土压平衡盾构泡沫泥浆改良砾砂防喷涌研究

范文静[1]，钟小春[1,2]，黄思远[1]，丰土根[1,3]，胡鹏[2]

（1. 河海大学土木与交通学院，江苏 南京 210024；2. 赣东学院应用工程学院，江西 抚州 344000；3. 江西理工大学土木与测绘工程学院，江西 赣州 341000）

摘要：为应对高渗透性砾砂地层中土压平衡盾构施工时螺旋输送机易发生喷涌、外掺剂用量大等问题，本研究采用泡沫泥浆对渣土进行改良。通过半衰期测定与微观结构观察，对比了泡沫泥浆与纯泡沫的稳定性；通过流变性测试，比较了泡沫泥浆与膨润土泥浆的初始动切力；借助跳桌试验与有压渗透试验，分析了泡沫体积占比（FVR）与泡沫泥浆注入比（FFSIR）对改良渣土防喷涌性能的影响。结果表明：1）泡沫泥浆中的泥浆相可有效抑制泡沫液膜变薄，使其在长时间内保持较高稳定性，有利于降低临时停机或管片拼装后重启时发生喷涌的风险；2）泡沫泥浆可显著减少膨润土泥浆用量，且改良效果未明显下降，即使泡沫占比达 50%，其对防喷涌能力的削减幅度不超过 20%；3）与膨润土泥浆相比，泡沫泥浆的初始动切力降幅控制在 20%以内，对粗颗粒砾砂地层适应性良好，并能长时间维持适宜的流塑性；4）经泡沫泥浆改良后的渣土流塑性显著改善，渗透系数可降至 3.6×10^{-5} cm/s。

关键词：土压平衡盾构；砾砂地层；渣土改良；泡沫泥浆；喷涌压力

中图分类号: U455　　**文献标志码**:A

Study on Anti-Spewing of Foam Slurry-Conditioned Gravelly Sand for EPB Shield Tunneling in Deep-Buried Strata

Fan Wenjing[1]，Zhong Xiaochun[1,2]，Huang Siyuan[1]，Feng Tugen[1,3]，Hu Peng[2]

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. College of Applied Engineering, Gandong University, Fuzhou 344000， China; 3. College of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: To address the problems of easy spewing in screw conveyors and excessive addition of admixtures during earth pressure balance (EPB) shield tunneling in highly permeable gravelly sand strata, this study adopts foam-slurry for soil conditioning. The stability of foam-slurry and pure foam was compared via half-life measurement and microstructure observation; the initial yield stress of foam-slurry and bentonite slurry was analyzed through rheological tests; and the effects of Foam Volume Ratio (FVR) and Foam Slurry Injection Ratio (FSIR) on the anti-spewing performance of conditioned soil were investigated by means of flow table tests and pressurized permeability tests. The results show that: 1) The slurry phase in foam-slurry can effectively inhibit the thinning of foam liquid films, maintaining high stability over an extended period, which is conducive to reducing the risk of spewing during restart after temporary shutdown or segment erection; 2) Foam-slurry can significantly reduce the dosage of bentonite slurry without obvious deterioration of conditioning effect; even when the foam ratio reaches 50%, the reduction in anti-spewing capacity is less than 20%; 3) Compared with bentonite slurry, the decrease in initial yield stress of foam-slurry is controlled within 20%, which exhibits good adaptability to coarse-grained gravel-sand strata and can maintain favorable flow plasticity for a long time; 4) The flow plasticity of soil conditioned by foam-slurry is significantly improved, and the permeability coefficient can be reduced to 3.6×10^{-5} cm/s.

Key words: Earth Pressure Balance Shield; Gravelly Sand Stratum; Soil Conditioning; Foam Slurry; Spewing Pressure

土压平衡盾构技术凭借施工安全性高、对周边环境扰动小、机械化程度高等显著优势，广泛应用于城市地下隧道工程建设[1]。随着技术的不断成熟，其适用范围逐步拓展至软土、砂土及复合地层等各类复杂地质条件[2]。然而，当该技术应用于高渗透性砾砂地层掘进时，仍面临严峻挑战。

收稿日期：2026-08-26

基金项目：国家自然科学基金面上项目（52178387）

高渗透性砾砂地层具有粗颗粒占比高、颗粒级配不良[3]、孔隙率大、渗透性强的特点，在深埋段较高地层压力与地下水作用下，地下水极易在压力梯度驱动下穿透渣土形成渗流通道，进而引发喷涌灾害。该灾害会直接导致盾构掘进效率锐减、出土量失控，严重时还会引发开挖面失稳等连锁工程事故[4]。因此亟需通过渣土改良措施增强土体抗渗性，保障掘进安全[5]。

在现有渣土改良技术中，膨润土泥浆或高分子聚合物改性泥浆可有效降低渣土渗透系数，但应用于高渗透性砾砂地层时，需掺入大量膨润土泥浆，增加了材料购置成本，同时降低施工效率。泡沫改良剂虽成本低，制备便捷[6]，但在高水压力作用下降低砂土渗透系数的效果十分有限。泡沫泥浆（或称泥浆-泡沫组合改良剂）是砾砂等地层盾构渣土改良的常用材料[7]，其改良效果优于单一泡沫或膨润土泥浆。但既有应用多采用刀盘前分区独立注料的方式，难以实现改良剂充分搅拌混合，易导致泡沫分散不均、改良体系稳定性差；同时，针对高渗透性砾砂地层，系统考察泡沫体积占比与改良剂注入比共同作用下防喷涌性能的研究仍较有限。

基于上述认识及现有技术缺陷，本文采用泡沫泥浆对土体进行改良。与工程中常见的刀盘前分区注入不同，本文在室内按预设体积比将微细泡沫预先均匀混入膨润土泥浆，经充分搅拌形成稳定的气-液-固三相复合浆体后再用于改良渣土，以改善泡沫分散均匀性与改良体系的稳定性。本文通过跳桌试验和有压渗透试验，以流动度、渗透系数、喷涌压力为评价指标，探究泡沫体积占比（Foam Value Ratio，FVR）和泡沫泥浆注入比（Foam Slurry Injection Ratio，FSIR）对改良效果的影响规律，明确泡沫泥浆的改良效果与技术优势，为该类地层渣土改良及防喷涌控制提供试验依据。

1 试验材料

1.1 砂土

本文选取广州地铁18号线HP2中间风井至HP3盾构井区间的土样作为研究对象。取一定量烘干土样，采用标准筛进行筛分试验，绘制得到该土样的颗粒级配曲线如图1所示。该土样主要为砾粒（d=2~60 mm）和砂粒（d=0.075~2 mm），分别占41.4%和53.72%，细粒（d＜0.075 mm）不足5%；土体不均匀系数C_u=14，曲率系数C_c=0.96。根据《铁路工程土工试验规程》TB 10102—2023[8]对土样进行划分，该土样属于级配不良粗砂SP。由其在地层适应性分区中的位置可以看出该土样的粒径较粗，此颗粒组成易导致渣土流动性较差、渗透性较大。因此，需对该土样进行改良，以增强渣土的流动性并降低其渗透性[9]。

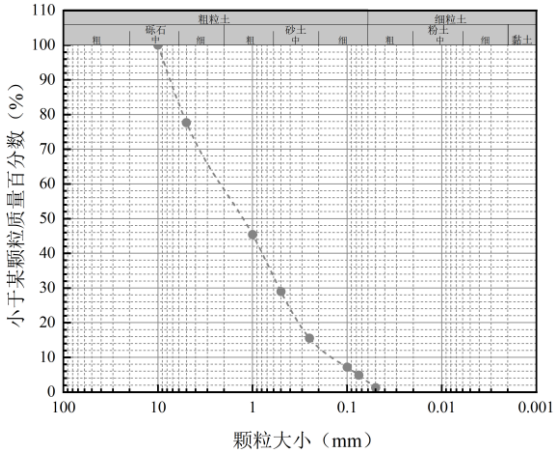


图1 颗粒级配曲线图

Fig. 1 Particle size distribution curve

1.2 泡沫泥浆

1.2.1 泡沫

泡沫的制备采用自制的发泡装置。半衰期和发泡倍率是评价泡沫稳定性和发泡剂发泡性的关键参数。发泡剂溶液浓度的高低能显著影响泡沫性能[10-11]。测试不同发泡剂溶液的发泡半衰期和发泡倍率，结果见表 1、表 2。由表 1、表 2 分析可知，浓度为 1%的发泡剂溶液制得的泡沫展现出良好的稳定性和发泡性，并兼具一定的经济性。因此，本研究确定该浓度为后续渣土改良试验中发泡剂溶液的基准浓度。

表 1 不同发泡剂溶液浓度下的泡沫半衰期

Table 1 The foam half-life of different concentrations

泡沫剂溶液浓度/%	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
半衰期/min	15	15.7	16.8	17.2	17.0	17.1

表 2 不同发泡剂溶液浓度下泡沫发泡倍率

Table 2 Foam expansion ratio with different concentrations

泡沫剂溶液浓度/%	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
发泡倍率	14	17	20	21	22	23

1.2.2 泡沫泥浆的制备

在完成基准膨润土泥浆（膨水比为 1∶7[12-13]）及泡沫的制备后，系统开展泡沫泥浆的配制。具体制备流程如下：首先量取一定体积的膨润土泥浆置于搅拌容器中，按预设体积比注入预先制备的稳定泡沫；随后以恒定搅拌速率进行充分混合，确保气泡在泥浆基体中均匀分散，最终形成结构稳定的泡沫泥浆体系。通过调控泡沫掺入量，配制出不同泡沫体积占比的泡沫泥浆，见表 3。

表 3 不同泡沫体积占比泡沫泥浆

Table 3 Foam slurry with different foam volume ratios

改良剂	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4	FS-5
FVR/%	16.67	28.57	37.5	44.44	50

2 泡沫泥浆与传统改良剂的性能对比

2.1 泡沫泥浆与泡沫的性能对比

2.1.1 半衰期

半衰期作为评价泡沫稳定性的关键指标，本文同样采用半衰期作为评价泡沫泥浆稳定性的指标。水性泡沫的稳定性可以用泌水半衰期或体积半衰期评价，但泡沫泥浆中泥浆的粘滞性导致泌水过程不明显，可能存在较大误差，而泡沫破裂现象易被观察到。因此，本文通过测定泡沫泥浆的体积半衰期评价泡沫泥浆的稳定性。不同泡沫体积占比下泡沫泥浆的半衰期见表 4。由表 4 分析可知，泡沫泥浆半衰期随 FVR 的增大而缩短，即使 FVR 为 50%，泡沫泥浆半衰期与纯泡沫的相比仍增长了近 260 倍，说明泡沫泥浆稳定性更好。

表 4 不同泡沫体积占比泡沫泥浆的半衰期

Table 4 Half-life of foam slurry at different foam volume ratios

FVR/%	16.67	28.57	37.50	44.44	50.00
半衰期/h	385	269	230	101	73

2.1.2 微观结构演变

为揭示泡沫与泡沫泥浆中泡沫的稳定性差异，采用带有 AxioCam ICc 3 数码相机的蔡司光学显微镜

（Oberkochen，德国）对泡沫及不同 FVR 的泡沫泥浆进行显微观察。泡沫或泡沫泥浆制备完成后立即用刮刀轻刮表面并涂抹在载玻片上，轻轻盖上盖玻片，使样品尽可能平铺于载波片上，提高透光率。分别在样品制备后对同一区域进行拍摄，以追踪泡沫液膜排液、粗化与破裂过程。每组样片不同时间节点拍摄 30 张照片，从中选取结构清晰、泡沫分布均匀、无明显人为扰动的代表性图像，以反映泡沫液膜排液与粗化过程，而非不同试样间的初始差异。

图 2 为泡沫改良剂微观结构在 20 min 内的演变。由图可知，t=0 min 时，泡沫间存在较厚的液膜，且液膜呈湿润状态；t=10 min 时，泡沫间液膜在重力作用下发生排液，液膜明显变薄，同时泡沫在气体的扩散作用下发生粗化；t=20 min 时，液膜消失泡沫破裂。

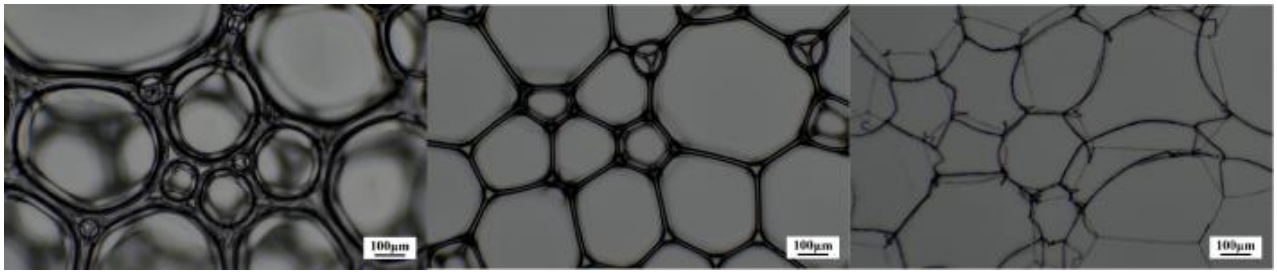
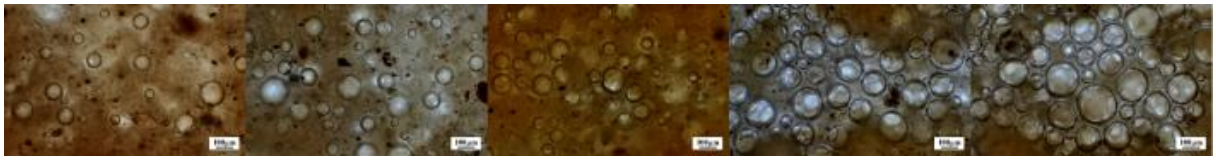


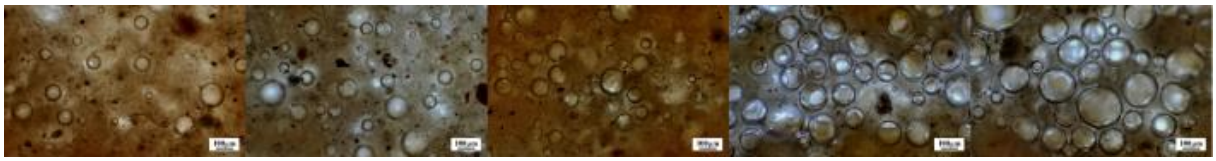
图 2 泡沫改良剂微观结构的演变（0min→10min→20min）

Fig. 2 Evolution of microstructure of foam modifier（0min→10min→20min）

图 3 为泡沫泥浆改良剂微观结构在 2 h 内的演变。由图 3 分析可知，当 FVR 较小时，泡沫间距离较大，泡沫直径较小，2 h 后泡沫直径变得更小甚至发生破裂；当 FVR 较大时，泡沫间距离较小，泥浆含量较小，泡沫直径较大，2 h 后泡沫直径变大甚至发生破裂。与图 2 中泡沫改良剂微观结构中的泡沫相比，泡沫泥浆改良剂中的泡沫形态发生了改变，呈球形，且泡沫直径随 FVR 增大而增大。



（a）0 h



（b）2 h

图 3 泡沫泥浆改良剂微观结构的演变（FVR=16.67%→FVR=28.57%→FVR=37.5%→FVR=44.44%→FVR=50%）

Fig. 3 Evolution of microstructure of foam slurry modifier

（FVR=16.67%→FVR=28.57%→FVR=37.5%→FVR=44.44%→FVR=50%）

为了分析泡沫改良剂和泡沫泥浆改良剂中泡沫的演变过程，使用 ImageJ 图像处理软件统计分析气泡的直径分布及随时间的变化规律。图 4 为泡沫和泡沫泥浆中泡沫的直径分布。由图 4 分析可知，泡沫改良剂中泡沫直径分布范围最广，为25~350 μm。20 min后，泡沫改良剂中的泡沫直径分布范围扩大为25~450 μm。随着 FVR 减小，泡沫泥浆改良剂中泡沫直径分布范围变小，且泡沫直径变化幅度变小。当 FVR≤44.44%时，泡沫泥浆改良剂中泡沫直径分布范围在 2 h 内基本不变。

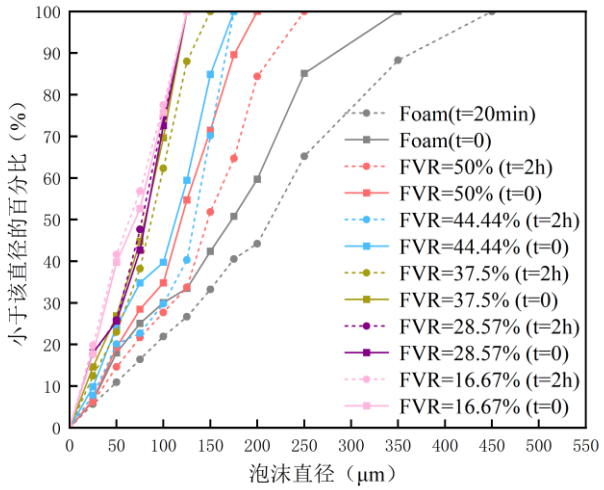


图 4 泡沫、泡沫泥浆改良剂中泡沫的直径分布

Fig.4 Bubble size distribution in foam and foam slurry modifier

综上所述，纯泡沫粗化较快，稳定性较差，导致泡沫改良土的渗透性呈现时变性，在渗透初期具有较好的抗渗性，其后抗渗性降低，难以有效解决盾构施工被迫停机下复推导致的严重喷涌问题。为防止喷涌，同时考虑到管片拼装等工序耗费时间，改良剂应具备良好的稳定性[14-17]。泡沫泥浆中泡沫间存在泥浆，泥浆的相互排斥作用有效延缓了泡沫的粗化，且这种排斥作用随着泡沫体积占比增大逐渐减小，进而导致泡沫泥浆稳定性随泡沫体积占比增大而降低[18][19]。

2.2 泡沫泥浆与膨润土泥浆的性能对比

本节从密度和流变性两个方面探讨泡沫泥浆和膨润土泥浆基本性质及对渣土改良的影响。

2.2.1 密度

各种改良剂的密度如表 5 所示。纯膨润土泥浆的密度约为 1.16 g/cm^3，而不同比例的泡沫泥浆的密度可在 0.69~1.13 g/cm^3 范围内调节，当 FVR 为 50%时，泡沫泥浆的密度比膨润土泥浆的密度降低了 40%，便于工程实施组织。

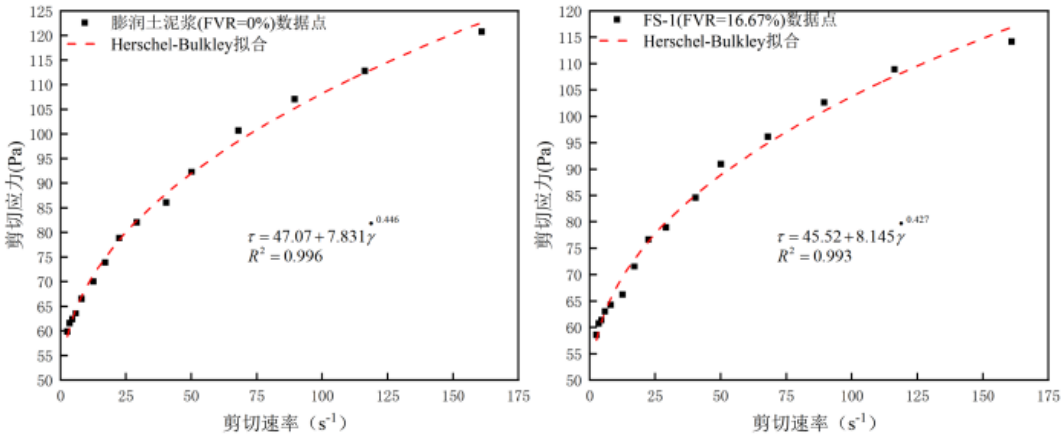
2.2.2 流变性

流变性测试采用 NXS-11B 型旋转黏度计，各种改良剂的流变曲线如图 5 所示。从中看出，泡沫泥浆、膨润土泥浆的剪切应力随着剪切速率的增加而增加。使用 Herschel-Bulkley 流体模型对不同改良剂的流变性测试结果进行拟合，且 Herschel-Bulkley 流体模型拟合曲线的决定系数 R^2 高达 0.99，拟合度极高，拟合结果见表 6。由表 6 分析可知，膨润土泥浆的初始动切力为 47.07Pa，泡沫泥浆的初始动切力为 38.39~45.52 Pa，即使 FVR 达到了 50%，其初始动切力与膨润土泥浆的相比仅下降了 18.44%。

表 5 不同种类改良剂的密度

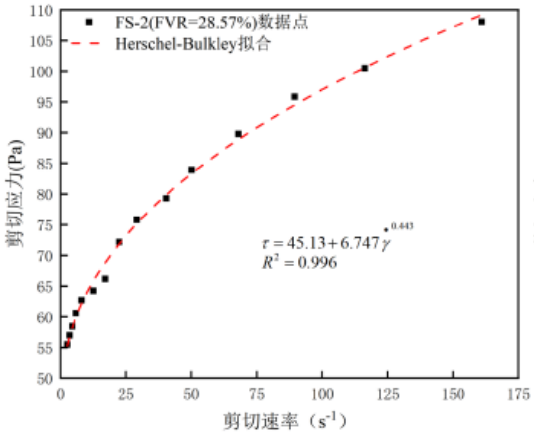
Table 5 Density of different types of modifiers

改良土种类	膨润土	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4	FS-5
密度/g·cm^{-3}	1.16	1.13	0.97	0.82	0.79	0.69

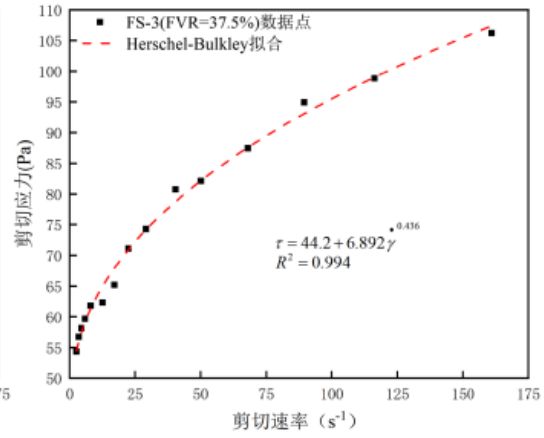


（a）彭润土泥浆

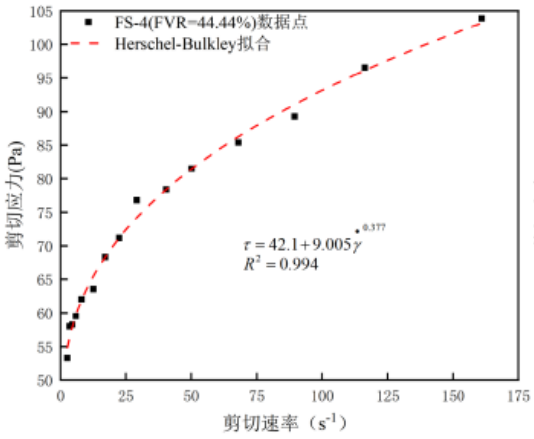
（b）FS-1



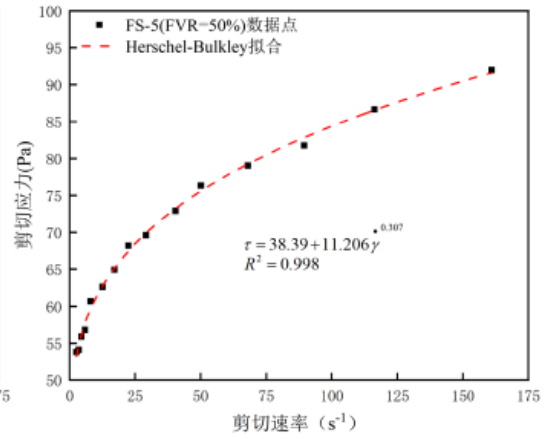
(c) FS-2



(d) FS-3



(e) FS-4



(f) FS-5

图 5 不同泡沫体积占比泡沫泥浆流变曲线

Fig.5 Rheological Curves of Foam Slurry with Different Foam Volume Ratios

表 6 不同改良剂的流变性

Table 6 Rheological properties of different modifiers

改良剂名称	FVR(%)	初始动切力 τ_0（Pa）	稠度系数 K（Pa·s）	幂指数 n
膨润土泥浆	0	47.07	7.831	0.446
FS-1	16.67	45.52	8.145	0.427
FS-2	28.57	45.13	6.747	0.443
FS-3	37.5	44.2	6.892	0.436
FS-4	44.44	42.1	9.005	0.377
FS-5	50	38.39	11.206	0.307

2.3 防喷涌效果对比

本文采用自制可调压式渗透仪对不同泡沫体积占比泡沫泥浆改良土（改良剂注入比为 30%）开展喷涌单元体试验。

2.3.1 试验装置

自制可调压式渗透仪主要由空压机、有压渗透仪、数据采集装置构成，如图 6 所示。

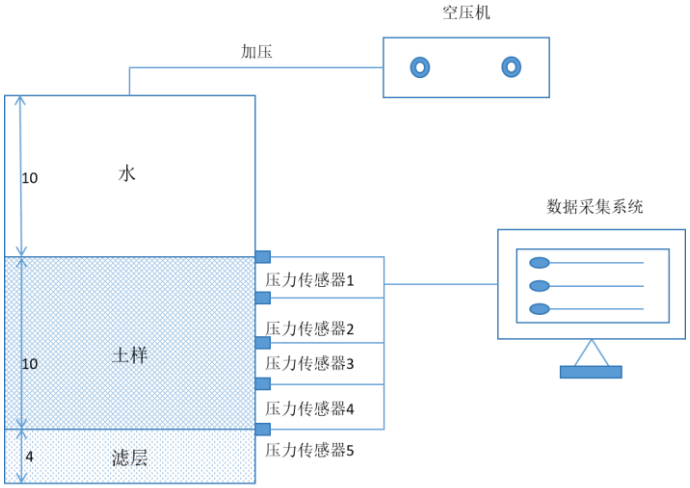


图 6 自制可调压式渗透仪器的示意图

Fig.6 Schematic Diagram of Self-made Pressure-adjustable Permeameter

2.3.2 试验方法

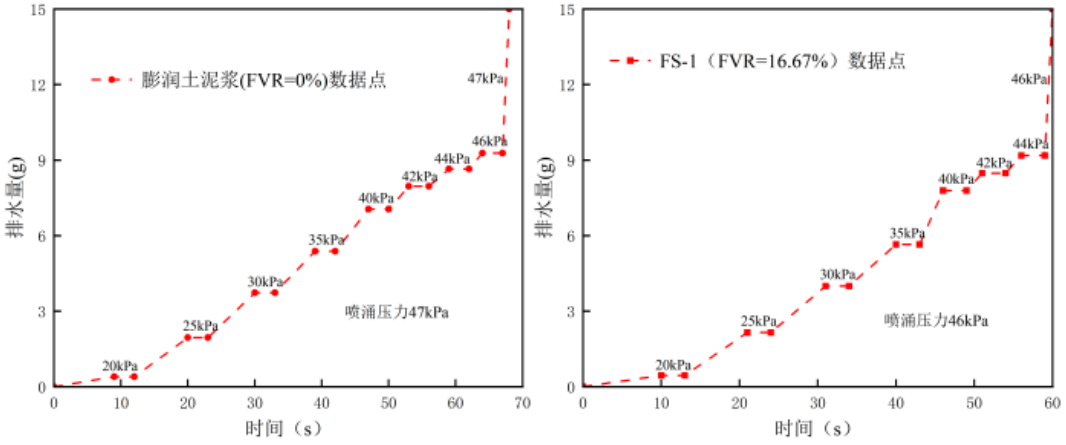
在渗透仪底部放置 4 cm 粒径范围为 2~5 mm 的粗砂作为滤层，并用水对滤层进行饱和处理，在滤层上方分层添加改良土，每次装入改良土高度都为 10 cm，在其上置放缓冲垫然后缓慢注入自来水以防止对土样扰动。有压渗透仪顶部和空压机连接，施加压力。试验过程中逐级增大压力并观察排水口。观察发现，当压力较低时，排水口排水量呈现先增加后趋于稳定的趋势且水呈透明状，随着压力增加，有少量泡沫排出，当压力达到一定值时，排水量骤增且浑浊，认为喷涌即将发生，此时压力即为该单元体试验的喷涌压力。

需特别指出，本试验试样高度为 10 cm，所测喷涌压力为试样上下端面的临界渗透压差，属单元体尺度的相对评价指标，主要用于比较不同配比改良渣土的防喷涌能力；其绝对值受试样尺寸、滤层粒径与加载速率等因素影响，不等同于现场实际水压力，亦不直接对应某一埋深条件下的临界水压。

2.3.3 试验结果

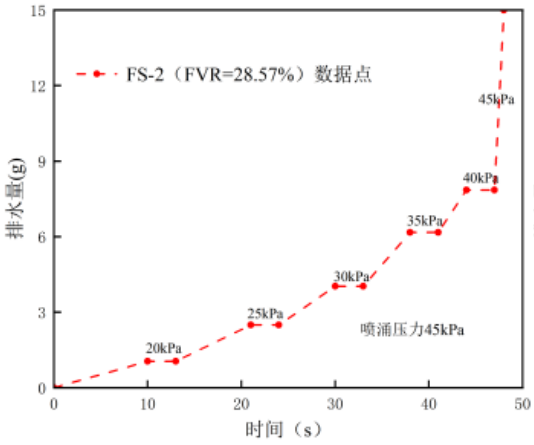
不同压力下排水口排水量随时间变化规律见图 7。从中可以看出，排水量随压力增大呈现先增长后稳定的规律，当压力达到一定值时排水量骤增，认为喷涌发生，此时压力即为该单元体试验的喷涌压力。

图 8 为不同改良剂下（改良剂注入比为 30%）改良土的喷涌压力，从中可知，泡沫泥浆改良土的防喷涌能力随着泡沫体积占比的增加而降低，但降低幅度不显著，即使泡沫占比达到 50%，其喷涌压力值较膨润土泥浆的仅降低了 19.15%。

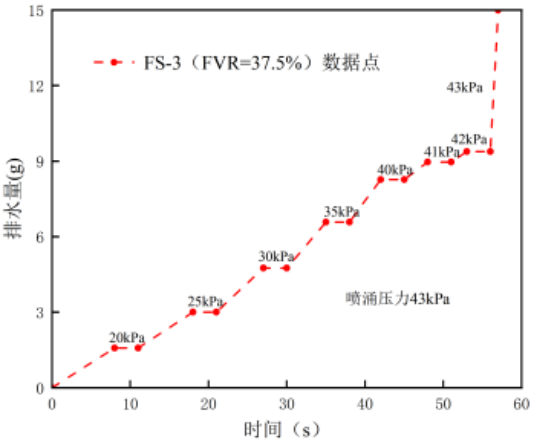


（a）彭润土泥浆

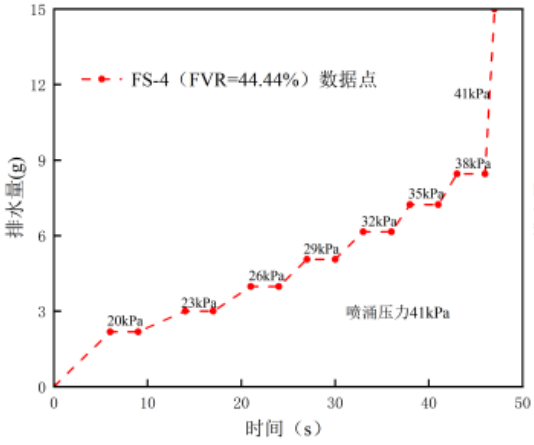
（b）FS-1



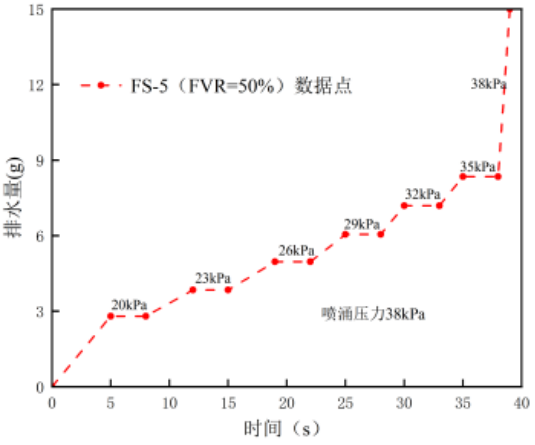
(c) FS-2



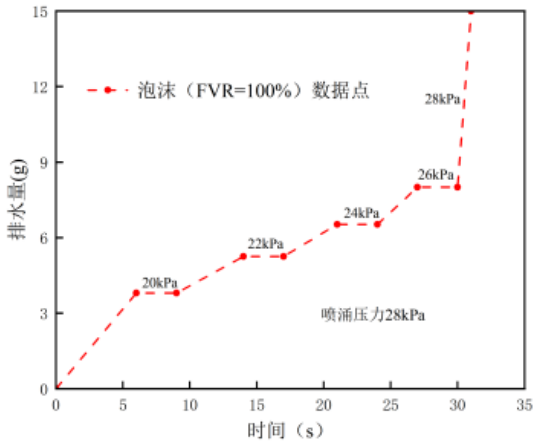
(d) FS-3



(e) FS-4



(f) FS-5



（g） 泡沫

图 7 不同压力下排水口排水量随时间变化关系

Fig.7 Relationship Between Drainage Volume of Outlet and Time Under Different Pressures

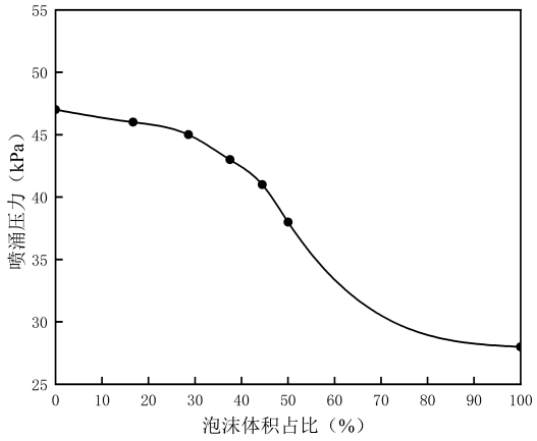


图 8 不同泡沫体积占比泡沫泥浆（改良剂注入比为 30%）改良土的喷涌压力

Fig.8 Spewing Pressure of Improved Soil with Foam Slurry of Different Foam Volume Ratios (Foaming Agent Injection Ratio: 30%)

3 泡沫泥浆改良土改良效果分析

3.1 流动度

为探究 FVR 和 FSIR 对泡沫泥浆改良土流动度的影响规律，开展了跳桌试验，试验结果如图 9 所示。图 9 显示，泡沫泥浆改良土的流动性随 FSIR 的增加呈现不同幅度的增长，FS-5 因泡沫体积占比最大，展现出良好的流动性。当 FSIR 为 10%时，泡沫泥浆改良土的流动性与未改良土的相比提升了 50%以上，说明低泡沫含量便可以使改良土达到良好的流动性，也说明泡沫泥浆中的泡沫起到良好的润滑作用，通过减少颗粒间摩擦提升流动性[20-21]。

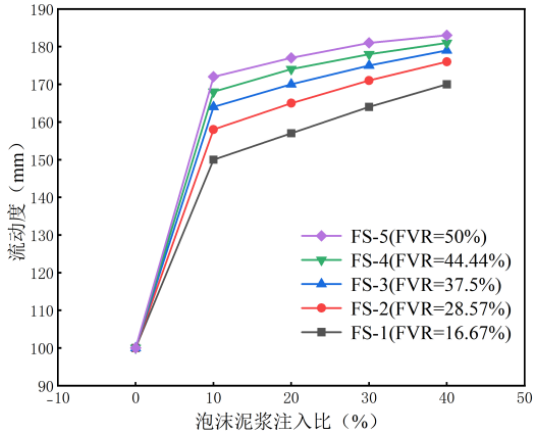


图 9 不同泡沫体积占比泡沫泥浆改良土的流动度随泡沫泥浆注入比的变化

Fig.9 Variation of Fluidity of Foam-slurry Improved Soil with Different Foam Volume Ratios versus Foam Slurry Injection Ratio

3.2 渗透系数

在土压平衡盾构掘进过程中，为防止喷涌发生，改良土的渗透系数应低于 1.0×10^{-3} cm/s[22-23]。未改良土的渗透系数为 7.5×10^{-3} cm/s，不满足抗渗性要求，需进行渣土改良。

为探究 FVR 和 FSIR 对泡沫泥浆改良土渗透性的影响规律，开展了有压渗透试验，试验结果如图 10 所示。由图 10 分析可知，泡沫泥浆改良土的渗透系数随 FVR 的减小而降低，其中 FS-1 因泡沫体积占比最小，其改良土表现出最优的抗渗性能；当 FSIR 为 10%时，改良土的渗透系数降至 6.55×10^{-4} cm/s 以下，相较于未改良土下降了一个数量级，这表明在较小的 FSIR 条件下即可使改良土具有满足防喷涌要求的低渗透性；即便 FS-5 中泡沫体积占比达 50%，其改良土的渗透系数仍低于 1.0×10^{-3} cm/s，不仅能够满足防喷涌的低渗透性要求，还可以减少泥浆用量，进而降低材料购置成本。

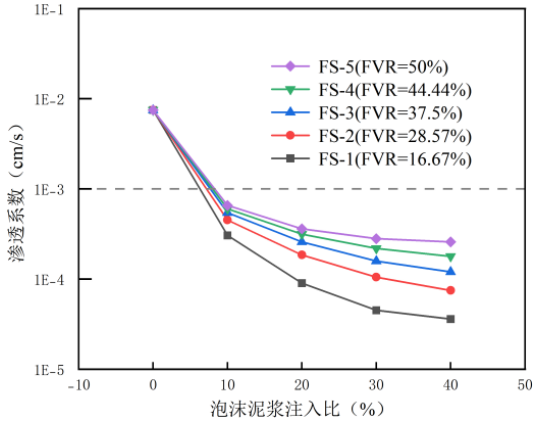


图 10 不同泡沫体积占比泡沫泥浆改良土的渗透系数随泡沫泥浆注入比的变化

Fig.10 Variation of Permeability Coefficient of Foam-slurry Improved Soil with Different Foam Volume Ratios with Foam-slurry Injection Ratio

3.3 喷涌压力

为探究 FVR 和 FSIR 对泡沫泥浆改良土喷涌压力的影响规律，开展了有压渗透试验，试验结果如图 11 所示。图 11 显示，泡沫泥浆改良土的喷涌压力随着 FVR 的增大而降低，且随着 FSIR 的增大，FVR 对喷涌压力的影响作用趋于饱和；当 FVR=50%时，泡沫泥浆改良土的喷涌压力增至 24 kPa 以上，较未改良土增长了 3.8 倍，且该泡沫泥浆中泡沫体积占比高达 50%，可在提升渣土防喷涌能力的基础上，大幅减少泥

浆用量，降低材料购置成本。

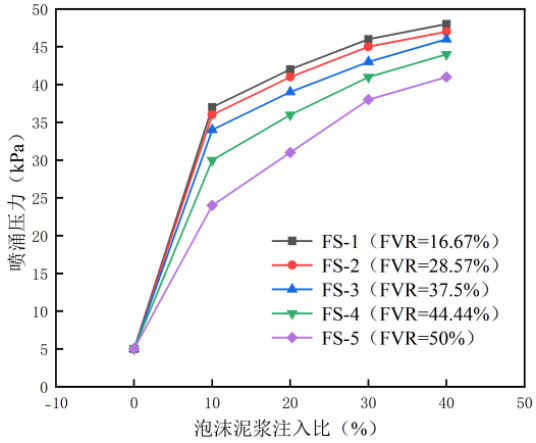


图 11 不同泡沫体积占比泡沫泥浆改良土的喷涌压力随泡沫泥浆注入比的变化

Fig.11 Variation of Spewing Pressure of Foam-slurry Improved Soil with Different Foam Volume Ratios with Foam Slurry Injection Ratio

4 结论

本文通过半衰期测试与微观结构观察，对比了纯泡沫与泡沫泥浆的稳定性；通过密度与流变性测试，比较了膨润土泥浆与泡沫泥浆的基本性质；借助跳桌试验与有压渗透试验，以流动度、渗透系数和喷涌压力为指标，系统分析了 FVR 和 FSIR 对改良土体抗喷涌性能的影响。主要结论如下：

1）泡沫泥浆的半衰期超过 73 h，显著优于纯泡沫。泡沫泥浆中的泥浆相可有效抑制泡沫粗化，使其长期保持良好的稳定性；

2）与膨润土泥浆相比，泡沫泥浆的初始动切力下降幅度有限。当 FVR 处于 16.67%~50%范围内时，其初始动切力仅降低 3.29%~18.44%，同时仍能有效提升土体流塑性；

3）在砾砂中注入泡沫泥浆可显著降低渣土渗透性，渗透系数由未改良状态下的 7.5×10^{-3} cm/s 降至 3.6×10^{-5} cm/s，降幅达两个数量级，同时跳桌流动度提升至 150 mm 以上，表明该改良方式在提升流塑性的同时具备优良的抗渗性能；

4）泡沫泥浆可大幅减少膨润土泥浆用量，且对渣土的改良效果未见明显下降。即使泡沫体积占比达 50%，其抗喷涌性能降幅仍控制在 20%以内；

5）工程配比建议：

综合考虑泡沫泥浆稳定性、改良土流动性、抗渗性及材料成本：

• 优先推荐工况：FVR=28.57%~44.44%，FSIR=20%~30%的泡沫泥浆配比，该配比兼顾抗喷涌能力、流动性能，同时节约膨润土材料；

• 若现场膨润土供应紧张，可选用 FVR=50%、FSIR=30%~40%，仍可满足防喷涌基本要求，但应加强土舱压力及螺旋输送机状态监测；

• 高水压风险区段，建议降低泡沫体积占比，优先选用 FVR=16.67%~37.5%，FSIR=30%~40%，进一步提升抗渗和防喷涌储备。

注：以上为室内试验得到的推荐范围，现场施工时，应结合实际地质、水压、出土情况开展渣土试样复核，动态微调泡沫及泥浆注入参数。

参考文献：

[1] 余俊，郑靖凡，张志中，等. 考虑推进过程的土压平衡盾构渗流场解析解及喷涌判别[J]. 岩土工程学报，2024, 46(10): 2101-2110.
Yu Jun, Zheng Jingfan, Zhang Zhizhong, et al. Analytical solution for seepage field and spewing discrimination during propulsion process of earth pressure balance shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(10): 2101-2110.

[2] 蔡辉. 土压平衡盾构在砂层中掘进的渣土改良技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(09): 928-934.
Cai Hui. Ground Conditioning Technology for EPB Shield Tunneling in Sand Strata[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(09): 928-934.

[3] 王树英，胡钦鑫，王海波，等. 盾构泡沫改良砂性渣土渗透性及其受流塑性和水压力影响特征研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(02): 94-102.
Wang Shuying, Hu Qinxin, Wang Haibo, et al. Study on Permeability Characteristics of the Shield Foam Conditioned Sand Under Influences of Flow Plasticity and Water Pressure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(02): 94-102.

[4] 王树英，刘朋飞，胡钦鑫，等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(05): 8-34.
Wang Shuying, Liu Pengfei, Hu Qinxin, et al. State-of-the-art on Theories and Technologies of Soil Conditioning for Shield Tunneling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(05): 8-34.

[5] 支斌. 富水砂层土压平衡盾构喷涌机理与渣土运移规律研究[D]. 济南：山东大学, 2021.
Zhi Bin. Research on Spewing Mechanism and Migration Law of Conditioned Soil in Water-Rich Sandy Strata for Earth Pressure Balance Shield[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[6] 王树英，令凡琳，黄硕. 泡沫改良粗粒渣土渗透性计算模型及适用性对比研究[J]. 岩石力学与工程学报，2021, 40(11): 2357-2365.
Wang Shuying, Ling Fanlin, Huang Shuo. A permeability calculation model of foam-conditioned coarse-grained soil and its applicability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2357-2365.

[7] 郭彩霞，孔恒，王梦恕. 无水大粒径漂卵砾石地层土压平衡盾构施工渣土改良分析[J]. 土木工程学报，2015, 48(S1): 201-205.
Guo Caixia, Kong Heng, Wang Mengshu. Study on muck improvement of EPB shield tunneling in waterless sandy-cobble boulder stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 201-205.

[8] TB 10102-2023 铁路工程土工试验规程[M]. 北京：中国铁道出版社, 2023.
TB 10102-2023 Civil Engineering Experiment of Railway Project[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2023.

[9] 魏康林. 土压平衡盾构施工中泡沫和膨润土改良土体的微观机理分析[J]. 现代隧道技术, 2007, (01): 73-77.
Wei Kanglin. Micro-mechanism analysis for the soil improvement by foam and bentonite in EPB shield tunneling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, (01): 73-77.

[10] 徐琳琳，余金，蒋亚龙，等. 泡沫性能测试及其在富水砂层渣土改良中应用[J]. 地下空间与工程学报，2021, 17(S1): 345-353.
Xu Linlin, Yu Jin, Jiang Yalong, et al. Testing of Foam Properties and Its Application in Soil Conditioning for Water Bearing Sandy Grounds[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 345-353.

[11] 张新全，张丽丽，高胜雷，等. 泡沫剂性能检测装置研制及性能研究[J]. 市政技术, 2019, 37(04): 251-255.
Zhang Xinquan, Zhang Lili, Gao Shenglei, et al. Development and PerformanceTest of Foaming Agent Properties Testing Device[J]. Journal of Municipal Technology, 2019, 37(04): 251-255.

[12] 邱龑，杨新安，唐卓华，等. 富水砂层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2015, 43(11): 1703-1708.
Qiu Yan, Yang Xin'an, Tang Zhuohua, et al. Soil Improvement for Earth Pressure Balance Shields Construction in Watered Sandy Stratum[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1703-1708.

[13] 张润来，宫全美，周顺华，等. 砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报（自然科学版），2019, 47（05）: 673-680.
Zhang Runlai, Gong Quanmei, Zhou Shunhua, et al. Soil Conditioning Tests for Earth Pressure Balance Shield Applications in Sandy Cobble Strata[J]. Journal of Tongji University（Natural Science）, 2019, 47（05）: 673-680.

[14] BUDACH C, THEWES M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research[J].

Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50(8): 296–304.

[15] BORIO L, PEILA D. Study of the permeability of foam conditioned soils with laboratory tests[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2010, 6(4): 365–370.

[16] 乔国刚. 土压平衡盾构用新型发泡剂的开发与泡沫改良土体研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2009.
Qiao Guogang. Development of New Foam Agent for EPB Shield Machine and foamed-soil modification[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.

[17] QUEBAUD S, SIBAI M, HENRY J P. Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(2): 173–180.

[18] Wang L, Zhu W, Qian Y. Interface characteristics and stability mechanisms of bubbles in high-concentration bentonite slurry[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 387.

[19] Wang L, Zhu W, Qian Y. Experimental study on the stratum applicability and mechanisms of bubble-slurry for EPB shields[J]. Frontiers of structural and Civil Engineering, 2023.

[20] 万泽恩，李树忱，赵世森，等. 富水砂性地层盾构渣土改良试验与喷涌防治技术[J]. 土木工程学报，2022，55（03）: 83-93.
Wan Zeen, LiShuchen, ZhaoShisen,et al. Soil conditioning tests and screw conveyor spewing prevention technoloygy of earth balance pressure shield tunneling in water-rich sandy stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55（03）: 83-93.

[21] 朱自鹏. 砂卵石地层高水压条件下土压平衡盾构防喷涌研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
Zhu Zipeng. Study on Anti-Blowout Induced by EPB Shield Tunnelling under High Water Pressure in Sandy Cobble Stratum[D]. Beijing: BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY, 2016.

[22] Wilms J. Zum Einfluss der Eigenschaften des Stutzumediums auf das VerschleBVerhalten eines Erddruckchildes[D]. Nordrhein-Westfalen，Germany：Gesamthochschule Essen University, 1995.

[23] Qinxin Hu, Shuying Wang, Tongming Qu, et al. Effect of hydraulic gradient on the permeability characteristics of foam-conditioned sand for mechanized tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 99(C): 103377.



第一作者：范文静（2001—），硕士，研究方向为土压平衡盾构渣土改良、管片土压力试验及理论分析。



通信作者：钟小春（1976—），男，教授，博士，硕士生导师，研究方向为盾构隧道设计及施工研究。