

DOI: 10.7672/sgjs2025130094

双液浆施工盾构隧道管片上浮特征分析*

单晓波¹, 秦楠², 武文清¹, 柳献²

(1. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211800; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘要] 双液浆具有胶凝时间短、早期强度高的特点, 在控制管片上浮中具有显著作用。为了解双液浆施工下盾构隧道的上浮特征, 总结了盾构隧道双液浆施工工艺, 提出了盾构隧道管片上浮监测和计算方法。依托江心洲二通道隧道工程, 分析了双液浆施工盾构隧道管片上浮时序和纵向特征。通过上浮数据分析表明: 管片上浮在时序上可分为线性发展和稳定阶段, 其中线性发展阶段为管片上浮控制的关键, 而其所经历时间由浆液终凝时间所决定; 验证了双液浆对于管片上浮控制的有效性。

[关键词] 隧道; 盾构; 双液浆; 上浮; 试验

[中图分类号] U455.43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)13-0094-05

Characteristics Analysis of Segment Uplift in Shield Tunnel Construction with Cement-sodium Silicate Grouting

SHAN Xiaobo¹, QIN Nan², WU Wenqing¹, LIU Xian²

(1. China Railway 14th Bureau Group Mega Shield Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Cement-sodium silicate grout, which has the characteristics of short setting time and high early strength, plays a significant role in controlling the buoyancy of the tunnel segments. To better understand the buoyancy characteristics of shield tunnel segments in the construction of cement-sodium silicate grout, this paper first summarized the construction process of shield tunnel segments with dual-liquid slurry and proposed a monitoring and calculation method for the buoyancy of shield tunnel segments. Based on the Channel-II Tunnel Project of the Jiangxinzhou Sewage Collection System, the buoyancy timing and longitudinal characteristics of shield tunnel segments during the construction of cement-sodium silicate grout were analyzed. The analysis of buoyancy data indicates that the buoyancy of tunnel segments can be divided into linear development and stable stages in terms of timing, with the linear development stage being the key to buoyancy control, and its duration is determined by the slurry's final setting time. The effectiveness of cement-sodium silicate grout in controlling segment buoyancy has been verified.

Keywords: tunnels; shields; cement-sodium silicate grouting; uplift; tests

0 引言

盾构隧道常用同步注浆浆液为单液浆^[1], 其主要组分为水泥、膨润土、粉煤灰、砂和水, 凝结时间为1~2d, 由于凝结时间较长, 早期强度形成较慢, 采用单液浆施工的隧道时常存在管片上浮、错台和破损等施工质量问题。随着国内盾构隧道施工技术的逐步提高, 部分盾构隧道工程逐步采用双液浆进

行施工, 并取得良好效果, 如北京东六环改造工程^[2]、苏州地铁5号线通园路一站至星港街站区间^[3]、广州市中心城区地下综合管廊工程^[4]等项目。双液浆主要组分为A液浆和B液浆, 相比单液浆而言, 双液浆通过调整浆液配合比可大大缩短浆液凝结时间, 提高早期强度, 可对脱出盾尾管片形成有效约束。

双液浆材料的研发和应用在工程领域已引起众多学者关注, 其中陈艺元^[5]研究了粉料比例、水玻璃掺量、水灰比对双液浆流动性能、稳定性能、胶凝性能的影响规律; 王成等^[6]对常规同步浆液与聚

* 中铁十四局集团有限公司科研课题(202214jtky0070)

[作者简介] 单晓波, 工程师, E-mail: 1556239432@qq.com

[通信作者] 柳献, 教授, 博士, E-mail: xian.liu@tongji.edu.cn

[收稿日期] 2025-02-13

丙烯酰胺水溶液混合形成的双液浆对管片上浮的控制效果进行分析;贾毅等^[7]对不同双液浆配合比下的凝胶时间、流动度、泌水率、弹性模量、抗压强度进行了分析;陈鹏等^[8]进行了双液浆同步注浆原位试验,对压力分布和填充效果进行探究。此外,管片上浮在盾构隧道施工过程中也是常见现象,为了控制管片上浮,对其特征及机理已有部分研究:戴志仁^[9]考虑管片环间的纵向约束作用得到维持隧道抗浮稳定需要的浆液最小屈服强度表达式;张小龙^[10]采用多种机器学习算法对盾构隧道施工期管片上浮进行了预测;钟小春等^[11]建立了弹性地基梁模型对管片上浮量进行了计算;苏恩杰等^[12]对泥质砂岩地层盾构隧道管片上浮时间、速率等特征进行了监测分析。通过以往研究可以看出,管片上浮与浆液性能息息相关,采用屈服强度高、凝结时间快的浆液将对管片上浮起到抑制作用,而双液浆具有上述特性,但目前双液浆对管片上浮的控制效果研究还较少。

本文总结了双液浆施工工艺,特别是浆液配合比确定及浆液注入的具体流程,提出了采用盾构隧道管片上浮监测和计算方法,通过对采用双液浆的江心洲二通道隧道工程管片上浮数据分析,得到了管片上浮的时序和纵向特征,验证了双液浆对管片上浮控制的有效性,为后续双液浆应用提供参考。

1 双液浆施工工艺

双液浆同步注浆主要步骤包括浆液材料选取及验收、浆液配合比确定、浆液拌合、浆液运输、浆液注入、浆液堵塞处理等工序。浆液配合比确定浆液的基本物理力学性能,很大程度上决定了盾构隧道同步注浆的施工质量。而双液浆具有胶凝时间短的特性,在浆液注入过程中往往会出现注浆管堵塞,造成施工进度滞后。因此,着重介绍浆液配合比确定及浆液注入两道重要工序。

1.1 浆液配合比确定

双液浆主要组分为水、水泥、膨润土、稳定剂和水玻璃,其中水玻璃也称为B液浆,在制备浆液时一般先将水、水泥、膨润土和稳定剂按照配合比混合后成为A液浆,再与B液浆按照体积比混合为双液浆。不同配合比将决定双液浆胶凝时间、初凝时间、终凝时间、强度等物理力学性能有所不同,而盾构隧道施工中管片上浮、管片错台等成型质量问题与其特性紧密相关,浆液配合比确定流程如图1所示。施工过程中还应注意掘进地层变化,动态调整浆液配合比,使其与地层匹配。

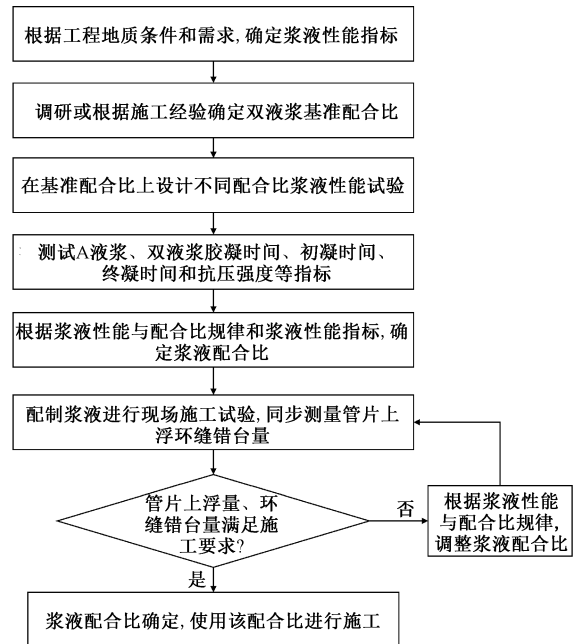


图1 浆液配合比确定流程

Fig. 1 Flow of slurry ratio determination

1.2 浆液注入

施工时双液浆注入流程如下:①推动推杆阀关闭盾尾的注浆口,将A液体加压至适合注浆的值;②拉动推杆阀打开注浆口,当掘进机前进20~30mm,推进速度稳定时,开始注入A液;③启动B液注入,在注浆管中混合A、B液,并制成均匀的胶凝物,在盾构推进的同时进行双液注浆;④用推杆阀将管内的胶凝物推出注浆口,通过推杆阀关闭进浆口,用流动的清洁水冲洗注浆管内的凝胶材料保持管道清洁,防止管道堵塞。下一环施工时则重复进行上述步骤,具体如图2所示。

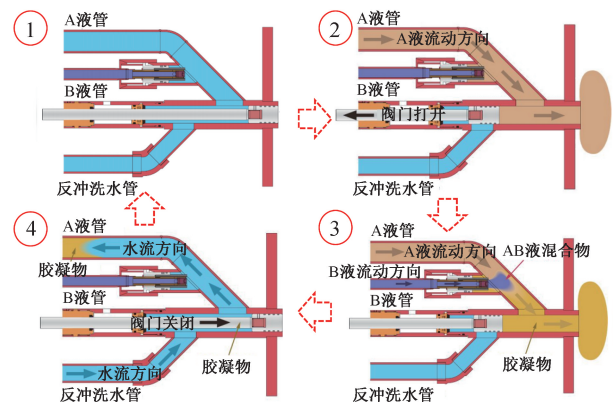


图2 浆液注入流程

Fig. 2 Slurry injection process

在注入过程中如出现注入压力异常,常表现为部分注浆管压力传感器显示数值远大于其他注浆管,或在盾构机正常掘进过程中,注浆管压力传感

器数值逐渐增大直至远超正常水平,则可判定注浆管出现堵塞,为避免同步注浆量不足,需停机通管。

2 管片上浮测量及计算方法

当管片拼装成环,盾构机还未向前掘进时,布置多个棱镜测点,如图3所示,使用导向系统全站仪对准棱镜的镜片中心,操作导向系统计算机测量管片初始坐标值,并设置测点编号保存,管片拼装完成各测点的初始坐标为 (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j}) ,其中下标1代表测点第1次测量坐标,下标j为测点编号;在盾构机掘进过程中,对各测点进行自动测量,坐标结果为 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) ,下标i代表第i次测点测量坐标值。由于盾构机施工空间有限,测点布置数量可能受到影响,因此,考虑不同测点数量下的管片上浮计算方法。

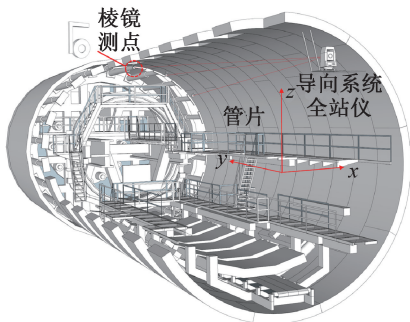


图3 管片上浮测量方法

Fig. 3 Measurement method of segment uplift

2.1 测点数量小于5个

选取拼装环距离顶部最近的测点初始坐标为 (x_{1d}, y_{1d}, z_{1d}) ,其中d代表距离拱顶最近测点,后续测量坐标为 (x_{id}, y_{id}, z_{id}) ,上浮量 D_{i-1} 可根据下式计算:

$$D_{i-1} = z_{id} - z_{1d} \quad (i = 2, 3, 4, \dots) \quad (1)$$

2.2 测点数量为5个

假设拼装环的管片横断面为椭圆,根据5个测点的初始坐标计算拼装环对应椭圆的几何中心,在x-z面内椭圆方程为:

$$x^2 + bxz + cz^2 + dx + ez + f = 0 \quad (2)$$

式中:b, c, d, e, f为椭圆参数。

将5个测点的初始坐标代入式(2):

$$x_{1j}^2 + bx_{1j}z_{1j} + cz_{1j}^2 + dx_{1j} + ez_{1j} + f = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

上式为5个方程组成的方程组,可求解得出b, c, d, e, f椭圆参数,根据下式求解得出初始测量坐标下的椭圆几何中心坐标:

$$X_{C1} = \frac{be - 2cd}{4c - b^2}, Z_{C1} = \frac{bd - 2e}{4c - b^2} \quad (4)$$

利用上述同样方法计算后续测量坐标 $(x_{ij}, y_{ij},$

$z_{ij})$ 对应的椭圆几何中心 (X_{Ci}, Z_{Ci}) ,类似地,利用式(4)可计算5个测点第i次测量对应的椭圆几何中心坐标:

$$X_{Ci} = \frac{b_i e_i - 2c_i d_i}{4c_i - b_i^2}, Z_{Ci} = \frac{b_i d_i - 2e_i}{4c_i - b_i^2} \quad (5)$$

则上浮量 D_{i-1} 可根据下式计算:

$$D_{i-1} = Z_{Ci} - Z_{C1} \quad (i = 2, 3, 4, \dots) \quad (6)$$

2.3 测点数量多于5个

当测点数量多于5个时,采用最小二乘法对管片横断面对应的椭圆进行拟合,对椭圆方程进行处理可得到下式:

$$x^2 + b_i xz + c_i z^2 + d_i x + e_i z + f_i = 0 \quad (7)$$

可采用下式对椭圆方程参数 b_i, c_i, d_i, e_i, f_i 进行求解,其中测点数量为n个:

$$\begin{bmatrix} b_i \\ c_i \\ d_i \\ e_i \\ f_i \end{bmatrix} = (A^H A)^{-1} A^H \begin{bmatrix} x_{i1}^2 \\ x_{i2}^2 \\ x_{i3}^2 \\ \vdots \\ x_{in}^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_{i1} z_{i1} & z_{i1}^2 & x_{i1} & z_{i1} & 1 \\ x_{i2} z_{i2} & z_{i2}^2 & x_{i2} & z_{i2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{in} z_{in} & z_{in}^2 & x_{in} & z_{in} & 1 \end{bmatrix}$$

求解 b_i, c_i, d_i, e_i, f_i 后,可根据式(5)计算椭圆几何中心点,上浮量 D_{i-1} 可根据(6)式计算。

3 工程概况

江心洲二通道建设工程(穿越夹江段)盾构隧道长度693m,采用泥水盾构施工,隧道外径8.8m,内径7.9m,管片厚度0.45m,环宽1.5m,采用通用衬砌环进行拼装,拼装方式为错缝拼装。管片混凝土强度等级为C50,抗渗等级为P12,管片环由1个封顶块、2个邻接块和5个标准块组成。隧道主要穿越粉砂、粉细砂和粉质黏土地层。

该隧道工程采用双液浆进行施工,根据施工经验和室内试验,水泥、膨润土、稳定剂、水对应配合比为:350:30:3.5:813(kg),A液浆与B液浆体积比为15.7:1。此外,由于盾构机上部空间有限,在隧道顶部仅布置了1个上浮测点,管片上浮量采用式(1)进行计算,监测结果将在第5节进行分析。

4 上浮特征分析

4.1 上浮时序特征

隧道施工过程中对463环管片中的部分管片进行上浮测量,管片上浮量与盾构机相对管片的掘进距离关系如图4所示。管片上浮在时序特征上可以

分为2个阶段:①线性发展阶段,盾构机向前掘进直至管片脱出盾尾2环左右,管片上浮位移量随着盾构机向前掘进而呈线性增大,期间管片上浮量由0基本呈线性增大,直至达到2~17mm;②稳定阶段,管片脱出盾尾2环后,管片上浮位移量基本趋于稳定,期间上浮量基本处于波动状态,波动值在2mm之内。线性发展阶段管片上浮快速发展,是管片上浮需着重控制的区段。

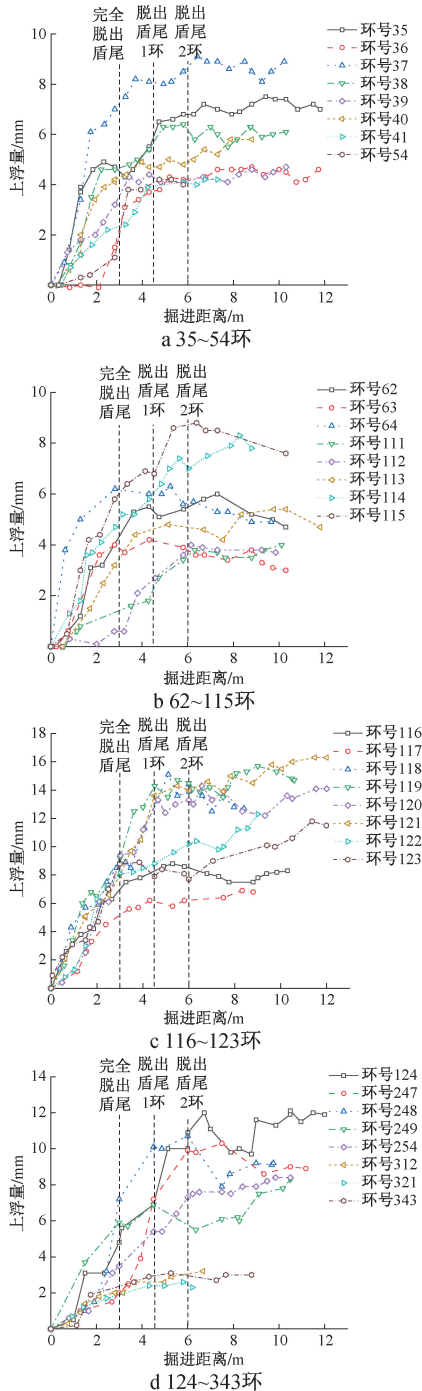


图4 管片上浮量与掘进距离关系
Fig. 4 Relationship between segment uplift value and tunneling distance

值得注意的是,管片在盾尾内也会发生0~7mm的上浮,这主要是由于脱出盾尾的管片在受到浆液上浮力作用时,盾尾内管片在环间螺栓作用力和摩擦力环间作用下将带动盾尾内管片向上位移。此外,根据现场盾构机施工速度,管片环脱出盾尾2环时间大致为250min,而通过浆液试验可知,同步注浆浆液终凝时间为261min,两者基本相等,因此,管片上浮稳定时浆液已终凝。

4.2 上浮纵向特征

将盾构隧道施工过程中管片上浮稳定后数据统计如图5所示,管片最终总上浮量在-0.9~16.7mm,均值为3.17mm。通过统计管片上浮量频数分布可知,管片上浮量小于6mm的管片环数为135环,占所监测管片环数的82%,即绝大部分管片环上浮量小于6mm,如图6所示。

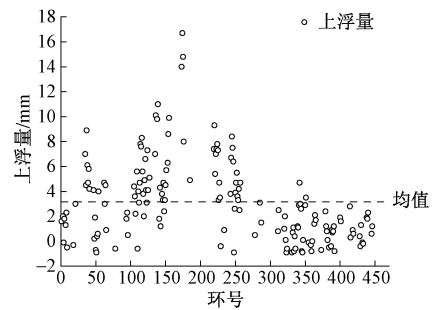


图5 稳定后管片上浮量
Fig. 5 Segment uplift value after stability

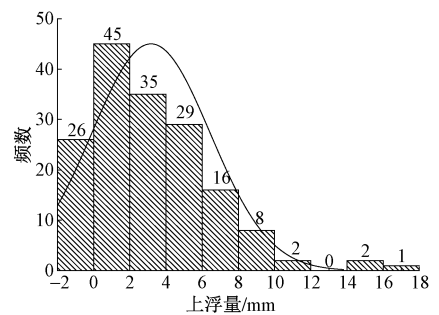


图6 管片上浮量分布
Fig. 6 Distribution of segment uplift value

统计与依托工程类似地层的盾构隧道工程,且所统计隧道均采用单液浆进行施工,如表1所示,使用单液浆的隧道最大上浮量在82~150mm,平均值在59~120mm。而本隧道工程使用了双液浆施工,其管片最大上浮量和平均上浮量均远小于单液浆施工的隧道。其主要原因是所使用的双液浆终凝时间仅261min,浆液结石体可快速对脱出盾尾的管片形成约束,缩短线性发展阶段所经历的时间,有效减小管片上浮量。

表1 盾构隧道管片上浮量对比

Table 1 Comparison of segment uplift in shield tunnels

项目	地质条件	最大上浮量/mm	平均上浮量/mm
本项目	粉砂、粉细砂、粉质黏土	16.70	3.17
宁波某地铁隧道 ^[13]	淤泥质粉质黏土、粉砂	116.00	65.69
上海地铁7号线杨高南路—东明路区间 ^[14]	黏土、粉土	82.00	59.00
上海翔殷路隧道 ^[15]	粉土、黏土	150.00	120.00

5 结语

总结了盾构隧道双液浆施工工艺,并提出了盾构隧道管片上浮监测和计算方法。依托江心洲二通道隧道工程,分析了双液浆施工盾构管片上浮时序和纵向特征,主要结论如下。

1)通过借用盾构机导向系统的全站仪可对盾构隧道管片上浮实现自动化监测,不同测点数量对应不同计算方法,在满足可视条件下,建议增设测点以提高管片上浮的测量精度。

2)管片上浮量在时序上可分为线性发展阶段和稳定阶段,其中线性发展阶段为盾构机向前掘进直至管片脱出盾尾2环左右,期间管片上浮快速发展,是管片上浮需着重控制的区段,缩短该区段所经历的时间是控制管片上浮的关键,而其由浆液终凝时间所决定。

3)使用双液浆施工的隧道管片最大上浮量为16.7mm、平均值为3.17mm,均远小于单液浆施工的隧道。由于双液浆终凝时间短,浆液结石体快速对脱出盾尾的管片形成约束,缩短线性发展阶段所经历的时间,可有效减小管片上浮量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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. Test and application effect of double liquid grouting for super-large diameter shield[J]. Railway engineering, 2022, 62(5):117-122.
- [3] 刘西科,史志淳,张文强,等. 双液浆同步注浆在软弱地层隧道施工中的应用技术[J]. 建筑机械,2019(6):82-86.
LIU X K, SHI Z C, ZHANG W Q, et al. Application technology of double slurry synchronized grouting in tunnel construction in weak ground[J]. Construction machinery, 2019(6):82-86.
- [4] 槐荣国,黄思远,钟小春,等. 盾构管片壁后新型同步双液浆开发及工程应用[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(9):1521-1528.
HUI R G, HUANG S Y, ZHONG X C, et al. Development and engineering application of novel synchronous double-component

grouting behind shield segment[J]. Tunnel construction, 2022,42(9):1521-1528.

- [5] 陈艺元. 盾构同步注浆复合水泥基—水玻璃双液浆材料特性研究及强度模拟试验[D]. 北京:北京交通大学,2017.
CHEN Y Y. Investigation into the characteristics and strength simulation test of the complex two-component in synchronous grouting of shield tunneling [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 戴志仁. 盾构隧道盾尾管片上浮机理与控制[J]. 中国铁道科学,2013,34(1):59-66.
DAI Z R. The mechanism and control principle of upward movements of segments at the rear of shield tail[J]. China railway science, 2013,34(1):59-66.
- [10] 张小龙. 盾构隧道施工期管片上浮机理与预测研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
ZHANG X L. Research on the mechanism and prediction method of upward movement of shield tunnel linings during construction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [11] 钟小春,黄思远,槐荣国,等. 基于浆液浮力试验的盾尾管片纵向上浮特征研究[J]. 岩土力学,2023,44(6):1615-1624.
ZHONG X C, HUANG S Y, HUI R G, et al. Longitudinal uplift characteristics of segments of shield tunnels based on buoyancy of grouting[J]. Rock and soil mechanics, 2023,44(6):1615-1624.
- [12] 苏恩杰,任超,叶飞,等. 泥质砂岩地层盾构隧道管片连续上浮规律与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(2):706-714.
SU E J, REN C, YE F, et al. Law and analysis of continuous floating of shield tunnel segments in argillaceous sandstone stratum[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2024,55(2):706-714.



图10 爆破效果

Fig.10 Blasting effect

1)形成了基于凿岩台车的钻爆施工工艺,优化了掏槽孔、辅助孔和周边孔的装药封堵结构,确定了起爆爆破振动安全距离,确保高效开挖。

2)提出了深浅复合光爆孔技术控制隧道周边,光爆深孔用于形成开挖轮廓,光爆浅孔用于消除欠挖,模拟确定了深浅复合光爆孔技术的可靠性。

3)在该隧道平导段开展了现场试验,清理完爆破断面的崩落岩石后,开挖断面平整光滑,形成了良好的爆破轮廓。量测平均开挖进尺达到了2.8m,接近预设开挖进尺3m,炮眼利用率达到了93.3%。

参考文献:

- [1] 梅敏,张军灵,文佳,等.特长公路隧道全断面钻爆大型机械化施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(18):49-54.
MEI M, ZHANG J L, WEN J, et al. Large-scale mechanized construction technology of extra-long highway tunnel with full-section drilling and blasting[J]. Construction technology, 2024, 53(18):49-54.
- [2] 段伟,韩通,龙葳.钻爆法隧道下穿既有双连拱隧道施工技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(1):93-99.
DUAN W, HAN T, LONG W. Study on construction technology of drilling and blasting tunnel passing through existing twin-arch tunnel[J]. Construction technology, 2024, 53(1):93-99.
- [3] 肖明清,徐晨,谢壁婷,等.高速铁路钻爆法隧道分序支护设计技术研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(3):369-382.
XIAO M Q, XU C, XIE B T, et al. Research on design technology of sequential supporting for high-speed railway tunnel constructed by drilling and blasting method[J]. Tunnel construction, 2023, 43(3):369-382.
- [4] 张庆龙,王昌,冯海潮,等.单线隧道Ⅲ级围岩全断面不同爆破开挖工法对比[J].工程爆破,2024,30(4):67-72.
ZHANG Q L, WANG C, FENG H C, et al. Comparison of full-face different blasting excavation method in grade Ⅲ surrounding rock section of single-track tunnel[J]. Engineering blasting, 2024, 30(4):67-72.
- [5] 罗钰博,阳军生,詹双桥,等.基于GSI分级的小断面引水隧洞超欠挖预测与钻爆参数优化研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(12):3032-3043.
LUO Y B, YANG J S, ZHAN S Q, et al. Prediction of over-under excavation and optimization of blasting parameters in small section diversion tunnels based on GSI classification[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2024, 43(12):3032-3043.

- [6] 高轩,王帅帅,王星,等.小断面铁路隧道凿岩台车钻孔施工光面爆破技术研究[J].现代隧道技术,2022,59(S1):811-817.
GAO X, WANG S S, WANG X, et al. Study on smooth blasting technology in drilling construction of small cross-section railway tunnel with drill trolley[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(S1):811-817.
- [7] 张国浩,褚存,郭佳嘉.基于新意法理念的连拱隧道设计施工优化[J].科学技术与工程,2021,21(32):13914-13918.
ZHANG G H, CHU C, GUO J J. Design and construction optimization of multi-arch tunnel based on ADECO-RS method[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(32):13914-13918.
- [8] 彭俊聪,杨四海,李晓冉,等.深圳市谷对岭分岔隧道无中导洞施工与监测技术[J].施工技术(中英文),2021,50(18):31-35.
PENG J C, YANG S H, LI X R, et al. Construction and monitoring method of guding bifurcated tunnel without middle pilot heading in Shenzhen[J]. Construction technology, 2021, 50(18):31-35.
- [9] 胡桂斌.夹泥灰岩隧道爆破参数对超欠挖的影响研究[J].工程爆破,2024,30(2):78-87.
HU G B. Study on the influence of blasting parameters on overbreak and underbreak in tunnels with marl[J]. Engineering blasting, 2024, 30(2):78-87.
- [10] 余绍山,王薇,李姚伟奇.周边眼偏心空孔爆破设计优化研究与应用[J].铁道科学与工程学报,2024,21(4):1509-1520.
YU S S, WANG W, LI Y W Q. Research and application of offset hole for peripheral blasting design and optimization[J]. Journal of railway science and engineering, 2024, 21(4):1509-1520.
- [11] 丁祥.互层岩体隧道爆破超欠挖控制技术研究[J].铁道工程学报,2022,39(3):75-80.
DING X. Research on the control technology of over-under-excavation of tunnel blasting in interbedded rock masses[J]. Journal of railway engineering society, 2022, 39(3):75-80.

(上接第98页)

- [13] 邓剑峰.地铁隧道施工期管片上浮原因及抗浮措施研究[J].现代城市轨道交通,2011(5):47-49.
DENG J F. Study on the reasons and anti-floating measures of segment floating during subway tunnel construction[J]. Modern urban transit, 2011(5):47-49.
- [14] 王选祥.盾构隧道管片上浮机理及控制技术[J].铁道建筑,2009,49(5):52-55.
WANG X X. Mechanism and control technology of segment floating in shield tunnel[J]. Railway engineering, 2009, 49(5):52-55.
- [15] 张海涛.盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D].上海:同济大学,2007.
ZHANG H T. Study on the proportioning of tail void grouting material and up floating control of shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.