

富水砂层土压平衡式盾构螺旋输送机喷涌 风险评价方法研究*

曹铁军¹ 曹 阳² 孟世强³ 蒋沛峰¹ 朱 儒³ 朱 君⁴ 曹占林⁴

(1. 中国铁建股份有限公司南京地铁9号线一期工程施工总承包, 210019, 南京; 2. 南京地铁集团有限公司, 210008, 南京; 3. 中铁十一局集团有限公司, 200126, 上海; 4. 同济大学交通学院, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 盾构在富水砂层中施工时, 因地下水丰富、土体渗透性大, 螺旋输送机极易发生喷涌, 若控制措施不当, 可能引发施工安全事故。因此, 需对土压平衡式盾构在富水砂层中施工时螺旋输送机喷涌风险评价方法进行研究。

[方法] 建立了土仓-螺旋输送机压力梯度模型, 将土压平衡式盾构的水流通道简化为二维平面问题; 依据达西定律, 认为土仓内的流体通过孔隙介质进行二维达西流动, 而螺旋输送机内的流体则进行一维达西流动; 结合边界条件, 采用有限差分-解析解联合方法计算了土仓中一定水压条件下螺旋输送机出口处的水头-流量曲线, 提出了螺旋输送机喷涌风险划分方法。根据螺旋输送机出口水流高度和涌水量, 定义了4个临界状态和5个风险区域, 分别为一级风险区、二级风险区、三级风险区、四级风险区和安全区, 建立了螺旋输送机喷涌风险划分标准和喷涌风险分区分级方法。以南京地铁9号线穿越长江漫滩地区绿博园站—滨江公园站盾构区间为例, 对该区间进行了螺旋输送机喷涌风险等级划分, 形成了喷涌风险单元链。[结果及结论] 该盾构区间存在6条螺旋输送机喷涌风险等级的施工单元链, 包含3个风险等级, 其中一级风险等级区段长约408 m, 二级风险等级区段长约463 m, 无喷涌风险等级区段长约241 m, 占比分别为36.69%、41.64%和21.67%。在该区间施工时, 螺旋输送机喷涌风险高, 施工距离长, 需要针对不同风险等级采用不同防喷涌措施, 从而保证盾构施工安全高效。

关键词 地铁; 富水砂层; 土压平衡式盾构; 螺旋输送机; 喷涌风险评价方法

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230523

Blowout Risk Assessment Method of Screw Conveyor in Earth Pressure Balance Shield Tunneling through Water-bearing Sand Layers
CAO Tiejun¹, CAO Yang², MENG Shiqiang³, JIANG Peifeng¹, ZHU Ru³, ZHU Jun⁴, CAO Zhanlin⁴

(1. Nanjing Metro Line 9 Phase I Construction Contract, China Railway Construction Corporation Limited, 210019, Nanjing, China; 2. Nanjing Metro Group Co., Ltd., 210008, Nanjing, China; 3. China Railway 11th Bureau Group Co., Ltd., 200126, Shanghai, China; 4. College of Transportation, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] During shield tunneling in water-bearing sand layers, due to abundant groundwater and high soil permeability, screw conveyors are highly prone to blowout incidents. If control measures are inadequate, serious construction safety accidents may occur. Therefore, it is essential to study a blowout risk assessment method for screw conveyors in EPB (earth pressure balance) shield tunneling through water-bearing sandy strata. [Method] A pressure gradient model of the excavation chamber and screw conveyor is established, simplifying the water flow channel in EPB shield to a two-dimensional plane problem. Based on Darcy's law, fluid in the pressure chamber is considered to undergo two-dimensional Darcy flow through a porous medium, while the fluid in the screw conveyor will undergo one-dimensional Darcy flow. By incorporating boundary conditions, a combined finite difference-analytical solution method is applied to calculate the head-discharge curve at the screw conveyor outlet under specified water pressure conditions in the soil chamber. A blowout risk classification method for screw conveyors is proposed. Four critical states and five risk zones are defined according to water height and inflow volume at the screw conveyor outlet, they are classified as Level I, II, III, and IV risk zones, and a safety zone respectively. A classification standard and zoning-grading method for blowout risk of screw conveyors is established. Taking the shield interval between Lyuboyuan Station and Binjiang Park Station on Nanjing Metro Line 9 as an example, which crosses the Yangtze River floodplain area, a screw conveyor blowout risk level classification is carried out on the

* 上海市科委基础性研究自然科学基金计划项目(20ZR1459900)

interval, forming a risk unit chain for blowout assessment.

[Result & Conclusion] In this shield interval, six construction unit chains with varying screw conveyor blowout risk levels are identified, covering three risk levels. Among which, the segment of Level I risk measures approximately 408 m, Level II about 463 m, and the no-risk zone about 241 m, accounting for 36.69%, 41.64%, and 21.67% of the total length, respectively. Given the high blowout risk and long construction distance during the interval construction, differentiated anti-blowout measures should be adopted for different risk levels to ensure safe and efficient shield tunneling.

Key words metro; water-bearing sand layer; earth pressure balance shield; screw conveyor; blowout risk assessment method

土压平衡式盾构穿越高渗透性、高水压漫滩地区时,因开挖面水压过大,渣土渗透性强,地下水易发生集中渗流,从而引起螺旋输送机喷涌并导致地面超限变形。此类工程事故数量近些年呈现明显上升趋势^[1-5]。因此,通过研究盾构掘进中螺旋输送机喷涌预警方法,在施工前研判喷涌风险,并在关键位置做好喷涌防范措施,从而降低盾构施工事故发生的风险,这对保证工程安全具有重要作用^[6-7]。

针对螺旋输送机喷涌问题,国内外学者主要对喷涌的机理和防治等方面进行了研究。文献[8]利用CFD(计算流体动力学)软件,建立富水地层盾构掘进过程中涌水量预测模型,并提出采用全断面帷幕注浆技术的建议;文献[9]考虑施工过程的正面附加推力和孔隙水压力,建立了土压平衡盾构螺旋输送机喷涌的预警模型;文献[10]分析了不同土层中,盾构施工时姿态偏移引起的附加土压力的变化,为盾构施工的安全计算提供参考;文献[11-12]结合土压平衡式盾构施工实例,对富水砂层中掘进渣土改良技术进行了总结;文献[13]通过螺旋输送机一维渗流解析解、土仓与螺旋输送机界面流量及水头连续条件,确定了盾构的渗流场解析解;文献[14-15]根据盾构土仓内压力传递理论和加气排水防喷涌机理,提出了土压平衡盾构加气排水防喷涌技术;文献[16-17]针对土压平衡式盾构穿越砂层的渣土改良进行了研究,通过测试不同配合比(质量比)膨润土浆液改良的渣土性质,给出了改良剂的合理配合比。螺旋输送机喷涌作为目前发生率较高的盾构掘进事故之一,研究此类事故的风险预

警及评价体系具有必要性。

本文针对土压平衡式盾构穿越漫滩地区易产生螺旋输送机喷涌的问题,进行了喷涌风险分区、分级研究。研究了土仓-螺旋输送机压力梯度模型,明确了螺旋输送机喷涌风险划分标准,建立了螺旋输送机喷涌风险分级评价模型。基于该模型,确定了南京地铁9号线穿越长江漫滩地区盾构施工区间的喷涌风险等级,并形成了施工单元链。

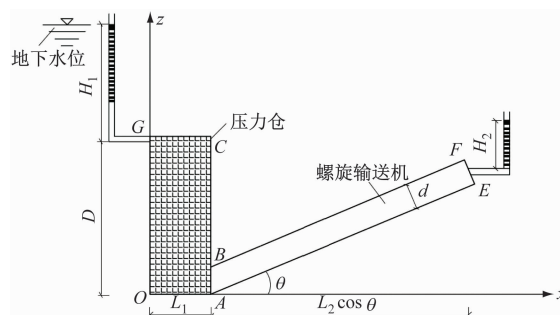
1 螺旋输送机喷涌风险分级评价模型

为了评估土压平衡式盾构穿越富水砂层时发生螺旋输送机喷涌风险,构建了土仓-螺旋输送机压力梯度模型,结合本工程区段采用的盾构参数,基于压力梯度模型计算结果提出了螺旋输送机喷涌风险划分标准,可为后续施工区间进行螺旋输送机喷涌风险分区、分级提供依据。

1.1 土仓-螺旋输送机压力梯度模型

土压平衡式盾构的水流通道包括压力仓和螺旋输送机两个部分,将其简化为二维平面问题。土仓-螺旋输送机水压力梯度模型示意图见图1。其中压力仓视为水通过孔隙介质的二维达西流动,而螺旋输送机内的流体视为一维达西流动。该模型中假设如下^[18]:

- 1) 仅考虑流体与土体的相互作用,不考虑螺旋输送机叶片对流体的扰动;
- 2) 土体各向同性、均质、饱和;
- 3) 土体充满压力仓与螺旋输送机内的全部空间;



注: H_1 —土仓顶部水头高度; H_2 —螺旋输送机出口水头高度; D —盾构直径; d —螺旋输送机直径; L_1 —土仓长度; L_2 —螺旋输送机长度; θ —螺旋输送机倾角; OA 、 BC 、 CG 、 BF 、 AE —不可渗边界; OG 、 AB —可渗边界。

图1 土仓-螺旋输送机水压力梯度模型示意图

Fig. 1 Diagram of water pressure gradient model of soil chamber-screw conveyor

4) 仅考虑流体与土体的相对速度,不考虑土颗粒本身的运动;

5) 忽略螺旋输送机内土体的旋转与刀盘开口率的影响。

当流体通过孔隙介质时,达西定律为:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\rho_f g}{K} u_x \quad (1)$$

式中:

p ——水压;

ρ_f ——水的密度;

g ——重力加速度;

K ——渗透系数;

u_x —— x 方向水流的表观流速,即单位时间通过单位截面积的流体体积。

对压力仓中的水流二维流动,忽略旋流,其速度梯度关系如下:

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (2)$$

式中:

u_z —— z 方向的水流速度。

对螺旋输送机中的一维流动,有:

$$\Delta H = \int \cos \theta dp \quad (3)$$

式中:

ΔH ——螺旋输送机的水头差。

地下水涌水量 Q 可用螺旋输送机内的表观流速 u_s 表示:

$$Q = u_s \frac{\pi d^2}{4} \quad (4)$$

压力仓的边界条件为: OG 边界的孔压可由地下水位计算得出, AB 的边界条件需与螺旋输送机满足连续性的要求。螺旋输送机的边界条件如下:

$$x = L_1 + L_2 \cos \theta$$

$$p = \rho_f g \left(L_2 \sin \theta + H_2 + \frac{d}{2 \cos \theta} \right) \quad (5)$$

在该模型中压力仓内可以使用有限差分方法求解,而在螺旋输送机内可以使用解析方法进行计算^[18-19]。通过以上简化模型,将压力仓内的数值解与螺旋输送机内的解析解结合,可以较快计算出螺旋输送机内的水压和流量变化。

1.2 螺旋输送机喷涌风险划分标准

文献[20]依据大量工程经验提出了螺旋输送机喷涌发生的临界条件:当出口处水头超过 1 m 且

涌水量超过 3 cm³/s,认为螺旋输送机发生轻微喷涌,同时本文以此状态作为临界状态(临界点为 A)。不同渗透系数下螺旋输送机出口处涌水量与水头关系曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出:当土体渗透系数小于穿过临界点 A 的临界渗透系数时,螺旋输送机出口处 Q - H_2 关系曲线始终不会穿过任何“喷涌区”,此时螺旋输送机不会发生喷涌,处于绝对的喷涌安全区内。

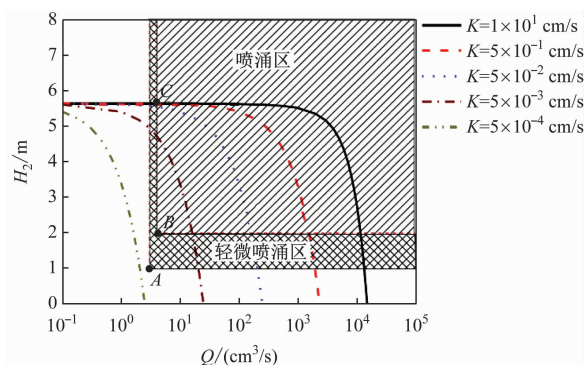


图2 不同渗透系数下螺旋输送机出口处 Q 与 H_2 关系曲线 ($H_1 = 5$ m)

Fig. 2 Relation curve of water blowout (Q) and hydraulic head (H_2) at screw conveyor outlet under different permeability coefficients ($H_1 = 5$ m)

当出口处水头超过 2 m 且涌水量超过 4 cm³/s 时,即可认为发生了严重喷涌,此状态作为临界状态(临界点为 B);当土体渗透系数小于穿过临界点 B 的临界渗透系数,并大于穿过临界点 A 的临界渗透系数时,螺旋输送机出口处 Q - H_2 关系曲线始终穿过“轻微喷涌区”,此时螺旋输送机会发生轻微喷涌。

基于以上临界条件,本文进一步补充了以下临界点与临界渗透系数:

1) 临界点 C:该临界点为 Q - H_2 关系曲线与 $Q = 4$ cm³/s 直线相交时的渗透系数,通过该点的临界渗透系数曲线还需满足 $k|_{Q=4 \text{ cm}^3/\text{s}} = 0$ 且 $k|_{Q>4 \text{ cm}^3/\text{s}} \neq 0$ (k 为该曲线斜率)。由图 2 可以看出:当土体渗透系数小于穿过临界点 C 的临界渗透系数,并大于穿过临界点 B 的临界渗透系数时,螺旋输送机出口处 Q - H_2 关系曲线会穿过大部分“喷涌区”以及小部分“轻微喷涌区”,此时螺旋输送机会发生喷涌,但由于曲线也通过了部分“轻微喷涌区”,处于发生喷涌但不严重的情形。

2) 增加涌水量为 10 cm³/s 作为临界点,并将

以上 4 个临界状态所对应的 4 条临界 Q - H_2 关系曲线作为螺旋输送机喷涌风险划分标准,得到 5 个风险区,如图 3 所示。

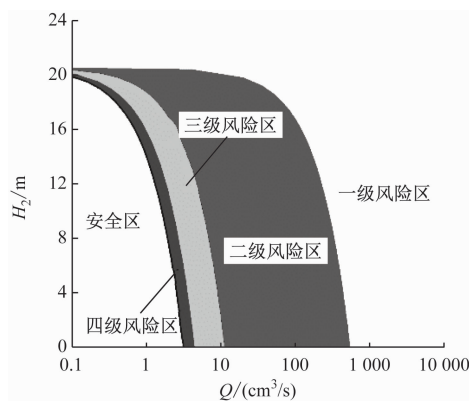


图 3 螺旋输送机喷涌风险划分标准

Fig. 3 Standard for classification of screw conveyor blowout risk

综上所述,本文提出了螺旋输送机喷涌风险的五级标准,分别为:

- 1) 一级风险区:认为螺旋输送机出口处会发生非常严重喷涌,会严重影响工程结构及人员安全。
- 2) 二级风险区:认为螺旋输送机出口处会发生严重喷涌,会严重影响工程结构安全。
- 3) 三级风险区:认为螺旋输送机出口处会发生喷涌,会影响工程结构稳定与安全。
- 4) 四级风险区:认为螺旋输送机出口处会发生轻微喷涌,会影响工程结构稳定。
- 5) 安全区:认为螺旋输送机出口处不会发生喷涌。

2 案例分析

南京地铁 9 号线绿博园站—滨江公园站区间(以下简称“博滨区间”)工程主要穿越长江漫滩地区,地下水丰富,地质软弱。博滨区间里程为 K18+140—K19+252,全长约为 1 112 m,均为地下线。该区间最大埋深约为 25.600 m,最小埋深约为 15.774 m,主要穿越淤泥质粉质黏土、粉质黏土和粉细砂等土层,其中粉细砂层为强透水层。该区间承压水分布于粉砂层中,水位埋深为 1.33 ~ 3.54 m。根据上述螺旋输送机喷涌风险分级评价模型,对博滨区间喷涌风险进行划分。

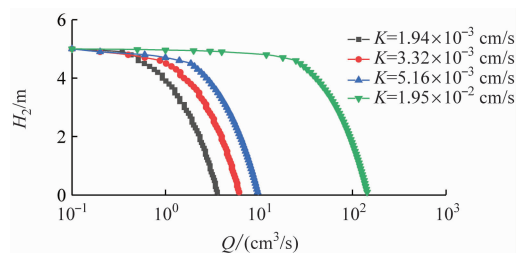
2.1 南京漫滩地区螺旋输送机喷涌风险分级标准

博滨区间工程采用的盾构参数如下: $D=6.4$

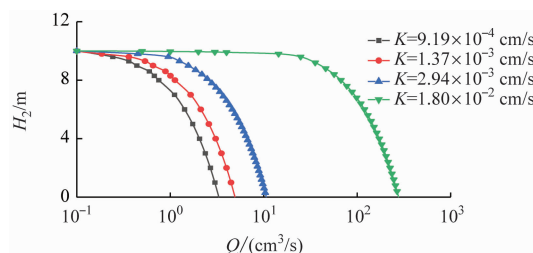
$m, L_1=1.6\text{ m}, L_2=13.5\text{ m}, \theta=22.5^\circ, d=0.8\text{ m}$ 。将该参数代入上述建立的土仓-螺旋输送机压力梯度模型中,可以计算给定土仓顶部水头 H_1 情况下,不同土层渗透系数对应的螺旋输送机出口处的 Q - H_2 关系曲线。

通过土仓-螺旋输送机压力梯度模型绘制盾构顶部地下水位 0 ~ 30 m 范围内的涌水量曲线,并提取其中 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m 和 30 m 的盾构顶部地下水位涌水量,如图 4 所示。

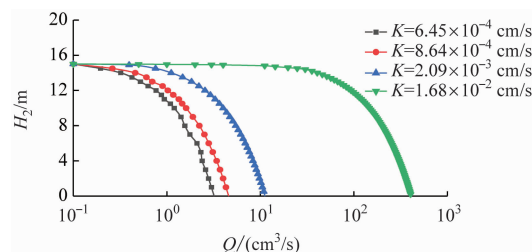
通过涌水量曲线,根据螺旋输送机喷涌风险划分标准,提出盾构顶部地下水位 0 ~ 30 m 范围内的 4 个临界渗透系数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 。绘制 H_1 -临界渗透系数关系曲线,如图 5 所示。提出南京漫滩地区



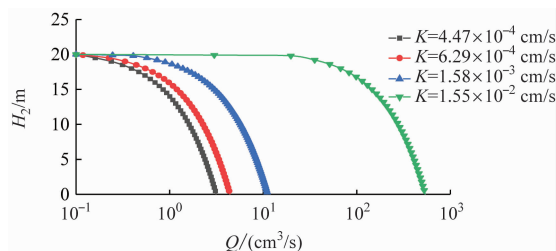
a) $H_1 = 5\text{ m}$



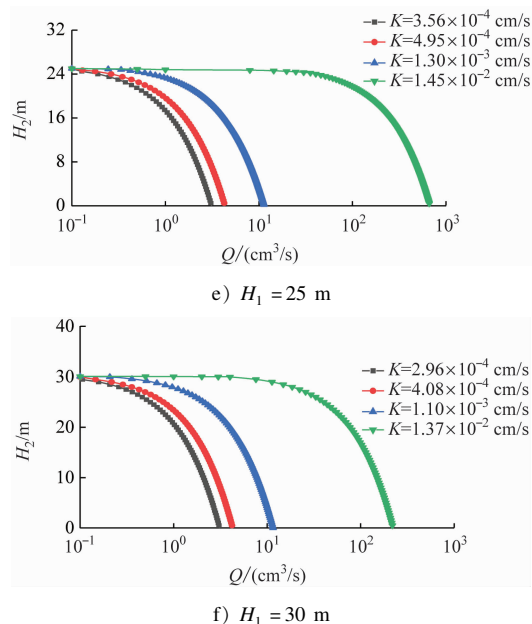
b) $H_1 = 10\text{ m}$



c) $H_1 = 15\text{ m}$



d) $H_1 = 20\text{ m}$

图4 不同 H_1 下 $Q-H_2$ 关系曲线Fig. 4 Water blowout-hydraulic head relation curves under different H_1

富水砂层螺旋输送机喷涌风险分级评价模型。基于该模型,进一步确定该盾构施工区间的喷涌风险

表1 施工区段螺旋输送机喷涌风险等级单元链

Tab. 1 Risk level unit chain of screw conveyor blowout in construction section

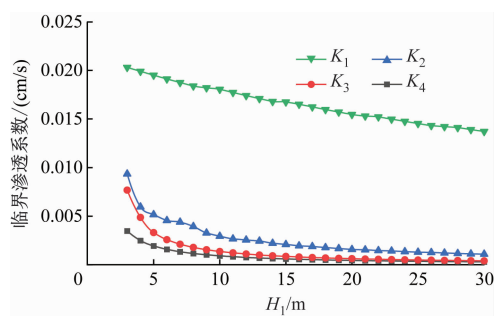
施工区段	穿越地层	$K/(cm/s)$	水头埋深/m	风险等级
K18 + 140—K18 + 361	粉砂	1.5×10^{-2}	16.1 ~ 18.1	二级风险
K18 + 361—K18 + 769	粉细砂	1.7×10^{-2}	15.5 ~ 19.2	一级风险
K18 + 769—K18 + 860	粉砂	1.5×10^{-2}	14.8 ~ 16.9	二级风险
K18 + 860—K18 + 930	淤泥质粉质黏土	4.5×10^{-5}	11.9 ~ 14.8	无喷涌风险
K18 + 930—K19 + 081	粉砂	1.5×10^{-2}	8.7 ~ 11.9	二级风险
K19 + 081—K19 + 252	淤泥质粉质黏土	4.5×10^{-5}	4.7 ~ 8.7	无喷涌风险

根据表3可知:绿滨区间存在6条喷涌风险等级的施工单元链,包含3个风险等级,其中一级风险等级区段长约408 m,二级风险等级区段长约463 m,无喷涌风险等级区段长约241 m,占比分别为36.69%、41.64%和21.67%。在该区间施工时,螺旋输送机喷涌风险高,施工距离长,需要针对不同风险等级采用不同防喷涌措施,从而保证盾构施工安全高效。

3 结论

1) 建立了土仓-螺旋输送机压力梯度模型。将压力仓视为水通过孔隙介质的二维达西流动,而螺旋输送机内的流体视为一维达西流动。结合边界

等级,为保证盾构安全施工提供依据。

图5 H_1 -临界渗透系数关系曲线Fig. 5 Relation curves between water head height at soil silo top(H_1) and critical permeability coefficients

2.2 施工区段螺旋输送机喷涌风险等级划分

将各施工区段相关参数代入建立的土仓-螺旋输送机压力梯度模型,结合本文提出的螺旋输送机喷涌风险分级评价模型,计算盾构施工时的螺旋输送机喷涌风险等级,将具有相同风险等级且相邻的管片区间合并,形成喷涌风险等级单元链,如表1所示。

条件,采用有限差分-解析解联合方法计算了压力仓一定水压条件下螺旋输送机出口处的水头-涌水量曲线,提出了螺旋输送机喷涌风险划分方法。

2) 提出了螺旋输送机喷涌风险等级划分标准。将螺旋输送机喷涌风险划分为五级标准,分别为一级风险区、二级风险区、三级风险区、四级风险区和安全区,并给出了分级标准。

3) 对漫滩地区盾构施工产生的螺旋输送机喷涌风险进行了分区、分级。计算获得施工区段的喷涌风险等级,并形成施工单元链;统计发现一级风险区、二级风险区、安全区等的长度占比分别为36.69%、41.64%和21.67%。

参考文献

- [1] 竺维彬,鞠世健. 地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M]. 广州:暨南大学出版社,2009.
- ZHU Weibin, JU Shijian. Research on metro shield construction risk sources and typical incidents[M]. Guangzhou: Jinan University Press, 2009.
- [2] 周诚. 地铁工程建设安全控制系统设计与应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- ZHOU Cheng. Study on the design and application for safety control system in metro construction project[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [3] 吕培印,王亚利,马啸,等. 地铁工程事故案例库建立与风险评估研究[J]. 都市快轨交通,2023,36(3):1.
- LYU Peiying, WANG Yali, MA Xiao, et al. Construction of a case base for subway engineering accidents and risk assessment analysis[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(3):1.
- [4] 罗敏鹤,王旭春,刘绪壮,等. 土压平衡盾构掘进喷涌处治分析与实践[J]. 市政技术,2023,41(2):98.
- LUO Minhe, WANG Xuchun, LIU Xuzhuang, et al. Analysis and practice of spewing treatment of earth pressure balance shield tunneling[J]. Journal of Municipal Technology, 2023, 41(2):98.
- [5] 钟志全,李平. 土压平衡盾构喷涌防治技术[J]. 建筑机械化,2017,38(11):41.
- ZHONG Zhiquan, LI Ping. Prevention and control technology of earth pressure balance shield[J]. Construction Mechanization, 2017, 38(11):41.
- [6] 王潇. 盾构施工喷涌及地表变形的预警预测方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- WANG Xiao. Research on method of pre-warning and prediction for spewing and ground surface movements in shield construction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [7] 刘琦. 富水砂层地铁施工的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J]. 中国设备工程,2019(8):174.
- LIU Qi. Control technology of EPB shield machine blowout during metro construction in water-bearing sand layer[J]. China Plant Engineering, 2019(8):174.
- [8] 杨永涛. 富水地层土压平衡盾构机防喷涌控制技术[J]. 建材世界,2023,44(3):76.
- YANG Yongtao. Anti-surge control technology of earth pressure balance shield in water-rich strata[J]. The World of Building Materials, 2023, 44(3):76.
- [9] 赵宗智,崔明,荆敏,等. 考虑施工过程的土压平衡盾构喷涌预警研究[J]. 北京交通大学学报,2020,44(6):1.
- ZHAO Zongzhi, CUI Ming, JING Min, et al. Blowout early warning of earth pressure balance shield during the construction process[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(6):1.
- [10] 肖明清,封坤,薛光桥,等. 软土地层盾构姿态偏移引起的附加土压力影响因素研究[J]. 现代隧道技术,2025,62(2):141.
- XIAO Mingqing, FENG Kun, XUE Guangqiao, et al. Study on the influence factors of additional earth pressure caused by shield attitude deviation in soft soil strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(2):141.
- [11] 宁士亮. 富水砂层盾构渣土改良技术[J]. 铁道建筑技术,2014(3):86.
- NING Shiliang. Improvement techniques for residue soil of shield tunneling in water-rich sand bed[J]. Railway Construction Technology, 2014(3):86.
- [12] 邴帅. 青岛富水复杂地层盾构施工渣土改良技术研究[J]. 低温建筑技术,2020,42(4):130.
- BING Shuai. Soil conditioning for shield construction of water-rich complex stratum in Qingdao City[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(4):130.
- [13] 余俊,郑靖凡,杨鑫歆,等. 土压平衡盾构渗流场解析解及喷涌判别研究[J]. 岩土力学,2023,44(增刊1):572.
- YU Jun, ZHENG Jingfan, YANG Xinxin, et al. Analytical solution of seepage field and identification of spewing in earth pressure balance shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1):572.
- [14] 魏文义. 土压平衡盾构加气排水防喷涌技术研究[J]. 铁道建筑技术,2021(2):38.
- WEI Wenyi. Research on the technology of aeration drainage and spew prevention for earth pressure balance shield[J]. Railway Construction Technology, 2021(2):38.
- [15] 米振远,郑旭日. 土压平衡盾构喷涌问题处置的监理实践与创新[J]. 建设监理,2021(8):65.
- MI Zhenyuan, ZHENG Xuri. Supervision practice and innovation on the handling of gushing problem of earth pressure balance shield[J]. Project Management, 2021(8):65.
- [16] 胡长明,崔耀,王雪艳,等. 土压平衡盾构施工穿越砂层渣土改良试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2013,45(6):761.
- HU Changming, CUI Yao, WANG Xueyan, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in full section sand layer[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, 45(6):761.
- [17] 陆正. 饱和粉土粉砂层土压平衡盾构渣土改良技术应用[J]. 绿色建筑,2021,13(4):123.
- LU Zheng. Saturated silt layer earth pressure balancing shield residue soil improvement technology[J]. Green Building, 2021, 13(4):123.
- [18] 戴轩. 城市地下工程漏水漏砂灾害演化机理的试验与理论研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- DAI Xuan. Model test and theory study on the urban underground engineering hazards induced by loss of groundwater and sand[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [19] ZHENG G, DAI X, DIAO Y. Parameter analysis of water flow during EPBS tunnelling and an evaluation method of spewing failure based on a simplified model[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 58:96.
- [20] 朱伟,秦建设,魏康林. 土压平衡盾构喷涌发生机理研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(5):589.
- ZHU Wei, QIN Jianshe, WEI Kanglin. Research on the mechanism of the spewing in the EPB shield tunnelling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5):589.

· 收稿日期:2023-07-10 修回日期:2023-08-02 出版日期:2025-06-10
Received:2023-07-10 Revised:2023-08-02 Published:2025-06-10
· 通信作者:曹铁军,高级工程师,32754511@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license