

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.019

大粒径卵砾石地层盾构刀盘选型及适应性评价

江 华^{1,2}, 江玉生¹, 张晋勋², 杨志勇¹

(1. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 北京城建集团有限责任公司 博士后工作站, 北京 100085)

摘 要:大粒径卵砾石地层是北京地铁修建过程中开挖难度最大的地层之一,给土压平衡盾构施工造成了一系列的难题。刀盘是土压平衡盾构的重要构件之一,合理的刀盘结构型式是大粒径卵砾石地层土压平衡盾构高效、可靠运行的前提。为了找出适用于大粒径卵砾石地层的刀盘结构型式,以北京地铁九号线盾构工程为背景,开展大粒径卵砾石地层土压平衡盾构开挖原型试验,基于“北京地铁盾构施工实时管理系统”和“北京地铁建设安全风险技术管理体系”收集盾构关键施工参数,以现场掘进试验数据为基础,对盾构掘进效能、盾构关键参数地层适应性及刀具磨损情况进行了对比研究。研究表明:1)大粒径砂卵石地层辐条式刀盘适应性更好,掘进效率更高,对刀具的磨损控制更为有利;2)辐条式刀盘可适当增大开口率至55%~65%;3)大粒径卵砾石地层,辐条式刀盘比面板式土压力控制更加稳定;提高盾构掘进速度的同时,应注意盾构土压力的控制,合理的盾构推进速度应为20~60 mm/min。

关键词:大粒径卵砾石地层;现场试验;面板式;辐条式;地层适应性

中图分类号:TU 94.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)05-0119-06

Cutting Wheel Structure Selection of EPB TBM and Its Adaptability Evaluation in Large Particle Size Gravel Strata

Jiang Hua^{1,2}, Jiang Yusheng¹, Zhang Jinxun², Yang Zhiyong¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, P. R. China;

2. Postdoctoral Programme, Beijing Urban Construction Group Co., Ltd, Beijing 100088, P. R. China)

Abstract: Large particle size gravel strata layer is very difficult for TBM construction which brings about a series of problems for EPB TBM advancing in Beijing Metro. Cutting wheel is an important component of EPB TBM and cutting wheel with reasonable structure is essential for EPB TBM to advance steadily and effectively in large particle size gravel strata. In-situ EPB TBM advancing tests are carried out in large two adjacent shield interval where the strata conditions make it possible to find out the most efficient cutting wheel structure by monitoring key parameters through Real-time Information Management System. Based on the analysis and comparison of advancing efficiency, strata adaptability of key parameters and tools wearing, the following conclusions can be obtained: 1) Spoke cutting wheel has better strata adaptability and higher efficiency than panel cutting wheel as well as more advantages in controlling tools wearing. 2) open ratio ranging from 55% to 65% is the reasonable for cutting wheel. 3) Advancing speed and earth pressure are very important for EPB TBM construction. Compared with panel cutting wheel, spoke cutting

收稿日期:2014-02-08

基金项目:国家自然科学基金重点支持项目(U1261212);北京市科技计划项目(D08050600390803)

作者简介:江华(1984-),男,博士后,主要从事隧道及城市地下工程研究,(E-mail)alandavidrain@163.com。

wheel can obtained higher advancing speed and more stable earth pressure in tests. However the change of earth pressure should also be paid attention when EPB TBM advancing in fast speed. The advancing speed should be controlled in the range of 20 to 60 mm/min.

Key words: large size gravel stratum; in-situ tests; panel-type; spoke-type; stratum adaptability

随着科学技术的不断发展和城市化进程的不断加快,盾构工法以安全、高效、机械性能高、对周围环境及地层扰动小等优点,已经逐渐取代明挖、浅埋暗挖等工法,成为城市地下隧道修建的首选工法。但盾构要充分发挥其最佳设计性能,盾构选型至关重要,盾构选型不仅仅与盾构施工成本、盾构掘进进度有关,严重时还能影响整个工程的成败。刀盘位于土舱的前部,直接与开挖土体接触,一方面具有切削和排出渣土的功能,另外刀盘本身还具有支护掌子面的功能。因此,刀盘选型是盾构选型的关键,而刀盘的结构型式是盾构选型时需要确定的主要指标,是影响掘进性能的决定性因素。目前国内外常用的盾构刀盘型式主要有辐条式和面板式两种,在各种土层中采用哪种型式刀盘更合理一直是盾构对地层适应性研究的重要内容^[1-3]。

目前,尚没有定量地计算分析刀盘结构型式对地层适应性的文献,大多数研究主要基于模型试验,并取得了一系列的研究成果。如徐前卫等^[4-5]以北京地区砂土地层为研究对象,通过盾构掘进模型试验得出刀盘开口率是盾构掘进性能的重要影响因素,应根据地层对其进行专项设计。胡国良等^[6]研究了盾构掘进参数与地层的相互关系,分析了刀盘开口率与刀盘扭矩的相互影响规律。王洪新等^[7-11]开展了盾构模型试验,研究了刀盘开口率对盾构推力、刀盘扭矩、出土量的影响。宋克志等^[12]研究了刀盘结构型式及工程适应性特征,重点对辐条式和面板式刀盘进行了对比研究。

然而,盾构是一种机械化、专业化程度较高的隧道开挖设备,由于室内模型试验容易受到模型尺寸、设备相似度、开挖材料及测量精度等因素的限制,模型隧道开挖试验很难得到预期的试验结果。因此,开展盾构现场掘进试验,是得到精度的盾构-地层适应性特征的最好办法。

以北京地铁九号线大粒径卵砾石地层盾构工程为背景,基于北京地铁建设安全技术管理体系,选取2个地层条件类似的标段开展盾构现场掘进试验对比研究,通过研究辐条式和面板式两种常用刀盘在大粒径卵砾石地层中的适应性特征,总结出大粒径

卵砾石地层适应性更好的刀盘结构型式,为将来类似工程刀盘的设计、选型提供参考。

1 盾构隧道现场开挖试验

1.1 盾构试验条件

1) 地铁九号线 02 标“科一南”区间

北京地铁九号线 02 标段“科一南”区间隧道左线长为 746 m,采用海瑞克 S488 的土压平衡盾构进行现场试验,开挖直径 6.26 m,采用面板式刀盘,开口率约为 42%。盾构隧道主要穿越卵石⑤层,属于大粒径卵砾石地层,大粒径卵砾石含量高,卵砾石粒径大于 20 mm 的含量约占 80%~90%,粒径大于 200 mm 的漂石含量约占 15%~45%,其中漂石最大粒径 380 mm,卵砾石平均粒径 20~80 mm。地层中无地下水。

2) 地铁九号线 03 标“丰东—丰北”区间

北京地铁九号线 03 标“丰东—丰北”区间隧道左线长度 1 030 m,采用石川岛的土压平衡盾构进行现场试验,开挖直径 6.26 m,刀盘为辐条式结构,开口率约为 60%,盾构隧道主要穿越卵石⑤层,大粒径卵砾石的含量与 02 标基本相同,卵砾石粒径大于 20 mm 的含量约占 80%~90%,粒径大于 200 mm 的漂石含量约占 15%~45%;地层中揭露漂石最大粒径 400 mm,卵砾石平均粒径 20~80 mm。

1.2 试验过程分析

为尽量真实的反映盾构设备与地层的适应性特征,现场盾构掘进试验参数的选取尽量贴近实际工程施工控制标准。现场试验主要分两个阶段:第 1 阶段,北京地铁九号线 02 标段“科一南”区间现场试验;第 2 阶段,北京地铁九号线 03 标段“丰东—丰北”区间掘进试验。具体试验安排如下所示:

1) 第 1 阶段试验总历时 105 d,2010 年 1 月 17 日试验盾构始发,2010 年 5 月 1 日试验盾构到达,平均掘进速度每天 5.9 环,最大掘进速度每天 14 环。

2) 第 2 阶段试验总历时 121 d,2011 年 2 月 21 日盾构始发,2011 年 6 月 20 日试验盾构到达,平均掘进速度每天 7.0 环,最大掘进速度每天 31 环。

1.3 试验数据的采集与分析

现场试验数据设定、控制以“北京地铁建设安全风险技术管理体系”为准则,数据采集利用“盾构施工信息管理系统”。数据采集和分析过程如下:

1)利用数据传输软件通过预先布设的光纤将地下隧道盾构工控机上自动采集的数据传输至地面电脑;

2)利用数据传输软件通过 Internet 数据实时的从现场地面电脑传输至远程服务器(设置在北京地铁公司);

3)利用“盾构施工实时信息管理系统”访问服务器,对盾构施工参数进行分析和处理。数据传输过程如图 1 所示。

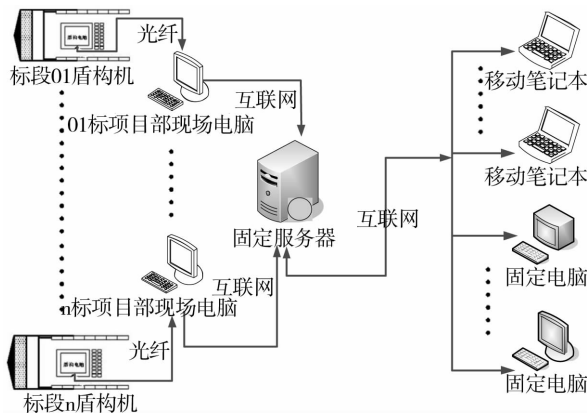
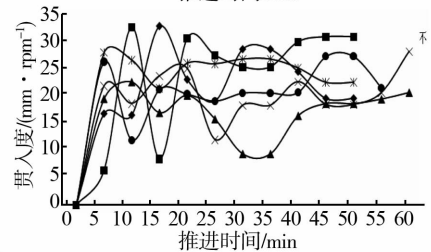
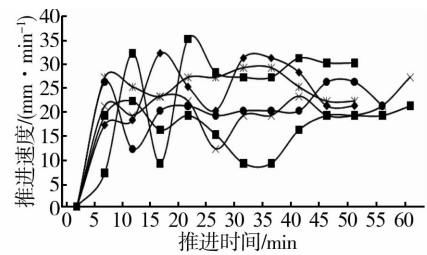


图 1 系统数据传输示意图

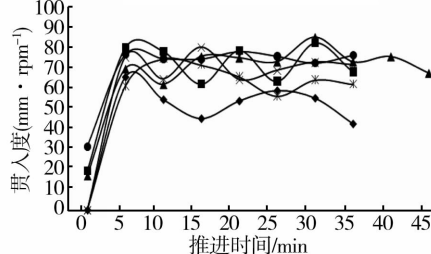
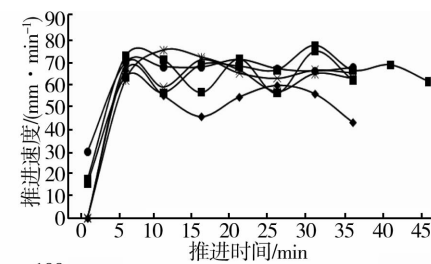
2 盾构掘进效能对比研究

面板式刀盘开口率较小,大多小于 45%,盾构在大粒径卵砾石地层掘进时,由于刀盘开口率的限制,不仅刀盘前方的大粒径卵砾石很难快速进入土舱,并顺畅的通过螺旋输送机排出;而且,滞留在刀盘前方和土舱内的大粒径卵砾石会和刀盘、刀具及搅拌装置发生 2 次或多次摩擦,大大增加盾构掘进负荷的同时,显著降低了盾构掘进开挖效率。现场试验结果表明:辐条式土压平衡盾构掘进效率比面板式盾构约高 3 倍,辐条式土压平衡盾构在大粒径卵砾石地层中掘进的适应性比面板式盾构更好,对盾构隧道开挖工期的控制更有把握。具体数据为:北京地铁九号线 02 标段“科一南”区间盾构平均速度约为 23 mm/min,平均贯入度约 22 mm/rpm,整个推进过程中时有推进速度和贯入度为零的情况发生,如图 2 所示;“丰东—丰北”区间盾构平均速度 67 mm/min,平均贯入度 75 mm/rpm,如图 3 所示。



注:■—41环 ■—45环 ●—51环 ●—55环 ×—61环 ×—65环

图 2 北京地铁九号线 02 标“科一南”区间推进速度及贯入度历时曲线



注:■—241环 ■—245环 ●—251环 ●—255环 ×—261环 ×—265环

图 3 北京地铁九号线 03 标“丰东—丰北”区间推进速度及贯入度历时曲线

3 盾构关键参数控制及地层适应性对比研究

3.1 上土压力控制及地层适应性对比研究

上土压力是指土舱顶部压力传感器记录的土压力值,由于上土压力对开挖面稳定性和地表变形最为敏感,因此常被用于研究。

现场试验结果表明:采用面板式刀盘时,盾构上土压力控制值偏小、波动范围大,易出现地表沉降超限和地面塌方等事故;相反,采用辐条式刀盘时,盾构上土压力控制的更为稳定,更有利于开挖面稳定及地表沉降控制。如图 4 所示,41 环盾构平均控制值约为 0.3 bar,且约有一半的时间上土压力小于

0.3 bar;如图5所示,上土压力平均控制值为0.53 bar,且大多数时间在0.45~0.60 bar范围内变化,对地表沉降控制非常有利。

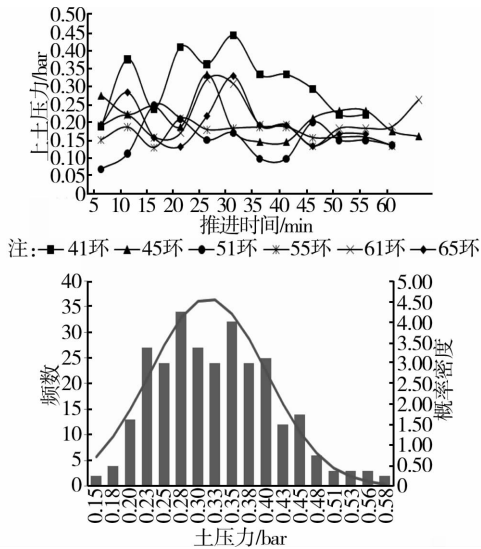


图4 北京地铁九号线02标“科一南”区间上土压力历时规律及分布特征

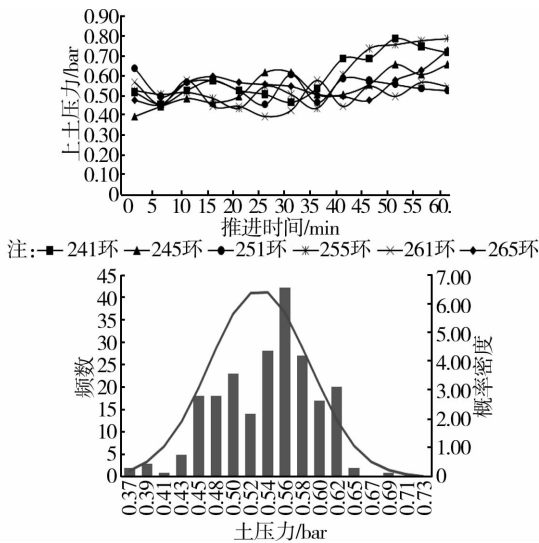


图5 北京地铁九号线03标段“丰东—丰北”区间上土压力历时规律及分布特征

3.2 盾构总推力控制及地层适应性对比研究

如图6、7所示,盾构正常推进过程中,采用面板式刀盘时,盾构总推力较小,约为8 000~12 000 kN;采用辐条式刀盘时,盾构总推力较大,约为19 000~24 000 kN。现场试验结果表明:辐条式刀盘开口率约比面板式高30%,但盾构总推力却高了约50%。由于除了地层条件,盾构总推力还受推进速度和贯入度的影响,因此,为了消除掘进速度和贯入度对盾构总推力的影响,将盾构总推力进行归一化处理,得到地

层识别参数场切深指数 FPI(FPI=盾构总推力/贯入度),用以评价盾构设备的地层适应性。如图10所示,面板式刀盘的场切深指数 FPI 约为辐条式刀盘的2倍,结果表明:在相同密实度和软硬程度的卵砾石地层,面板式刀盘单位贯入度需比辐条式刀盘需消耗约2倍的盾构总推力,即辐条式刀盘比面板式刀盘开挖效率更高,更适用于大粒径卵砾石地层盾构施工。

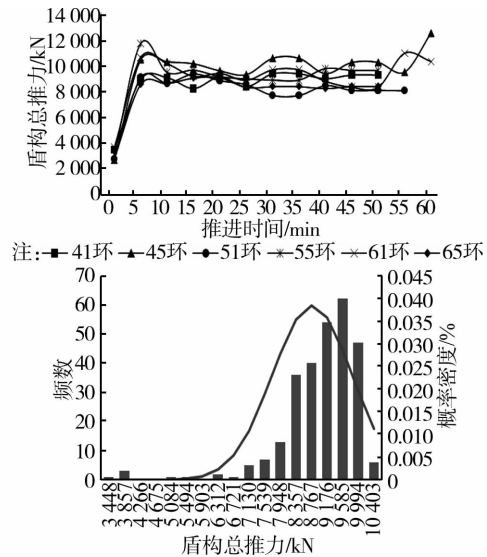


图6 北京地铁九号线02标“科一南”区间盾构总推力历时规律及分布特征

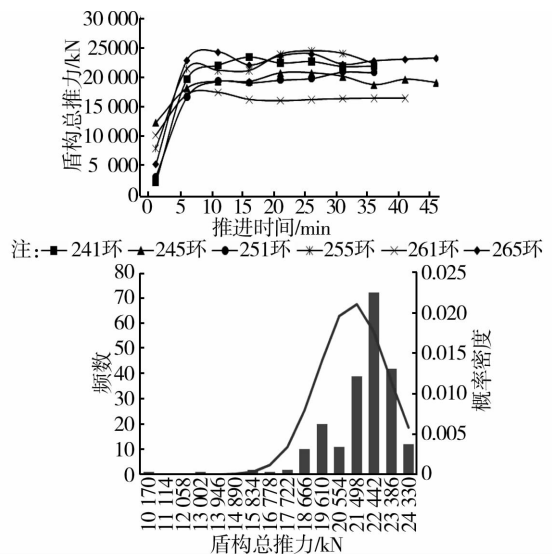


图7 北京地铁九号线03标段“丰东—丰北”区间盾构总推力历时规律及分布特征

3.3 刀盘扭矩控制及地层适应性对比研究

刀盘扭矩是表征土压平衡盾构掘进效能的一个综合性指标,刀盘扭矩控制的合理与否,对大粒径卵砾石地层盾构适应性至关重要。上述现场掘进试验表明:不管采用辐条式刀盘还是面板式刀盘,盾构在

大粒径卵砾石地层掘进时设备总体负荷偏大,掘进效能较低,如图8和图9所示。进一步分析可知,采用面板式刀盘时,刀盘扭矩波动范围较大,为1 135~5 200 kN·m;想反,辐条式刀盘的扭矩控制更为合理,浮动范围小,约为4 200~4 800 kN·m,如图9所示。

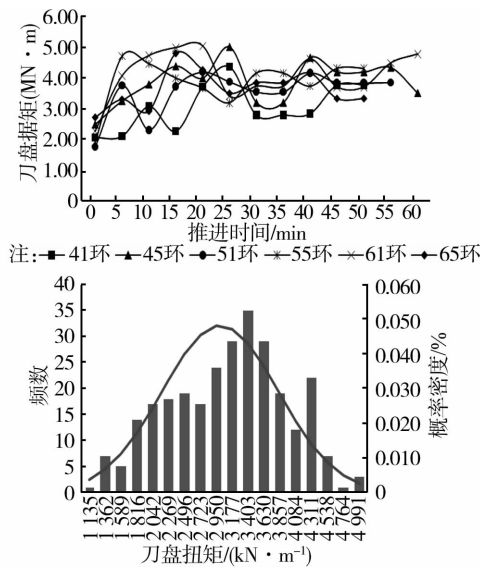


图8 北京地铁九号线02标段“科—南”区间刀盘扭矩历时规律及分布特征

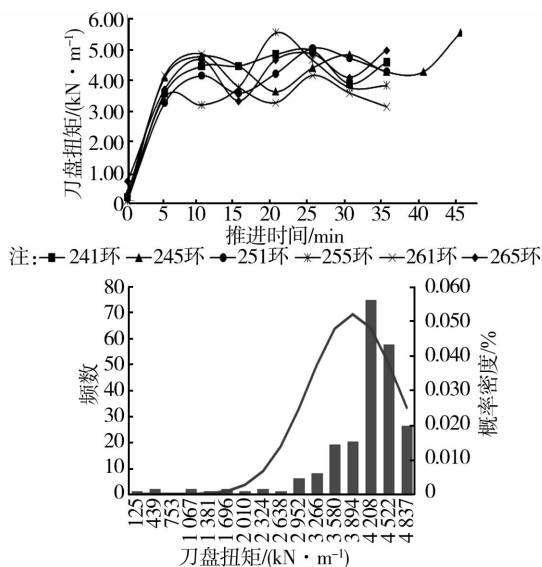


图9 北京地铁九号线03标段“丰东—丰北”区间刀盘扭矩历时规律及分布特征

类似于盾构总推力的分析方法,采用归一化参数扭矩切深指数 TPI ($TPI = \text{刀盘扭矩} / \text{贯入度}$) 表征盾构设备的适应性特征。如图10所示,面板式刀盘扭矩切深指数 TPI 约为辐条式刀盘的3倍,结果表明:在相同密实度和软硬程度的卵砾石地层,面板

式刀盘单位贯入度需比辐条式刀盘消耗约为3倍的扭矩。这一结论进一步验证了虽然辐条式刀盘总扭矩要高于面板式,但产生了更高的推进速度和贯入度,在大粒径卵砾石地层辐条式土压平衡盾构掘进效能和地层适应比面板式盾构更好。

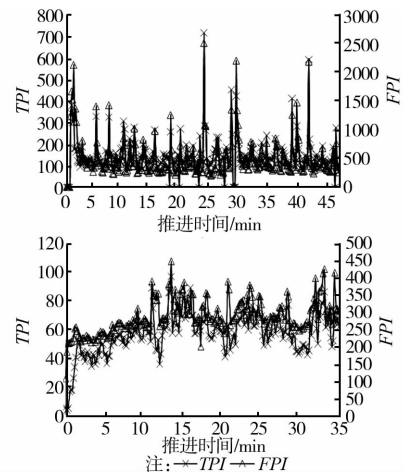


图10 北京地铁两个区间 FPI 和 TPI 的历时特征

4 刀具磨损情况对比研究

北京地铁九号线卵砾石地层卵石含量高、粒径大、属于强磨蚀性地层,控制刀具磨损和提高合理的换刀距离对盾构施工至关重要。现场掘进试验表明,刀盘结构型式对刀具磨损影响较大,其中面板式刀盘开口率较小,盾构掘进过程中,大粒径卵砾石很难快速进入土舱,卵砾石与刀具易发生2次或多次磨损,大大降低了刀具的正常使用寿命;采用面板式刀盘的“科—南”区间换刀距离较短,约为240 m;相反,辐条式刀盘由于开口率足够大,大粒径卵砾石一经开挖就能快速进入土舱,因此盾构掘进过程中刀具磨损相对较小,采用辐条式刀盘的“丰东—丰北”区间平均换刀距离约为400 m;结果表明:在大粒径卵砾石地层,相比面板式刀盘,辐条式刀盘对刀具磨损的保护和控制更为有利,减少了盾构换刀次数,提高了盾构掘进效率,降低了盾构施工成本。

5 结 论

以北京地铁九号线02标“科—南”区间和03标“丰东—丰北”区间盾构工程为背景,进行现场掘进试验,对大粒径卵砾石地层盾构掘进效能、关键参数地层适应性及刀具磨损情况进行了对比研究,得出了如下结论:

1) 从盾构掘进效能对比结果可知:大粒径卵砾石地层,辐条式刀盘比面板式刀盘地层适应性更好,

对盾构隧道开挖工期的控制更有把握。

2)从盾构上土压力的控制情况对比可知:大粒径卵石地层,辐条式刀盘比面板式刀盘更有利于开挖面的稳定和地表沉降的控制。

3)从盾构掘进关键参数地层适应性对比结果可知:相同地层条件下,贯入度相同的条件下,采用面板式刀盘比采用辐条式刀盘消耗更大的推力和刀盘扭矩。进一步表明大粒径卵石地层,辐条式刀盘比面板式刀盘掘进效率更高,与地层适应性更好。

4)大粒径卵石地层辐条式刀盘可以比面板式刀盘取得更高的开挖效率,但盾构施工中提高推进速度的同时应关注土压力变化,不宜过度强度提高盾构推进速度,建议将盾构推进速度控制在20~60 mm/min。

5)大粒径卵石地层,开口率更大的辐条式刀盘刀具的磨损比开口率相对较小的面板式刀盘小,采用辐条式刀盘可以有效提高刀具的换刀距离;建议适当增大刀盘开口率至55%~65%。

参考文献:

- [1] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘挤土效应及刀盘开口率对盾构正面接触压力影响[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 113-118.
Wang H X. Effect of cutterhead compressing the front soil and influence of head aperture ratio on contact pressure of EPB shield to the front soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 4 (7): 113-118.
- [2] 刘建琴, 郭伟, 黄丙庆, 等. 土压平衡盾构刀盘开口率与刀盘前后压差的关系[J]. 天津大学学报, 2011, 44(3): 659-664.
Liu J Q, Guo W, Huang B Q, et al. Relationship between aperture ratio and fore-and-back pressure of EPB shield cutter head [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 659-664.
- [3] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率选型及其对地层适应性研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 88-92.
Wang H X. Type selection of the head aperture ratio of EPB shield cutterheads and adaptability to stratum characteristics [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 88-92.
- [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(Sup): 2902-2909.
Xu Q W, Zhu H H, Liao S M, 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(Sup): 2902-2909.
- [5] Zhu H H, Liao S M, Xu Q W, et al. Experimental study on working parameters of earth pressure balance shield machine tunneling in soft ground [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2008, 2 (4): 350-358.
- [6] 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, 19(16): 1916-1919.
Hu G L, Hu A, Gong G F, et al. Study on design theory and method of geology adaptability for earth pressure balanced shield tunneling machine [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(16): 1916-1919.
- [7] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘扭矩计算及其与盾构施工参数关系研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 109-113.
Wang H X. Calculation of cutterhead torque for EPB shield and the relationship between cutterhead torque and shield driving parameters [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 109-113.
- [8] 张厚美, 吴秀国, 曾伟华. 土压平衡式盾构掘进试验及掘进数学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (S2): 5762-5766.
Zhang H M, Wu X G, Zeng W H. Study on tunneling experiment and mathematical model of EPB shield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S2): 5762-5766.
- [9] 王洪新, 傅德明. 土压平衡盾构平衡控制理论及试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40 (5): 61-68.
Wang H X, Fu D M. Theoretical and test studies on balance control of EPB shields [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (5): 61-68.
- [10] 王洪新, 傅德明. 土压平衡盾构掘进的数学物理模型及各参数间关系研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39 (9): 86-90.
Wang H X, Fu D M. A mathematical model and the related parameters for EPB shield tunneling [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (9): 86-90.
- [11] 李向红, 傅德明. 土压平衡模型盾构掘进试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1101-1105.
Li X H, Fu D M. Experimental study on excavation behaviour using model EPB shield with a diameter of 1.8m [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1101-1105.
- [12] 宋克志, 王本福. 常见盾构刀盘型式及选用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(6): 44-46.
Song K Z, Wang B F. Common types of shield cutter wheel and selection [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2007, 24(6): 44-46.

(编辑 胡玲)