

盾构隧道穿越泉域强富水灰岩地质掘进控制技术^{*}

朱连臣

(中铁二十五局集团第五工程有限公司, 266100, 青岛//高级工程师)

摘要 以济南轨道交通 1 号线盾构隧道穿越泉域强富水灰岩地质为工程背景, 分析盾构掘进效率的影响因素, 提出强富水灰岩地质刀盘、刀具选型与掘进参数控制技术。研究表明: 影响盾构掘进的主要因素为灰岩强度高达 122 MPa、裂隙水量大、盾构开挖面涌水突泥、螺旋机喷涌以及出渣与外运困难; 根据刀具磨损规律, 将滚刀优化为一体式滚刀, 刃宽减小为 19 mm, 刀具中心采用楔形镶齿滚刀且刀盘增加耐磨格栅, 以提升掘进效率; 制定盾构穿越富水灰岩地质关键掘进参数控制范围, 同步注浆量应控制在 $5.0 \sim 5.8 \text{ m}^3/\text{环}$, 在岩溶水丰富区域应控制注浆材料的胶凝时间。

关键词 济南轨道交通; 盾构隧道; 掘进控制

中图分类号 U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.032

Excavation Control Technology of Shield Tunneling Through the Geology of Water-rich Limestone in Spring Area

ZHU Lianchen

Abstract In the engineering context of Ji'nan Rail Transit Line 1 shield tunnel crossing spring area water-rich limestone geology, the influencing factors of shield tunneling efficiency are analyzed, and the control technology of cutter tool selection and driving parameter for water-rich limestone stratum is proposed. Research results show that: the main factors affecting shield tunneling are that limestone strength reaching 122 MPa, large fissure water volume, gushing water and mud on shield excavation face, the screw spout, slag and outward transfer difficulty. According to the rules of tool wear, the hob is optimized to be a one-piece hob, the width of blade is reduced to 19 mm. Cutter tool center adopts wedge insert tooth hob and the abrasion resistance grille is added to cutter plate, which improves the excavation efficiency. The control range of key excavation parameters for shield tunneling through water-rich limestone geology is formulated. The synchronous grouting amount should be controlled at $5.0 \sim 5.8 \text{ m}^3/\text{ring}$, and the cementing time of grouting materials should be controlled in

karst water-rich areas.

Key words Ji'nan rail transit; shield tunnel; excavation control

Author's address China Railway 25th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., 266100, Qingdao, China

济南以“泉”闻名于世, 趵突泉、五龙潭、珍珠泉、黑虎泉四大泉群交相辉映, 七十二名泉星罗棋布。泉城济南在泉水的润养下蓬勃发展。与此同时, 泉域强富水地质环境也给地下工程建设带来了极大的挑战。济南轨道交通 1 号线作为泉城首条采用盾构法施工的地铁线路, 承担着先行先试泉域盾构隧道技术的使命。

目前, 对于深圳地铁复合地层、兰州地铁砂卵石地层、成都地铁富水卵石地层及南宁地铁软硬不均地层等典型地质下的盾构施工控制技术已进行了诸多研究^[1-2], 但针对泉域强富水岩溶灰岩地质的盾构刀盘、刀具选型, 以及掘进参数控制等方面的研究鲜有见之, 亟需建立该类特殊地质条件下的盾构施工控制技术。

本文以济南轨道交通 1 号线盾构隧道穿越强富水灰岩地质为工程背景, 分析了灰岩溶洞物探成像和盾构掘进效率的影响因素, 提出了强富水灰岩地质刀具选型与掘进参数控制技术, 为后续强富水地质环境的盾构掘进施工及灾变防控提供了工程经验与技术指导。

1 工程概况

1.1 强富水灰岩地质勘察分析

济南轨道交通 1 号线王府庄站—大杨站区间在里程 K30+460.3—K31+392.2 段穿越两处富水石灰岩基岩上浮段, 该段基岩经地质构造运动形成褶皱上抬或出露进入盾构穿越范围, 左线穿越灰岩长度约为 725 m, 右线穿越灰岩长度约为 798 m, 共计约

^{*} 山东省自然科学基金项目 (ZR2021QE187)

1.5 km,基岩为寒武系和奥陶系中风化石灰岩,单轴饱和抗压强度普遍分布在 80 MPa 以上,最高强度可达 122 MPa。该段地层变化较大,有黏性土地层、上软下硬复合地层和硬岩地层,地质剖面如图 1 所示。该灰岩段受南部山区径流补给及长期溶蚀影响存在现状溶洞和破碎带,岩溶裂隙发育、富水量大、地下水脉络通达,灰岩裂隙水为承压水,最大水头高程在拱顶以上 8 m。

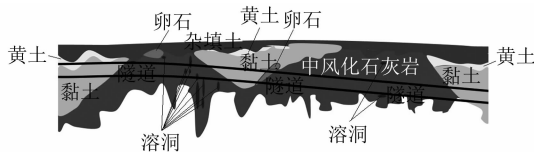


图1 盾构穿越富水灰岩地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of shield tunneling through water-rich limestone stratum

王大区间里程 K30+510.0—K30+850.0 段,地质钻探揭露溶洞数量较多、尺寸较大;同时,揭露有串珠状溶洞且灰岩溶蚀现象较严重,局部灰岩蜂窝状、针孔状溶洞溶隙发育,在长期地下水作用下,溶洞规模可能进一步扩大,岩溶稳定性较差。根据钻探成果,钻孔揭露的溶洞总数为 129 个。其中:小于 1 m 的溶洞数量为 79 个,占溶洞总数的 61.2%;大于 1 m 的溶洞数量为 50 个,占溶洞总数的 38.8%;大于 2 m 的溶洞数量为 29 个,占溶洞总数的 22.5%;大于 3 m 的溶洞数量为 23 个,占溶洞总数的 17.8%。钻探揭露无充填型溶洞的钻孔个数为 11 个,无充填型溶洞个数为 12 个。

王大区间灰岩段揭露地下水主要为灰岩裂隙水,水位埋深为 11.2~14.6 m。含水层主要为强风化灰岩⑮₁层、中风化灰岩⑮₂层及灰岩破碎体。该层地下水局部受完整灰岩及上覆粉质黏土层隔挡,具有承压性。根据现场抽水试验分析,补给水为岩溶裂隙水,抽水采用 100 m³/h 泵连续抽水 4 h,水位降低 0.4 m 后,稳定水位不变,地下水补给量大。

1.2 灰岩溶洞地质物探分析

为探明该段地质主要溶洞和导水通道的空间分布,采用高密电阻率法、瞬变电磁、地质雷达法和声纳扫描进行综合探测,在重点和复杂异常地段进行跨孔电阻率 CT(电子计算机断层扫描)法补充探测和成像,以获得主要溶洞和导水通道较为详细的空间分布。其中,瞬变电磁法工作原理为,利用不接地回线及接地长导线发射一次瞬变电磁场在地下形成感应涡流场,然后采用不接地线圈或接地电

极观测该电磁场的空间和时间分布。

瞬变电磁成像图如图 2 所示。由图 2 a)可知,该剖面有 2 处低阻异常(虚线椭圆圈区域),根据初勘时的钻孔剖面图分析,这 2 处低阻异常都处于灰岩段且在水位以下,低阻异常深度为 13~40 m,宽度为 40~165 m,推断为由基岩裂隙发育引起。由图 2 b)可知,该剖面有 2 处低阻异常,根据初勘时的钻孔剖面图分析,这 2 处低阻异常都处于灰岩段且在水位以下,低阻异常深度为 16~40 m,宽度为 17~140 m,推断为由基岩裂隙发育引起。由图 2 c)可知,该剖面有 1 处低阻异常,根据初勘时的钻孔剖面图分析,此处低阻异常均处于灰岩段且在水位以下,低阻异常深度为 19~40 m,宽度为 180 m 左右,推断为由基岩裂隙发育引起。

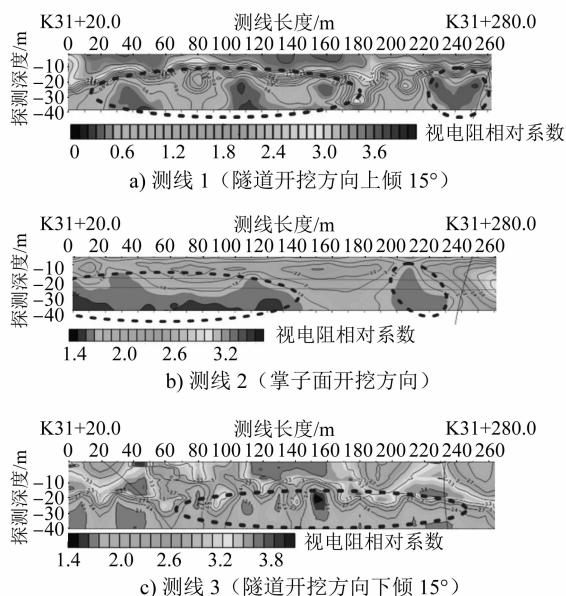


图2 瞬变电磁成像图

Fig. 2 Transient electromagnetic imaging

由现场 3 条具有代表性的瞬变电磁测线物探成像(见图 2)推断分析可知:

1) 区间岩溶非常发育,发育深度大多数在 15 m 以下,与隧道埋深范围重合较大,主要岩溶与破碎带(见图 2 中的虚线椭圆圈区域)对隧道施工影响较大,存在溶洞等重大地质风险源,拟建隧道与溶洞等风险源相互存在一定水力联系。

2) 探测范围内存在一条导水岩溶破碎带,主要位于隧道区间中间部位,基本呈东西向发育,对区间施工影响较大。

3) 对于探测圈定的低阻异常区域,施工过程中应给予重视,必要情况下应采取控制措施,以避免

溶洞等地质灾害事故的发生。

2 强富水灰岩盾构掘进效率影响分析

1) 灰岩强度高,单轴抗压强度大于 80 MPa,显著影响刀具磨损及掘进效率。根据加密钻探试验数据,灰岩天然单轴饱和抗压强度普遍分布大于 80 MPa,最高强度可达 122 MPa,盾构掘进速度由原来的平均 10.0 mm/min 降低至 5.0 mm/min,掘进速度约为 2.4 m/d。

由于岩石强度变化较大、灰岩强度高,刀盘、刀具磨损严重,如图 3 所示。刀具寿命严重降低,而导致换刀频繁,第二段灰岩掘进 30 环已两次换刀,换刀周期约 20 m,一般每次换刀耗时间约 3~4 d,且该段裂隙水丰富,开挖面涌水突泥,换刀风险较高。开仓刀具检查频率由原设计的 40 环/次调整至 3 环/次,开仓检查和更换刀具占用了大量时间。换刀计划改为 24 m 一次,显著降低盾构掘进效率。

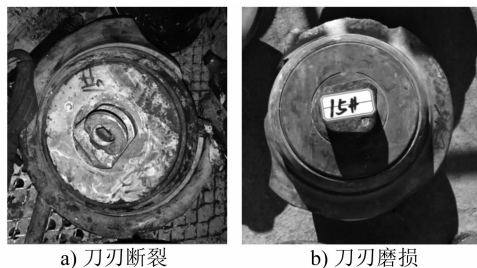


图 3 刀具磨损情况

Fig. 3 Tool wear state

2) 盾构开挖面涌水突泥,土压平衡不易控制,导致掘进困难。在盾构掘进时,土压力舱内土体透水性大,级配不良,从螺旋机出口处发生涌水、喷泥等喷涌现象,如图 4 所示。喷涌现象严重影响正常施工排土和压力舱土压平衡,掘进风险剧增,易引发地表沉降与塌陷以及管片漏水等施工病害。

3) 裂隙水量大,螺旋机喷涌严重,排水、清渣占

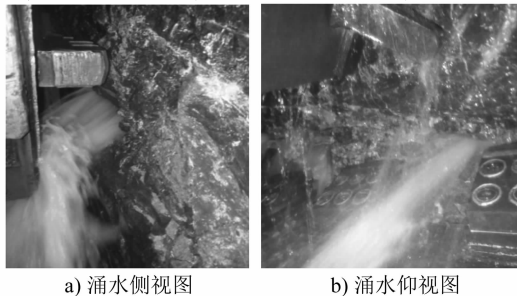
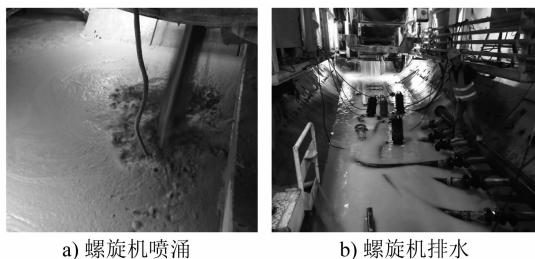


图 4 开挖面涌水突泥照片

Fig. 4 Pictures of gushing water and mud in excavation face

用大量时间。盾构机在中风化灰岩段掘进过程中,地层裂隙水补给量大,螺旋机喷涌严重,渣土变为泥浆,如图 5 所示。渣土外运困难、效率降低,由原来的 4 斗/环增加至 7 斗/环,额外消耗大量排水、清渣时间,每掘进 1 环额外消耗 8 h 的清渣时间,占有有效工作时间的 36%,严重影响施工效率。同时,裂隙水高速流动冲刷背后同步浆液,导致填充不密实,严重影响了隧道防水质量,需进行大量二次注浆补充,造成了施工成本及施工时间的增加。



a) 螺旋机喷涌

b) 螺旋机排水

图 5 螺旋机喷涌与排水照片

Fig. 5 Pictures of screw machine spouting and draining

4) 渣土含水量大,出渣处置与外运困难。盾构机采用的立式渣浆泵仅能抽出沉渣表部浮浆及细渣,底部沉渣仍需人工清理。隧道内大量地下水通过土斗倾倒进渣土池,需要耗费大量人力、物力和时间来处置渣土,影响了渣土外运效率,对掘进连续性具有一定的影响。另外,一般渣土场不接受石渣,且其环保、扬尘等环境要求较高,影响渣土外运,导致渣土存放占用大量场地。

3 高强度灰岩地质刀具选型及优化

刀盘、刀具是盾构掘进的核心部件,其地质条件的适应性将直接决定盾构掘进效率与开挖面稳定性,需根据具体地质环境及施工条件进行针对性的刀盘布置与刀具选型^[3-4]。

3.1 刀盘刀具选型

针对强富水灰岩地质的单轴饱和抗压强度在 80~122 MPa、填充性溶洞发育、灰岩局部破碎、岩溶裂隙水丰富等特点,刀盘设计采用四辐条+四面板复合式刀盘,支撑方式为中间支撑。刀盘直径为 6 680 mm,并可实现正反双向旋转出碴。刀盘中心设计有中心回转接头,可向开挖舱及刀盘中心注入渣土改良剂。刀盘各部分设有耐磨保护措施,并设有磨损检测 7 处,刀盘背部设计有主动搅拌棒。刀盘和刀具配置如图 6 所示,可拆卸式刀具均可从刀盘背部进行更换。

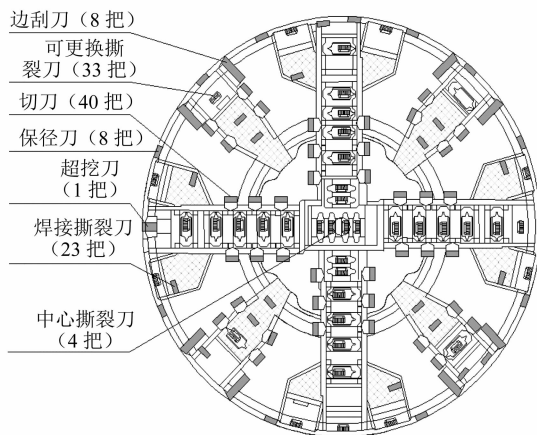


图6 复合式刀盘配置图

Fig. 6 Configuration diagram of compound cutter plate

盾构机在该段灰岩地质掘进中发现：①盾构掘进效率较低，正常掘进仅1~2环/d；②刀具磨损严重，换刀频次增加，功效降低；③开仓换刀造成盾构停机，引起灰岩裂隙水突涌和螺旋机喷涌，进一步加剧了施工难度，且排水、清渣消耗大量时间；④若盾尾排水、清渣不干净，将影响管片的拼装质量。

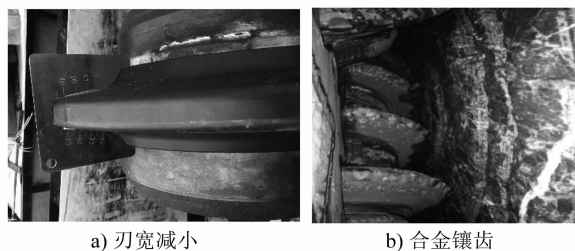
3.2 刀具磨损分析

在盾构穿越高强度灰岩地质的过程中，对滚刀磨损进行开仓检查发现：①中心滚刀和单刃滚刀出现不同程度的偏磨、崩刃及刀圈脱落等现象，中心滚刀整体磨损较为严重；②边缘部分刀具虽磨损量较为正常，也未出现严重崩刃现象，但普遍出现刀圈松动，与刀轴发生位移，已无法继续使用。

分析刀具磨损与掌子面的破岩情况表明，较多刀具磨损并非由掘进岩层时造成的，而是由掉落的切刀或刀盘上的金属构件与正常刀具相互磨损造成的。因此，开仓检查发现切刀或刀盘上金属构件脱落时，应立即将其取出，以免掉落破坏正常刀具而形成恶性循环。

3.3 刀具优化

针对上述盾构掘进刀盘磨损及突涌水等问题，需对刀盘、刀具进行进一步优化改进。由于灰岩强度高达122 MPa，为增加刀具的抗冲击能力，将原刀盘的普通滚刀改为一体式滚刀，将刃宽由原来的24 mm减小至19 mm；刀圈底部加厚并调整刀具材质，刀具中心采用楔形镶齿滚刀以提高刀具韧性。同时，刀盘增加耐磨格栅，滚刀、齿刀可互换，以提高盾构机在强富水灰岩地层中的适应性，在减少换刀频次的同时提升掘进效率。刀具优化如图7所示。



a) 刃宽减小

b) 合金镶齿

图7 刀具优化改进照片

Fig. 7 Pictures of cutter tool optimization and adaptation

刀具优化后，在坚硬灰岩地质中的破岩效果明显有所增强，如图8所示。由图8可知，盾构掘进速度由0~2.0 mm/min提升至3.0~5.4 mm/min。掘进效率稳定在2~3环/d，提高了约170%，刀具磨损和崩刃情况有所减少，换刀频率有所降低，由此可见，优化刀具后取得了良好的应用效果。

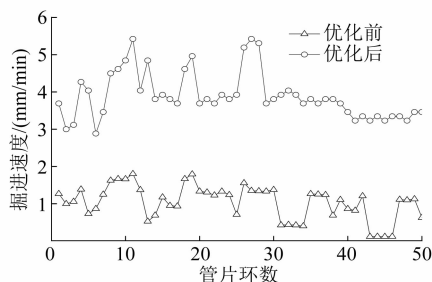


图8 刀具优化前后掘进速度对比

Fig. 8 Comparison of excavation speed before and after cutter tool optimization

4 岩溶灰岩地质盾构掘进参数控制

王大区间在76环至221环盾构穿越岩溶区灰岩基岩上浮段，对盾构掘进总推力、刀盘扭矩、同步注浆量、掘进出土量、土仓压力、掘进速度等关键掘进参数^[5-6]进行实时监测，其参数分布如图9所示。

由图9的盾构掘进参数分布可知：

1) 穿越灰岩地质的盾构总推力分布范围为6 100~10 900 kN，集中分布于8 000~10 000 kN，部分参数跳跃波动较大。这是由于刀盘掘进至岩溶溶洞，溶洞多为黏性土填充或半填充，地质软硬不均，尤其在串珠状溶洞处参数跳动较为明显。

2) 刀盘扭矩分布范围为1 600~3 100 kN·m，比进入灰岩段之前的黄土、黏土中的掘进扭矩增大200~500 kN·m，这主要是由于灰岩抗压与抗剪强度较大，刀盘与开挖面岩层间的摩擦力较大，需配合注入膨润土润滑。在210环至220环的刀具扭矩较大，这是由于该段灰岩刚度较大，单轴抗压强度

达到 80 MPa 以上。

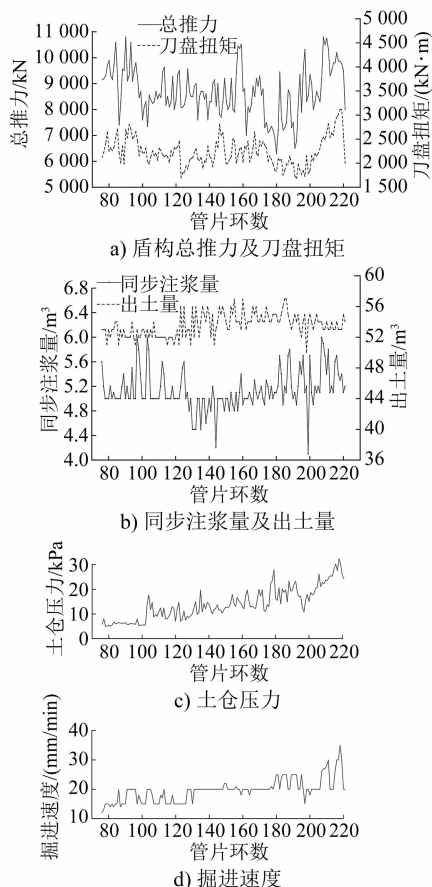


图9 盾构掘进关键参数监测图

Fig. 9 Diagram of shield tunneling key parameters monitoring

3) 穿越灰岩段的同步注浆量主要分布在 $4.4 \sim 5.8 \text{ m}^3/\text{环}$, 注浆量主要根据地质岩溶发育情况产生一定的波动, 在溶洞发育或岩溶水较大处的注浆量较大, 注浆速度应与掘进速度相匹配, 采用注浆压力和注浆量双指标控制, 注浆压力控制在 $0.3 \sim 0.4 \text{ MPa}$ 。根据详细勘探资料, 在溶洞较为发育的区域, 先进行地面钻孔注浆加固, 再进行同步注浆处理; 在岩溶水丰富区域, 应控制注浆材料的胶凝时间, 通过现场试验调整配比并加入促凝剂, 可以获得早期强度, 保证良好的注浆效果。

4) 盾构掘进出土量控制在 $50.0 \sim 57.0 \text{ m}^3/\text{环}$, 在岩溶水丰富地段, 岩溶裂隙水补给量大, 螺旋机发生喷涌现象, 渣土变为泥浆, 导致外运困难, 且消耗了大量排水及清渣时间, 因此要加强渣土改良, 以确保盾构掘进正常出渣并控制地层变形。

5) 灰岩段盾构掘进过程中, 土仓压力波动较大, 主要分布范围为 $5 \sim 30 \text{ kPa}$, 土仓压力较小是由

于开挖面岩层自稳性较高, 下部土仓压力明显大于上部土仓压力。

6) 盾构在灰岩中掘进速度缓慢, 一般维持在 $12.0 \sim 30.0 \text{ mm/min}$, 明显低于土层中的掘进效率, 刀盘磨损较为严重, 这主要是由于灰岩强度较高, 需控制较小的贯入度以便于切削岩层。掘进速度必须与地表隆陷控制、出土量、开挖面土压平衡及同步注浆等相协调。

5 结论

1) 济南轨道交通 1 号线是济南首条盾构法施工的地铁线路, 承担着先行先试岩溶地质盾构施工技术的使命, 分析强富水灰岩地质盾构掘进影响因素, 并制定科学可行的控制技术, 对类似地质环境盾构施工及灾害防控意义重大。

2) 针对强富水灰岩地质岩石强度高、填充性溶洞发育、灰岩局部破碎、岩溶裂隙水丰富等特点, 确定了盾构机刀盘、刀具配置, 并结合现场刀具磨损情况对刀具进行优化改进。

3) 制定盾构穿越富水灰岩地质关键掘进参数控制范围, 盾构总推力波动跳跃, 这主要是由于刀盘掘进至岩溶溶洞、地质软硬不均所造成的。穿越灰岩段同步注浆量应控制在 $5.0 \sim 5.8 \text{ m}^3/\text{环}$, 在溶洞发育区域, 应先进行地面注浆加固, 在岩溶水丰富区域, 应控制注浆材料的胶凝时间。

参考文献

- [1] 侯凯文, 王崇, 江杰, 等. 南宁地铁 2 号线盾构选型设计与适应性分析[J]. 隧道建设, 2017(8): 1037.
HOU Kaiwen, WANG Chong, JIANG Jie, et al. Type selection design and adaptability analysis of shield used in Line No. 2 of Nanning Metro[J]. Tunnel Construction, 2017(8): 1037.
- [2] 孙捷城, 王国富, 路林海, 等. 厚冲积地层盾构掘进参数设定及地表变形规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018(3): 487.
SUN Jiecheng, WANG Guofu, LU Linhai, et al. Study on parameters setting of EPB shield driving and laws of surface deformation in thick alluvial clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018(3): 487.
- [3] 门燕青, 王永军, 周建国, 等. 济南复合地层土压平衡盾构掘进效能实测分析[J]. 土木工程学报, 2019(8): 110.
MEN Yanqing, WANG Yongjun, ZHOU Jianguo, et al. Measurement and analysis on EPB shield machine tunneling efficiency in Jinan composite stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2019(8): 110.
- [4] 方勇, 王凯, 陶力铭, 等. 黏性地层面板式土压平衡盾构刀盘泥饼堵塞试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020(9): 1651.

FANG Yong, WANG Kai, TAO Liming, et al. Experimental study on clogging of cutterhead for panel earth-pressure-balance shield tunneling in cohesive strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020(9):1651.

- [5] 李龙,周晓鹏. 富水砂卵石地层大直径盾构刀具磨损规律及优化分析[J]. 施工技术, 2020(13):35.

LI Long, ZHOU Xiaopeng. Wear law and optimization analysis of cutter head for large diameter shield machine in water rich sandy cobble stratum [J]. Construction Technology, 2020

(13):35.

- [6] 李金奎,颜志坚. 隧道前方溶洞对盾构机掘进影响分析——以大连地铁5号线后后区间工程为例[J]. 科学技术与工程, 2020(14):5798.

LI Jinkui, YAN Zhijian. Analysis on the impact of front Karst cave on shield tunneling; a case study of the Hou Hou interval project of Dalian Metro Line 5 [J]. Science Technology and Engineering, 2020(14):5798.

(收稿日期:2022-04-20)

(上接第156页)

5 结语

本文对双向变流装置直流侧短路暂态特性进行了研究,主要获得以下结论:

1) 装置直流侧的短路故障可以分为3个阶段,其中,续流阶段 IGBT 反并联二极管的损坏风险最高,因此需要在此阶段之前进行保护。

2) 在功率模块中并联桥臂二极管,通过分流来降低流过 IGBT 反并联二极管的电流,同时在直流侧设置直流电抗,进一步抑制故障电流的上升率,起到保护作用。最后,通过 Simulink 软件搭建仿真模型,验证了所提保护方法的有效性。

参考文献

- [1] 李力鹏,盛家川. 轨道交通牵引系统再生能量利用方案研究[J]. 铁道工程学报, 2014(9):121.
- LI Lipeng, SHENG Jiachuan. Research on the utilization of regenerative energy of rail transit traction system [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(9):121.

(上接第159页)

搭设和拆除模架,并能合理利用小导洞侧壁作为支护结构,缩小破除范围,减少了施工投入,有效提高了二衬扣拱的施工效率。

3) 可移动模架施工过程中对沉降量进行了严格的控制,所测点沉降量的变化量与变化率均为安全状态,最大沉降量为 12.71 mm,保证了施工安全。

参考文献

- [1] 朱统步. PBA 工法、洞桩法的对比分析和改进措施[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016(5):88.
- ZHU Tongbu. Comparison of PBA and cavern-pile method and improvement measure [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016(5):88.
- [2] 常瑞杰. 地铁车站施工工法的优化选择[J]. 都市轨道交通, 2010(2):83.
- CHANG Ruijie. Optimum selection for the construction method

of a metro station [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2010(2):83.

- [3] 杨秀仁. 浅埋暗挖洞桩(柱)逆作法设计关键技术分析[J]. 都市轨道交通, 2012(2):64.
- YANG Xiuren. Analysis on key design technology of pilot-tunnel & pile (column) top-down method [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012(2):64.
- [4] 杨小龙. 合并式 PBA 法中导洞顶纵梁及二衬扣拱技术[J]. 市政技术, 2018(5):101.
- YANG Xiaolong. Technology of top longitudinal beam and second lining arch of central pilot tunnel by composite PBA [J]. Journal of Municipal Technology, 2018(5):101.
- [5] 王利涛. PBA 暗挖车站跳仓法施工二衬扣拱技术分析[J]. 市政技术, 2018(3):141.
- WANG Litao. Analysis of interval arch pouring technology for PBA station second lining [J]. Journal of Municipal Technology, 2018(3):141.

(收稿日期:2020-08-26)