

隧道掘进机泡沫添加剂发泡效果的试验研究

屠垒

(上海城建隧道装备有限公司, 上海市 200137)

摘要: 泡沫添加剂作为隧道掘进机施工中重要的土体改良剂,其系统组成、发泡效果在很大程度上影响着实际施工,尤其是在较为复杂的地层中。针对隧道掘进机泡沫添加剂系统中出现的发泡效果不佳等问题,研制并搭建试验平台,通过模拟设置掘进机实际施工参数,探索对比测试影响泡沫发泡喷射效果的诸如不同发泡倍率等6种因素,为泡沫系统的设计开发提供试验数据。

关键词: 隧道掘进机;泡沫添加剂;发泡效果;试验

中图分类号: U455.3+1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0268-05

0 引言

随着轨道交通建设的不断发展,隧道掘进机^[1-2]以其开挖施工过程对周围环境影响较小、施工安全高效、劳动强度低等优势,已成为城市隧道建设的主要暗挖工艺设备。但在复杂的地段,如砂层、卵石层与黏土并存的土层条件中,尤其是在圆砾、卵石地层,隧道掘进机施工会遇到以下方面不同程度的困难。

(1)难以实现开挖面土压力的动态平衡。在圆砾、卵石地层中,掘进机施工中刀盘旋转切削下来的渣土塑流性差,设定的工作压力不能顺利地传递到掌子面,不易实现连续的动态平衡,掌子面容易失稳,导致发生超挖现象。

(2)刀盘及螺旋输送机扭矩过大问题。砂卵石地层触动后会变得松软,颗粒较大的卵石容易在刀盘底部堆积,使得盾构机运转扭矩过大,引起刀盘“堵转”,而在黏土地层中则容易发生刀盘“结泥饼”现象。

(3)刀具的异常磨损及磨损过快的问题。由于卵石本身的高摩擦性、刀具与卵石的冲击作用及开挖后渣土对刀具的抱死作用,很容易造成刀具的过快磨损、刀具的冲击磨损、滚刀的偏磨及刀盘的异常磨损。

(4)砂砾层等强透水层施工时,开挖面过高的水压力会导致掘进机螺旋机出口水土流失,严重时发生喷涌^[3],影响工程顺利施工。

从20世纪80年代初期,日本开发出气泡改良

技术以来,气泡对土体改良效果的研究一直在不断进行,经历超40 a,从相关研究和工程实践中得以证实,泡沫添加剂^[4]在改良渣土特性,改善仓内土体流塑性,稳定掌子面,降低刀盘、螺旋机扭矩,减少结构磨损和降低土砂渗透系数等方面有明显效果,而对于泡沫添加剂的研究主要集中在泡沫剂材料的开发和特性的研究^[5]、泡沫添加剂对于施工土层的改良和施工参数影响^[6-8],而对于影响发泡效果因素的探索研究较为缺乏。图1所示为具有泡沫加注功能的隧道掘进机。



(a)隧道掘进机泡沫加注示意 (b)试验平台泡沫加注示意
图1 具有泡沫加注功能的隧道掘进机

1 试验研究

1.1 试验方法和流程

本试验基于搭建试验平台进行测试研究^[9],通过模拟设置掘进机实际施工参数,对可能影响发泡性能效果的泡沫发生器、空气调节阀、管路“Ω”装置、泡沫发生器设置位置、发泡倍率、泡沫溶液浓度等因素进行单因素对比加注测试,同时匹配自适应数据采集与故障监测、智能化控制逻辑程序,对掘进机在无人驾驶模式下的泡沫自动化加注控制调节以及精度进行试验优化。主要围绕试验设计(试验系统原理、控制程序开发、试验技术方案等)、试验平台搭建、泡沫加注

收稿日期: 2023-09-17

作者简介: 屠垒(1968—),男,学士,高级工程师,从事隧道工程施工技术研究与管理工。

测试及影响发泡效果因素的探索测试、程序优化、验收汇报流程执行,试验流程如图2所示。

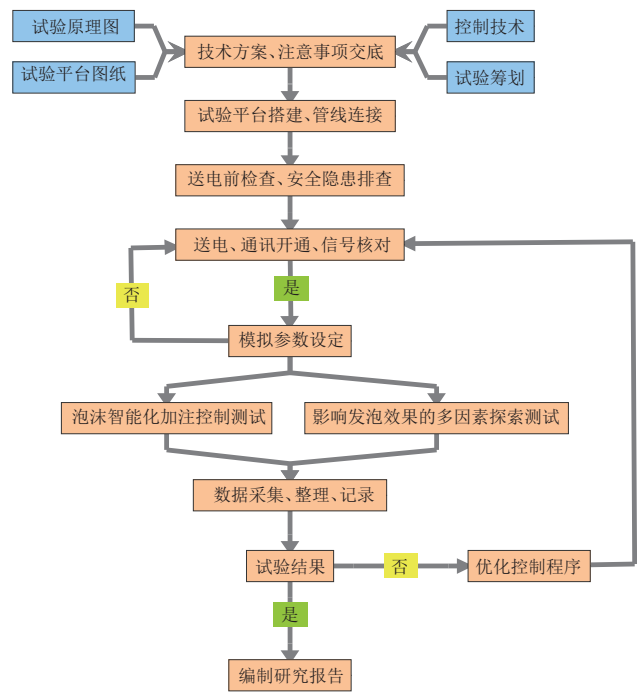


图2 隧道掘进机泡沫添加剂加注试验流程图

1.2 试验平台组成

如图3所示的试验平台结合隧道掘进机添加剂加注系统而设计,主要由模拟刀盘、加注泵、搅拌机、阀件、添加剂箱体、监测传感器、控制室和管路元器件等组成。此试验平台可通过人机操作界面模拟设置掘进机施工工况下泡沫加注系统的各个功能控制,同时还可对可能影响发泡效果的因素进行对比探索、测试研究。

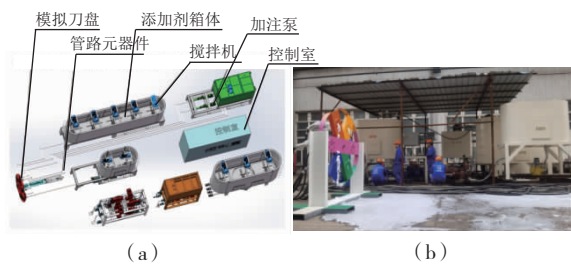


图3 泡沫添加剂试验平台模型及搭建实物图

1.3 泡沫加注试验原理

如图4所示,泡沫加注试验系统主要由泡沫溶液配比、溶液加注回路和发泡回路组成。泡沫溶液配比由位于件31泡沫原液箱的件9潜水泵通过件13气动球阀控制转移到件32泡沫溶液箱,与通过件14气动球阀转移到溶液箱的工业水搅拌混合形成泡沫溶液,泡沫溶液的配比浓度只需要改变泡沫原液和工业水的转移量即可调整,原液和水的转移量分别通过件26和件27流量计进行换算累计。同时,泡沫

原液箱和溶液箱均配置件30液位计以监测箱体内介质的液位并参与液位报警和控制;泡沫溶液加注通过件10溶液泵进行泵送加注,溶液泵出口设置件28流量计和件29压力传感器监测回路流量和压力,当出现流量过低或压力过高等异常现象,联锁控制泵的运行状态;发泡回路在件25泡沫发生器中将泡沫溶液注入一定倍率的空气,使溶液产生更多的气泡泡沫达到发泡效果,泡沫溶液和空气混合后的发泡液通过件7喷嘴喷射到前方。进入到发生器的空气由件1空压机产生并通过件23调节阀进行量的调节,同时空气回路配备件21压差流量计、件22压力传感器对空气流量和压力进行监测,在自动模式下匹配加注的自动联锁控制。

1.4 试验内容

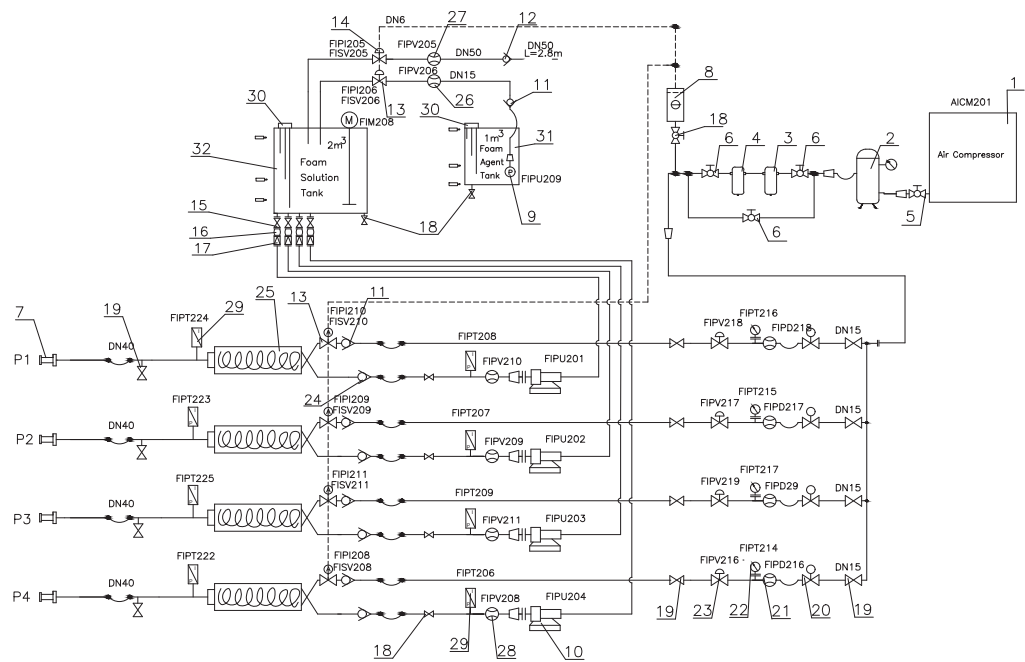
在泡沫系统加注中,泡沫发生器结构、空气调节阀形式、泡沫发生器设置位置、发泡倍率以及泡沫溶液的配比浓度等因素均可能影响发泡喷射效果,为验证上述因素对发泡效果的影响,对各因素进行对比加注测试,从发泡效果的目视状态、衰落时间及管路压力等指标进行指标衡量^[10]。

1.4.1 泡沫发生器对发泡效果的影响测试

对图5所示两种不同结构的泡沫发生器在相同的加注条件(泡沫溶液泵加注流量和空气输入量一致)下进行加注对比测试,试验结果为规格2泡沫发生器发泡液喷射饱满且连续性较好、气泡呈蓬松绸绸状态,而规格1泡沫发生器发泡液喷射断续、气泡呈稀疏状态,如图6所示。这可能是因为规格2泡沫发生器内部结构的空气通道以及腔内的陶瓷球容积更为合理,使得泡沫溶液和空气能更好地混合,从而得到更好的发泡效果。对两种发泡液的衰落时间进行监测,发现规格1和规格2的发泡液衰落时间分别为210 min和170 min,离散状态的规格1发泡液衰落更快。

1.4.2 调节阀对空气调节的响应与精度测试

空气加注量的大小会直接影响到泡沫的混合发泡效果,其调节主要依靠图4中件23调节阀进行。目前市面上存在常用的几种形式的调节阀其调节特性(控制方式、调节响应、控制精度)存在差异,选用气动、电动(带定位器)和电动(不带定位器)3种不同形式的调节阀进行加注模拟试验,试验包括阀口开度从关闭到全开的用时,调节达到同一流量值时的响应速度、控制精度(流量稳定性)和操作的便捷性等方面,测试结果参见表1所示。



注:1—螺杆式空压机;2—储气罐;3—空气过滤器;4—空气过滤器;5—手动球阀 D50;6—手动球阀 D40;7—喷嘴;8—自动排水二联件 PT1;9—泡沫原液泵;10—泡沫泵;11—单向阀 DN15;12—单向阀 DN50;13—气动球阀 DN15;14—气动球阀 DN50;15—气动球阀 DN65。

图 4 泡沫加注试验原理图

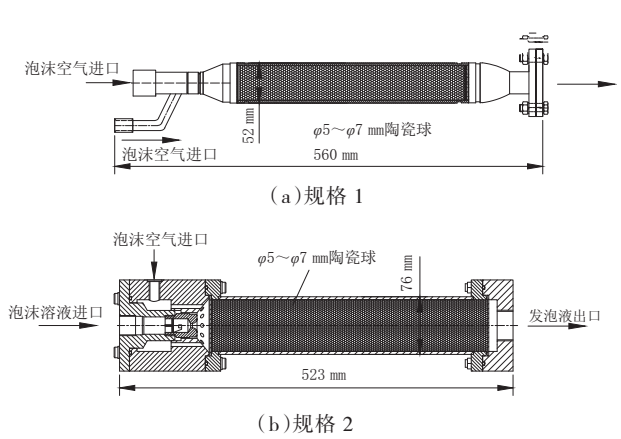


图 5 两种棍哥泡沫发生器结构图

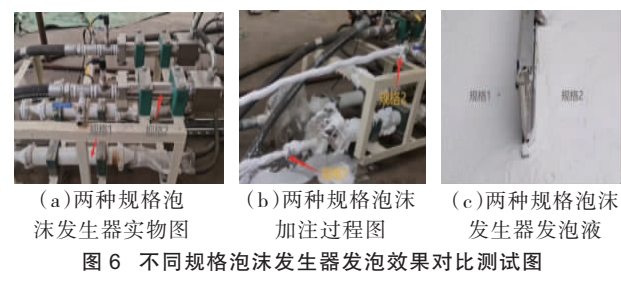


图 6 不同规格泡沫发生器发泡效果对比测试图

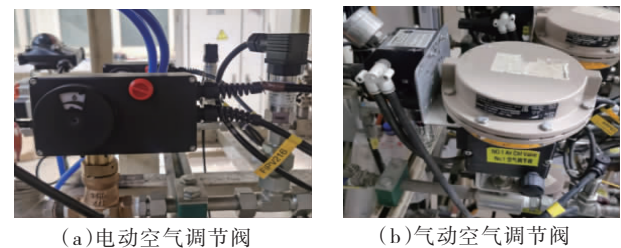


图 7 不同形式空气调节阀

表 1 不同形式调节阀对泡沫空气调节的对比测试

测试项目	气动调节阀	电动调节阀(带定位器)	电动调节阀(不带定位器)
从关闭到全开用时 /s	5	38	44
电控阀响应及精度自动模式流量从 0 L/min 加到 600 L/min	10 s 后流量稳定在 626 L/min	32 s 后流量稳定在 630 L/min	40 s 时 500~600 L/min 范围波动,72 s 后流量稳定在 620 L/min
驱动控制方式	气动 +4~20 mA	24V 电压 +4~20 mA 电流	24 V 电压交流电
操作便捷性	界面百分比输入	界面百分比输入	界面百分比输入
价格	高	较低	低

2.4.3 “Ω”装置对发泡效果的影响测试

在实际泡沫加注系统中,泡沫发生器往往定位于后配套车架位置,从泡沫发生器出口到盾构主机再进入刀盘加注口的管路长度至少达到了 30 m,此

时从泡沫发生器出来的气泡混合液可能会在长距离管路中出现气液分层现象,空气离散分布在管路上方,发泡质量下降,如图 8 所示。

为探究在长距离管路中给予适当的背压和混合



图 8 泡沫在管道内的分布示意图

对泡沫发泡效果产生的影响,设计“Ω”装置,在相同的加注条件(泡沫溶液流量和空气流量)下进行对比测试,如图 9 所示。由测试结果可得,加装了“Ω”装置的回路,发泡液具有更加蓬松、绵稠的效果,无论“Ω”装置是水平设置还是垂直设置,均对发泡效果产生了促进作用。

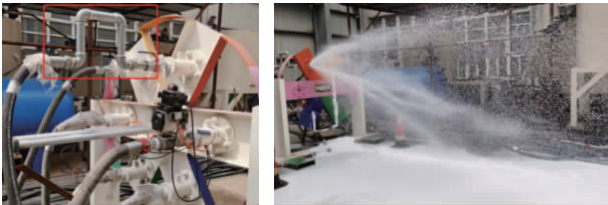
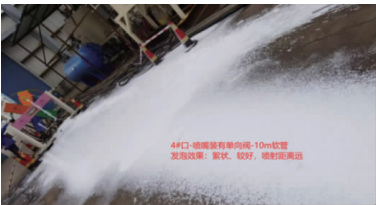


图 9 泡沫加注回路安装“Ω”装置的泡沫喷射测试

1.4.4 泡沫发生器设置位置对发泡效果的影响测试

由测试结果可知:当泡沫发生器距离喷嘴位置 10 m 时[见图 10(a)],4# 口泡沫喷射的距离更远,由安装在加注口处的机械式压力表显示可知,4# 口处的加注压力为 0.23 MPa,其发泡效果呈絮状。而泡沫发生器距离加注口位置 30 m 时[见图 10(b)],2# 口处的加注压力为 0.2 MPa,发泡散开、呈流体状。



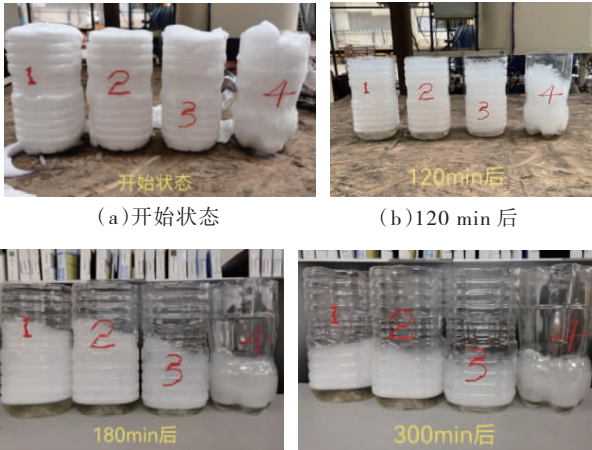
(c)泡沫发生器距离喷嘴不同距离的发泡液效果对比

图 10 泡沫发生器距离喷嘴不同距离对发泡效果的对比测试

2.4.5 发泡倍率对泡沫衰落度的影响测试

在泡沫自动加注系统中,发泡倍率的大小会影响泡沫溶液和空气的输出量,使发泡液产生不同的效果。为探究不同发泡倍率对泡沫衰落度的影响,在相同的泡沫浓度和加注条件下,分别调节发泡倍率为 10、15、20、30 倍进行发泡的衰落度测试,试验结

果如图 11 所示。



(a)开始状态 (b)120 min 后 (c)180 min 后 (d)300 min 后

图 11 不同发泡倍率对发泡效果的对比测试

表 2 不同发泡倍率对泡沫衰落度的影响对比测试

发泡倍率	衰落时间(以半杯计)/min
10 倍(1# 量杯)	230
15 倍(2# 量杯)	210
20 倍(3# 量杯)	160
30 倍(4# 量杯)	140

由测试结果可知,发泡倍率为 10 倍和 15 倍时,发泡的衰落度均在 200 min 以上,而发泡倍率为 20 倍和 30 倍时,发泡的衰落度均在 150 min 附近,这表明发泡倍率并不是越大越好,超过一定倍率时,泡沫中空气含量增加,溶液含量减少,并不能达到质量较高的发泡液。

2.4.6 泡沫溶液浓度对泡沫衰落度的影响测试

泡沫溶液中泡沫浓度的高低会影响发泡液的稳定性和性能,为探究泡沫浓度对发泡衰落度的影响,在加注条件相同的条件下,对比测试四种浓度:1%、3%和 5%的发泡衰落度,记录在不同浓度下发泡液的衰落速度,如图 12 所示。

由表 3 中数据可知:在相同的测试条件下,泡沫溶液浓度为 5%时,气泡的衰落时间为 230 min,其发泡效果也较好。当泡沫溶液浓度在 3%以下,气泡的衰落时间变短,其发泡效果随浓度降低而变差,这是由于泡沫溶液中泡沫原液的占比减少,水的占比变大导致。

3 结 语

通过搭建试验平台模拟设置掘进机施工参数,对泡沫加注系统中可能影响发泡效果的泡沫发生器、空气调节阀、管路“Ω”装置、泡沫发生器设置位

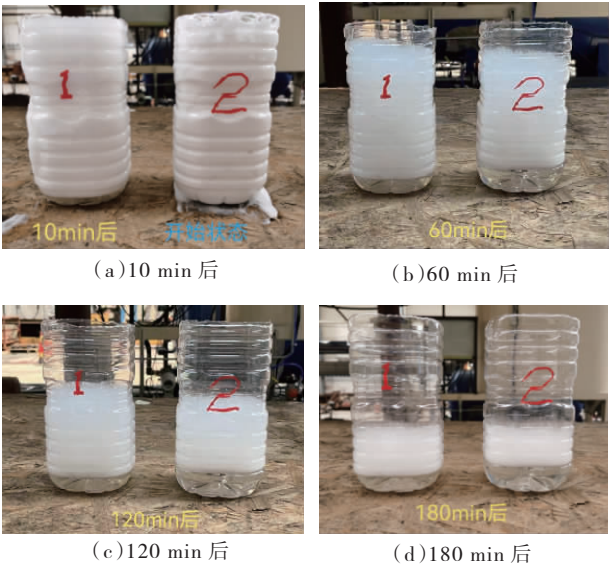


图 12 不同发泡倍率对发泡效果的对比测试

表 3 不同溶液浓度对泡沫衰落度的影响对比测试

测试项目	1%泡沫浓度 图 12-1 号量杯	3%泡沫浓度 图 12-2 号量杯	5%泡沫浓度 图 11-1 号量杯
发泡状态	气泡明显	泡沫密实	泡沫蓬松
衰落时间 (以半杯计)	120	140	230

置、发泡倍率、泡沫溶液浓度等因素进行对比加注测试,测试结果可得:

(1)从发泡液的喷射效果以及衰落时间可以得出,规格 2 泡沫发生器在发泡质量方面优于规格 1 泡沫发生器;

(2)结合三种形式空气调节阀关于空气调节的响应速度、控制精度测试,气动型响应速度和精度控制最优,适合于掘进机自动驾驶下泡沫系统的自动控制,而电控带定位器调节阀在性价比方面更有优势;

(3)在泡沫液管路上加装“Ω”装置(水平安装和垂直安装)可对发泡液性能起到改善作用;

(4)泡沫发生器设置在距离加注口位置较近的时候,会被设置在离加注口远端拥有更好状态的发

泡液;

(5)发泡倍率会影响发泡液的衰落,在相同加注条件下,倍率 10 倍和 15 倍发泡液衰落时间较发泡倍率为 20 倍和 30 倍长;

(6)泡沫浓度高低会影响泡沫质量,在相同加注条件下,浓度为 1%、3%和 5%三种浓度的泡沫测试结果显示,浓度为 5%的泡沫,其衰落速度最慢,稳定性也最高。

本试验为隧道掘进机泡沫添加剂系统的设计开发提供测试依据和技术支持,但也存在缺乏针对不同土层的发泡液选择以及在实际地层掘进时泡沫加注控制效果的验证,后续可结合针对不同土层自动配比调节得到最佳的发泡液以达到自适应施工的目的。

参考文献:

[1] 日本土木学会. 隧道标准规范[盾构篇]及解说[M].朱伟,译.北京:中国建筑工业出版社,2011.

[2] Bernhard Maidl, Martin Herrenknecht. Mechanised Shield Tunnelling, Second Edition[M].Germany:ERNST&SOHN,1996.

[3] 魏康林.土压平衡式盾构施工中喷涌问题的发生机理及其防治措施研究[D].南京:河海大学,2003.

[4] 张凤祥,朱合华,傅德明.盾构隧道[M].北京:人民交通出版社,2004.

[5] 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[N].中国矿业大学(北京),2009(13):27-30.

[6] 陈春林.土压平衡盾构施工中泡沫剂作用[J].山西建筑,2007,33(7):307-308.

[7] 宋克志,汪波,孔恒,袁大军.无水砂卵石地层土压盾构施工泡沫技术研究[N].岩石力学与工程学报,2005(12):77-80.

[8] 王辉.地铁隧道盾构施工泡沫剂应用效能分析[J].黑龙江交通科技,2014(11):134-136.

[9] 李小峰.盾构用泡沫性能的试验研究[J].中国新技术新产品,2013(6):36-38.

[10] 郭涛.盾构用发泡剂性能方法评价及研究[J].大连:河海大学,2005.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com