

复杂地层盾构刀盘与地层适应性分析

曹云飞, 王旭春*, 孟成龙, 吴文瑞, 洪勇

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 为了探究土压平衡盾构在复杂地层中刀盘与地层的适应性, 本文以青岛地铁4号线沙子口站至崂山六中站区间盾构施工为背景, 依据深圳地铁成功贯通的经验, 对本区间盾构刀盘与地层进行了适应性初步评价, 并针对4种不同地层条件下的盾构机掘进参数进行了地质适应性分析。研究表明: (1) 盾构机在4种地层条件下掘进时, 总推力控制在5 043.0~27 211.5 kN之间, 刀盘扭矩控制在719.9~4 636.7 kN·m之间, 均未超过相应设计值, 且整个区间的平均掘进速度约为40 mm/min; (2) 利用地层进行刀盘针对性设计是合理的; (3) 盾构机在粉质黏土地层掘进时, 消耗的推力最小, 产生的掘进速度与贯入度最高, 因此盾构刀盘与粉质黏土地层的适应性最好。

关键词: 土压盾构; 复杂地层; 掘进参数; 适应性分析

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)04-0335-07

Analysis on adaptability of shield cutterhead in complex formation

CAO Yun-fei, WANG Xu-chun*, MENG Cheng-long, WU Wen-rui, HONG Yong

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: In order to explore the adaptability of earth pressure balance shield in complex stratum, the preliminary evaluation of the adaptability of shield cutter head and stratum in the section between Shazikou Station and Laoshan No.6 Middle Station of Qingdao Metro Line 4 is carried out based on the successful completion experience of Shenzhen Metro. The geological adaptability of shield tunneling parameters under four different stratum conditions is analyzed. The research results show that: (1) When the shield machine tunnels under four stratum conditions, and the gross thrust is controlled between 5 043.0~27 211.5 kN, then the cutter head torque is kept in the range of 719.9~4 636.7 kN·m, which is within the corresponding design values, and the average tunneling speed of the whole section is about 40 mm/min; (2) It is reasonable to use the stratum to carry out the targeted design of the shield cutter head; (3) When the shield machine tunnels in the silty clay formation, it consumes the least thrust and generates the highest tunneling speed and penetration, then the shield cutter head possesses the best adaptability to the silty clay formation.

Key words: earth pressure shield; complex formation; tunneling parameters; adaptability analysis

0 引言

随着我国地下空间技术的快速发展, 盾构法修建隧道被广泛应用于城市地铁施工中。但盾构掘进受地层条件影响较大, 且各地区的地质情况具有差异性, 如北京市主要以砂卵石地层为主, 上海市主要以软土地层为主, 青岛市主要以花岗岩地层为主。由于刀盘直接作用于地层, 其与地层间的适应性是影响盾构机掘进效率的关键因素^[1]。因此, 对于盾构刀盘地质适应性分析很有必要。

目前国内外针对盾构刀盘与地层的适应性研究已经取得了一些进展。詹金武^[1]采用理论计算与现场掘进参数相结合的方法, 分析了刀盘与地层的相关性。胡国良^[2]利用模型试验的方法, 研究了盾构机工作参数与土体的相互关系。何峰^[3]通过总结工程经验, 提出了适用于砂卵石地层的刀具布置形式。徐前卫^[4]利用相似理论与模型试验的方法, 对盾构机工作参数与地层适应性进行了研究。江华^[5]通过对面板式与辐条式盾构的掘进参数, 得出了适用于砂卵石地层的刀盘形式。夏毅敏^[6]基于模糊

收稿日期: 2021-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505302)。

作者简介: 曹云飞(1997—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事隧道工程的研究工作。E-mail: 841475756@qq.com。

*通讯作者: 王旭春(1963—), 男, 博士(后), 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、矿业工程方面研究。E-mail: xcwang2008@qq.com。

数学理论,提出了一种地质适应性配刀方法。孙剑萍^[7]以刀盘设计适应性为影响机理,提出了基于改进 TOPSIS 的分析模型与评价方法。总之,目前对盾构刀盘地层适应性分析主要依托于数学模型与室内模型试验,而对于掘进参数来分析地层适应性的研究相对较少。

因此,本文依托青岛地铁4号线沙子口站至崂山六中站区间,通过刀盘地层适应性初步评价与掘进参数分析,研究了盾构刀盘与地层适应性的关系,以期同类盾构隧道施工提供经验。

1 工程概况

1.1 工程及地质概况

沙子口站—崂山六中站区间设计为双洞单线隧道,采用盾构法施工,左线隧道长1 112.485 m,右线隧道长1 114.920 m。该区间最小平面曲线半径为450 m,隧道纵断面采用人字坡,最大纵坡为18.485%,隧道拱顶埋深7.0~17.2 m。管片外径为6 000 mm,内径5 400 mm,管片幅宽1 500 mm,管片厚度300 mm。每环衬砌环由6块管片组成,分为3块标准块,2块邻接块和1块封顶块。本文以沙崂区间右线盾构隧道为工程依托,采用青岛地铁盾构施工管理信息系统获取本区间掘进参数,且由于右线盾构首先始发,因此不考虑左线隧道施工对右线地层的扰动。右线隧道软土段长度为844 m,岩石段长度为271 m,主要穿越的地层为粉质黏土、中粗砂、卵石土、强风化花岗岩、中风化花岗岩和微风化花岗岩。

1.2 水文概况

区间右线在YDK26+200处下穿南九水河,南九水河河道两侧为砌石河堤,线路通过区域为南九水河下游南岸,靠近沙子口湾,距沙子口湾约500 m,地势平坦开阔,海水涨潮时,海水会倒灌进河道内,河道底标高约0.3~0.6 m,满潮时水位标高为2.2 m,河道为自然河床,河底地层与海水连通,因此本区间隧道穿越地层含水量较丰富。本段地铁线路沿线地下水主要赋存在第四系松散砂土层及基岩的裂隙中。场区地下水主要类型为第四系孔隙水潜水、承压水和基岩裂隙水。

1.3 隧道穿越地层占比分析

右线隧道长1 114.92 m,共743环,其中盾构机掘进至0~160环、293~539环所穿越的地层为砂黏复合地层,占整个区间隧道长度的54.9%;161~292环为粉质黏土地层,占整个区间隧道长度

的17.8%;540~670环为上软下硬地层,占整个区间隧道长度的17.6%。由于本区间岩土工程勘察采用钻孔取芯方式进行分析,钻孔间距20~50 m,因此隧道纵断面图可能与实际地层存在差异。通过盾构机在671~743环的掘进试验发现,实际掘进地层应为微风化花岗岩、强风化花岗岩并夹杂有中粗砂的地层,为了描述方便,将本区段地层定义为中粗砂与花岗岩混合地层,本区段占整个区间隧道长度的9.7%,盾构机的出渣情况如图1所示。各地层占比如图2所示。



图1 盾构机出渣情况

Fig. 1 Slagging situation of the shield machine

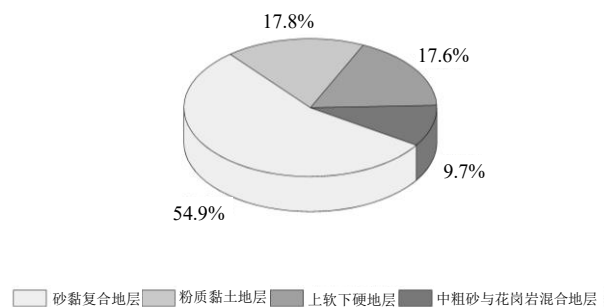


图2 右线隧道各地层占比

Fig. 2 Proportions of each stratum in the right-line tunnel

2 沙崂区间盾构设备参数

2.1 设备参数

右线隧道采用一台复合式土压平衡盾构机从沙子口站东端头井始发推进至崂山六中站西端头井接收,盾构机型号为ZTE 6250,前盾直径6 250 mm,盾体长度约7 980 mm,整机长度约82 000 mm。刀盘采用四辐条+四面板的辐板式设计,支撑方式为中心支撑。刀盘上安装有滚刀、切刀、边缘刮刀、导流刀和贝壳刀等,对隧道进行全断面开挖,并可实现正反双向旋转出渣。根据不同的地质工况,滚刀可以全部或部分更换成齿刀。所有可拆式刀具均可从刀盘背部进行更换,刀盘主体结构的正常使用

寿命大于 10 km。刀具技术参数如表 1 所示。

表 1 刀具技术参数表
Table 1 Tool technical parameters

刀具类型	数量/把	安装高度/mm	刀间距/mm
17"双刃中心滚刀	4	187.5	90
17"单刃正面滚刀	20	187.5	100
17"双刃边缘滚刀	11	187.5	—
切刀	36	140.0	200
边缘刮刀	8	140.0	—
贝壳刀	12	—	—
导流刀	6	—	—
超挖刀	1	—	—

2.2 盾构针对性设计方案

针对沙岭区间的水文地质特点,为了降低泥饼形成的危险,整个刀盘面板的开口率约为 33%,中心采用端盖式齿刀(滚刀),刀座尺寸较小,刀间距可以做的更窄,在不减少刀具配置的情况下,中心开口率可达到 38%。并采用 Z 字形连续肋板的设计,在对 $\Phi 350$ mm 粒径进行筛选的同时,提高整体扭矩传递的均匀性和流经肋板处渣土的流动性。开口处的纵深方向采用梯形设计即“严进宽出”的结构,有利于渣土的纵向流动,提高渣土的流动效率,继而降低滞磨率^[3,8];为了进一步提高中心区域的渣土流动性能,在保证径向均匀布置的前提下,加强了中心区域的渣土改良点和冲洗口布置,进而降低结泥饼的风险。

针对岩石地层的高冲击性,滚刀采用加宽型刀刃,且可换装 18"刀圈,刀毂部分加焊耐磨层,尽可能减少中途换刀的次数以控制地面沉降。且为了提高刀盘边缘区域的耐磨性,增加边缘区域切刀、刮刀的数量,有效保证了开挖直径。齿刀、切刀、边刮刀都采用合金设计,大大提高了刀具的耐磨性能以及耐冲击性能,刀座背部采用了耐磨合金保护刀座,各面板处也布置了相应的导流刀具用于保护刀座。为了增加盾构机刀盘面板的耐磨性能,本区间盾构机采用正面母材上加覆 12.5 mm 的复合耐磨板,而大圆环外周则配以镶嵌合金的耐磨板,且刀盘的背面和边缘过渡区,也焊有致密耐磨网格。在刀盘的外周设置有 2 个液压开关式的磨损检测,用于预警刀盘外周的磨损情况。

3 盾构刀盘适应性分析

针对本区间地质情况与盾构机刀盘参数进行

分析,结果如下^[9]:

(1) 盘型滚刀的标准尺寸规格一般根据隧道的开挖直径来选择,当盾构隧道开挖直径为 5~12 m 时,滚刀尺寸可采用 17"^[10]。本区间盘型滚刀尺寸均为 17",因此与隧道的开挖直径 6 280 mm 相适应。

(2) 由于单刃滚刀的破岩能力一般大于 80.0 MPa,因此适用于较硬的地层。而双联滚刀破岩能耗较高,且破岩能力为 30.0~80.0 MPa,因此适用于软岩地层。本区间采用 4 把中心双联滚刀、20 把正面单刃滚刀以及 11 把边缘单刃滚刀的布置方式,使得盾构机刀盘既满足破岩的同时,并能保证开挖面积,因此本区间滚刀的选择和布置与刀具自身的工作特性相适应。

(3) 花岗岩地层所对应的滚刀间距一般为 50.0~85.0 mm,砂岩地层所对应的滚刀间距一般为 70.0~85.0 mm,页岩(以黏土类矿物为主)地层所对应的滚刀间距一般为 85.0~100 mm,而本区间隧道所穿越的地层以砂黏复合地层与花岗岩地层为主,因此正面滚刀间距与中心滚刀间距与地层相适应。

(4) 本区间盾构机刀盘面板上安装的切刀、边刮刀都采用合金设计,可以有效提高刀具的耐磨性能以及耐冲击性能,刀座背部采用了耐磨合金保护刀座,各面板处也布置了相应的导流刀具用于保护刀座,因此本区间刀具的耐磨性与地层的高磨损性相适应,且为了便于换刀,切刀与滚刀均采用背装式。

(5) 增加边缘区域切刀、刮刀的数量,提高刀盘边缘区域的耐磨性能,可以有效保证开挖直径。

(6) 滚刀与切刀、刮刀的组合方式可以同时满足复合地层、软土地层、上软下硬以及较坚硬地层的掘进需求,可从深圳轨道交通 11 号线车公庙站—红树湾站区间隧道的成功贯通得已验证。

(7) 17"滚刀的允许磨损量一般为 25.0 mm。对于本区间来说,正面滚刀与中心滚刀的刀高为 187.5 mm,切刀刀高为 140 mm,安装高度差为 47.5 mm,故安装高度差大于 25.0 mm,因此可以在满足滚刀先行工作的同时,保护切刀。

(8) 本区间刀盘的开口率约为 33%,降低滞磨率。中心开口率约为 38%,可以提高中心低速渣土的流动性,从而降低泥饼形成的危险,且深圳轨道交通 11 号线车公庙站—红树湾站区间盾构机刀盘的开口率与本区间基本一致,因此开口率的设置是合理的。

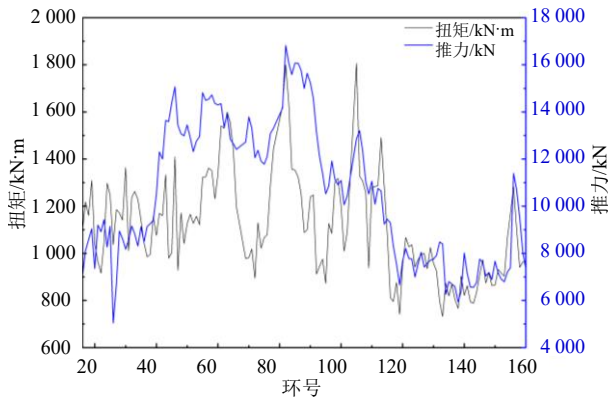
综上所述,通过借鉴深圳轨道交通 11 号线车公庙站—红树湾站区间隧道的成功经验,可以初步

表明 ZTE 6250 型盾构机刀盘与本区间地层具有较好的适应性。

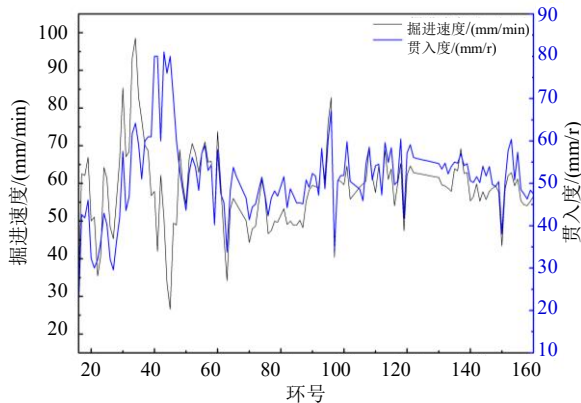
4 不同地层掘进参数分析

4.1 砂黏复合地层掘进参数分析

为了保证掘进参数在特定地层下，能较好地反映盾构机的掘进特性，本文选取正常掘进状态下每一环掘进数据的平均值作为该环的代表值^[11]。沙岭区间右线 0~160 环所对应的地层为砂黏复合地层，且始发端头采用高压旋喷加固地层的方法，加固长度为沿线路纵向 12 m，因此为了消除始发加固区对掘进参数产生影响，选取 16~160 环所对应的掘进参数进行分析。该地层所对应的掘进参数如图 3 所示，其中图 3 (a) 为推力、扭矩变化曲线，图 3 (b) 为掘进速度、贯入度变化曲线。



(a) 推力、扭矩变化曲线



(b) 掘进速度、贯入度变化曲线

图 3 16~160 环掘进参数变化曲线

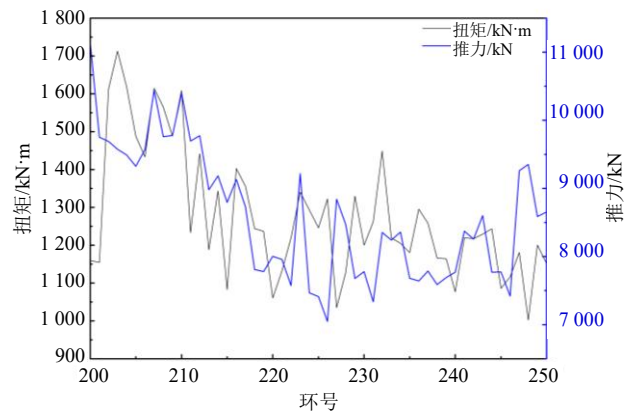
Fig. 3 Change curve of tunneling parameters of ring 16~160

由图 3 (a) 可得，盾构机在沙岭区间右线砂黏复合地层中掘进时，总推力、刀盘扭矩控制在 5 043.0~16 820.8 kN、731.4~1 806.2 kN·m 之间，且该区段的平均推力为 10 444.2 kN、平均扭矩为 1 114.2 kN·m，均小于刀具装备推力 39 914.0 kN、刀

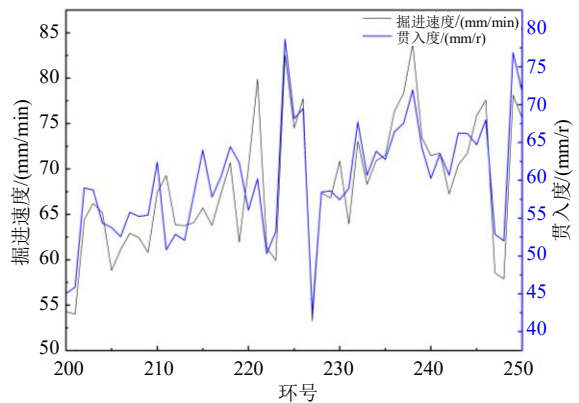
盘装备扭矩 6 848.0 kN·m。由图 3 (b) 可得，贯入度与掘进速度保持在 21.1~81.0 mm/r、26.6~98.5 mm/min 之间，该区段的平均贯入度为 51.4 mm/r，平均掘进速度为 58.6 mm/min，且掘进过程中约有一半以上的掘进速度大于平均掘进速度。这表明在技术性能范围内，ZTE 6250 型土压平衡盾构机在砂黏复合地层掘进时，具有较高的掘进效率。

4.2 粉质黏土地层掘进参数分析

沙岭区间右线 200~250 环所穿越的地层为粉质黏土，该地层所对应的掘进参数如图 4 所示，其中图 4 (a) 为推力、扭矩变化曲线，图 4 (b) 为掘进速度、贯入度变化曲线。



(a) 推力、扭矩变化曲线



(b) 掘进速度、贯入度变化曲线

图 4 200~250 环掘进参数变化曲线

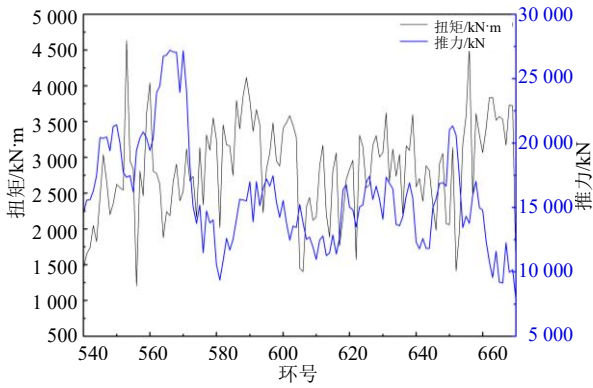
Fig. 4 Change curve of tunneling parameters of ring 200~250

由图 4 (a) 可得，盾构机在沙岭区间右线粉质黏土地层中掘进时，总推力、刀盘扭矩控制在 7 047.5~11 135.9 kN、1 002.0~1 713.0 kN·m 之间，且该区段的平均推力为 8 602.7 kN、平均扭矩为 1 278.6 kN·m。由此可得，盾构机在该区段掘进时，掘进参数均小于刀具装备推力 39 914.0 kN、刀盘装备扭矩 6 848.0 kN·m。由图 4 (b) 可得，贯入度与掘进速度保持在 42.3~78.6 mm/r、53.2~

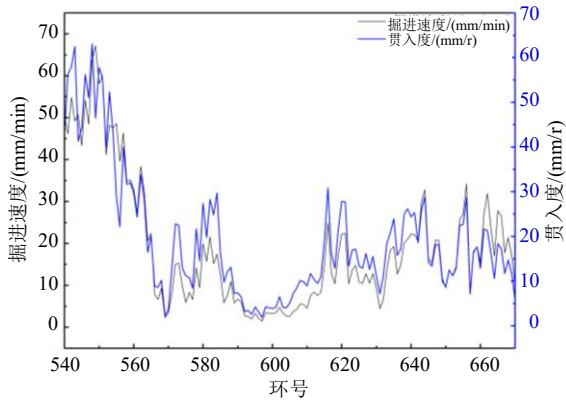
83.8 mm/min 之间, 该区段的平均贯入度为 60.0 mm/r, 平均掘进速度为 67.9 mm/min。在掘进过程中约有一半的掘进速度大于平均掘进速度, 且掘进速度与贯入度总体呈上升趋势, 这表明在技术性能范围内, ZTE 6250 型土压平衡盾构机在粉质黏土地层掘进时, 可以保持较高的掘进效率。

4.3 上软下硬地层掘进参数分析

沙崂区间右线 540~670 环所穿越的地层为上软下硬地层, 上部主要分布有中粗砂层、粉质黏土层和卵石土层, 下部主要分布有微风化、中风化、强风化花岗岩地层。该上软下硬地层所对应的掘进参数如图 5 所示, 其中图 5 (a) 为推力、扭矩变化曲线, 图 5 (b) 为掘进速度、贯入度变化曲线。



(a) 推力、扭矩变化曲线



(b) 掘进速度、贯入度变化曲线

图 5 540~670 环掘进参数变化曲线

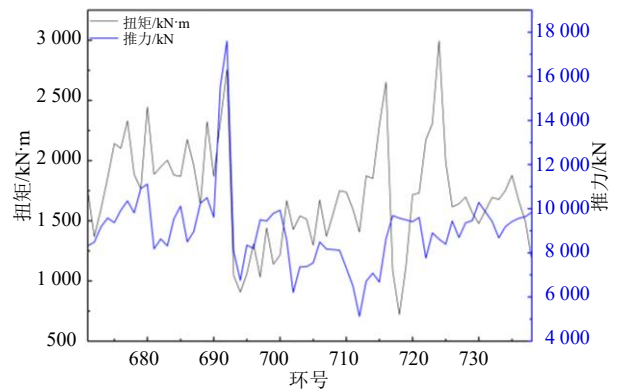
Fig. 5 Change curve of tunneling parameters of ring 540~670

由图 5 (a) 可得, 盾构机在沙崂区间右线上软下硬地层中掘进时, 总推力、刀盘扭矩控制在 7 813.0~27 211.5 kN、1 200.5~4 636.7 kN·m 之间, 且该区段的平均推力为 15 872.0 kN、平均扭矩为 2 837.2 kN·m, 因此均小于刀具装备推力 39 914.0 kN、刀盘装备扭矩 6 848.0 kN·m。由图 5 (b) 可得, 贯

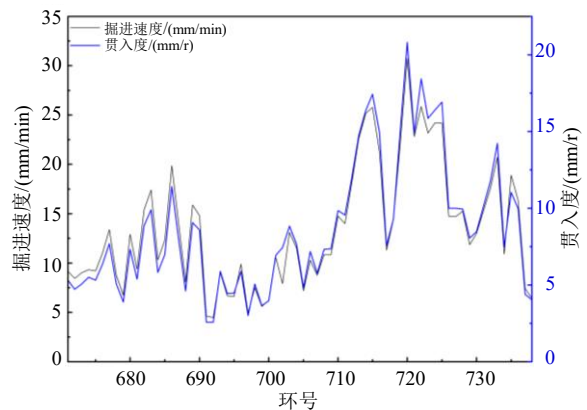
入度与掘进速度保持在 1.9~63.0 mm/r、1.5~67.1 mm/min 之间, 该区段的平均贯入度为 19.6 mm/r, 平均掘进速度为 19.2 mm/min。可能造成的原因是, 盾构机在上软下硬地层掘进时, 上部与下部岩土体强度差距较大, 且对原地层扰动较大, 掘进参数不易控制导致掘进速度相对较慢^[12]。但在掘进过程中约有 40%的掘进速度大于平均掘进速度, 且盾构掘进至 610~670 环时, 掘进速度稳定在平均值附近, 这表明合理的设置掘进参数, 可以使 ZTE 6250 型土压平衡盾构机在粉质黏土地层中掘进时, 具有较稳定的掘进速度。

4.4 中粗砂与花岗岩混合地层掘进参数分析

沙崂区间右线 671~738 环所穿越的地层为微风化花岗岩、强风化花岗岩并夹杂有部分中粗砂的地层, 该地层所对应的掘进参数如图 6 所示, 其中图 6 (a) 为推力、扭矩变化曲线, 图 6 (b) 为掘进速度、贯入度变化曲线。



(a) 推力、扭矩变化曲线



(b) 掘进速度、贯入度变化曲线

图 6 671~738 环掘进参数变化曲线

Fig. 6 Change curve of tunneling parameters of ring 671~738

由图 6 (a) 可得, 盾构机在本区段地层中掘进

时,总推力、刀盘扭矩控制在 5 118.6~17 600.5 kN、719.9~2 995.3 kN·m 之间,且该区段的平均推力为 9 033.4 kN、平均扭矩为 1 721.7 kN·m,因此均小于刀具装备推力 39 914.0 kN、刀盘装备扭矩 6 848.0 kN·m。由图 6 (b) 可得,贯入度与掘进速度保持在 2.6~20.8 mm/r、4.5~30.7 mm/min 之间,该区段的平均贯入度为 8.6 mm/r,平均掘进速度为 13.4 mm/min。可能造成的原因为,由于本区段地层复杂且含有硬岩,可能会造成刀具磨损量偏大,且该区段距离接收端较近,为了减少中途开仓换刀次数,采用较小的掘进参数进行盾构掘进,因此盾构机在本区段掘进时,受地质情况与刀具磨损控制影响较大,导致掘进参数偏小且波动较大,掘进速度相对较慢^[13-14]。当盾构机掘进至 710 环之后,掘进速度具有上升趋势,掘进速度平均值为 18.3 mm/min,因此可以表明通过设置与地层相适应的掘进参数,可以使 ZTE 6250 型土压平衡盾构机在硬岩地层中掘进时,具有较稳高的掘进效率。

5 不同地层刀盘与地层适应性对比

为了更好的分析盾构机刀盘与地层的适应性,将 4 种不同地层条件下的总推力变化范围、刀盘扭

矩、总推力平均值、扭矩平均值、贯入度平均值和掘进速度平均值进行统计,统计结果如表 2 所示。由表 2 可得,盾构机在 4 种不同的地层掘进时,总推力与刀盘扭矩均小于刀具装备推力与扭矩,且整个区间的平均掘进速度约为 40 mm/min,这表明 ZTE 6250 型土压平衡盾构机在本区间具有较高的掘进效率,因此刀盘与地层具有较好的适应性。而对于砂黏复合地层与粉质黏土地层来说,盾构机总推力、刀盘扭矩的波动范围较小,且平均值也较小,但贯入度与掘进速度均保持较高水平。对于上软下硬地层与硬岩地层来说,盾构机总推力、刀盘扭矩波动较大,且平均值也较大,但贯入度与掘进速度相对较小。因此,盾构机刀盘与粉质黏土地层与砂黏复合地层的适应性更好。造成此现象的原因为,粉质黏土地层与砂黏复合地层所占的总比例为 72.7%,因此盾构机刀盘设计以软土地层为主,其它地层为辅,从而导致在软土地层掘进时,盾构机刀盘与地层的适应性更好。

而对于软土地层来说,ZTE 6250 型土压平衡盾构机在粉质黏土地层掘进时的总推力比砂黏复合地层更小,且贯入度与掘进速度更大,即盾构机在粉质黏土地层掘进时可以消耗较小的推力产生较高的掘进速度与贯入度,因此刀盘与粉质黏土地层的适应性最好。

表 2 掘进参数统计表

Table 2 Statistics table of shield tunneling parameters

地层/掘进参数	总推力/ kN	刀盘扭矩/ kN·m	总推力平均值/ kN	扭矩平均值/ kN·m	贯入度平均值/ (mm/r)	掘进速度平均值/ (mm/min)
砂黏复合地层	5 043.0~16 820.8	731.4~1 806.2	10 444.2	1 114.2	51.4	58.6
粉质黏土地层	7 047.5~11 135.9	1 002.0~1 713.0	8 602.7	1 278.6	60.0	67.9
上软下硬地层	7 813.0~27 211.5	1 200.5~4 636.7	15 872.0	2 837.2	19.6	19.2
硬岩地层	5 118.6~17 600.5	719.9~2 995.3	9 033.4	1 721.7	8.6	13.4

6 结 论

(1) 通过借鉴深圳轨道交通 11 号线盾构隧道的成功经验,可以初步表明 ZTE 6250 型盾构机刀盘与本区间地层具有较好的适应性。

(2) 盾构机在 4 种不同的地层掘进时,总推力控制在 5 043.0~27 211.5 kN 之间,刀盘扭矩控制在 719.9~4 636.7 之间,均未超过刀具装备推力与扭矩,且整个区间的平均掘进速度约为 40 mm/min,因此刀盘与地层具有较好的适应性。

(3) 由于本区间粉质黏土地层与砂黏复合地层所占的总比例为 72.7%,因此盾构机刀盘设计以

软土地层为主,其它地层为辅,从而可以表明利用地层进行刀盘针对性设计是合理的。

(4) 盾构机在粉质黏土地层掘进时,消耗的推力最小,产生的掘进速度与贯入度最高,因此本区间盾构机刀盘与粉质黏土地层的适应性最好。

参考文献

- [1] 詹金武,李涛,郭朝,等.深圳复合地层 Φ7 m 土压平衡盾构刀盘地质适应性分析[J].土木工程学报,2017,50(S2):75-80.
ZHAN Jin-wu, LI Tao, GUO Chao, et al. Geological

- adaptability analysis of $\Phi 7$ m EPB shield cutterhead in mixed ground of Shenzhen[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(S2): 75-80.
- [2] 胡国良, 胡爱闽, 龚国芳, 等. 土压平衡盾构地层适应性设计理论和方法研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 256(16): 1916-1919.
HU Guo-liang, HU Ai-min, GONG Guo-fang, et al. Study on design theory and method of geology adaptability for earth pressure balanced shield tunneling machine[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 256(16): 1916-1919.
- [3] 何峰, 李小岗, 孙善辉. 北京铁路地下直径线泥水盾构刀盘、刀具适应性分析[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(12): 35-40.
HE Feng, LI Xiao-gang, SUN Shan-hui. The adaptability analysis of cutter tool to slurry shield of Beijing railway underground diameter line[J]. *Strategic Study of CAE*, 2010, 12(12): 35-40.
- [4] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 砂土地层盾构法施工的地层适应性模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1): 2902-2909.
XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming, et al. Model experimental study on stratum adaptability of tunnel excavation with EPB shield machine in sandy stratum[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S1): 2902-2909.
- [5] 江华, 江玉生, 张晋勋, 等. 大粒径卵砾石地层盾构刀盘选型及适应性评价[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(5): 119-124.
JIANG Hua, JIANG Yu-sheng, ZHANG Jin-xun, et al. Cutting wheel structure selection of EPB TBM and its adaptability evaluation in large particle size gravel strata[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2014, 36(5): 119-124.
- [6] 夏毅敏, 罗德志, 周喜温. 盾构地质适应性配刀规律研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(7): 1232-1236.
XIA Yi-min, LUO De-zhi, ZHOU Xi-wen. Study on the law of geology adaptability cutter selection for shield[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(7): 1232-1236.
- [7] 孙剑萍, 汤兆平. 盾构刀盘系统的设计适应性研究与评价[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(4): 27-36.
SUN Jian-ping, TANG Zhao-ping. Study and evaluation on the design adaptability of shield cutterhead system[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2020, 57(4): 27-36.
- [8] 吴沛霖, 李代茂, 陆岸典, 等. 海底隧道盾构刀盘刀具选型综述[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S1): 162-167, 193.
WU Pei-lin, LI Dai-mao, LU An-dian, et al. Cutter head and cutter selection of submarine shield tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(S1): 162-167, 193.
- [9] 宁锐, 郭朝, 黄明利. 深圳轨道交通 11 号线车公庙站—红树湾站区间复合地层 $\phi 7$ m 盾构刀盘的适应性分析[J]. *隧道建设*, 2015, 35(S2): 176-180.
NING Rui, GUO Chao, HUANG Ming-li. Analysis on adaptability of cutterhead of a $\phi 7$ m shield in composite ground: Case study on running tunnel from Chegongmiao station to Hongshuwan station on line 11 of Shenzhen rail transit system[J]. *Tunnel Construction*, 2015, 35(S2): 176-180.
- [10] 陈韶章, 洪开荣. 复合地层盾构设计概论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [11] 杨果林, 张沛然, 陈亚军, 等. 长沙典型地层土压平衡盾构掘进参数及表现预测[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2020, 51(8): 2069-2080.
YANG Guo-lin, ZHANG Pei-ran, CHEN Ya-jun, et al. Excavation parameters and performance prediction of earth pressure balance shield in typical strata of Changsha[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2020, 51(8): 2069-2080.
- [12] 郭卫社. 软硬不均地层盾构技术的思考[J]. *隧道建设*, 2016, 36(10): 1196-1201.
GUO Wei-she. Reflecting on technologies for shield tunneling in heterogeneous ground[J]. *Tunnel Construction*, 2016, 36(10): 1196-1201.
- [13] 赵博剑, 周建军, 谭忠盛, 等. 复合地层盾构掘进参数及其与地层相关性分析[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(S1): 140-144.
ZHAO Bo-jian, ZHOU Jian-jun, TAN Zhong-sheng, et al. Variation of shield boring parameters and correlation analysis in mixed ground[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(S1): 140-144.
- [14] 卢泽霖, 王旭春, 冯磊, 等. 复合地层盾构隧道近距离下穿桥基施工控制技术[J]. *青岛理工大学学报*, 2021, 42(2): 10-18.
LU Ze-lin, WANG Xu-chun, FENG Lei, et al. Construction control technology of shield tunnel passing through bridge foundation at close range in composite stratum[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2021, 42(2): 10-18.