

地铁盾构隧道衬砌管片施工质量控制措施

霍九坤

武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]随着国民经济的快速发展,城市轨道交通建设在全国各大城市正在如火如荼地进行着。因盾构法隧道施工具有机械化程度高、地表沉降小等特点,被广泛应用到地铁区间隧道建设中,但当采用盾构法进行隧道施工时,往往会出现管片错台、隧道渗漏水、破损等现象,影响管片拼装质量以及成型隧道的验收。本篇文章以武汉市轨道交通蔡甸线工程第四标段土建工程蔡甸广场站~凤凰山站区间为背景,从管片进场验收、管片防水材料粘贴、盾构掘进姿态控制、管片拼装以及壁后注浆等几方面介绍盾构法隧道衬砌管片施工质量控制措施。提高盾构隧道衬砌管片的拼装质量,减少管片修补和隧道堵漏等工作,提高经济效益。

[关键词]盾构隧道;管片错台;隧道渗漏;控制措施

DOI: 10.33142/ec.v5i2.5254

中图分类号: U2

文献标识码: A

Quality Control Measures for Lining Segment Construction of Metro Shield Tunnel

HUO Jiukun

Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: With the rapid development of national economy, the construction of urban rail transit is in full swing in major cities across the country. Due to the characteristics of high mechanization and small surface settlement, shield tunnel construction is widely used in subway tunnel construction. However, when shield method is used for tunnel construction, segment dislocation, tunnel leakage and damage often occur, affecting the segment assembly quality and the acceptance of formed tunnel. Based on the section from Caidian square station to Fenghuangshan station of the civil engineering project of the fourth bid section of Wuhan Rail Transit Caidian line project, this paper introduces the construction quality control measures of shield tunnel lining segments from the aspects of segment mobilization acceptance, segment waterproof material pasting, shield tunneling attitude control, segment assembly and grouting behind the wall, so as to improve the assembly quality of shield tunnel lining segments, reduce segment repair and tunnel plugging, and improve economic benefits.

Keywords: shield tunnel; segment dislocation; tunnel leakage; control measures

引言

随着国民经济的快速发展,城市轨道交通建设在全国各大城市正在如火如荼地进行着。城市轨道交通区间隧道施工方法主要有:明挖法、矿山法、暗挖法和盾构法等。随着近年来国内外盾构施工技术水平 and 国产化程度的不断提高,盾构法施工因其对周围环境影响小、自动化程度高、施工快速、优质高效、安全环保等突出特点,尤其是在地层条件差、环境情况复杂、地下水位高等情况下,盾构法具有明显的优越性,使其在地铁区间隧道施工中越来越受青睐。然而,盾构隧道衬砌往往会存在管片错台、隧道渗漏等现象,影响管片拼装质量和成型隧道的验收,需要耗费大量的人力物力进行管片修补和堵漏工作。

本文以武汉市轨道交通蔡甸线工程第四标段土建工程蔡甸广场站~凤凰山站区间为背景,从管片进场验收、管片防水材料粘贴、盾构掘进姿态控制、管片拼装以及壁后注浆等几方面介绍盾构法隧道衬砌管片施工质量控制措施。

2 工程概况

武汉市轨道交通蔡甸线工程第四标段土建工程包括

一站一区间:即蔡甸广场站和蔡甸广场站~凤凰山站区间,工程总造价为3.3亿元。凤凰山站~蔡甸广场站区间隧道全长1.93km,为左、右双线隧道形式,采用土压平衡盾构法施工,隧道衬砌管片外径6.0m,内径5.4m,管片厚300mm,隧道埋深11.1~19.4m,左右线间距9.9~15.4m,设置三个联络通道及一个泵房,其中3号联络通道与泵房共建。

2.1 工程地质情况

蔡~凤区间场地地貌单元上属剥蚀垄岗地貌,相当于汉江三级阶地。场地地势主体呈西底东高的趋势,地面高程一般在25.0~33.2m。地层由上至下依次为:表层为杂填土Qm1,其下主要为第四系全新冲、洪积Qa1+pl的黏性土层,第四系中更新统冲、洪积的Qa1+pl的黏性土层、砂土层,残积黏土Qe1,下伏基岩为二叠系栖霞组P1q灰岩、炭质灰岩、三叠系大冶组T1d的泥灰岩、灰岩和泥盆系五通组D3w石英砂岩、泥质砂岩夹石英砂岩以及志留系中统纹头组S2f泥岩、泥质粉砂岩。本区间隧道范围内地质主要为:(10-2)黏土层、(19a-1)强风化石英砂岩、(19a-2)中风化石英砂岩、(19b-1)强风化泥质砂岩夹

石英砂岩、(19b-2)中风化泥质砂岩夹石英砂岩、(20a-1)强风化泥岩和(20a-2)中风化泥岩。隧道范围内土层物理力学参数如表1所示。

表1 土层物理力学参数

土层代号	密度 /g/cm ³	内摩擦角/°	粘聚力 /kPa	承载力特征值/kpa	压缩模量 /MPa	单轴抗压强度/MPa
10-2	2.0	47.5	15.5	420	11.1	/
19a-1	2.9	/	/	1000	56	30~50
19a-2	3.0	/	/	3000	/	50~100
19b-1	2.6	/	/	400	42	10~30
19b-2	2.7	/	/	1200	/	10~30
20a-1	2.7	/	/	1000	/	10~30
20a-2	2.6	/	/	400	42	10~30

2.2 工程水文情况

(1) 隧道所处地层主要为不透水地层和裂隙相对发育的坚硬岩、软岩等地层；

(2) 地表水系不发育；

(3) 上层滞水水量不大，水位不连续，无统一自由水面；

(4) 几乎未见孔隙承压水，未能实测其水位；

(5) 基岩裂隙水主要赋存于场地碎屑岩（泥岩、泥质粉砂岩、石英砂岩、泥质砂岩夹石英砂岩）的节理裂隙及其破碎带内，补给方式主要由上覆含水层下渗补给，本地碎屑岩中节理、裂隙多被泥质充填，水量极贫乏。

3 成型管片质量控制难点

蔡甸广场站~凤凰山站区间盾构穿越长距离老黏土、硬岩地层、软岩地层、软硬不均地层（上软下硬地层和上硬下软地层），盾构穿越该类地层时，造成盾构隧道成型管片错台、渗水、边角破损的主要原因，即该工程成型管片质量控制难点，有以下几点：

3.1 管片上浮

在盾构推进过程中，一般有1~2环管片位于盾尾内。盾尾内管片受到推进千斤顶推力及盾壳对管片有较强的约束作用；随着盾构推进，管片逐渐脱离盾尾，管片受到盾构机约束减弱，并受同步注浆浆液浮力作用，管片发生上浮；盾构开挖是卸载过程，管片的重量远小于开挖土方的重量，即衬砌管片底部处于卸载状态，周边围岩会产生回弹收敛；然而，由于凤~蔡区间地层为老黏土、软硬不均、硬岩等地层，地层自稳性较好，拱效应的明显，隧道围岩收敛变形较小、速率较慢，因此地层对管片没有及时形成约束，使盾构掘进过程中控制管片上浮成为该工程的一大难题。部分管片上浮造成管片环缝连接、纵缝连接处发生错台、边角破损及渗漏。

3.2 盾构掘进姿态的控制

凤~蔡区间盾构机须穿越部分“上软下硬，上硬下软、

左右不均、软硬突变”复合地层，上部为较软的黏土层，下部为坚硬的岩层，盾构掘进过程中姿态控制困难：盾构机极易向较软弱的土层方向掘进，出现盾构机“抬头”或“栽头”事故，并伴随盾构刀盘刀具偏磨以及管片姿态偏差大成型管片不满足设计规范要求等事故。①改变了推进油缸与撑靴支撑的管片之间平行关系，使管片与推进油缸之间形成一定的夹角，使管片受力不均而造成管片破损。②管片与推进油缸之间形成夹角，则推进油缸施作给管片的力对管片形成扭矩，使管片发生扭转，又管片之间采用刚性螺杆连接，螺杆将阻止管片发生扭转，造成管片错台、破损等现象。

4 管片拼装技术要点及质量控制措施

盾构管片拼装的施工流程：管片进场检查→防水材料粘贴及粘贴质量检查→管片选型及吊装下井→电瓶车将管片运至盾尾→管片吊装卸车、管片短驳→盾尾清理→缩回安装位置油缸→管片就位→拼装管片→管片螺栓连接→管片脱离盾尾后→二次紧固螺栓→三次紧固螺栓。

4.1 管片外观质量控制

管片进场检查时要确认管片出厂合格证、标识、管片是否崩角、破损、裂缝、露筋，吊装孔是否完好以及是否被堵塞，若有崩角、破损等现场时，组织对破损处进行修补避免因管片破损而引起管片渗漏水，影响拼装质量。

4.2 管片防水材料粘贴控制

防水材料粘贴质量的好坏直接影响隧道渗漏水情况。盾构隧道衬砌管片主要防水材料为：三元乙丙橡胶密封胶垫、丁腈软木橡胶传力衬垫、自粘性橡胶薄板、缓膨胀型遇水膨胀止水条、螺栓孔密封圈等，粘结剂采用单组份氯丁-酚醛粘结剂。

管片防水材料粘贴质量控制要点：

①检查防水材料是否破损；

②管片表面应干燥洁净，避免管片表面存在灰尘或潮湿而使材料粘贴不老；

③涂刷粘结剂时，要涂刷均匀饱满，且凉置5分钟后待手指接触不粘时，再进行防水材料粘贴；

④为加强弹性密封垫角部防水和防止拼装时碎裂，在密封垫外角部覆贴自粘性橡胶薄板；

⑤为加强防水效果在管片两端增加缓膨胀型遇水膨胀止水条。为防止止水条提前膨胀，需在止水条3个外露面均涂刷缓膨胀剂两遍，两次涂刷间隔不少于30分钟。

管片防水材料粘贴时，必须按照规定进行粘贴，防止由于粘贴不正确造成管片在拼装时受力不均而碎裂。管片防水材料粘贴完毕后需静置12小时才能吊装下井拼装。管片防水密封质量应符合设计要求，不得缺损、耸肩、塌肩、空鼓及翘边，粘结应牢固、平整，防水垫圈不得遗漏。

4.3 盾构掘进姿态控制

盾构掘进的过程中，盾构机的运动轨迹可以近似地看

成是围绕设计轴线的曲线,通过不断地调整各个分区的盾构推进油缸确保盾构掘进姿态,保证盾构掘进成型的隧道轴线与设计隧道轴线偏差在设计规范规定范围内,达到验收质量合格要求。一般土压平衡盾构有 32 个推进油缸,分为 4 个区,即 A 区位于上方 6 个推进油缸、B 和 D 区位于左侧和右侧每侧 8 个推进油缸、C 区位于下侧 10 个千斤顶。在推进过程中有时存在各个区位的千斤顶伸缩不一致,使管片受到偏心压力,传递至已经安装管片上产生扭矩作用,在扭矩作用下管片产生上浮,影响管片拼装质量。

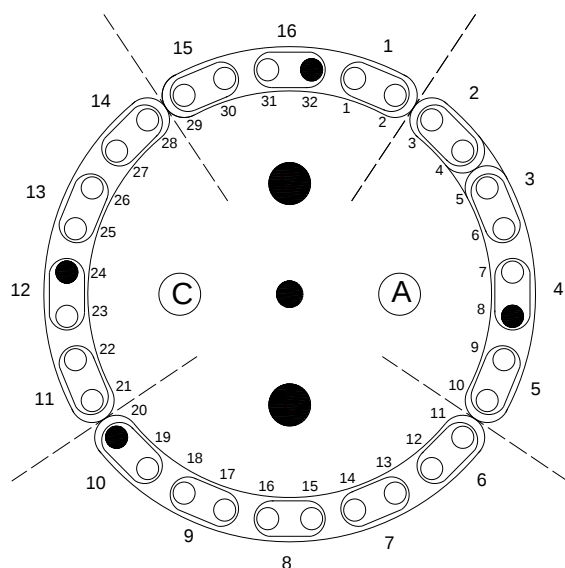


图 1 油缸分区图

针对该问题,在推进过程中采取以下措施:

由于盾构姿态采取一次过量纠偏会使管片受力不均且容易造成土体扰动现象,反而影响管片拼装质量,所以在推进工程中首先要把控盾构姿态,其次采取少量多次逐渐纠偏的方式进行纠正。在逐渐纠偏过程中要保持盾构中心线对称区域的推进油缸之间的推力差小于 5MPa,且形程差控制在 120mm 内。另外,针对由于管片上浮而导致的管片拼装质量,在盾构掘进时将盾构推进轴线高程调至设计轴线以下 50mm,用于抵消管片衬砌后期的上浮,保证成型隧道质量验收达到设计规范要求。

4.4 管片拼装过程控制

管片拼装过程控制是保证管片拼装质量最重要的环节,管片拼装质量的好坏直接影响后期管片错台、渗水等现象的发生。为了保证管片拼装的质量,在管片拼装时注意以下几点:

①盾构油缸推行程一定要满足管片拼装的要求。本区间采用管片宽度 1500mm,封顶块 K 块拼装时要求径向搭接 2/3,然后再纵向插入,为了满足拼装要求推进油缸行程最小行程不应小于 1750mm,最大不超过 1850mm。

②管片拼装前,盾尾夹仓必须清理干净,里面不能有泥浆或小石块,以免使落地块拼装时,无法使其与上一环管片环面相平而导致管片错台。且拼装前一定选择好管片拼装点位,贴别是第一块管片的位置将影响整环管片成型的质量。

③在使用拼装机拼装管片时要注意对管片的保护,特别是防水材料的保护,做到匀速操作,避免管片碰撞。

④管片拼装要把握好管片环面的平整度、环面的超前量以及椭圆度,还要用水平尺将第一块管片与上一环管片精确找平,不合格时及时纠正,直到椭圆度满足规范要求后方可进行下一环的推进。管片拼装过程中应对隧道轴线和高程进行控制,应符合表 2 要求:

表 2 管片拼装质量要求

项目	隧道轴线平面位置	隧道轴线高程	衬砌环直径椭圆度	相邻管片的径向错台	相邻管片环面错台
允许误差/mm	±50	±50	±5%D	5	6

注: D 指隧道的外直径,单位: mm

⑤管片拼装施工中需要按照一定频率测量管片圆环环面与隧道设计轴线的垂直度,当管片超前量超过控制量时,及时调整管片旋转角度,从而保证管片环面与隧道设计轴线的垂直度。

⑥拼装时千斤顶交替收回,即安装哪段管片收回哪段相对应的千斤顶,其余千斤顶仍顶紧,严禁同时收缩。管片安装到位后,及时伸出相应位置的推进油缸顶紧管片,且及时调整其顶推力,防止盾构姿态发生突变对已拼装的管片产生伤害。

⑦每安装一块管片,立即将管片纵环向连接螺栓插入连接,并戴上螺帽用电动扳手紧固,初次拧紧时扭矩不得小于 300 N.m。在整环管片脱出盾尾后,再次拧紧全部连接螺栓,扭矩值达到 700~950N.m。

4.5 壁后注浆控制

4.5.1 同步注浆

同步注浆是填充衬砌管片和围岩之间空隙,防止地表变形和隧道渗水一道重要的工序,也是保证管片拼装质量的一道重要工序。应根据不同的地质情况和出土量控制好注浆压力和注浆量等参数。注浆压力的设定应根据以下公式确定:

$$P=P_1+P_2+P_3 \quad (1)$$

其中, P_1 —该注浆点位的泥水压力值 (Pa); P_2 —注浆管承载压力值,根据不同盾构机而不同,一般为 200kpa; P_3 —注浆压力差,一般取 150kpa。

根据盾构机开挖直径以及隧道衬砌管片外径确定每环管片的理论注浆量。该区间的盾构机开挖直径为 6.28m,盾构隧道衬砌管片外径 6.0m,每环管片宽度 1.5m,则该

区间理论注浆量为:

$$V = \pi / 4 \cdot (D_{12} - D_{22}) \cdot l = \pi / 4 \cdot (6.282 - 6.02) \cdot 1.5 = 4.05 \text{ m}^3 \quad (2)$$

根据设计要求实际注浆量为理论注浆量的150%~200%，即 6.08~8.1 m³，统计该区间实际注浆量在 6.0~6.5 m³，满足要求且注浆效果良好。

4.5.2 二次补浆

为弥补同步注浆凝固收缩、在地层中的扩散出现局部填充不均匀、不密实等缺陷，提高管片衬砌背后同步注浆层的防水性及密实度，加强保护隧道衬砌管片，在管片脱出盾尾 5~10 环后立即进行二次补浆处理。

根据现场监测情况反馈和所处地质情况，决定二次补浆采用单液浆或者是双液浆。①一般而言，二次补浆采用单液浆，水泥和水的质量比为 1:1。②根据隧道埋深计算注浆处静止水压及土压力之和，一般情况二次注浆压力比此数值大 0.3~0.5 MPa；若注浆后，止水效果不佳，可适当增加注浆压力。③一般根据地表监测情况和地质情况由注浆压力控制注浆量。

4.5.3 控制浆液稠度

注浆浆液的配比直接影响注浆质量，在施工过程中要根据掘进地层（黏土地层盾构掘进较快 20~40mm/min，硬岩地层盾构掘进慢 5~15mm/min）、浆液运距等调整浆液配比，做到有准备性注浆而非盲目注浆。根据地质不同合理调整水泥以及粉煤灰用量调整浆液稠度，缩短浆液凝固时间，保证浆液凝固时间在 4 小时内（现阶段注浆满足此要求），使浆液快速形成具有一定强度的固体，并且降低浆液被稀释和浆液分层离析的概率，保证浆液充填效果。

5 质量控制效果

在施工中，通过加强现场管理及相关质量管理措施，武汉轨道交通蔡甸线第四标段土建工程蔡甸广场站~凤凰山站盾构区间成型管片质量现场实体质量、盾构隧道贯通测量均满足设计、规范要求，验收合格。



图2 第三方隧道贯通测量



图3 成型隧道外观质量

6 结论

盾构隧道衬砌管片的拼装质量是盾构隧道工程的重点，直接影响盾构成型隧道的质量验收。通过本文分析总结和现场实际施工效果得出，在长距离黏土地层、硬岩地层和上软下硬，上硬下软、左右不均、软硬突变”复合地层中盾构掘进，可以通过以下措施控制管片质量：

(1) 施前准备好：盾构管片拼装成环前，要做好管片进场的外观质量验收、防水材料的粘贴方式及粘贴效果的验收、管片运输工程中的保护等各项工作，确保管片拼装前的质量。

(2) 施中控制好：盾构掘进过程中，通过加强盾构姿态预判性、提前调整、及时调整、多次调整、单次微调盾构掘进姿态控制盾构掘进姿态；拼装过程中匀速运动，减少管片强劲撞击；管片螺栓实行多次复紧施工措施，能

够较大程度地减少围岩应力释放而产生的管片破损。

(3) 施后填充好: 管片拼装完成后, “多次少量”及时填充管片与围岩之间的空隙, 根据不同地层调整注浆浆液的粘稠度, 对管片及时形成包裹约束力, 能有效减少管片上浮造成的管片错台、渗水等现象。

[参考文献]

- [1] 常江, 赵一, 王岩. 盾构隧道管片上浮原因分析及控制措施[J]. 市政技术, 2010, 3(28): 123-125.
- [2] 陈馈, 洪开荣, 焦胜军. 盾构施工技术(第二版)[M]. 北京: 人民教育出版社, 2016.
- [3] 李宏安, 赵德海. 北京地铁 10 号线区间隧道盾构施工质量控制要点[J]. 铁道标准设计, 2008(12): 76-78.
- [4] 吴雷. 盾构法地铁管片拼装质量控制[J]. 隧道建设, 2006, 26(2): 41-43.
- [5] 黄士兴. 地铁隧道盾构法施工的质量标准和质量控制[C]. 上海: 中国土木工程学会隧道与地下工程学会地铁专

业委员会第十二届学术交流会论文集, 1998.

- [6] 杨一才. 软土盾构区间管片上浮及破损控制技术研究[C]. 山东: 2014 中国青岛城市轨道交通管理和技术创新研讨会论文集, 2014.
 - [7] 王彦会. 浅谈地铁盾构管片拼装质量控制措施[J]. 广东土木与建筑, 2009, 16(12): 29-31.
 - [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T164-2011 盾构隧道管片质量检测技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
 - [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50446-2011 盾构法隧道施工与验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- 作者简介: 霍九坤(1990.3-)男, 毕业院校: 中国矿业大学(北京); 所学专业: 建筑与土木工程, 当前就职单位武汉市政建设集团, 职务分公司副职, 职称级别中级工程师, 主要从事地下工程施工技术研究、管理。