

泡沫剂性能检测装置研制及性能研究

张新全^{1,3}, 张丽丽^{1,2}, 高胜雷^{1,2}, 刘永旗^{1,3}, 王晓婵^{1,3}, 赵东华^{1,3}

(1. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100089; 2. 北京朝旭鼎新市政工程检测科技有限公司, 北京 100095;
3. 北京市政建设集团有限责任公司 第四工程处, 北京 100045)

摘要:随着城市轨道交通建设的迅猛发展,盾构法已成为地下隧道修建的主要工法,泡沫剂是盾构施工中渣土改良的主要材料。笔者研制了1套用于室内检测泡沫剂性能的试验装置,研究了泡沫剂的半衰期、发泡倍率、表面张力等性能,并将自制的BJSZ泡沫剂和市场上的通用泡沫剂进行对比,从而对泡沫剂的性能优劣做出了判断,为土压平衡盾构施工中泡沫剂的选择提供了一定的参考依据。

关键词:土压平衡盾构;泡沫剂;渣土改良;半衰期;发泡倍率;表面张力

中图分类号: U 455.43 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7767(2019)04-0251-05

Development and Performance Test of Foaming Agent Properties Testing Device

Zhang Xinquan, Zhang Lili, Gao Shenglei, Liu Yongqi, Wang Xiaochan, Zhao Donghua

目前土压平衡盾构是盾构施工中应用最为广泛的一种技术,在我国土压平衡盾构施工中所用泡沫剂多为进口产品,造价较高。国内泡沫剂的研究处于起步阶段,技术尚不成熟,种类较少,质量不达标,尚未开发出可替代国外泡沫剂的优良产品。此外,我国在盾构用泡沫剂性能评价方面缺乏理论的指导以及方法和标准,造成我国在盾构施工中对泡沫剂的优劣难以鉴别,在使用时用量难以把控,造成不必要的资金和材料浪费,同时采购泡沫剂时没有简易的设备来进行泡沫剂性能的检测,给土压平衡盾构施工中泡沫剂的选择带来了一定的困难。因此,笔者研制了1套泡沫剂性能检测装置,并对泡沫剂性能进行了研究。

1 试验装置的研制

北京市政建设集团有限责任公司科技创新中心在充分调研国内外常见型号盾构机上配置的泡沫剂发泡装置的结构、发泡原理以及工作参数设定的基础上,进行了发泡装置的方案设计、结构设计、外购件选型,并组织进行了发泡装置的制造、装配、调试及检定;然后通过所研制的泡沫发生器进行试验,对泡沫剂的主要性能指标进行了量化研究。

1.1 发泡装置设计

试验装置主要由两部分构成,即发泡装置和泡沫渣土改良装置。发泡装置气液流量模拟盾构机实际情况,可实时调节,产出符合工程需要的泡沫;泡沫渣土

改良装置将产出的泡沫用于渣土改良,通过数据采集系统分析改良效果。设计1台发泡装置,使其能方便地进行泡沫的发生、控制调整 and 效果检测,同时也能方便地进行原料的加注和储存,其应包括如下子系统:

1)物料加注及存放系统。该试验所用物料主要有泡沫原液、水、压缩空气。考虑到试验系统不需要持续工作,故采用手动计量,并且将泡沫原液和水手动加注到混合液箱,实现混合液的配制,压缩空气则由配备的外接空压机提供。

2)混合液、压缩空气的输送及流量控制系统。混合液通过由变频器驱动的柱塞泵输送至管路中,通过调节变频器的输出频率改变混合液流量,同时在管路中设置流量计检测混合液的实际流量。而压缩空气的供给流量则是通过气动三联件(该试验仅需要减压联,无需对压缩空气进行处理)和电磁球阀进行控制,并设置流量计检测压缩空气的实际流量。为防止流体回蹿,应在混合液及压缩空气管路中设置单向阀。

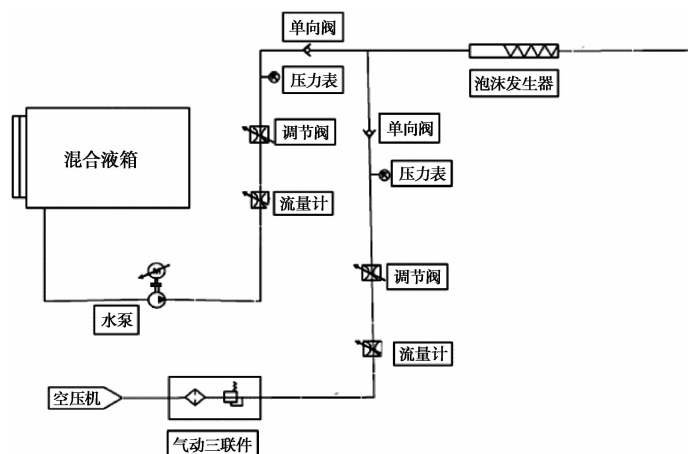
3)泡沫发生器。混合液和压缩空气在泡沫发生器中进行发泡。

4)控制操作及显示系统。控制系统采用手动式。

5)系统支撑基座。支撑基座设计为可移动式,留出混合液箱和空压机安放位置。

系统原理简图与实物图如图1所示。

该试验装置最大压力为0.5 MPa,在该试验系统中



a) 系统原理简图



b) 实物图

图1 系统原理简图与实物图

不设置泡沫原液与水的比例混合装置,可将按一定比例预混好的混合液直接装入混合液箱中。

由于试验是在实验室中进行的,因此选用了带有电动机的空压机,计量泵也由电动机单独驱动,其工作稳定可靠、噪声小。在土压平衡盾构施工中,泡沫一般由安装在盾构机内部的空气压缩系统制造产生,因此,混合液和压缩空气的压力和流量是产生泡沫的核心工作参数。参考国外现有的设计,混合液和压缩空气在一定的压力下被送入一个连接装置或混合腔室,混合点处混合液和压缩空气的压力一般为 $0.4 \sim 0.7 \text{ MPa}$,然后通过一定长度的管路或发泡枪将泡沫发射出来。而从泵出口处到泡沫出口处有一定的压力损失,其值约为 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$,因此确定泵的最大工作压力为 0.8 MPa 。

为产生适合盾构施工采用的泡沫,混合液与压缩空气的流量要有一定的比例关系。另外,试验要求按照不同的气液比产生泡沫来确定最优化的气液混合参数,而试验装置的泡沫液体流量要求不大,为此考虑以下流量组合参数:计量泵的流量为 $6 \sim 60 \text{ L/h}$;空压机的排气量为 $160 \sim 1600 \text{ L/h}$ 。计量泵和空压机流量均可调,通过调节阀即可得到不同的气液比。

1.2 衰落筒试验设计

1.2.1 试验仪器

衰落筒是一种可以比较精确地测量泡沫半衰期的试验装置。其主要仪器如图2所示。

1) 衰落筒:衰落筒为高 20 cm 、外径 12 cm 、壁厚 0.5 cm 的有机玻璃筒,上部开口,下部用有机玻璃瓶塞密封,瓶塞中部留有直径为 1 cm 的圆孔,衰落筒下部铺设1层薄薄的过滤网格,以防止衰落筒内的气泡下



图2 衰落筒

落,但气泡衰落后得到的液体可以顺利通过网格流出衰落筒。试验时衰落筒用铁三角架支撑。

2) 电子天平:精度为 0.1 g ,用来称量由衰落筒内流出的液体质量。

3) 烧杯:容积约为 2000 mL ,用来收集由衰落筒内流出的液体。

4) 秒表:精度为 s ,用于记录试验时间。

1.2.2 测量步骤

1) 将烧杯放到电子天平上,并调零。

2) 用室内发泡装置将预先配制好的发泡剂溶液发泡,发泡过程中调节发泡装置,直至得到满足试验要求的气泡,并使这一状态保持稳定。

3) 在衰落筒下部铺设过滤网格将发泡装置产生的泡沫装满衰落筒并迅速测量泡沫质量,然后立即放到三角架上,使衰落筒的液体流出小孔并对准烧杯的中央,

为了保证试验的准确性,该步骤须在 1 min 内完成。

4)在第 3 步完成以后立即按下秒表计时,观察并记录烧杯内液体质量随时间的变化。烧杯内液体质量为衰落筒内气泡质量的一半所需时间即为泡沫的半衰期。

2 半衰期试验与结果分析

泡沫稳定性是衡量泡沫剂质量的一个重要指标。泡沫稳定性受泡沫剂浓度影响较大,泡沫剂浓度越高则发出的泡沫越稳定。该试验主要研究了泡沫剂浓度、气体流量、液体流量、泡沫剂类型对泡沫稳定性(以泡沫半衰期表示)的影响,以此来判断泡沫剂的最佳浓度以及不同发泡剂的性能优劣。试验结果见图 3~6。

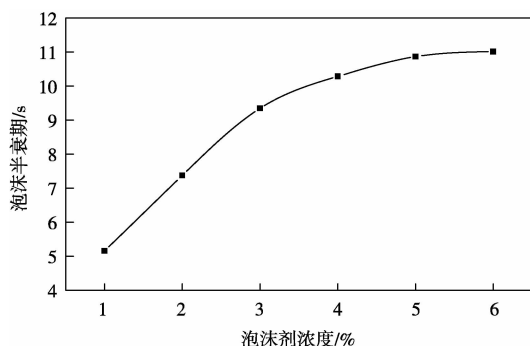


图3 泡沫半衰期与泡沫剂浓度关系曲线

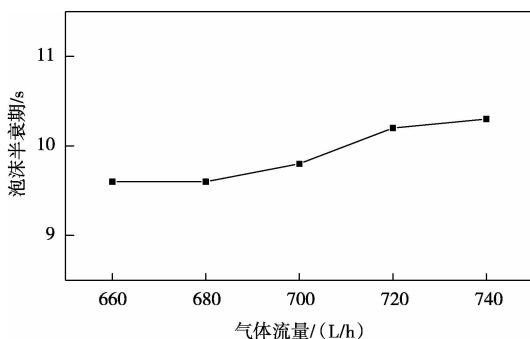


图4 泡沫半衰期与气体流量关系曲线

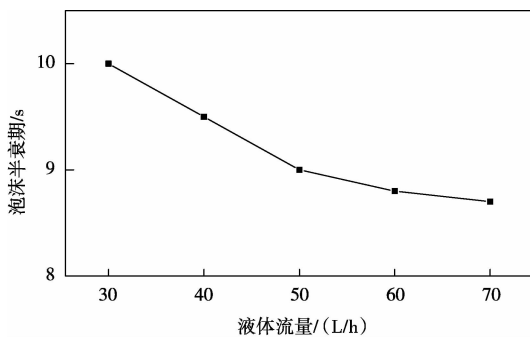


图5 泡沫半衰期与液体流量关系曲线

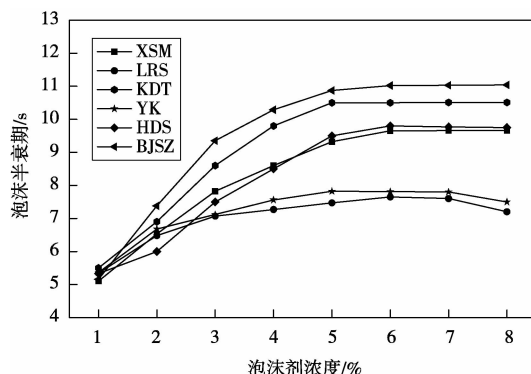


图6 不同泡沫剂产生的泡沫半衰期对比曲线

从图 3~5 可以看出,在一定的浓度范围内,泡沫剂浓度越高,泡沫半衰期越长,即泡沫越稳定;当泡沫剂浓度达到 4 %时,泡沫的半衰期增加速度变缓,随后达到一个峰值,超过这一峰值,随着泡沫剂浓度的继续增加,泡沫半衰期出现了下降的趋势。所以,泡沫剂的最佳浓度为 3 %。随着气体流量的增大,泡沫的稳定性增强,但当气体流量达到一定数值后,泡沫的半衰期变化不明显,因此最适宜的气体流量为 700 L/h。泡沫的半衰期随着液体流量的增加而降低,即液体的流量越大,泡沫的稳定性越差。

从图 6 可以看出,在一定的浓度范围内,不同泡沫剂产生的泡沫其半衰期都随着泡沫剂浓度的增加而增加,且增加速率较快。当泡沫剂浓度超过 3 %后,泡沫半衰期增加速率变缓,当泡沫剂浓度超过 6 %后,BJSZ、KDT、HDS 和 XSM 泡沫半衰期变化不大,并趋于稳定,YK 和 LRS 泡沫半衰期出现下降趋势。总体来看,BJSZ 和 KDT 泡沫剂产生的泡沫在半衰期表现出较为明显的优势,说明其具有较好的稳定性。因此,当泡沫剂浓度在 3 %~4 %之间时,泡沫半衰期较长,泡沫较稳定。从泡沫半衰期来看,试验用泡沫剂的优劣如下:BJSZ>KDT>HDS>XSM>YK>LRS。上述检测方法可作为评价泡沫剂优劣的方法之一。

3 发泡倍率试验与结果分析

发泡倍率指一定体积泡沫剂溶液产生泡沫的体积与泡沫剂溶液的体积之比。盾构施工中为达到良好的土体改良效果,要求泡沫的发泡倍率达到一定数值,泡沫剂发泡倍率越高,等量泡沫剂溶液产生的泡沫越多,泡沫剂的利用效率就越高。该试验主要研究了泡沫剂浓度、气体流量、液体流量、泡沫剂类型对发泡倍率的影响,结果见图 7~10。

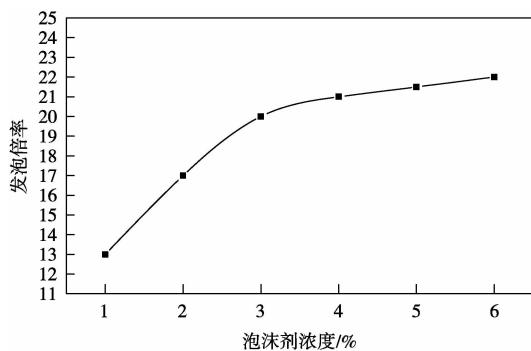


图7 发泡倍率与泡沫剂浓度关系曲线

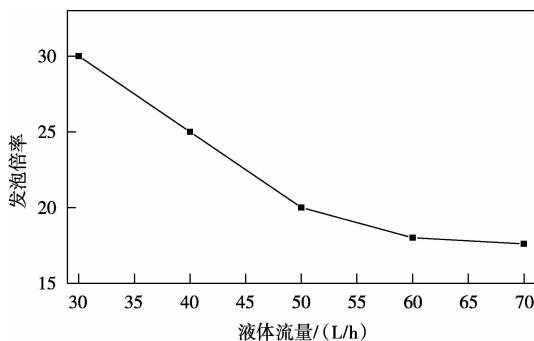


图8 发泡倍率与液体流量关系曲线

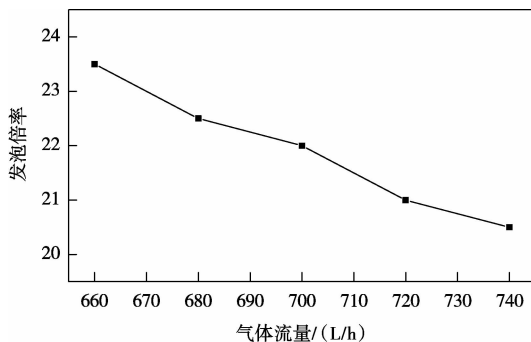


图9 发泡倍率与气体流量关系曲线

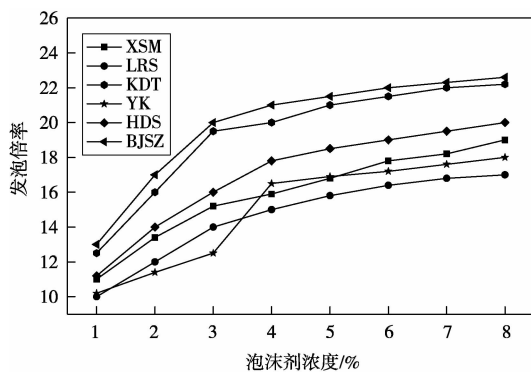


图10 不同泡沫剂发泡倍率对比曲线

从图7~9可以看出,泡沫剂的发泡倍率随着发泡剂浓度的增加而增加,增加速率先快后慢,最后发泡倍率趋于稳定;泡沫剂的发泡倍率随着液体流量的增加而减小,即液体流量越大,泡沫剂的发泡性能越差;泡沫剂的发泡倍率随着气体流量的增加持续减小,但总体变化不大,观察发现泡沫直径变小且均匀。由此可见气体流量的增加可使泡沫剂的发泡效果更加充分。

从图10可以看出,在一定的浓度范围内,不同泡沫剂的发泡倍率都随着泡沫剂浓度的增加而增加,并且增加速率较快。当泡沫剂浓度超过3%后,泡沫剂的发泡倍率增加速率变缓。总体来看BJSZ和KDT泡沫剂在发泡倍率上表现出较为明显的优势,说明其具有较好的稳定性。因此,当泡沫剂浓度在3%~4%之间时,泡沫剂发泡倍率较合适,泡沫较稳定。从发泡倍率变化来看,试验用泡沫剂的优劣如下:BJSZ>KDT>HDS>XSM>YK>LRS。上述检测方法可作为评价泡沫剂优劣的方法之一。

4 表面张力

在土压平衡盾构中,泡沫的稳定性是影响土体改良效果的关键因素。泡沫的稳定性是指泡沫在土体中存在的时间长短,也可以理解为泡沫不易破灭的能力。

液体的表面张力是影响泡沫稳定性的一个重要因素,依据拉普拉斯公式,泡沫液膜与平面膜在交界处的压力差与表面张力成正比,即表面张力越小,交界处的压力差就越小,泡沫液膜不易变薄,泡沫不易衰变,有利于泡沫的稳定。当泡沫液膜局部变薄时,泡沫上的表面活性剂分子密度发生变化,从而使表面积增大,表面张力增大,使体系处于非平衡状态,于是表面活性剂分子从密度较大处向密度较小处流动,使体系重新恢复平衡状态,这种现象称为表面张力的“修复”作用。因此,泡沫剂的表面张力越小,发出的泡沫越稳定,但表面张力也不宜过小,否则将破坏其表面张力的修复作用。

利用白金板法对泡沫剂-水混合液进行试验,得出不同泡沫剂浓度下的表面张力见图11;不同泡沫剂表面张力对比见图12。

从图11可以看出,随着泡沫剂浓度的增大,混合液表面张力先减小后增大,当泡沫剂浓度为3%时,混合液表面张力降到最低点。混合液的表面张力越低,泡沫越不易衰变、破碎,泡沫越稳定,由此也验证了部分泡沫剂随着浓度的升高,泡沫半衰期出现了下降的趋

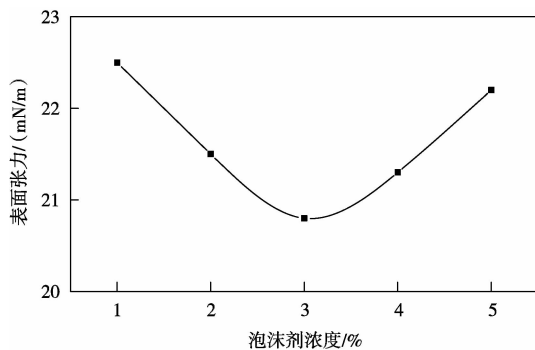


图 11 表面张力与泡沫剂浓度关系曲线

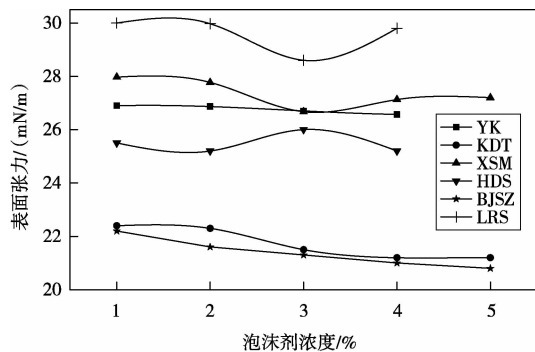


图 12 不同泡沫剂表面张力对比图

势。因此,综合来看当泡沫剂浓度为 3 % 时,泡沫剂的性能最好。

从图 12 可以看出, LRS 的表面张力最大,说明该泡沫剂发出的泡沫最不稳定;而 BJSZ 的表面张力最小,说明该泡沫剂发出的泡沫最稳定。大部分泡沫剂在 3 % 浓度时表面张力最小,因此,泡沫剂的最佳浓度为 3 %。上述检测方法可作为评价泡沫剂优劣的方法之一。

5 结论

1) 半衰期和表面张力可以作为评价泡沫剂稳定性的指标参数,发泡倍率可以体现泡沫剂的发泡能力,利用这 3 个指标可以综合评定泡沫剂的性能。

2) 影响泡沫性能最显著的因素是泡沫剂浓度。在一定的浓度范围内,随着泡沫剂浓度的增加,泡沫的半衰期延长,发泡倍率增大,泡沫的稳定性增强;当超过该浓度范围后,泡沫的稳定性以及发泡倍率趋于稳定;泡沫剂浓度继续增加,泡沫的性能甚至出现降低,说明泡沫剂浓度并非越高越好,在有效改良渣土的情况下,适当减小泡沫剂浓度反而能提高泡沫的使用性能,节约施工成本。

3) 液体流量对泡沫性能的影响虽次于泡沫剂浓度,但仍较为显著。当液体流量增加时,泡沫剂的发泡倍率减小,泡沫的半衰期缩短,表面张力也减小,导致泡沫的稳定性降低。造成这一现象的原因是泡沫发生器内注入的发泡液过多,使得发泡液与气体成分混合不充分造成发泡倍率降低,产生的泡沫中含水量过大导致泡沫的衰败加快。

4) 气体流量对泡沫性能的影响较小。随着气体流量的增加,泡沫的稳定性增强,发泡倍率有所减小。可见,气体流量的增加使得发泡液充分发泡,通过观察泡沫直径的细小均匀程度判别泡沫的稳定性更好。

5) 当泡沫剂浓度为 3 %~4 % 时,泡沫的稳定性最好,半衰期和发泡倍率满足要求,表面张力较小。MET

收稿日期: 2018-12-14

作者简介: 张新全,男,工程师,主要从事隧道与地下工程研究工作。