

DOI: 10.7672/sgjs2024150047

# 超大直径盾构隧道双液同步注浆工艺与应用效果分析\*

孙旭涛

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司,江苏 南京 211800)

[摘要] 对北京东六环路改造工程超大直径盾构隧道双液同步注浆设备、地面拌合设备等进行介绍,考虑双液浆快凝特性,采用特制注浆设备有效解决了双液浆堵管问题,有效避免因堵管造成的施工问题。提出使用膨润土封堵盾尾的措施,防止停机后盾构机被双液浆包裹,保护盾尾止浆板、钢板束和盾尾刷不被破坏。盾构机掘进过程中,需控制注浆量、注浆压力、注浆速度。本工程盾构机掘进引起的地表沉降可控制在13mm以内,管片浮动量基本为-5~10mm,可知双液同步注浆可有效控制地表沉降及管片上浮。

[关键词] 隧道;盾构;注浆;沉降;施工技术

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)15-0047-05

## Analysis on Double Liquid Synchronous Grouting Technology and Application Effect of Super Large Diameter Shield Tunnel

SUN Xutao

(China Railway 14th Bureau Group Big Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China)

**Abstract:** The double liquid synchronous grouting equipment and ground mixing equipment of super large diameter shield tunnel in Beijing East Sixth Ring Road Reconstruction Project are introduced. Considering the rapid solidification characteristics of double liquid slurry, the special grouting equipment is used to effectively solve the problem of double liquid slurry plugging and effectively avoid the construction problems caused by plugging. The measures of using bentonite to seal the shield tail are put forward to prevent the shield machine from being wrapped by double liquid slurry after shutdown, and to protect the shield tail slurry stop plate, steel plate bundle and shield tail brush from being destroyed. In the process of shield tunneling, it is necessary to control the grouting volume, grouting pressure and grouting speed. The surface settlement caused by shield tunneling in this project can be controlled within 13mm, and the floating amount of segments is basically -5~10mm. It can be seen that double liquid synchronous grouting can effectively control surface settlement and segment floating.

**Keywords:** tunnels; shields; grouting; settlement; construction

### 0 引言

盾构法因其具有安全高效、优质环保等特点,已成为隧道施工主要方法之一<sup>[1]</sup>。在盾构隧道掘进过程中,盾尾同步注浆作为重要工序之一,对管片早期稳定、控制地表沉降和地层变形等起到重要作用<sup>[2-3]</sup>。

目前我国隧道工程采用的同步注浆材料主要分为单液浆和双液浆。由于单液浆具有良好的流动性、离析少、运输性能好和凝固后期强度高等特点,

已得到大量工程应用<sup>[4]</sup>。

邹翀<sup>[5]</sup>结合广州地铁2号线盾构隧道工程,对单液浆配合比选择和同步注浆工艺进行了总结;孙立功等<sup>[6]</sup>以广州地铁3号线盾构隧道为背景,对不同地层下同步单液注浆参数进行总结分析;高鹏鹏等<sup>[7]</sup>以南南通市富水砂层轨道交通1号线工程为背景,研究不同性能单液浆对盾构施工参数的影响规律;颜静等<sup>[8]</sup>通过对比研究同步单液注浆参数,提出了适用于苏州地区盾构隧道地表沉降同步注浆控制措施;路开道<sup>[9]</sup>以常德沅江过江盾构隧道工程为背景,引入絮凝剂并对其单液浆抗水分散性进行优化,给出适用于富水地层的单液浆配合比。

\* 国家自然科学基金(52178398)

[作者简介] 孙旭涛,工程师,E-mail:526979174@qq.com

[收稿日期] 2024-04-18

相比单液浆,双液浆具有凝结时间快、浆液不易流失等特点,已有学者通过开展室内试验对不同双液浆材料性能和配合比优化进行了研究<sup>[10-15]</sup>,但在实际施工过程中双液浆易造成堵管,对现场施工组织要求高。盾构隧道双液同步注浆工艺、施工控制等技术有待完善,需研究双液浆属性对施工的影响<sup>[16-18]</sup>。

## 1 工程概况

北京东六环路改造工程南起京哈高速以南约2km处,北至潞苑北大街,路线全长16km,按车速80km/h、高速公路标准设计,全线分为直接加宽段和入地改造段,直接加宽段标准断面由现状双向4车道向两侧加宽至双向6车道,入地改造段以分离式隧道形式布置于现状六环路西侧绿化带内。路线自张采路以北入地,连续穿越京津公路、张家湾铁路、滨河路、北运河、广渠路、地铁6号线、京秦铁路、通胡路、减河、通燕高速、京榆旧线,京榆旧线北侧爬升至地面,线路走向如图1所示。

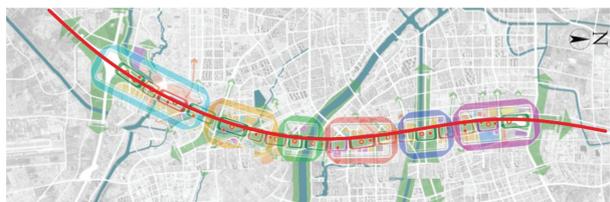


图1 线路走向

Fig.1 Route direction

盾构隧道段管片外径达15.4m,超大直径泥水盾构单次掘进距离长达7.4km。盾构机最大开挖直径达15.97m,整机长度155m,总重约4300t,额定扭矩5328kN·m,最大推力 $2.22 \times 10^5$ kN,配置了常压换刀、伸缩主驱动、超大直径重载管片高效倒运及拼装、高效大功率泥水环流、高精度开挖面气液独立平衡控制系统等,同时搭载了管环收敛测量、管环平整度检测、管环选型、自动盾尾间隙测量、双液同步注浆、三通闭塞器换管系统。

本工程隧址区为第四纪沉积层,主要由古金沟

河及古潮白河冲积形成。土层主要以砂土、粉土与黏性土交互层为主(见图2),局部分布有少量圆砾、卵石层,粒径 $\leq 20$ cm。区间盾构隧道长距离穿越高致密砂层,覆土埋深10~59m,平均覆土埋深20m,最大纵坡坡度3%。

勘察期间长期水位观测资料表明,地表以下9.0~10.0m进入了潜水层,近3~5年的平均水位标高为15.000m,隧址区砂、卵砾石层内分布了多层承压水。

## 2 施工重难点

根据区间盾构隧道工程地质、地下水情况及实际情况,施工过程中存在以下重难点。

1) 盾构隧道段管片外径达15.4m,盾构机掘进对周边地层影响大。

2) 盾构隧道段穿越地层主要为粉细砂、中砂、粉质黏土等,地层透水性高,存在前仓不能保压等问题。

3) 部分区间埋深大,地下水丰富且承压水头高,最大水压约达0.59MPa,施工过程中存在喷涌等问题。

4) 区间盾构隧道下穿道路、轨道、河道、重要专业管线,需控制因素多。

## 3 超大直径盾构隧道双液同步注浆施工技术

相比于单液浆,水泥-水玻璃双液浆化学胶凝时间可达10s左右,该特性导致双液同步注浆施工工艺和注浆控制方面均与单液注浆存在较大差异,因此,从注浆设备和注浆控制方面研究本工程超大直径盾构隧道双液同步注浆施工技术。

### 3.1 双液同步注浆系统

本工程超大直径盾构隧道双液同步注浆系统主要组成部分包括地面拌合设备、注浆设备及控制系统。

#### 3.1.1 地面拌合设备

地面拌合设备主要由A液泵及A液罐、B液泵及B液罐、压力开关、电磁流量计、注浆阀组、清洗水泵及水箱、通管设备等组成,包括4个100t水泥

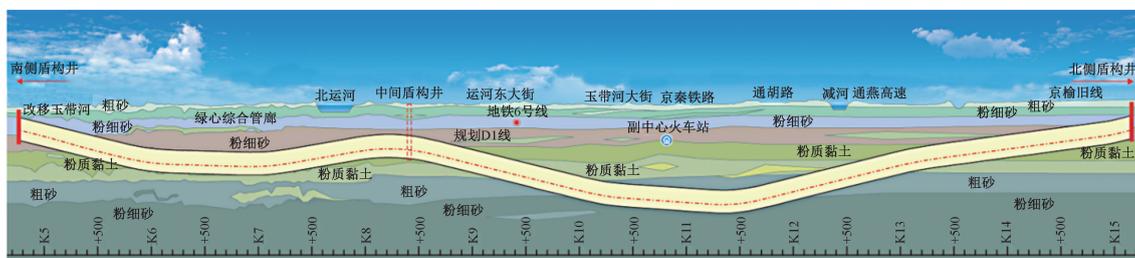


图2 土层分布

Fig.2 Soil layer distribution

罐(A液储存罐)、2个100t膨润土罐、5个B液储存罐、1个稳定剂储存罐、2台膨润土制浆机、4台A液制浆机等,如图3所示。

盾构机正常掘进时,1台膨润土制浆机+2台A液制浆机为1套制浆单元,其可满足正常掘进浆液拌制需求,另外1套制浆单元作为备用,随时满足盾构机正常掘进需求。

### 3.1.2 注浆设备

双液同步注浆设备主要由软管泵、盾尾注浆管、压力传感器、液位传感器、流量计、气动球阀、手动阀门、A液罐、B液罐、污水罐、注浆管路、清洗管路等组成,可控制地表沉降,防止管片变形和隧道上浮,进而保证管片缝隙防渗防漏。

盾构机配有8台变频驱动的A、B液软管泵,通过盾尾注浆管将A、B液混合后注入环形间隙中。双液同步注浆时,首先使盾构机处于初始状态,推动推杆使之伸出到位,活塞封闭盾尾注浆口,防止外界浆液及渣土进入注浆管内,A液管和反冲洗水管内充满上道工序完成后留下的清洁工业水(见图4a);其次盾构机推进20~30mm,推进速度稳定时开始注入A液,拉动推杆使之缩回到位,活塞缩回后盾尾注浆口打开(见图4b);然后待A液注入10s后启动B液泵开始注入B液,A、B液在B液喷头处混合为均匀的胶凝材料即双液浆,在盾构机推进的同时进行双液同步注浆(见图4c);最后在结束推进前1min(推进距离剩余20~30mm)停止注浆,首先停止B液注入,10s后停止A液注入,A液停止注入后推动推杆使之伸出到位,将注浆管内残留的胶凝材料推出注浆口,并用流动的清洁水经推杆冲洗注浆管内的A液,令其从A液注浆管逆向排出,保持管道清洁,防止管道堵塞(见图4d)。

## 3.2 双液同步注浆控制

### 3.2.1 浆液有效性

双液浆注入5~17s内处于胶结状态,注入10~

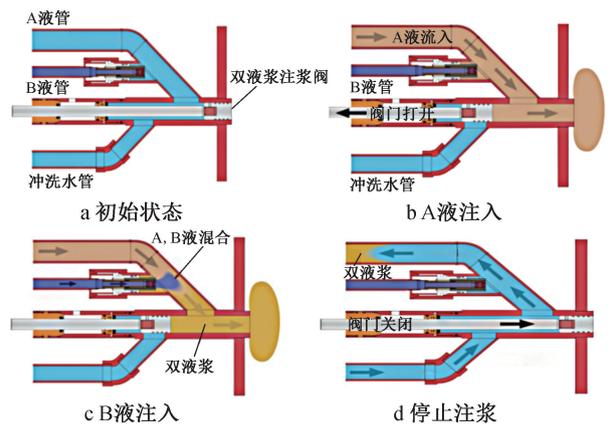


图4 双液同步注浆流程

Fig. 4 Double liquid synchronous grouting process

25min维持塑性状态(初凝),注入30min后强度增大(终凝)。为确认所用浆液有效性,测量始发掘进后前20环管片中至少5环管片及此后100环管片中至少1环管片收敛、横向位移、竖向位移。初级注浆至备用二次注浆期间管片竖向位移不得超过 $\pm 5\text{mm}$ 。

### 3.2.2 管路清洗与盾尾封堵

盾构机掘进过程中会因设备故障、刀具更换等因素长时间停机,停机前需对注浆管路、盾尾、注浆泵、储存罐等进行清洗和保护,确保盾构机能够正常恢复掘进。

本工程盾构机长时间停机时,在掘进最后20~30cm过程中同步注入高浓度膨润土,进行管路清洗及盾尾封堵,膨润土仅产生膨化,不会凝固,且无强度,注入过程中可将管道内液浆挤出,起到封堵管路和盾尾的作用,管路清洗干净后盾构机可正常恢复掘进,且对止浆板、钢板束、盾尾刷不会造成影响,保证结构安全。

### 3.2.3 注浆参数控制

根据地质条件、注浆方式、管片强度、设备性能、浆液特性和隧道埋深等确定注浆压力,根据注浆速度控制注浆量,为避免浆液进入盾构机土仓

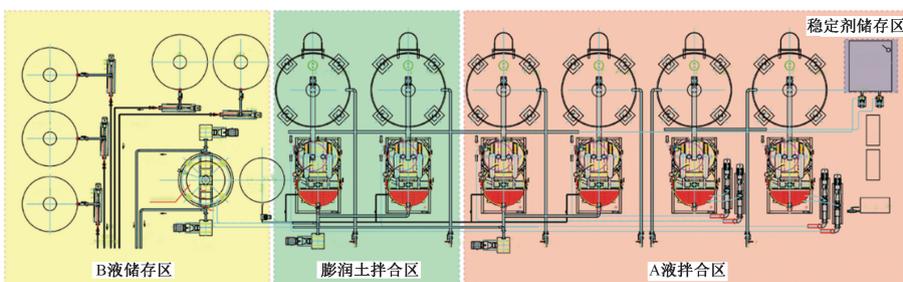


图3 地面拌合设备布置

Fig. 3 Layout of ground mixing equipment

中,实际掘进过程中不断调整注浆压力。本工程双液同步注浆充盈系数控制为 1.0~1.1,注浆速度控制为 16~22m<sup>3</sup>/h。

#### 4 超大直径盾构隧道双液同步注浆效果检验

##### 4.1 地表沉降

对前 100 环管片施工引起的地表沉降进行监测,自始发井间隔 20m 布置监测断面,其中监测断面 DB17~DB21 之间为 41~60 环管片对应的深孔注浆区域,典型断面监测结果如图 5 所示。

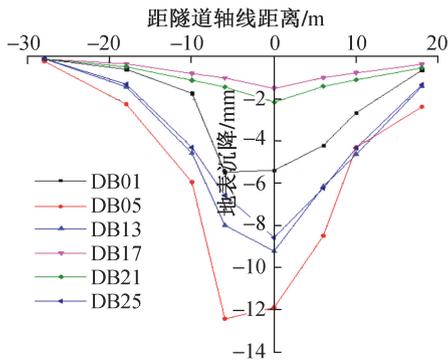


图 5 地表沉降

Fig. 5 Surface settlement

由图 5 可知,地表沉降基本以隧道轴线为中心向两侧逐渐减小,断面 DB17、DB21 监测到的地表差异沉降控制在 2mm 以内,其余断面监测到的地表差异沉降控制在 13mm 以内,可知注浆区域地表沉降较小。

##### 4.2 管片浮动

盾构机掘进过程中管片浮动情况如图 6 所示。由图 6 可知,管片浮动量基本为 -5~10mm,管片最大沉降量为 9mm,最大上浮量为 11mm。

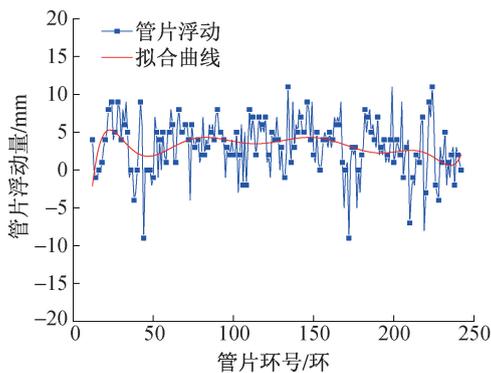


图 6 管片浮动

Fig. 6 Segment floating

综上所述,本工程超大直径盾构隧道双液同步注浆可有效控制地表沉降及管片上浮。

#### 5 结语

水泥-水玻璃双液浆具有胶凝时间短、强度高、

浆液不易流失等特点,在超大直径盾构隧道施工过程中能够有效控制管片上浮,保证盾构隧道快速安全施工,但会出现堵管问题,需清洗管路,因此需对注浆工艺进行研究。

依托北京东六环路改造工程,对超大直径盾构隧道双液同步注浆设备、地面拌合设备和注浆控制进行分析,并结合实际监测数据验证双液同步注浆效果。

##### 参考文献:

- [1] 任跃勤,石军.富水砂卵石地层大直径盾构下穿既有运营隧道施工技术[J].施工技术(中英文),2022,51(19):80-84.  
REN Y Q, SHI J. Construction technology of large-diameter shield tunnel under existing operating tunnels in water-rich sand and pebble stratum [J]. Construction technology, 2022, 51(19): 80-84.
- [2] 叶飞,王斌,韩鑫,等.盾构隧道壁后注浆试验与浆液扩散机理研究进展[J].中国公路学报,2020,33(12):92-104.  
YE F, WANG B, HAN X, et al. Review of shield tunnel backfill grouting tests and its diffusion mechanism [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(12): 92-104.
- [3] 张玄,肖颖,梁寿,等.盾构近距离穿高铁下的隔离桩-同步注浆施工技术[J].施工技术(中英文),2023,52(10):59-63,69.  
ZHANG X, XIAO Y, LIANG S, et al. Construction technology of isolation pile-synchronous grouting for shield tunneling under high-speed railway at close distance [J]. Construction technology, 2023, 52(10): 59-63,69.
- [4] 叶飞,夏天哈,应凯臣,等.盾构隧道壁后注浆浆液与地层适配性优选方法[J].岩土工程学报,2022,44(12):2225-2233.  
YE F, XIA T H, YING K C, et al. Optimization method for backfill grouting of shield tunnel based on stratum suitability characteristics [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2022,44(12):2225-2233.
- [5] 邹翀.广州地铁二号线盾构隧道同步注浆技术[J].隧道建设,2002,22(3):15-21.  
ZOU C. Synchronized grouting technology for shield tunnel of Guangzhou Metro Line 2 [J]. Tunnel construction, 2002, 22(3): 15-21.
- [6] 孙立功,金花,庞旭卿,等.广州地铁3号线盾构区间同步注浆施工技术[J].铁道标准设计,2010,54(10):125-128.  
SUN L G, JIN H, PANG X Q, et al. Synchronized grouting construction technology for shield interval of Guangzhou Metro Line 3 [J]. Railway standard design, 2010,54(10): 125-128.
- [7] 高鹏鹏,徐方,宋普涛,等.高性能同步注浆材料对富水砂层盾构施工参数的影响研究[J].现代隧道技术,2021,58(6):244-250.  
GAO P P, XU F, SONG P T, et al. Influence of high-performance synchronous grouting material on shield construction parameters in water-rich sand layer [J]. Modern tunnelling technology, 2021, 58(6): 244-250.
- [8] 颜静,王飞,付春青,等.地铁盾构隧道同步注浆地表沉降控制效果影响因素的现场试验研究[J].城市轨道交通研究,

- 2021,24(10):48-53.
- YAN J, WANG F, FU C Q, et al. Field experiment on influencing factors of surface settlement control effect induced by shield tunnel synchronous grouting [J]. Urban mass transit, 2021, 24(10): 48-53.
- [ 9 ] 路开道. 絮凝剂对过江盾构隧道同步注浆浆液性能的影响研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(3):7-11.
- LU K D. Influence of flocculants on the performance of synchronous grouting slurry in river-crossing shield tunnels[J]. Construction technology,2022,51(3):7-11.
- [ 10 ] 王成,王国义. 盾构隧道同步注浆新型双液注浆材料的研究与应用[J]. 隧道建设,2017,37(4):416-420.
- WANG C, WANG G Y. Study and application of new type two-component grout to simultaneous grouting of shield tunnel [J]. Tunnel construction, 2017, 37(4): 416-420.
- [ 11 ] 徐晶,范杰,黄俊,等. 盾构施工同步双液注浆材料的配合比及性能研究[J]. 混凝土,2021(10):151-154.
- XU J, FAN J, HUANG J, et al. Research on the proportion and properties of a simultaneous two-component backfill grouting material in shield construction [J]. Concrete, 2021(10): 151-154.
- [ 12 ] 王亚龙,王鸿凯,甄聪,等. 盾构法同步注浆新型双液注浆材料性能研究[J]. 粉煤灰综合利用,2021,35(5):68-72.
- WANG Y L, WANG H K, ZHEN C, et al. Research on the properties of a new type of dual-liquid grouting material for simultaneous grouting by shield tunneling [J]. Fly ash comprehensive utilization, 2021, 35(5): 68-72.
- [ 13 ] 沈树勋,於昌荣,包华. 盾构隧道壁后注浆 C-S 双液浆性能研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(3):1-6.
- SHEN S X, YU C R, BAO H. Research on performance of C-S double slurry of grouting behind shield tunnel segment [J]. Construction technology, 2022, 51(3): 1-6.
- [ 14 ] 李元凯,杨志勇,杨星,等. 盾构法施工注浆新型填充双浆液配比试验及应用[J]. 铁道标准设计,2022,66(4):149-154.
- LI Y K, YANG Z Y, YANG X, et al. Experiment and application of new filling two-component grouting in shield construction [J]. Railway standard design, 2022, 66(4): 149-154.
- [ 15 ] 贾毅,李福海,吴德宝,等. 盾构隧道壁后同步注双液浆配合比试验研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(2):143-151,157.
- JIA Y, LI F H, WU D B, et al. Experimental study on mix proportions of synchronous two-component grouting for shield tunnels [J]. Modern tunnelling technology, 2019, 56(2): 143-151,157.
- [ 16 ] 张龙,黄明利,张恩源. 富水砂层盾构隧道双液浆属性与施工进度关系研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(S1):407-413.
- ZHANG L, HUANG M L, ZHANG E Y. Relationship between properties of two-component grout and construction schedule of shield tunnel in water-rich sandy stratum [J]. Tunnel construction, 2021, 41(S1): 407-413.
- [ 17 ] 陈鹏,王先明,刘四进,等. 超大直径盾构隧道同步双液注浆原位试验研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(1):64-74.
- CHEN P, WANG X M, LIU S J, et al. In-situ experiment on synchronous double-component grouting in super-large-diameter shield tunnel[J]. Tunnel construction,2023,43(1):64-74.
- [ 18 ] 舒计城. 超大直径盾构双液注浆试验及应用效果[J]. 铁道建筑,2022,62(5):117-122.
- SHU J C. Experiment and application effect of double-liquid grouting in large-diameter shield tunnel[J]. Railway engineering, 2022,62(5):117-122.