

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.025

引大济湟工程 TBM 挤压大变形卡机 计算分析与综合防控

黄 兴¹, 刘泉声², 彭星新¹, 雷广峰¹, 魏 莱¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 武汉大学 土木建筑工程学院 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对青海省引大通河济湟水河(引大济湟)工程频繁遭遇挤压大变形和卡机灾害难题, 基于挤压大变形本构模型和全断面隧道掘进机(TBM)卡机事故预测分析理论, 提出了挤压大变形和卡机计算方法, 进行了引大济湟工程 TBM 掘进围岩挤压大变形与卡机计算, 结果表明: (1) TBM 穿越 F5 断层区段时, 当扩挖间隙为 10 cm 时, 开挖卸荷后护盾所受摩阻力将达到推进系统提供的最大推力, 易发生卡机事故; (2) 挤压变形、围岩-护盾接触面积和护盾所受摩阻力随停机时间不断增大, 停机 1 d 内增大的速率越来越大, 停机后 7 d 起, 围岩流变速率和护盾所受摩阻力增加速率均减缓, 直到停机后 13 d 时, 围岩-护盾相互作用达到平衡, 护盾所受摩阻力趋于稳定。同时为了防止和控制卡机事故, 对该工程后续施工提出了最佳扩挖间隙和许可停机时间等卡机综合防控的 3 个对策: 即扩挖间隙至少要增大到 15 cm, 此时停机初始时刻不发生卡机, 许可停机时间为 2 d; 扩挖间隙增大到 18 cm 时, 许可停机时间为 4 d; 扩挖间隙增大到 20 cm 时, 就选取的围岩条件下, 停机 7 d 内 TBM 基本不发生卡机, 7 d 后也很容易克服卡机。提出的卡机防控措施对引大济湟工程 TBM 安全高效掘进具有一定的指导意义, 并得到工程实际控制对策的验证。

关 键 词: 引大济湟; 隧道掘进机(TBM); 挤压大变形; 卡机; 防控

中图分类号: TV 52

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)10-2962-11

Analysis and comprehensive prevention-control for TBM jamming induced by squeezing deformation of surrounding rock around water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river

HUANG Xing¹, LIU Quan-sheng², PENG Xing-xin¹, LEI Guang-feng¹, WEI Lai¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071 China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Engineering Safety of Hubei Province, School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: This study aims to solve the problem of the frequent TBM jamming caused by the large squeezing deformation of surrounding rock around the water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river in Qinghai province. Based on the constitutive model of squeezing deformation and the shield jamming prediction theory, we developed a procedure to calculate squeezing deformation and shield jamming. The main conclusions are drawn as follows. When TBM advances through F5 fault section and the overcut gap is 10 cm, the friction on the shield reaches the maximum thrust supplied by the propulsion system, which may result in shield jamming. As the growth of the downtime, the squeezing deformation, the contact area between surrounding rock and shield, and the friction on the shield increase with the stoppage. The growth rate is getting greater on the first day. However, the creep rate of surrounding rock and its friction growth rate decrease from the seventh day. The interaction between surrounding rock and shield reaches a balance until the thirteenth day, and the friction on the shield becomes stable. The above results are consistent with observed data in the field. Furthermore, to prevent and control shield jamming, we provide the following advice for optimal overcut and permissible downtime for further tunnelling. The over gap should be larger than 15 cm, under which the shield will not

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41602326); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(No. 2014CB046904, No. 2015CB058102)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41602326) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB046904, 2015CB058102).

第一作者简介: 黄兴, 男, 1987 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事地下工程围岩稳定性分析与控制理论及支护技术、TBM(盾构)安全高效掘进理论与智能控制技术等方面的研究工作。E-mail: xhuang@whrsm.ac.cn

be jammed at the tunnelling unloading instant, and the permissive downtime is 2 days. When the overcut increases to 18 cm, the allowable stoppage is 4 days. While the over gap reaches 20 cm, shield jamming will not happen on the whole within 7 days under the surrounding rock condition, which also can be easily overcome. These control measures are substantially significant in the safety and efficiency of TBM tunnelling, which are also verified by the engineering practice.

Keywords: water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river; tunnel boring machine (TBM); squeezing deformation; shield jamming; prevention and control

1 引言

我国正在和即将建设大量深长隧道，如大瑞铁路高黎贡山隧道（长 34.5 km，埋深 1 155 m）、引汉济渭秦岭引水隧洞（长 98.3 km，埋深 2 000 m）和中远期规划的南水北调西线、雅鲁藏布江水电开发工程等。然而，在这些深埋长大隧道中，当全断面隧道掘进机（TBM）穿越软弱地层时，面临挤压大变形与卡盾的严峻挑战。其中，引大济湟工程双护盾 TBM 掘进中围岩挤压大变形卡机次数多、卡机严重、卡机脱困困难，损失重大。

TBM 在围岩发生大变形时极易发生卡机事故^[1]。一直有许多学者、工程师研究 TBM 在挤压性岩层中的适应性问题, 这个问题已经引起许多研究者的关注和研究, 最近的研究有 Graziani^[2]、Ramoni^[3-4]、Sterpi^[5]等。目前的研究主要限于定性的相互作用关系和机制的基本分析, 在国外也只有些初步的经验总结, 如文献[6-8]中提出了一个经验公式。

TBM 卡机机制的核心是围岩-TBM 相互作用机制, 数值模拟是研究围岩与护盾相互作用、预测判断围岩挤压大变形卡机、提出控制对策的重要手段。目前已有许多学者开展了 **TBM 开挖数值模拟研究**^[9-11]。然而, 在数值模拟中边界条件的选取, 尤其是围岩、护盾、支护结构间的界面模拟存在困难。而且数值模拟的本构关系和强度准则大都采用的是常规加载下的本构关系和准则, 或者采用的是简单的弹性、弹塑性本构模型, 而且计算条件比较简单, 并不能真正地反映 **TBM 开挖条件下围岩的变形破坏规律**, 所计算的卡机状态也不够准确。

因此, 本文针对引大济湟工程 TBM 掘进围岩挤压大变形和卡机事故进行计算分析, 并提出相应的防控技术。研究成果可为本工程后续的施工及类似的深埋软弱地层 TBM 工程的建设提供指导。

2 工程概况

2.1 工程简介及卡机情况

引大济湟工程是青海省引大通河水穿越大坂山补给水资源紧缺的湟水河的长距离调水工程,由

调水总干渠、石头峡水库、黑泉水库、湟水北干渠、西干渠等工程组成(见图1)^[12]。

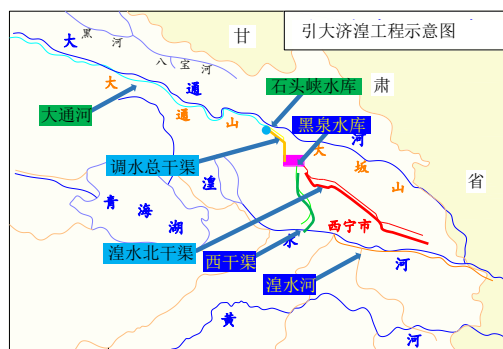


图 1 引大济湟工程示意图

Fig.1 Diagram of water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river in Qinghai province

其中, 引水隧洞是该调水总干渠工程中最关键的工程, 全长为 24.166 km, 进口高程为 2 955.6 m, 出口高程为 2 914.7 m, 隧洞轴线地面高程为 2 934~4 020 m, 最大埋深为 1 070 m, 平均埋深约为 840 m。隧洞进口段 3 025 m 采用钻爆法施工, 出口段先采用钻爆法施工 1 200 m, 然后采用 TBM 施工 19.94 km, 由于多方面因素, 实施时 TBM 施工段调整为 20.903 km 长^[13]。

鉴于该输水隧洞掘进路线长、工程地质条件复杂的情况,采用 Wirth TB593EPTS 型双护盾 TBM 施工(见图2)。主机长 12.5 m, TBM 开挖直径 5 930 mm。掘进机的支撑靴提供的总有效支撑荷载为 45 MN, 主推进系统总推力 25 MN, 辅助推进系统推力由 19 个辅助推进油缸支撑在管片上提供, 辅助推进系统总推力 34 MN, 则推进系统能提供的最大总推力为 59 MN^[14-15]。

TBM 洞段采用预制钢筋混凝土管片衬砌,每环 6 块,管片外径为 5.7 m,内径为 5 m,宽为 1.5 m,管片混凝土强度等级为 C40,抗渗等级为 WS。管片采用错缝拼装方式,管片与围岩之间的空隙用豆砾石回填灌浆。

由于穿越大阪山南缘断裂带时,面对大断层、大埋深复杂地质条件制约,频繁塌方和严重围岩大

变形造成 TBM 至今已经历 10 余次比较大的围岩大变形卡机事故, 工程陷入举步维艰的境地, 最终施工中断并卡机在桩号 CH17+000 附近处, 施工停滞 2 a 左右^[16]。由于围岩大变形、塌方和高地应力等不利因素的影响, TBM 严重受损, 需要人工扩挖才能重新启动 TBM 掘进, 为了重新启动并完成后续洞段的掘进工作, 还需要对 TBM 进行修复和改造, 造成了严重的工程延误和经济损失。



图 2 引大济湟工程及其双护盾 TBM

Fig.2 Water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river and its double shield TBM

2.2 地质条件

引大济湟工程 TBM 掘进穿越大坂山南缘断裂带时, 由于频繁的坍塌和围岩大变形导致 TBM 进尺很低和经常性的卡机, TBM 卡机段位于 CH17+000 桩号附近。该桩号所处工程地质分段起止于桩号 CH16+088~CH17+192 (见图 3), 该段处于大坂山南缘断裂带中, 母岩为加里东期侵入的石英闪长岩, 受构造影响的石英闪长岩总体较破碎, 局部为碎裂岩并有轻微蚀变, 围岩 IV、V 类占 41% 左右, III 类占 30% 左右, 主要为极软岩, 强度非常低, 自稳时间非常短, 局部存在塌方等破坏, 有涌水^[16]。该区段为本文的研究区域, 该区段受 F4、F5 大坂山南缘断层带影响明显。

拟研究的挤压大变形卡机洞段 (CH17+000 附近) 位于大坂山南缘断裂, 即 F5 断裂带。F5 断裂带又名大坂山南缘断裂, 为一深大断裂, 呈 NWW 向展布, 延伸长达 500 km。表现为逆冲断裂, 走向

为 $290^{\circ}\sim 305^{\circ}$; 断层带宽 50~60 m。在皮条掌以西宁张公路边出露, 该断裂以南为下元古界变质岩系, 以北为志留系的片岩、板岩及加里东期侵入岩。断层及其影响破碎带宽度达 70~100 m。断层带由碎裂岩、糜棱岩和断层泥等组成, 劈理发育、蚀变强烈, 呈轻度-重度高岭土化, 属极软岩, 在高地应力作用下围岩塑性变形较强烈。

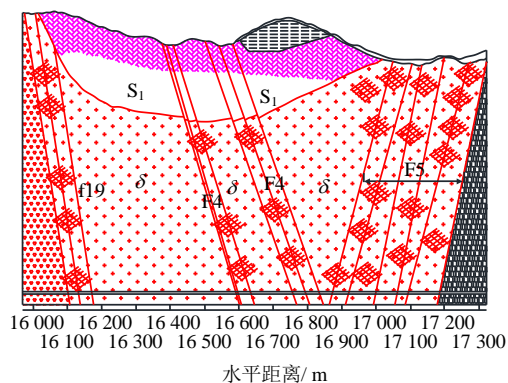


图 3 工程地质剖面图

Fig.3 Engineering geological profile

拟研究的挤压大变形卡机洞段 (F5 断裂带区域), 埋深为 690~830 m, 根据地应力场测试结果以及隧洞各工程段地应力建议值表, 水平主应力占主导地位。该洞段的地应力场: 垂直地应力为 18.2~21.9 MPa, 水平沿洞轴方向应力为 22.3~25.8 MPa, 垂直洞轴方向水平应力为 15.3~18.8 MPa。计算中初始地应力场取 $\sigma_{xx}=18.8$ MPa, $\sigma_{yy}=25.8$ MPa, $\sigma_{zz}=21.9$ MPa, 其中 y 方向为平行于隧洞轴线方向, z 方向为垂直方向。

3 TBM 卡机计算分析

3.1 计算参数

引大济湟隧洞在 F5 断裂带最大埋深为 830 m。围岩为挤压破裂岩, 母岩为石英闪长岩, 发生卡机事故十余次。用于挤压变形卡机计算的围岩物理力学参数参考文献^[13, 16-17], 见表 1~3。其中 m 、 n 、 A 为黏塑性本构模型材料常数^[17]。

表 1 F5 断裂带围岩块体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock in F5 fault zone

物理参数		变形参数			强度参数			黏塑性蠕变参数			
重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa	单轴抗压强度 σ_0 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	黏滞性参数 γ_0 /(GPa s) ⁻¹	m	n	A /MPa
26.50	3.826	0.308	1.463	3.321	12.7	2.73	22.8	2.036×10^{-15}	1.036	4.675	19.168

表 2 TBM 护盾物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters
of TBM shield

长度 /m	内径 /m	厚度 /m	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
12	2.815	0.05	212	0.2	0	19.3

表 3 地应力场
Table 3 In-situ stress field

σ_{xx}/MPa	σ_{yy}/MPa	σ_{zz}/MPa	σ_{xy}/MPa	σ_{yz}/MPa	σ_{zx}/MPa
18.8	25.8	21.9	0.0	0.0	0.0

3.2 计算方法

本文将岩体视为等效连续介质, 选用 Flac^{3D} 程序, 它可以模拟材料的弹性变形、塑性变形、塑性流动、应变软化、流变变形, 甚至大变形问题。各单元在位移和应力边界条件下遵循 TBM 掘进围岩挤压大变形本构方程^[17-18]。Flac^{3D} 能很好地模拟岩体、土体力学行为, 并提供了模拟锚杆、锚索、衬砌、支架等多种支护形式的结构单元, 能用于模拟复杂的岩土-结构相互作用力学问题, 其中衬砌结构单元(liner structural element)可用于模拟薄壳类支护结构, 因而可用于模拟 TBM 护盾。

为了通过数值计算方法模拟 TBM 开挖后围岩-护盾相互作用, 针对深部软弱围岩和 TBM 这一特殊的施工方法, 提出了如下的模拟方法。

3.2.1 扩挖间隙

实际工程中, 扩挖间隙是空的, 但在数值软件建模时仍然应将扩挖间隙建立成厚度为 δ_R 的单元, 只是为了模拟实际中扩挖间隙的力学行为, 将扩挖间隙的强度参数、变形模量设置很小, 即类似于泡沫。

3.2.2 护盾

由于 TBM 护盾厚度通常为 5~10 cm, 相比开挖直径和管片厚度来说非常薄, 因此, 建模时不能将护盾当作常规的实体单元来处理。

Flac^{3D} 提供了 liner 衬砌单元, 是一种结构单元, 能用于模拟喷浆等比较薄的支护措施。因此, 本文拟采用 liner 结构单元来模拟护盾, 紧贴于扩挖间隙的内表面上, 而护盾和围岩间是可以发生分离、滑动等相对运动, 因此, 将扩挖间隙和护盾间的黏聚力设置为 0, 允许围岩与护盾间发生相对运动, 据此, 用于模拟围岩-TBM 护盾的接触-挤压-摩擦相互作用。

Liner 结构单元初始时划分成许多单元, 这些单元的轴向、横向和弯曲荷载都能够用矩阵形式表示。两节点间的 Struct 单元如图 4 所示。Struct 单元具有

如下特点: ①支护体与洞周围岩可产生滑移; ②能适应非线性材料的大位移。

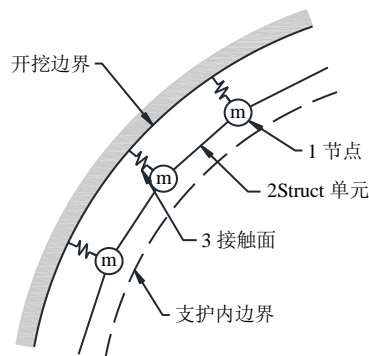


图 4 显式形式 Struct 单元
Fig.4 Explicit Struct element

3.2.3 管片

在进行 TBM 卡机计算模拟时, 考虑护盾末端的管片对围岩的支护作用是非常必要的, 因为护盾末端的管片对护盾具有转移荷载的作用, 若不考虑护盾末端管片的支护作用, 则相当于整个围岩是由仅靠近开挖面长度 6~15 m 的护盾来支护, 则计算出的围岩对护盾挤压力必定偏大, 故为了与实际围岩-护盾-支护间相互作用关系尽量吻合, 本文考虑护盾末端管片对护盾的荷载转移作用。

管片厚度通常为 250~350 mm, 因此, 采用实体单元模拟管片。同时为了反映 TBM 掘进过程是一环一环逐步往前推进的, 因此, 管片按照一环一环模拟设置。

3.2.4 卡机预测判别

本文将根据 TBM 卡机状态判别流程计算 TBM 开挖后围岩收敛变形沿隧道轴向的变化规律和相应的围岩压力, 进而计算护盾前移时所受到的摩擦阻力, 最后预测、判断护盾是否被卡。

3.3 计算模型

计算模型考虑了全长 50 m 的 F5 断裂带。而引大济湟工程的 TBM 护盾长约 12 m, 相对 F5 断裂带长度较小, 而且仅分析 TBM 在该断裂带内掘进时的挤压大变形卡机情况, 因此, 选取其中长度 30 m 的区段进行模拟, 将围岩视为等效连续介质, 计算模型如图 5 所示。

本构模型采用笔者文献^[17-18]的 TBM 掘进软岩挤压大变形本构模型。

3.4 计算结果

分别进行 TBM 开挖后不考虑护盾和支护作用、考虑护盾和护盾末端的管片支护作用、TBM 停机条件下的挤压大变形卡机计算分析。

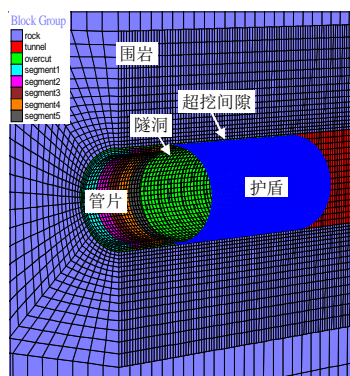


图5 F5断裂带内数值计算模型

Fig.5 Numerical model in F5 fault zone

3.4.1 TBM 开挖后不考虑护盾和支护作用

在数值模型中开挖 17 m, 只考虑 TBM 开挖对围岩扰动影响, 计算结果见图 6。

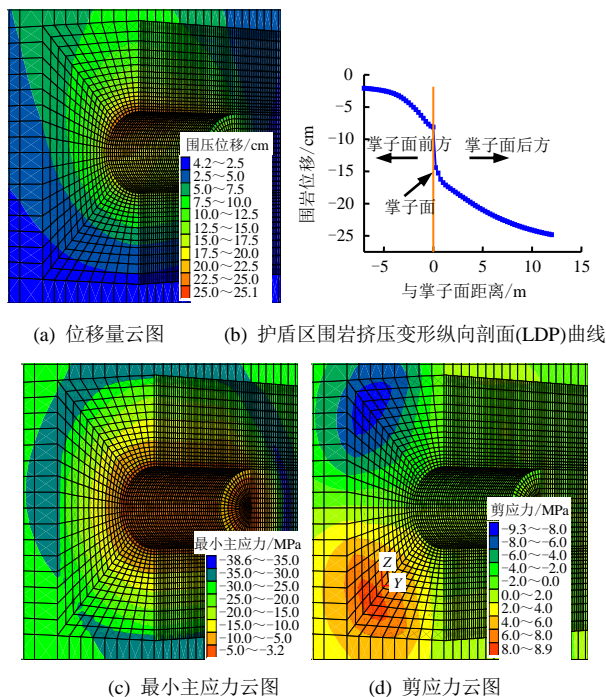


图6 TBM 开挖扰动计算结果

Fig.6 Numerical results of excavation disturbance induced by TBM tunnelling

上述计算得到护盾区域围岩若不考虑围岩与护盾接触挤压关系及不考虑围岩时效变形时围岩的力学响应, 计算得到围岩最大径向位移为 24.83 cm, 开挖面初始位移 $u_r(0)$ 为 8.13 cm, 因此, 护盾区域围岩在沿护盾长度方向将发生径向位移 16.73 cm (相对开挖面初始位移发生的相对位移), 超过 TBM 开挖时通过扩挖为围岩与护盾间预留的变形间隙 10 cm, 根据挤压大变形指标和挤压大变形等级划分^[19], 计算得该围岩变形条件属于非常严重的挤压大变形。因此, 围岩势必与护盾接触, 且当 TBM

停机时, 接触范围越来越大。因此, 接下来计算分析考虑护盾后的围岩与护盾接触-挤压-摩擦相互作用和卡机分析。

3.4.2 考虑围岩与护盾的接触挤压相互作用

TBM 开挖后, 当某一处围岩位移量超过扩挖预留变形间隙, 则围岩与护盾接触, 围岩对护盾产生挤压力。采用提出的 TBM 围岩挤压大变形卡机数值模拟方法和本工程计算参数, 计算结果如图 7 所示。

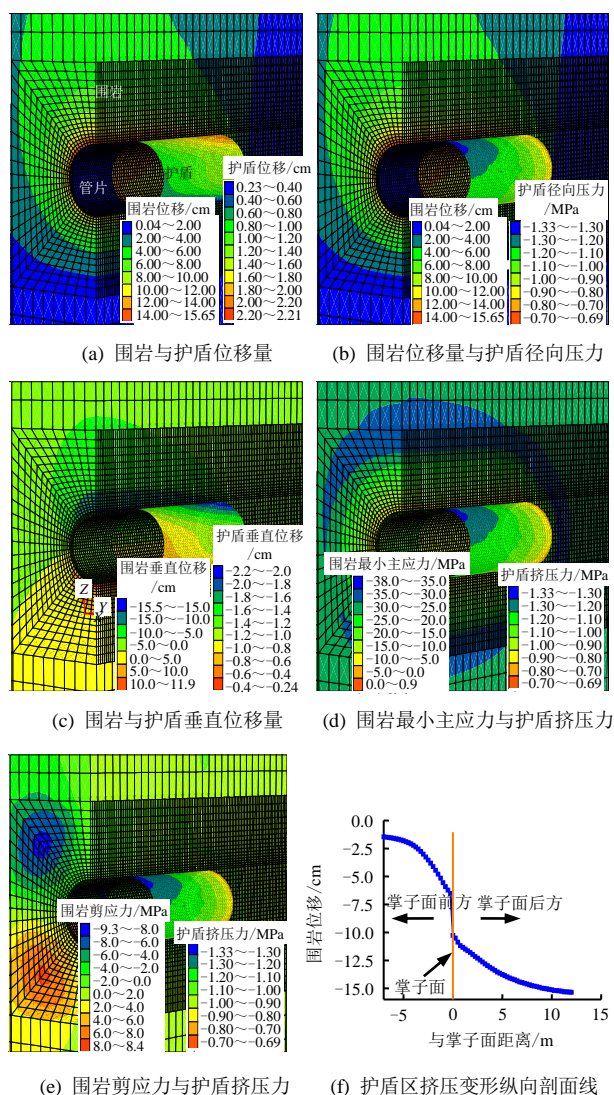


图7 考虑了围岩与护盾接触挤压作用计算结果

Fig.7 Numerical results considering the interaction between surrounding rock and TBM shield

上述计算得到了 TBM 连续掘进时 (不考虑围岩时效变形特性) 围岩与护盾相互作用的结果。由于受开挖面空间效应作用, 护盾位移从护盾前端到护盾末端依次增大, 护盾拱顶部位发生最大位移量为 2.2 cm, 护盾拱顶发生最大竖直位移为 2.163 cm, 在帮部发生水平最大位移为 9.14 mm。护盾所受挤

压力从护盾前端 (靠近开挖面) 到护盾末端由 0.692 MPa 依次增大到 1.330 MPa, 围岩对护盾最大挤压力发生在护盾末端 1.330 MPa, 按照本文数值计算中提出的围岩-护盾是否接触判别方法 (最大主应力 $\times 5\%$ 约等于 $20 \text{ MPa} \times 5\% = 1 \text{ MPa}$), 则围岩-护盾接触范围为从护盾所受挤压力大于 1 MPa 处至护盾

末端, 最长接触距离为 9.316 m。

考虑护盾和护盾末端安装管片后, TBM 护盾发生的位移和护盾所受挤压力计算结果见图 8, 进而通过编制的 Fish 程序计算得到护盾前移所受摩阻力 $R_{fs} = 61.097 \text{ MN}$ 。进而根据卡机状态判别 Fish 程序, 判断护盾是否被卡。

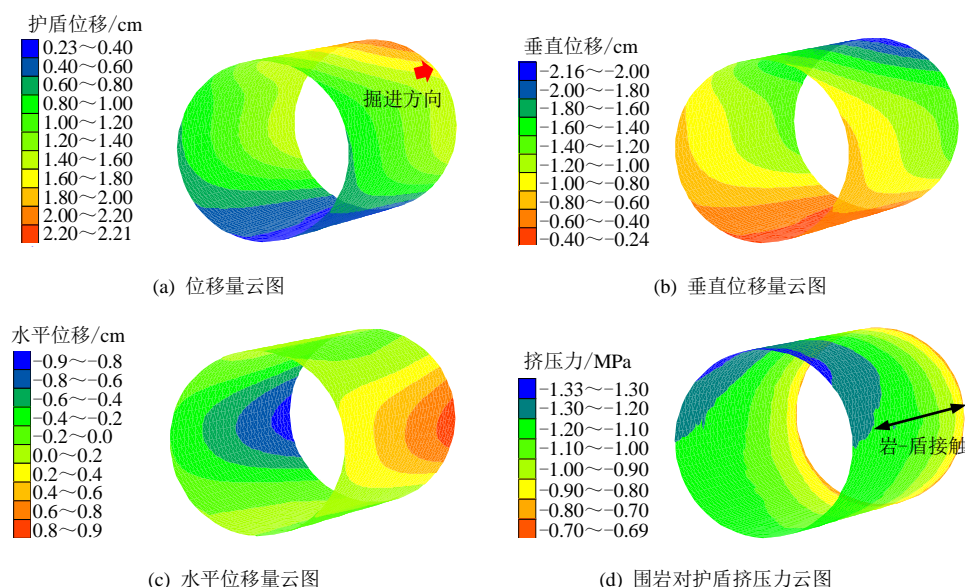


图 8 护盾位移及护盾所受挤压力计算结果

Fig.8 Numerical results of displacement and bearing squeezing pressure of TBM shield

计算得到护盾所受摩阻力 $R_{fs} = 61.097 \text{ MN}$, 超过推进系统所能提供的最大推力 $F_1 = 59 \text{ MN}$, 根据卡机状态判别准则 (见式 (1)), 可判断出 TBM 在开挖卸荷后便发生卡机。

$$\left. \begin{aligned} F_r + F_b &> F_1 \text{ 卡机} \\ F_r + F_b &\leq F_1 \text{ 不卡机} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: F_r 为克服护盾所受摩阻力所需要的推力; F_b 为 TBM 机器正常连续掘进开挖所需推力; F_1 为 TBM 推进系统所能提供的额定推力。

根据力的平衡条件, 则用于克服护盾所受摩阻力所需要的推力 F_r 等于护盾所受的摩阻力 R_{fs}

$$F_r = R_{fs} = 2\pi R f \int_0^L p_s(y) dy + fW \quad (2)$$

式中: R 为 TBM 护盾直径; $p_s(y)$ 为围岩对护盾的挤压力, 可从数值模拟结果护盾结构单元中获取; f 为围岩与护盾间的摩擦系数; W 为 TBM 自重。

3.4.3 停机时围岩-护盾相互作用计算结果

TBM 施工过程中, 不可避免需要进行检修、正常停机休班等活动, 尤其是引大济湟工程 TBM 掘进过程中经常出现卡机、塌方等工程事故, 甚至停机 1 a 左右, 于是本文进行了引大济湟工程双护盾

TBM 在扩挖间隙 10 cm 条件下停机 0~20 d 内的卡机计算, 计算结果见图 9。

从图可知, TBM 停机时, 由于挤压性软弱围岩的时效性, 围岩损伤破裂随时间不断演化发展, 造成护盾区域围岩收敛变形和围岩对护盾挤压力增大, 围岩与护盾接触范围增大, 从而导致围岩对护盾摩阻力不断增大。在停机的初期, TBM 护盾所受摩阻力为 61.097 MN, 就已经发生卡机了; 随着停机时间的增长, 挤压变形、接触面积和护盾所受摩阻力随时间不断增大, 尤其是在停机后 1 d 内增大的速率越来越大, 使得本已经被卡的护盾被卡塞越来越严重, 脱困越来越困难; 从停机后 7 d 起, 围岩流变速率和护盾所受摩阻力增加速率均减缓, 直到停机 13 d 时, 围岩-护盾相互作用达到平衡, 护盾所受摩阻力趋于稳定, 护盾所受摩阻力 R_f 达到最大值 94.619 MN。

停机 1 d 末和停机围岩-护盾相互作用稳定时的 13 d 末的计算结果如图 8、10~12 所示。

从各图可以看出, TBM 停机时护盾位移量不断增大, 其中护盾所受挤压力云图可以清晰显示围岩与护盾接触范围在增大、围岩对护盾挤压力不断增大, 从而导致护盾表面所受摩阻力随着停机时间不

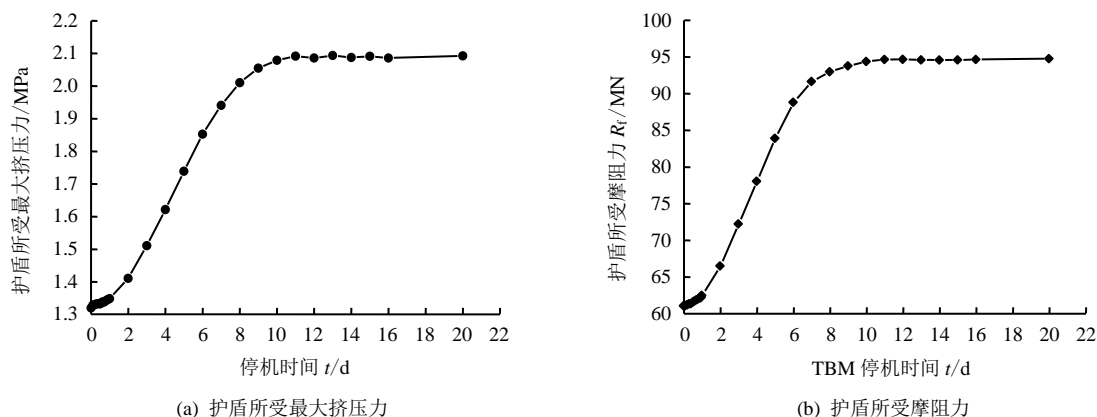


图9 停机时护盾所受最大挤压力与摩阻力演化规律 (当扩挖间隙 $\delta_R=10$ cm)

Fig.9 Evolution curves of the maximum squeezing pressure and friction during TBM stoppage ($\delta_R=10$ cm)

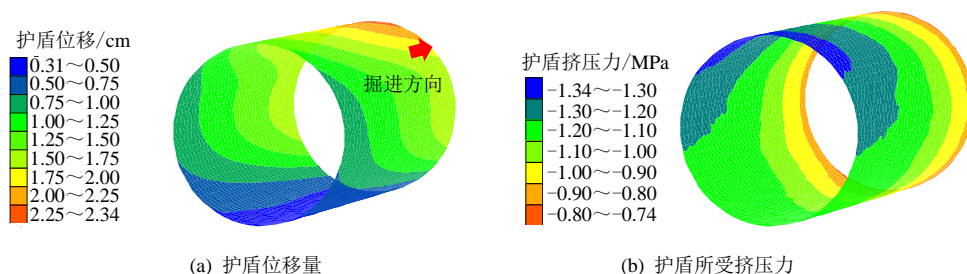


图10 TBM 停机 1 d 末计算结果

Fig.10 Numerical results after the first day of TBM stoppage

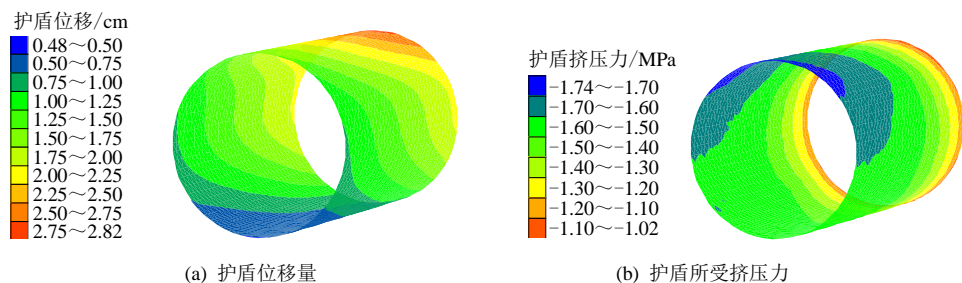


图11 TBM 停机 5 d 计算结果

Fig.11 Numerical results after the fifth day of TBM stoppage

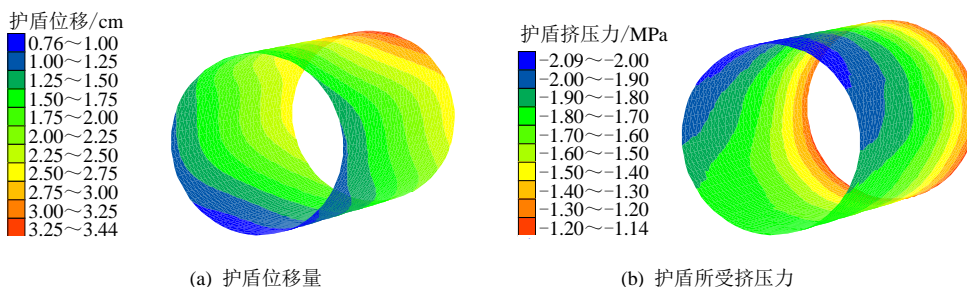


图12 TBM 停机 13 d (围岩-护盾相互作用稳定) 计算结果

Fig.12 Numerical results after the thirteenth day of TBM stoppage (stable interaction between surrounding rock and the shield)

断增大, 停机初始时刻围岩对护盾最大挤压力为 1.330 MPa、围岩与护盾接触范围为 9.316 m、护盾

所受摩阻力为 61.097 MN, 停机 1 d 末围岩对护盾最大挤压力为 1.349 MPa、围岩与护盾接触范围为

11.181 m、护盾所受摩阻力为 62.5 MN，停机 5 d 围岩对护盾最大挤压力为 1.739 MPa、停机 1 d 便将扩挖间隙完全闭合了（围岩与护盾完全接触，范围 10 m）护盾所受摩阻力为 83.917 MN，停机 13 d 围岩对护盾最大挤压力为 2.093 MPa、护盾所受摩阻力为 94.619 MN。

4 TBM 卡机事故防控

为了制定引大济湟工程 TBM 卡机事故的预防控制对策，本文开展了不同扩挖间隙条件下可以许

可的停机时间、停机后围岩对护盾挤压力和摩阻力达到稳定的时间计算，计算结果见表 4、图 13~16，从而提出最优组合的扩挖间隙和许可停机时间防控对策。

当扩挖间隙为 10 cm 时，停机 13 d 蠕变稳定，此时围岩与护盾相互作用才趋于平衡。

TBM 达到卡机时的临界扩挖间隙和停机时间下的计算结果：①扩挖间隙 15 cm，停机时间 2 d；②扩挖间隙 18 cm，停机时间 4 d；③扩挖间隙 20 cm，停机时间 7 d。

表 4 不同扩挖间隙 δ_R 条件下挤压大变形卡机计算结果

Table 4 Squeezing deformation and shield jamming results for different values of δ_R

δ_R /cm	初始 R_t /MN	卡机时间 t /d	卡机时 R_{fs} /MN	岩-盾作用稳定时间 /d	停机稳定时 R_{fs} /MN	备注
10	60.097	0	60.097	13	94.619	
12	53.957	0	53.957	13	84.165	停机后卡机变得越来越严重，13 d 时围岩-护盾相互作用趋于稳定
15	46.049	2	49.537	13	73.126	停机 2 d 未开始卡机
18	40.422	4	50.289	13	64.885	停机 4 d 未开始卡机
20	33.038	7	49.172	13	53.291	停机 7 d 未护盾摩阻力达到摩阻力阈值，待 13 d 稳定后，护盾摩阻力也与摩阻力阈值接近，容易克服，基本不发生卡机

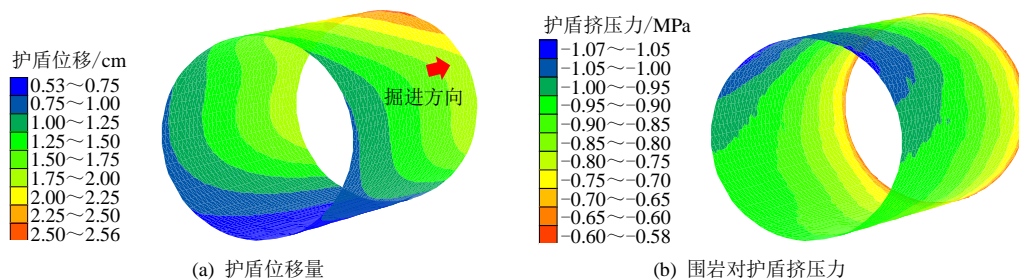


图 13 TBM 扩挖间隙 15 cm 停机 2 d 末计算结果 ($R_{fs}=49.537$ MN)

Fig.13 Numerical results for overcut gap 15 cm at the end of the second day of TBM stoppage ($R_{fs}=49.537$ MN)

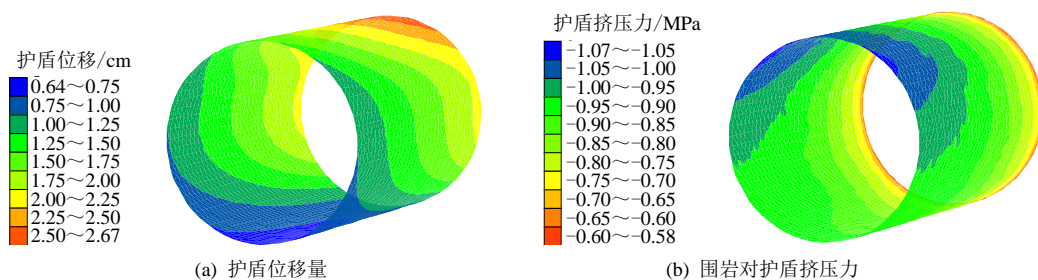


图 14 TBM 扩挖间隙 18 cm 停机 4 d 末计算结果($R_{fs}=50.289$ MN)

Fig.14 Numerical results for overcut gap 18 cm at the end of the fourth day of TBM stoppage ($R_{fs}=50.289$ MN)

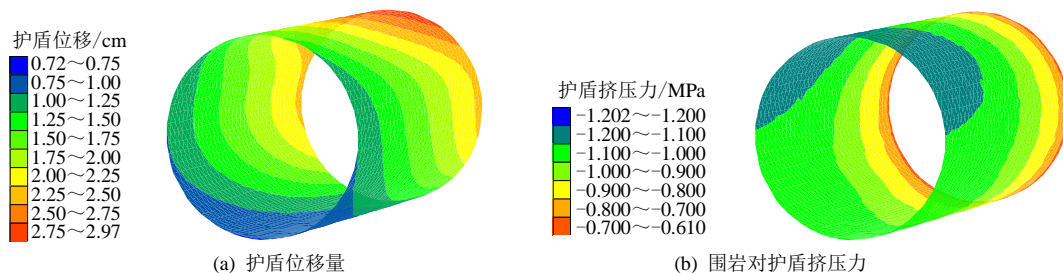


图 15 TBM 扩挖间隙 20 cm 停机 7 d 末计算结果 ($R_{fs}=49.172$ MN)

Fig.15 Numerical results for overcut gap 20 cm at the end of the seventh day of TBM stoppage ($R_{fs}=49.172$ MN)

根据 3.4 节引大济湟工程 TBM 卡机计算和现场调研得到,在目前的围岩条件和 TBM 运行参数(护盾长度、扩挖间隙和掘进速率)条件下,TBM 通过类似 F5 断裂带的挤压性软弱地层时护盾极易被卡。为了防止此类卡机事故,在现有条件下通常缩短 TBM 护盾是难于实现的,又根据卡机影响因素分析,比较可行的应对方案就是调整 TBM 扩挖量大小和控制停机时间,使得 TBM 能够在较经济合理的扩挖间隙和停机时间内安全掘进,不至于被卡。

本文提出适当增加 TBM 护盾与围岩间的扩挖间隙 δ_R ,而扩挖间隙的增大受目前的扩挖技术水平所限,并不能无限的增大,分别增大至 12、15、18、20 cm,拟通过计算得到最佳的扩挖间隙和许可停机时间 t^* ,计算结果如图 16 所示。其中, R_f^* 为临界的护盾摩阻力阈值。

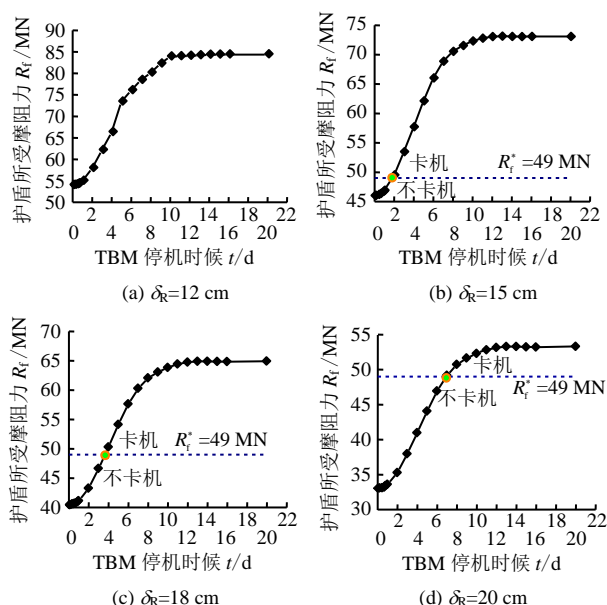


图 16 护盾所受摩阻力演化规律

Fig.16 Evolution rule of the friction on shield

由图可知,各种扩挖间隙条件下,TBM 停机 13 d 左右时,围岩与护盾相互作用趋于稳定,此后,围岩变形量和作用在护盾上的挤压力基本不变,因此,护盾所受摩阻力也基本不变了。扩挖间隙为 10、12 cm 时在停机后便发生卡机,随停机时间增长卡机变得越来越严重(见图 9、16(a))。当扩挖间隙为 15 cm 时,在停机的初始时刻并不卡机,等停机较短时间后(2 d)开始发生卡机,此后卡机越来越严重(见图 16(b))。扩挖间隙为 18 cm 时,在停机的初始时刻也不发生卡机,待停机 4 d 后开始发生卡机(见图 16(c))。当扩挖间隙增大到 20 cm 时(见图 16(d)),在停机的 7 d TBM 护盾所受摩阻力才达

到摩阻力阈值 $R_f^*=49$ MN,而且 13 d 时围岩-护盾相互作用趋于稳定,此时护盾所受摩阻力为 53.291 MN,仅比许可的摩阻力 R_f^* 大 4.291 MN。TBM 可通过高压拉缸或者将推进系统所有的推力用于克服护盾所受摩阻力,因而很容易克服护盾所受的这点摩阻力,因此,在扩挖间隙增大到 20 cm 的情况下基本不发生卡机,顶多是围岩与护盾接触而已,但此时系统提供的最大推力可以克服护盾所受的摩阻力,如果此时刀盘的扭矩也足够,则 TBM 停机后能够重启机器,一般不会发生卡机事故。

根据上述分析,为了防止 TBM 发生挤压大变形卡机事故,则扩挖间隙至少要增大到 15 cm,当扩挖间隙增大到 15 cm 时,则许可的停机时间为 2 d;当扩挖间隙增大到 18 cm 时,则许可的停机时间为 4 d;当扩挖间隙增大到 20 cm,就本文所选取的围岩条件下,停机 7 d 内 TBM 基本不发生卡机,7 d 后即便护盾所受摩阻力达到摩阻力阈值 R_f^* 也易克服,重启机器继续掘进。但扩挖间隙越大,管片壁后所需要填充的豆砾石和灌浆回填量越大,成本越高,而且还受扩挖技术和 TBM 机器制造技术水平的限制,因此,最合理的选择是根据实际中检修、休班、支护和常见工程问题处理等时间综合确定所需停机时间,从而选择合适的扩挖间隙,如综合考虑检修、休班、支护和常见工程问题处理的时间,通常情况下停机的最长时间为 2 d,则最合理的扩挖间隙为 15 cm。另一方面,根据机器和工程设计,扩挖间隙已经确定了的情况下,只能通过确定许可的停机时间,使得 TBM 施工中不允许停机时间超过许可的停机时间,如当扩挖间隙已经确定了为 15 cm,则检修、休班、支护等造成的 TBM 停机时间不允许超过 2 d,否则极易卡机。

上述挤压大变形卡机计算分析和卡机事故防控方法得到了工程现场一定程度上的验证,但由于测试空间的限制,目前国内外对于护盾式 TBM 的现场监测测试尚存在一定困难。

5 结 论

(1) 引大济湟 TBM 穿越 F5 断层区段时由于埋深大、地应力高、围岩软弱,当扩挖间隙为 10 cm 时,开挖卸荷后护盾所受摩阻力达 61.097 MN,超过推进系统提供的最大推力,因此,TBM 发生卡机事故与工程实际中卡机频繁发生相吻合。

(2) 随着停机时间的增长,挤压变形、接触面积和护盾所受摩阻力随时间不断增大,尤其是在停机后 1 d 内增大的速率越来越大,使得本已经被卡

的护盾卡塞越来越严重, 脱困越来越困难; 从停机 7 d 起, 围岩流变速率和护盾所受摩阻力增加速率均减缓, 直到停机 13 d 时, 围岩-护盾相互作用达到平衡, 护盾所受摩阻力趋于稳定, 护盾所受摩阻力 R_f 达到最大值 94.619 MN。

(3) 为了应对卡机事故, 进行了扩挖间隙分别增大到 12、15、18、20 cm, 停机时间 0~20 d 的卡机计算, 提出了最佳扩挖间隙和许可停机时间等卡机综合防控建议: ①扩挖间隙增大到 12 cm 时, 停机后依然发生卡机, 随停机时间增长卡机变得越来越严重; ②当扩挖间隙增大到 15 cm 时, 停机初始时刻不发生卡机, 许可停机时间为 2 d; ③扩挖间隙增大到 18 cm 时, 许可停机时间为 4 d; ④扩挖间隙增大到 20 cm 时, 就本文所选取围岩条件下, 停机 7 d 内 TBM 基本不发生卡机, 7 d 后即便护盾所受摩阻力达到摩阻力阈值也较容易克服, 重启机器继续掘进。

(4) 但扩挖量越大, 管片壁后所需要填充的豆砾石和灌浆回填量越大, 成本越高, 而且还受扩挖技术和 TBM 机器制造技术水平的限制, 因此, 最合理的选择是根据实际中检修、休班、支护和常见工程问题处理等时间综合确定所需停机时间, 从而选择合适的扩挖间隙。另一方面, 扩挖间隙已经确定的情况下, 只能通过确定许可的停机时间, 使得 TBM 施工中停机时间不允许超过许可的停机时间, 从而保障 TBM 安全掘进。

参 考 文 献

- [1] BARLA G, BARLA M, BONINI M, DEBERNARDI D. Guidelines for TBM tunnelling in squeezing conditions: A case study [J]. *Géotechnique Letters*, 2014, 4: 83—87.
- [2] GRAZIANI A, CAPATA A, ROMUALDI P. Analysis of rock-TBM-lining interaction in squeezing rock[J]. *Felsbau Magazin*, 2007, 25(6): 23—31.
- [3] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. The effect of advance rate on shield loading in squeezing ground[C]// *Underground Space-The 4th Dimension of Metropolises*, ITA World Tunnel Congress 2007. London: Taylor & Francis Group, 2007: 673—677.
- [4] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. Numerical analysis of the development of squeezing pressure during TBM standstills[C]// *The Second Half Century of Rock Mechanics*, 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics (ISRM). London: Taylor & Francis Group, 2007: 963—966.
- [5] STERPI D, GIODA G. Ground pressure and convergence for TBM driven tunnels in visco-plastic rocks[C]// *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling*. Vienna: Vienna University of Technology, 2007: 89.
- [6] 尚彦军, 史永跃, 曾庆利, 等. 昆明上公山隧道复杂地质条件下 TBM 卡机及护盾变形问题分析和对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(21): 3858—3863.
- [7] SHANG Yan-jun, SHI Yong-yue, ZENG Qing-li, et al. TBM jamming and deformation in complicated geological conditions and engineering measures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(21): 3858—3863.
- [8] GOEL R K, JETHWAL L, PATHANKAR. A GIndian experience with Q and RMR system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1995, 1: 97—109.
- [9] JAEK BURKE. Upcoming and ongoing tunneling projects across North America[J]. *TBM Tunnel Business Magazine*, 2001: 34—37.
- [10] ZHAO KAI, JANUTOLO M, BARLA G. A completely 3D model for simulation of mechanized tunnel excavation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(4): 475—497.
- [11] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. On the feasibility of TBM drives in squeezing ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(3—4): 262.
- [12] LOMBARDI G, NEUENSCHWANDER M, PANCIERA A. Gibraltar tunnel project update: The geomechanical challenges[J]. *Geomechanics and Tunnelling*, 2009, 2(5): 578—590.
- [13] 翁建良, 苏利军, 柯于义, 等. 青海省引大济湟调水总干渠工程初步设计报告[R]. 武汉: 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2004.
- [14] WENG Jian-liang, SU Li-jun, KE Yu-yi, et al. Preliminary design of water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river in Qinghai province[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, 2004.
- [15] 苏利军. 深埋软岩随洞双护盾 TBM 施工围岩稳定控制理论与技术[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [16] SU Li-jun. Surrounding rock stability control theory and technique of deep buried weak rock tunnel constructed with double shield TBM[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [17] 屈天祥, 倪锦初, 孙金山, 等. 深埋隧洞节理密集带 TBM 掘进围岩破坏范围研究[J]. *人民长江*, 2008, 39(3): 16—18, 44.

- QU Tian-xiang, NI Jin-chu, SUN Jin-shan, et al. Research for damage scope by TBM tunnelling in joint dense region in deep embedded tunnel[J]. **Yangtze River**, 2008, 39(3): 16—18, 44.
- [15] 崔原. 青海引大济湟调水总干渠工程引水隧洞 TBM[J]. 建筑机械, 2006, (2): 44—47.
- CUI Yuan. TBM of Water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river in Qinghai province[J]. **Construction Machinery**, 2006, (2): 44—47.
- [16] 张超. 青海“引大济湟”工程 TBM 卡机段围岩大变形特性及扩网洞室支护方案研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- ZHANG Chao. Research on surrounding rock large deformation characteristics and chamber enlargement support in TBM block tunnel section in “Yindajihuang” Project in Qinghai province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [17] 黄兴. 深部软弱地层 TBM 掘进围岩挤压大变形与卡机致灾机理[D]. 武汉: 中国科学院大学(武汉岩土力学研究所), 2014.
- HUANG Xing. Mechanism of large squeezing deformation and shield jamming in deep soft ground tunnelling by TBM[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [18] 黄兴, 潘玉丛, 刘建平, 等. TBM 掘进围岩挤压大变形机理与本构模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1245—1256.
- HUANG Xing, PAN Yu-cong, LIU Jian-ping, et al. Mechanism and constitutive model of large squeezing deformation in TBM tunnelling[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(6): 1245—1256.
- [19] 黄兴, 刘泉声, 刘滨, 等. TBM 围岩挤压大变形特性分析与等级划分[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 260—266.
- HUANG Xing, LIU Quan-sheng, LIU Bin, et al. Study on the properties of TBM surrounding rock large squeezing deformation and its grading[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2015, 32(2): 260—266.
-
- 上接第 2961 页
- [12] MA Q Y. Experimental analysis of dynamic mechanical properties for artificially frozen clay by the split Hopkinson pressure bar[J]. **Journal of Applied Mechanics and Technical Physics**, 2010, 5(3): 448—452.
- [13] 马芹永. 冻土在冲击荷载作用下动态力学行为的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2005.
- MA Qin-yong. Study on the dynamic mechanical properties of frozen soil under impact loading[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2005.
- [14] 马芹永. 人工冻土动态力学特性研究现状及意义[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 10—14.
- MA Qin-yong. Research status of dynamic properties of artificial frozen soil and its significance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.1): 10—14.
- [15] 马芹永, 袁璞, 陈文峰, 等. 人工冻土单轴与围压状态动力学性能对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 26—29.
- MA Qin-yong, YUAN Pu, CHEN Wen-feng, et al. Comparative analysis on dynamic mechanical properties of artificial frozen soil under uniaxial load and confining pressure[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2014, 10(1): 26—29.
- [16] 马芹永, 张经双, 陈文峰, 等. 人工冻土围压 SHPB 试验与冲击压缩特性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 637—640.
- MA Qin-yong, ZHANG Jing-shuang, CHEN Wen-feng, et al. Analysis of SHPB test and impact compression in confining pressure for artificial frozen soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 637—640.
- [17] 袁璞, 马芹永. 干湿循环条件下煤矿砂岩分离式霍普金森压杆试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2557—2562.
- YUAN Pu, MA Qin-yong. Split Hopkinson pressure bar tests on sandstone in coalmine under cyclic wetting and drying[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2557—2562.
- [18] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368—373.
- SONG Li, HU Shi-sheng. Two wave and three wave method in SHPB data processing[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2005, 25(4): 368—373.
- [19] 袁璞, 马芹永, 张海东. 轻质泡沫混凝土 SHPB 试验与分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 116—119.
- YUAN Pu, MA Qin-yong, ZHANG Hai-dong. SHPB tests for light weight foam concrete[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2014, 33(17): 116—119.
- [20] 平琦, 马芹永, 袁璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 401—407.
- PING Qi, MA Qin-yong, YUAN Pu. Energy dissipation analysis of stone specimens in SHPB tensile test[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2013, 30(3): 401—407.