

文章编号: 1674—8247(2023)04—0063—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.04.012

某跨海隧道地质选线及勘察控制要点分析

杨昌义¹ 杨进²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

2. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 成都 610072)

摘要:隧道选址阶段的地质比选是综合选线的重要组成部分。某铁路工程跨海段拟采用海底隧道,隧道地处花岗岩建造基底,风化深槽和球状风化发育。地质比选主要包括跨海平面位置比选、隧道埋深比选、隧道单双洞比选、施工方法(盾构法、矿山法)比选。以海底隧道方案进行地质控制因素分析,梳理了平面及纵断面选线、施工工法、综合勘察方法及手段、岩土参数等控制要点,最终推荐该海底隧道浅埋走行于全风化及碎块状强风化地层。研究成果以期类似工程提供参考。

关键词:海底隧道;盾构施工;差异风化;地质选线

中图分类号:U212.32

文献标志码:A

Analysis of Geological Route Selection and Survey Control Points of a Subsea Tunnel

YANG Changyi¹ YANG Jin²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

Abstract: Geological comparison in the tunnel site selection phase is an important part of comprehensive route selection. Taking the subsea section of railway project as an example, it was planned to construct a subsea tunnel in a granite bedrock area with deep weathered grooves and spheroidal weathering development. The geological comparison and selection mainly included the comparison the subsea plane position, tunnel depth, single or double-tube tunnel, and construction methods (shield method, mining method). This paper analyzed the geologically controlling factors based on the subsea tunnel scheme and provided an analysis of key controlling points such as horizontal and longitudinal alignment selection, construction methods, comprehensive survey methods and techniques, and geotechnical parameters. The final recommendation is that the subsea tunnel be shallowly buried in fully weathered and fragmented weathered formations. The conclusions are expected to provide a reference for similar projects.

Key words: subsea tunnel; shield construction; differential weathering; geological route selection

近年来,我国铁路建设得到快速发展,某城际铁路串联几个城市,跨海进入城区段采用隧道和高架比选。受控于城市密集房屋及周边道路交通等复杂因

素,泥水平衡盾构在隧道施工中被广泛采用。泥水平衡盾构在施工中带压开挖作业,对掘进临空释压提供了压力补偿,及时开挖后及时衬砌成环,既有利于开

收稿日期:2023-05-15

作者简介:杨昌义(1971-),男,高级工程师。

引文格式:杨昌义,杨进.某跨海隧道地质选线及勘察控制要点分析[J].高速铁路技术,2023,14(4):63-67.

YANG Changyi, YANG Jin. Analysis of Geological Route Selection and Survey Control Points of a Subsea Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4):63-67.

挖掘进,也有利于围岩变形控制^[1-3]。

某城际铁路入城跨海工程具有隧道浅埋的特点,又具有海底隧道浅埋高风险的特征。除了平面上的走廊比选外,与埋深有关的地质比选尤其重要。埋深过大,岩质太坚硬,经济性较差,海域埋深较浅,则工程风险极高。

本工程前期研究了交通规划、环境影响及城市景观等限制平面走向的条件,这些与地质条件相关性小,但对施工工法、海域覆盖岩土特征对隧道埋深选择的影响较大。海域隧道勘察方法及手段的选取、控制性岩土参数的选择都会影响方案的比选结果。本文通过多因素控制比选的实践应用,探讨海底隧道地质比选控制要点,以期同类工程提供参考。

1 某跨海工程概况

某跨海工程位于东部沿海,属于铁路项目的重要节点控制性工程,项目设计速度目标值为160 km/h,正线数目为双线,牵引种类为电力。全线处于花岗岩建造基底,拟建线路全长约220 km,跨海湾共计5段分属不同区域,最短跨海段1.5 km,最长跨海段5.3 km,一般段3~3.5 km,全长约17.8 km。针对不同跨海段落进行桥梁和隧道方案比选、对隧道进行单洞双线比选、对埋深进行深埋与浅埋比选、对施工工法进行泥水平衡盾构法与矿山法比选。

跨海段海岸为浅丘地貌,陆岸平坦开阔,高差小。土层主要是第四系全新统 Q_4 ~上更新统 Q_3 ,软粘土、粉质粘土、粉细砂、中粗砂等细粒土为主,总体厚度3~45 m;岩层主要是晚白垩世 K_2 ~晚侏罗世 J_3 ,为花岗岩、辉绿岩、少量凝灰熔岩、凝灰质砂岩,花岗岩中无序发育风化球与风花槽,风化差异大。地质构造条件主要为花岗岩建造巨型岩床,局部轻微发育分支断层,断层走向与线路走向呈 $65^\circ\sim 80^\circ$ 大角度相交,为非活动性断层,地震动参数0.15 g。所有跨海段均具有近陆海湾特征,海水具有内海、浅海半日潮汐特征,最小潮汐位差1.2 m,最大潮汐位差6.8 m,平均潮汐位差4.1 m。实测最大风浪波高2.32 m,对应波周期5.43 s。

2 地质选线主要控制因素

2.1 平面地质控制因素

线位区域主要处于花岗岩建造基底,地质构造主要为小型分支断层且与线路大角度相交,构造条件对方案选择影响小。本项目的跨海段平面线位控制因素主要受控于满足城市交通走廊规划布局、维护海洋

珍稀动植物环境保护区,保持城市海域景观及通航条件要求等非地质因素。在景观维持方面,要与既有交通工程相匹配,因此避免多条近距离跨海桥梁对城市海洋景观造成影响,采用跨海隧道对城市海岸景观和既有航道的维持有利。在平面选线中地质选线为非控制性因素,但近岸附近要有适合的施工场地布置条件,避免大量搬迁。

2.2 纵断面地质控制因素

跨海工程是项目的重点控制性节点工程,纵断面选线是跨海隧道工程选线的关键,而隧道埋深是决定技术经济比选的关键。随着埋深的增加,施工时泥水压力和注浆压力逐渐上升,施工难度加大^[4];埋深越大,荷重也越大,工程成本也会剧增;埋深越浅,透水风险及坍塌风险越高。综合考虑盾构设备的适应性及环境条件,该跨海隧道拟采用泥水平衡盾构法施工^[5],5.3 km长隧道拟采用2台掘进机。隧道施工中既要选择适合盾构的地层,又要有适合2台盾构机对接的空间,最好处于软质完整岩体;2台掘进机工作长度大致相当,便于施工组织工期协调。该泥水平衡盾构施工的适宜埋深是:埋深既能保证处于较软岩层中,以保证掘进效率,又要尽可能避免盾构机在软硬不均和透水性较差的地层中通过,还要保证在利于对接的地层中实现泥水盾构机的贯通对接^[6-8]。深埋与浅埋优缺点分析如表1所示。

隧道单双洞比选,左右线地质条件无明显差异或差异不大的情况下不作为主要控制因素,本文不予赘述。

鉴于风化槽、风化球等差异性风化的发育随机性,前期选线阶段主要在纵断面上进行优选,并通过横断面辅助选择。

跨海隧道纵断面主要处于散体状强风化花岗岩中,以利于盾构掘进发挥综合最佳效率;2台盾构选择在花岗岩岩面凸起范围内或稳定性较好的岩体中进行安全对接,如图1所示。该纵断面选线设计既避免了盾构机在埋深较浅(20~27 m埋深)地层中走行时海域段淤泥质黏土围岩自稳性差的问题,也消除了走行于粗砂时极高的中~强透水风险,还避免了盾构机在埋深较大(30~50 m埋深)时长距离走行于中等风化、微风化花岗岩中掘进难度大的问题。

2.3 施工工法控制的地质选线因素

隧道施工广义上大致分为矿山法(也叫“钻爆法”)、盾构法(TBM、泥水平衡盾构),地质条件对施工工法的适应性影响大^[9]。山岭型隧道大多采用矿山法,在通风、排水、辅助坑道方面具备较好的灵活性,

表 1 深埋、浅埋的优缺点分析及比选结论表

埋深	优点	缺点
深埋	1. 隧道主要处于基岩中等风化~弱风化带, 围岩级别高, 岩体稳定性较好 2. 岩质硬, 完整性好, 主要为基岩裂隙水, 渗漏水及坍塌风险相对较小 3. 断层、风化槽等软弱围岩需工程措施处理 4. 易实现 2 台盾构机贯通安全对接	1. 岩质硬度大, 不利于泥水平衡盾构法掘进, 掘进效率低 2. 受风花槽、风化球、断层及裂隙影响, 掘进面软硬不均显著, 对刀盘影响大, 泥水平衡盾构设备对硬岩适应性差 3. 海域段埋深越大, 近岸陆地段越长, 不利于尽早出土, 不利于控制投资 4. 掘进速度慢、工期较长, 施工组织受限
浅埋	1. 硬岩占比低有利于发挥泥水盾构快速掘进工期短、及时支护成环综合效率高的优势, 适应性较好 2. 海域段埋深越小, 临岸陆地段隧道越短, 利于尽早出土, 减少投资 3. 优选花岗岩全风化~散体状强风化带, 总体上围岩级别低, 岩体自稳性较好; 但应规避海积淤泥、软粘土等稳定性差或中粗砂、卵砾石等强透水层; 短距离范围亦可选择粉质粘土、粉细砂、碎块状强风化地层	1. 浅埋海底隧道渗漏水风险是极高风险, 应严格规避长段落通过中等~强透水层。浅埋范围内多发育海积软土和强透水砂层, 透水的风险极高, 应规避 2. 浅埋区大多岩体完整性较差, 不利于 2 台掘进机贯通安全对接, 对接风险高, 优选对接点应完整、稳定、易掘、防塌 3. 浅埋层内花岗岩内风化球、风化槽越发育, 软硬不均越频繁。泥水盾构需对碎裂岩块、海底孤石(风化球)、基岩凸起进行预处理, 处理工作量相对大; 处理工作可以地面(海面)作业, 影响投资但不控制工期
比选结论	1. 优选浅埋, 充分发挥泥水盾构机综合效率, 但应严格规避浅埋可能造成的强透水风险 2. 施工掘进扰动后有一定自稳定性的地层, 如海底残积层、粘土层、弱透水粉细砂层、花岗岩全风化层、散体状强风化层是海底隧道盾构施工的优选地层 3. 海积淤泥、软粘土等自稳性较差, 应严格规避粗砂、卵砾石土等强透水地层, 避免强透水风险 4. 花岗岩风化球软硬不均难以规避, 可地面开展处理措施, 不占隧道作业面, 影响投资但工期灵活, 利于发挥泥水平衡盾构的综合效率	

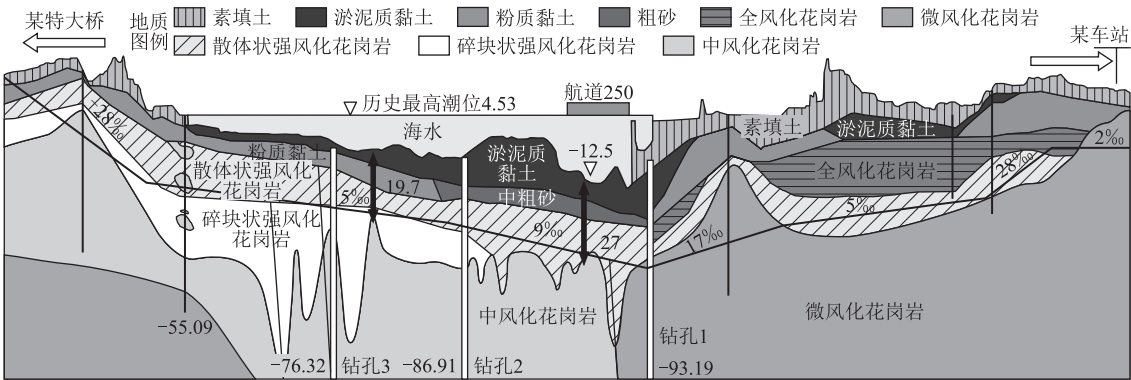


图 1 某跨海隧道纵断面选线地质示意图(m)

但其人力投入较多,工期进度较长,正常掘进工效较盾构低。狭义的盾构法分为硬岩掘进机(TBM)、泥水平衡盾构、土压平衡盾构等。硬岩掘进机(TBM)适用于山岭型长隧道、超长隧道或深埋隧道。泥水平衡盾构机在城市轨道交通、埋深较浅的软岩质和硬岩风化层中被广泛采用,适合于快速掘进、快速支护的工程中,泥水盾构施工对地表周边建构筑物干扰影响较小。跨海隧道工程在海岸陆地段尽早出土走明线可降低项目总投资,也可视设站需求减少埋深。综上所述,采用泥水平衡盾构是轨道交通工程海底隧道的最优选择。

泥水平衡盾构法在海底隧道施工中的优势包括:带压掘进更利于降低释压诱发透水和坍塌风险,及时快速支护成环可以很好地控制围岩变形。该项目根据工法和施工设备选用了泥水平衡盾构,之后选择泥水平衡盾构适应的地层,这与山岭型隧道地质选线有

较大不同。本文选线方法在花岗岩地区(差异性风化、存在较厚风化带地层)中较适用,而在坚硬岩石地层、风化层厚度薄,或自稳性较差土层中,其适应性有所降低。

两台盾构机对接处岩体应均质完整。若无法避免软硬不均地层,可考虑软岩侧盾构待机,硬岩侧盾构主动掘进,该方法更利于掘进机姿态控制,避免产生较大的对接误差。待机点要根据施工组织设计综合选择,充分研究地质纵断面,实现待机点优选。

3 跨海隧道勘察方法与手段主要控制要点

3.1 多种方法综合勘探的控制要点

跨海隧道勘探应选择遥感解译、钻探、物探、原位测试、室内试验等多种勘察方法相互验证。

遥感解译主要关注海岸地形地貌及既有构筑物特征,对于场地条件提供宏观判释,也可对填海造岸等海岸变迁进行推测,以便宏观掌握人工填土的大致分布范围。

海上钻探是地质选线的直接验证手段。由于近海河口附近水流受到河水入海、海洋潮汐和涌浪的影响,在每个工作日内钻台会根据海潮涨落进行调整。平面定位通过调整地锚实现,但海潮涨落和涌浪导致钻台升降难以避免;海潮尚且有一定规律可循,涌浪却是偶然无序的,不能良好控制容易导致测标破坏、钻深不准、卡钻、断杆等事故。

物探工作采用瞬变电磁法对 3 条平行纵剖面 and 5 条横剖面进行了探测,采用声波法对水下地形进行了测量,采用地震波法对孔内纵波及横波进行了测试,并对各层岩土物探特性与钻探取样进行验证。控制因素主要保证作业时间与气象条件匹配,提前了解海洋气象预报,海上物探优选要在潮汐涨落过渡期间开展,以降低侧面高差的影响。

海上钻孔原位测试主要控制要点是:提前谋划和准备,现场就位,及时提钻衔接测试,避免因提钻待测间隔时长过大、涨落潮和涌浪等导致测点定位不准,进而影响孔测质量。重复测试将增加成本和延长工期,同时增加海上作业风险。

3.2 海上钻探的主要控制因素要点

受潮汐涨落和涌浪影响,海上钻探平台定位控制难度大、风险高,还受到海事航道监管、海洋野生动植物保护监管等多方约束。因此,海上钻探准备工作复杂艰巨,办证手续多、流程长、费用高、管控严格,需提前周密布置前期准备工作。申请钻探用海手续,须编制和评估《海域施工通航安全保障方案》《河口湿地自然保护区应急预案》《珍惜海洋物种自然保护区应急预案》《施工组织方案》等多种专项评估并经专家评审和行业主管部门审批后方可执行。控制因素主要是熟知用海申请事项及流程、费用、航道设置以及作业限制条件。海上钻探作业控制要点有:

(1) 钻台设置警示灯、警示旗和提醒慢速通过信号,在作业船 200 m 附近设置警戒船,夜间作业确保警示灯正常开启。通行船避让钻探作业船,两船间距不小于 100 m。

(2) 钻平位置须保持稳定,一般四角定锚,边锚线与平台主线间的夹角约为 30°,风力超过 6 级或涌浪高度超过 1.0 m 不得作业。

(3) 施工作业区能见度小于 1 000 m 时停止施工作业,加强通航警戒。

(4) 若采用钻探船在浅滩水域施工时,退潮坐底所产生的倾角、受风浪或航道船行涌浪等影响所产生的倾角均不能超过 15°,倾斜超限停止作业。

3.3 主要地质参数控制要点

3.3.1 渗透系数的控制因素

跨海隧道透水事故具有极高的风险,因此海域工程岩土渗透系数的测试尤其重要,原位抽水试验是获取渗透系数的主要方法。

抽水试验在具有均质特性的孔隙水地层(如土层、砂层、卵砾石层)中适用性较好,但在基岩裂隙水所在地层中其离散性较大。因此,抽水试验主要针对土层、砂层、卵砾石层等开展,部分抽水试验获得的是综合地层渗透系数。岩石裂隙水主要根据钻孔岩心评价及岩体完整性,结合岩土组合特征进行综合评判。通过抽水试验及综合评判,隧址地层渗透系数如表 2 所示。

表 2 地层渗透系数推荐表

地层岩性	分类	渗透系数 m/d
淤泥质黏土	软弱土	0.05(弱透水)
中砂	软弱土	30(强透水)
粉质粘土	中软土	0.05(弱透水)
全风化花岗岩	硬土	0.06(弱透水)
散体状强风化花岗岩	软质岩	0.8(弱透水)
碎块状强风化花岗岩	次坚石	5(中等透水)
中风化花岗岩	坚石	3(中等透水)
微风化花岗岩	坚石	0.8(弱透水)

由表 2 可知,粉质粘土、全风化层、散体状强风化等弱透水层是该海底隧道适宜走行的地层。

3.3.2 岩石强度的控制因素

泥水盾构设备优选岩质较软的易掘地层,尽量避免在微风化及中风化花岗岩地层中穿越。岩石的可开挖性决定于岩石强度与岩体完整性(破碎程度)^[10]。由于强风化地层无法采到合格样品,仅对微风化及中风化进行岩样室内试验,强度指标如表 3 所示。

表 3 隧址岩石强度指标表

地层岩性	状态	微风化 K1LP	微风化 K1YB	中风化 K1MK	中风化 K1YB
单轴极限抗压强度/MPa	天然	89.3~132; 平均 110.4	93.7~128; 平均 110.9	29.6~73.3; 平均 46.9	43.3~92.1; 平均 65.0
	饱和	62.3~133; 平均 91.9	61.2~178; 平均 98.8	26.4~36.4; 平均 33.4	35.8~85.4; 平均 59.4

由表 3 可知,隧道不宜选择中等风化及以上的坚硬岩层中通过。花岗岩全风化层和散体状强风化层具有土层的易掘、自稳、低渗等综合优势,适宜盾构掘进。因此,岩石强度指标是控制因素之一,其次是岩体完整性。

4 结论

该跨海隧道工程具有极高的透水风险,且不宜深埋,是项目控制工程,地质条件对方案比选影响较大。地质条件从平面比选、纵断面比选、施工工法与设备选型、勘察方法与手段、海上钻探控制、主要地质参数等方面的控制要点归纳为:

(1) 平面线位控制因素主要是满足城市交通走廊规划布局、海洋珍稀动植物环境保护区和维护海域景观的要求。在平面选线中地质因素多为非控制性因素,近岸附近需具备适合的施工场地布置条件,避免大量搬迁。

(2) 纵断面地质选线不宜深埋,避免造成投资剧增,严格规避超浅埋强透水风险。优选均质较软岩土利于掘进、尽可能避免在中等或强透水(如中粗砂及卵砾石)地层和严重软硬不均岩土中通过,同时在完整性和自稳性好地层中实现安全贯通对接。

(3) 泥水平衡盾构具有带压快速掘进、快速支护成环、防止透水及坍塌等优势,在跨海隧道工程中具有较好的适应性。海域浅埋地质条件下,在花岗岩具有较厚全风化、散体状强风化地层条件下易找到易掘地层,基岩突起部位适合盾构机安全贯通对接。对接处优选均质完整岩体,或在软岩侧盾构待机,硬岩侧盾构主动掘进更利于掘进定位控制,可避免较大对接误差。结合地质纵断面综合施工组织确定对接点。

(4) 海上钻探因潮汐涨落和涌浪具有较高施工安全风险,准备工作复杂艰巨。用海办证手续多、流程长、费用高、管控严,因此应充分考虑前置要件办理流程等工期。海上施钻应注重定位控制和防倾防撞。

(5) 跨海隧道岩土勘察地质参数应特别注重渗透系数的获取与比选、综合分析渗透系数,严格规避强透水风险。岩石强度对泥水盾构施工影响较大,花岗岩全风化和散体状强风化是盾构掘进优选岩层,碎块状强风化属于中等透水,宜弃选,微风化岩石强度高,应规避。在2台盾构对接处可考虑短距离中等风化岩体,利于安全贯通对接。

参考文献:

- [1] 洪开荣,杜彦良,陈馈,等. 中国全断面隧道掘进机发展历程、成就及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 739-756.
HONG Kairong, DU Yanliang, CHEN Kui, et al. Full-face Tunnel Boring Machines (Shields/TBMs) in China: History, Achievements, and Prospects [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 739-756.
- [2] 陈馈,杨延栋. 中国盾构制造新技术与发展趋势[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 276-284.

- CHEN Kui, YANG Yandong. Innovation and Development Trends of Shield Manufacturing Technology in China [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 276-284.
- [3] 李建斌. 我国掘进机研制现状、问题和展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 877-896.
LI Jianbin. Current Status, Problems and Prospects of Research, Designing and Manufacturing of Boring Machine in China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 877-896.
- [4] 吴柯,张晓平,刘浩,等. 粉质黏土地层超大直径泥水盾构隧道地表变形与施工参数相关关系研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1555-1566.
WU Ke, ZHANG Xiaoping, LIU Hao, et al. Correlation Between Surface Deformation and Construction Parameters in Silty Clay Ground Tunneling with Super Large Diameter Slurry Shield TBM [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1555-1566.
- [5] 唐少辉,张晓平,刘浩,等. 复杂地层水下盾构隧道工程难点及关键技术研究展望[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1477-1487.
TANG Shaohui, ZHANG Xiaoping, LIU Hao, et al. Engineering Difficulties and Key Technologies for Underwater Shield Tunnel in Complex Ground [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1477-1487.
- [6] 肖明清. 我国水下盾构隧道代表性工程与发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(3): 360-367.
XIAO Mingqing. Representative Projects and Development Trend of Underwater Shield Tunnels in China [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(3): 360-367.
- [7] 何川,封坤,方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97-109.
HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and Prospects on Constructing Technologies of Metro Tunnels Using Shield Tunneling Method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.
- [8] 傅德明,周文波. 土压盾构技术在我国地铁隧道工程中的应用和发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S2): 4888-4892.
FU Deming, ZHOU Wenbo. Application and Development of Epb Shield Tunneling in Metro Tunnel Projects in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4888-4892.
- [9] 朱廷宇,王唤龙. TBM穿越富水构造风化破碎带脱困处理方案研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 103-110.
ZHU Tingyu, WANG Huanlong. Countermeasures of Jammed TBM in Shattered Weathered Zone of Water-rich Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 103-110.
- [10] 王亚暉,吴光. TBM隧道围岩力学参数对凿碎比功及刀具磨损值影响分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1216-1226.
WANG Yawei, WU Guang. Effects of the Mechanical Parameters of Surrounding Rock on Specific Chiseling Work and Attrition Value of TBM [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1216-1226.