,最大轴力是261.041 kN,并且可以看出受偏压影响,左侧锚杆的轴力增大趋势大于右侧,到40°时发现右侧锚杆轴力变化最大,最大轴力在右侧,因为此时地表倾角过大,造成右侧地表有边坡失稳趋势,使得锚杆轴力增大,维持边坡稳定,此时进一步证实当地表倾角过大隧道开挖容易造成地表产生滑坡现象。

2.2.2 塑性区分析

对比图6中隧道塑性区图,其中蓝色表示未进入屈服状态,而其他颜色表示剪应力屈服程度,红色表示处于屈服状态。从图中可以清楚看到隧道塑性区演化过程,随着地表倾角的增大,左侧塑性区不断扩大,而在30°到40°有一个明显的变化,右侧塑性区已经扩散到地表,说明40°时地表可能发生边坡失稳的情况。因此,隧道施工时需监测隧道左侧拱脚的变形情况,重视左侧支护;当地表倾角>30°时,隧道开挖时要关注地表沉降情况,预防边坡失稳,可进行注浆加固等措施加固地表。

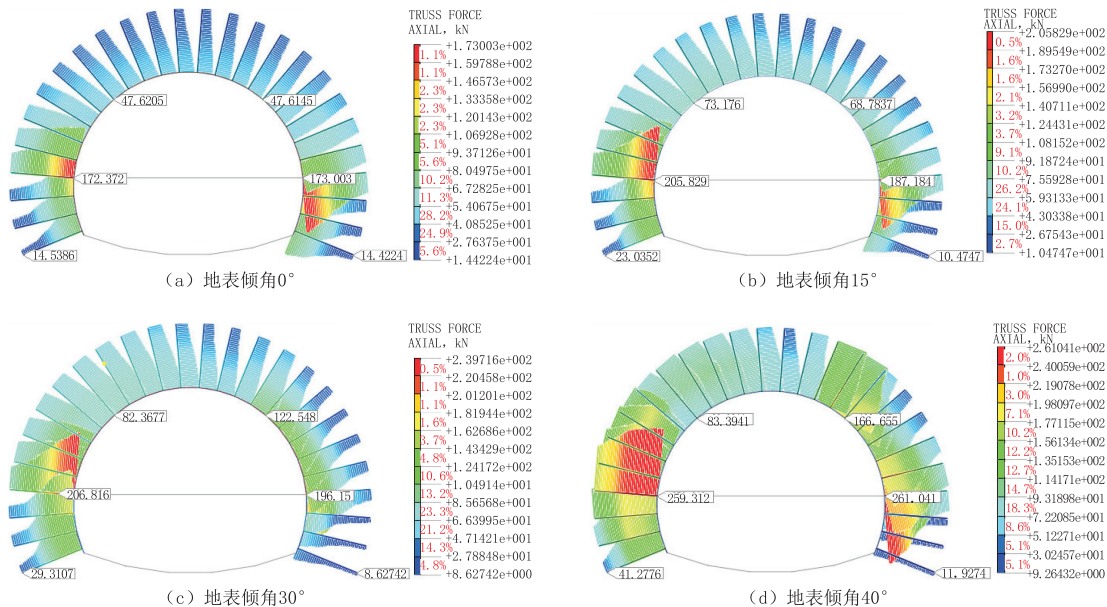


图5 不同地表倾角隧道锚杆轴力

Fig.5 Tunnel bolt axial forces at different surface dip angles

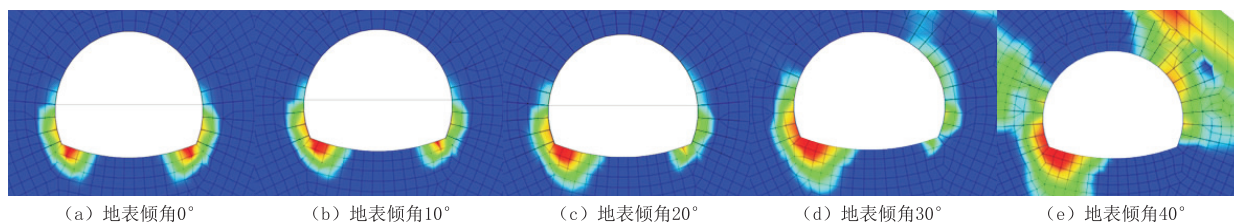


图 6 不同地表倾隧道塑性区分布

Fig.6 Tunnel plastic zone distribution at different surface dip angles

3 结论

依托朝阳隧道工程,模拟分析在不同地表倾角状况下,隧道周围变形过程及隧道锚杆和塑性区发展特征,总结了隧道变形和受力随地表倾角的关系,得出以下结论:

(1)隧道围岩变形随着地表倾角增大而增大,隧道左侧围岩整体变形大于右侧;在地表倾角 $<30^\circ$ 时,偏压情况造成拱顶仰拱变形增加速率缓慢;当地表倾角 $>30^\circ$ 后,隧道右侧拱腰变形减少,左侧变形出现明显增大;在 45° 时,因地表倾角过大,导致边坡失稳,地表变形整体下滑。因此,当地表倾角 $>30^\circ$ 时,隧道受地形偏压明显,深埋侧围岩变形大,所以开挖过程中要重视左侧围岩、拱底和仰拱变形情况。

(2)由于左侧为隧道的深埋侧,自重应力大的一侧,隧道锚杆轴力左侧大于右侧,锚杆最大值在拱腰处,且轴力的大小随着地表倾角增大而增大;在塑性区可以发现塑性区是以隧道拱脚开展,左侧拱脚塑性区范围随地表倾角增大而增大,右侧拱脚塑性区先减少后增加;在地表倾角 40° 时,地表出现塑性区,所以当地表倾角 $>30^\circ$ 时,隧道开挖时,除了要关注拱脚变形变化,还应关注地表沉降情况,预防边坡失稳,可进行注浆加固等措施加固地表。

(3)当遇到地形不同造成隧道偏压,可以采用数值模拟方式判定隧道偏压情况及地表变形范围,指导施工。

参考文献 (References):

- [1] 于清杨,刘伟,佘磊,等.偏压隧道偏压应力比特征分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(6):1797-1803.
YU Qingyang, LIU Wei, ER Lei, et al. Characteristic analysis on stress ratio of unsymmetrical load[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018,48(6):1797-1803.
- [2] 聂建春,郑文博,袁成海.不同偏压大断面浅埋隧道施工力学分析及优化[J].隧道建设,2012,32(3):315-322.

- NIE Jianchun, ZHENG Wenbo, YUAN Chenghai. Mechanical analysis on and optimization of construction of asymmetrical-loaded large cross-section tunnels under shallow cover [J]. Tunnel Construction, 2012,32(3):315-322.
- [3] 董建华,颜永斌,李建军,等.洞口段浅埋偏压隧道新型防护结构及其简化计算方法[J].中国公路学报,2018,31(10):339-349.
DONG Jianhua, XIE Yongbin, LI Jianjun, et al. New protective structure for shallow-buried bias tunnel at portal section and its simplified calculation method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018,31(10):339-349.
- [4] 李伟瀚,张彬,介玉新,等.Mohr-Coulomb与Hoek-Brown强度准则在浅埋偏压隧道数值模拟中的对比[J].公路交通科技,2018,35(8):112-122.
LI Weihuan, ZHANG Bin, JIE Yuxin, et al. Comparison of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown Criteria in numerical simulation of shallow unsymmetrical loading tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018,35(8):112-122.
- [5] 冯成奎,杜召华,曾威,等.浅埋偏压隧道施工风险评估指标体系的研究[J].公路工程,2018,43(2):45-48,100.
FENG Chengkui, DU Zhaohua, ZENG Wei, et al. Study on construction risk assessment index system of shallow buried bias tunnel [J]. Highway Engineering, 2018,43(2):45-48,100.
- [6] F. Hage Chehade, I. Shahrour. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels; influence of the relative position and construction procedure [J]. Tunneling & Underground and Space Technology, 2008,23(2):210-214.
- [7] 潘晓明.高速铁路浅埋大跨度隧道下穿公路施工安全性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(9):72-75.
PAN Xiaoming. Analysis on construction safety of shallow large-span tunnel passing through the road for high-speed railway [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(9):72-75.
- [8] S. L. Chen, S. C. Lee, M. W. Gui. Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels [J]. Tunneling & Underground and Space Technology, 2009,24(2):148-154.
- [9] 王佳欣,陈振邦,徐燕.偏压状态下非对称连拱隧道有限元分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):88-90.
WANG Jiaxin, CHEN Zhenbang, XU Yan. Finite element analysis on asymmetrical multi-arch tunnel under bias condition [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(12):88-90.

(下转第 98 页)

- CHEN Mingjun. Application of portable drilling rigs in green exploration[J]. *Low Carbon World*, 2018(9):45-46.
- [5] 侯俊卿, 马贵世, 阮向农, 等. MK3-15 Wagon Wheel 便携式钻机在中东地区的应用与改进[J]. *物探装备*, 2018(3):161-164.
HOU Junqing, MA Guishi, RUAN Xiangnong, et al. The application and improvement of MK3-15 Wagon Wheel portable rig in Middle Region[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2018(3):161-164.
- [6] 安峰. HC600 型全液压力头便携式钻机钻头优选与钻机高效利用[J]. *甘肃科技*, 2017(6):112-114.
AN Feng. HC600 full hydraulic drift portable drill rig and drill bit optimized and high efficiency use of drill[J]. *Gansu Science and Technology*, 2017(6):112-114.
- [7] 安峰. 冲洗液循环系统在 HC-600 型全液压力头便携式钻机上的试用[J]. *甘肃科技*, 2017(5):26-28, 100.
AN Feng. Trial of flush liquid circulation system on HC-600 full hydraulic drift portable drill rig[J]. *Gansu Science and Technology*, 2017(5):26-28, 100.
- [8] 刘广志, 等. 金刚石钻探手册[M]. 北京:地质出版社, 1991.
LIU Guangzhi, et al. *Diamond drilling handbook*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [9] 张祖培. 金刚石钻进技术[M]. 北京:地质出版社, 1985.
ZHANG Zupei. *Diamond drilling technology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- [10] 乌效鸣, 胡郁乐, 贺冰新, 等. 钻井液与岩土工程浆液[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2002.
WU Xiaoming, HU Yuele, HE Bingxin, et al. *Drilling mud and geotechnical engineering slurry*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [11] 刘志峰. 无固相冲洗液在变质岩系复杂地层绳索取心钻进中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(4):14-18.
LIU Zhifeng. Application of solid-free flush fluid for wire-line coring in complex metamorphic rock formation[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(4):14-18.
- [12] 蔡礼山, 苏长明, 刘金华. 易漏失地层承压能力分析[J]. *石油学报*, 2010, 31(2):311-317.
CAI Lishan, SU Changming, LIU Jinhua. Analysis on pressure-bearing capacity of easily leakage formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2):311-317.
- [13] 宋军, 陈礼仪, 张统得. 若尔盖轴矿田复杂地层泥浆技术研究与应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(12):1-5.
SONG Jun, CHEN Liyi, ZHANG Tongde. Research and application of mud technology in complex formation of Ruergai Uranium mining field[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(12):1-5.
- [14] 李锡. 背包式钻机的工程应用与存在的若干问题[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(5):56-58, 62.
LI Xi. Engineering application of knapsack type drilling machine and its problems[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(5):56-58, 62.
- [15] 刘广志. 岩心钻探事故预防与处理[J]. 北京:地质出版社, 1982.
LIU Guangzhi. *Prevention and treatment of core drilling accidents*[J]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.

(编辑 韩丽丽)

(上接第 103 页)

- [10] 刘远亮. 基坑开挖对邻近地铁隧道影响的 Midas GTS 三维数值模拟分析[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2013, 40(1):70-72.
LIU Yuanliang. Midas GTS 3D numerical simulation analysis on influence of foundation pit excavation to subway tunnel[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013, 40(1):70-72.
- [11] 董昌周, 曲晨. 地形偏压连拱隧道衬砌内力研究[J]. *浙江科技学院学报*, 2011, 23(3):216-219.
DONG Changzhou, QU Chen. Study on lining force of multi-arch tunnels in topographical uneven pressure[J]. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, 2011, 23(3):216-219.
- [12] 朱正国, 刘志春, 孙明磊, 等. 偏压连拱隧道围岩压力及结构计算[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(1):75-78.
ZHU Zhengguo, LIU Zhichun, SUN Minglei, et al. Calculation of surrounding rock pressure and structure of multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2010, 29(1):75-78.
- [13] 蔡来炳. 软弱围岩浅埋偏压连拱隧道力学效应研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
CAI Laibng. Research on the mechanical behavior of unsymmetrical loading twin-arched tunnels located on the shallow weak rock mass[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [14] 张永春. 朝阳隧道浅埋偏压段台阶法施工研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.
ZHANG Yongchun. Study on construction method of shallow buried biased tunnel on hegang-dalian expressway-take Chaoyang Tunnel as an example[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [15] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
ZHONG Shantong. *The concrete-filled steel tubular structures*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [16] 于永生, 王成. 公路隧道掘进中地应力释放系数研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(S1):390-392.
YU Yongsheng, WANG Cheng. Study on releasing coefficients of ground stress during highway tunneling[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2009, 28(S1):390-392.

(编辑 王建华)