

文章编号:1673-0836(2006)04-0571-07

盾构用气泡的性能及对开挖土体改良效果影响^{*}

朱伟¹, 郭涛¹, 魏康林²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 广州市地下铁道设计研究院, 广州 510000)

摘要:随着土压平衡式盾构在我国地铁建设中的推广应用, 气泡作为一种优良的土体改良剂, 已经得到广泛的采用。但是, 我国对盾构用发泡剂的研究开发处于起步阶段, 对盾构用气泡的基本性能及其对开挖土体的改良效果缺乏研究, 造成土压平衡式盾构中气泡应用的浪费。作者通过室内试验, 对气泡的基本性能进行了研究, 并在现场试验中研究了气泡性能对开挖土体的改良效果; 得出了气泡改良开挖土体的主要影响因素, 对盾构用气泡在实际中的应用具有指导意义。

关键词: 土压平衡式盾构; 气泡性能; 土性改良

中图分类号: U455.43

文献标识码: B

The Performance of Foams in Shield Tunneling Method and Its Effect on the Soil Conditioning

ZHU Wei¹, GUO Tao¹, WEI Kang-lin²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Design and Research Institute of Guang Zhou Metro, Guangzhou 510000, China)

Abstract: As the Earth Pressure Balanced Shield (EPBS) Tunneling is becoming comprehensive way to build the subway, foams as a good soil conditioning agent are widely used in EPBS. Whereas, because the performance study of the foams in Shield Tunneling Method is at the beginning stage and the experience of using foams as soil conditioning agents is scarce, there is large waste of foams in the EPBS tunneling in our country. In this article the basic performance and the soil conditioning effect of the foams is studied in laboratory and in practice. According to the study, the factors that have impact on the effect of foams as soil conditioning agents, are gained. The factors obtained are beneficial to the use of foams in Earth Pressure Balanced Shield Tunneling.

Key words: EPBS; foams performance; improvement of soil nature

1 引言

随着我国各大城市地铁建设的相继开工, 土压平衡式盾构, 作为一种不影响周围环境的施工方法, 已经成为我国城市地铁建设的主流。土压平衡式盾构施工成功的关键是将开挖面切削下来的土体在压力舱内调整成一种“塑性流动状态”, 以免开挖土在压力舱内发生闭塞、结饼、喷涌和开挖面失

稳^[1,3]等工程事故。

若不向机盾构机内注入添加剂, 开挖土只有在含水率高、粘附力小的粘性土层中掘进时才会形成这种“塑性流动状态”^[3]。当地质条件不适合, 就必须向开挖面和压力舱内注入添加剂。目前所有解决土压平衡式盾构施工中因土性不良产生的工程难题最先进和发展最快的就是采用气泡^[2]; 但是, 由于我国在盾构用发泡剂的研究方面又处于起

* 收稿日期: 2005-07-12 (修改稿)

作者简介: 朱伟 (1962-), 男, 甘肃平凉人。河海大学教授, 从事盾构设计理论与施工。E-mail: weizhu@jonline.com

基金项目: 江苏自然科学基金资助项目 BK2002065

步阶段,所以施工单位使用的发泡剂大多为进口产品,且品种繁杂,价格、性能各异。此外,我国在盾构用发泡剂性能评价方面缺乏理论的指导以及方法和标准,造成我国在盾构建设中对发泡剂的优良难以鉴别,在使用时难以把握量的控制,造成不必要的资金和材料浪费。本文通过对国外某发泡剂进行室内试验和现场试验,得出了气泡对开挖土体改良效果影响的主要参数,对盾构用气泡在实际中的应用具有指导意义。

2 气泡室内性能研究

我国盾构用发泡剂的研究处于起步阶段,不仅在理论方面缺乏指导,而且也缺乏相应的发泡装置和仪器。为此,作者根据盾构机的发泡原理,发明设计了一套可以进行室内发泡的装置以及研究气泡性能的仪器^[5,6]。利用这套装置和仪器作者对国外某公司生产的SLF_30发泡剂的性能进行了相关研究。

2.1 发泡装置及发泡剂

图1为笔者发明的发泡装置示意图。发泡装置中分别利用两条可以控制压力和流量的系统向发泡枪内注入发泡剂溶液和压缩空气,发泡剂溶液在压缩空气的作用下在发泡枪内形成稳定而又致密的泡沫^[6],如图2。发泡剂溶液为发泡剂与水按一定百分比混合所得溶液;发泡剂与混合液的质量百分比为发泡剂浓度。在发泡过程中,通过发泡装置的流量控制系统,调节压缩空气和发泡剂溶液的相对流量,可以控制气泡的发泡倍率,在发泡枪出口处得到不同密度和性质的气泡^[4,6]。发泡倍率即单位体积的发泡剂溶液所发出气泡的体积;可用公式(1)进行计算:

$$n = \frac{V_i}{V_s} \quad (1)$$

式中: n 为发泡倍率; V_i 为气泡体积; V_s 为发泡剂溶液体积。

本文作者使用的发泡剂为国外某公司生产的SLF-30型号产品,本型号产品在广州地铁三号线的建设中被广泛用于土压平衡式盾构施工。其技术参数如下:无色完全溶解液体,溶重为 $1035 \sim 1045 \text{ kg/m}^3$ (20℃),PH值为 $6.5 \sim 7.5$;建议采用 $2\% \sim 3\%$ 的水溶液使用。在实验室内把SLF_30按照一定的浓度配制成水溶液,利用图1的发泡装置进行发泡。

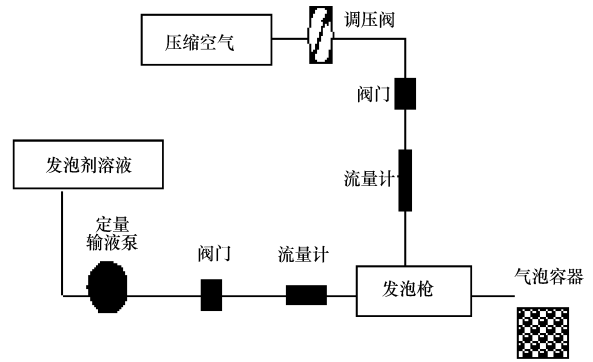


图1 发泡装置示意图

Fig. 1 Sketch of foaming equipment

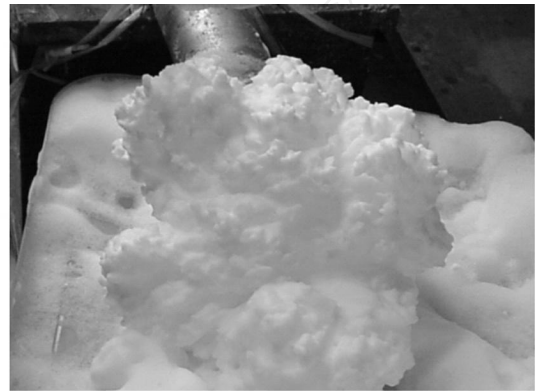


图2 发泡枪发出的泡沫

Fig. 2 Foams from the foaming lance

2.2 气泡性能及其影响因素分析

发泡剂的性能可以通过发泡剂的溶液发出的气泡的性能进行评价。在试验室内把发泡剂配成不同浓度的溶液,进行发泡试验,检测所得气泡的稳定性、发泡倍率,来评价气泡的性能。气泡的稳定性是气泡长时间静置于空气中而不破灭的性质,可通过测定消泡率与时间的关系来进行研究。消泡率是衡量气泡稳定性的重要参数之一,其定义见公式(2)

$$F_s = \frac{M_d}{M_o} \times 100\% \quad (2)$$

式中: F_s 为消泡率; M_d 为消散的气泡质量; M_o 为气泡初始质量。

消泡率为 50% 时所用时间称为气泡的半衰期,气泡半衰期是评价气泡性能的重要参数;气泡半衰期越长则气泡的性质越稳定,开挖土经改良后的状态可以保持更长时间。

图3为发泡剂浓度与半衰期关系(测量气泡半衰期的仪器与参考文献6相同);由图可以看出,随着发泡剂的浓度的提高,从 0.3% 到 6% ,溶液所发出的气泡的半衰期由 4 min 上升到 14.5 min ,可见

随着发泡剂浓度的上升,所发出气泡趋于稳定。发泡剂浓度从0.3%到2%时,气泡的半衰期由4 min上升到11.5 min,气泡的稳定性变化明显;而发泡剂浓度从2%到6%时,气泡的半衰期由11.5 min上升到14.5 min,气泡的稳定性变化不大。

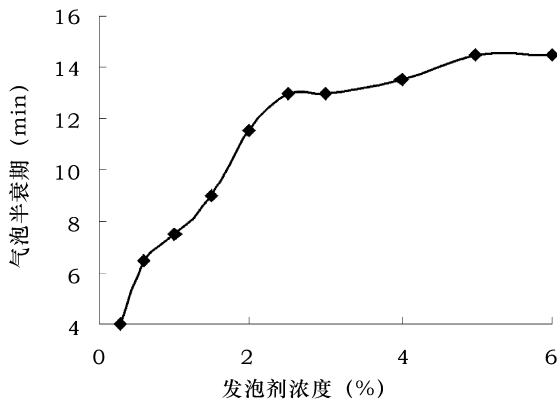


图3 发泡剂浓度与半衰期关系

Fig. 3 Relationship between the concentration and the half life of the foam

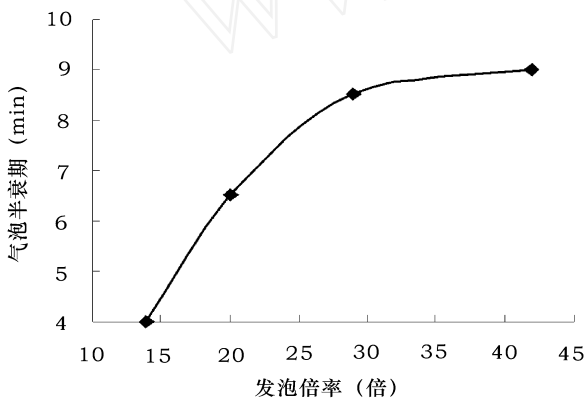


图4 发泡倍率与气泡半衰期关系

Fig. 4 Relationship between foam expansion ratio and its half life

图4为发泡剂浓度为1.5%时,提高发泡剂溶液的发泡倍率,气泡半衰期的变化。可见发泡剂浓度一定时,气泡半衰期随着发泡倍率的增加而延长,气泡更加稳定;该发泡剂浓度下,发泡倍率在14~29倍和29~42倍范围变化时,气泡的半衰期分别在4 min~8.5 min范围和8.5 min~9 min范围变化。发泡倍率在14~29倍范围时,发泡倍率较低,对气泡的稳定性影响较大;而发泡倍率在29~42倍范围的高发泡倍率时,发泡倍率对气泡的稳定性影响不明显。值得注意的是,发泡倍率为14倍时,发泡剂溶液的发泡倍率已经很低,发泡剂溶液发泡不充分,所发出的气泡内存有未得到利用的发泡剂溶液。

图5为发泡过程中调节压缩空气与发泡剂溶液之间的相对体积比,所得到的气泡的最大发泡倍率随发泡剂浓度的变化。这一发泡倍率越大,则气泡的发泡性能越高。可以看出,发泡最大发泡倍率随发泡剂浓度的升高而增加,浓度在0.3%~3%范围变化时,最大发泡倍率在14~58倍之间变化;而浓度在3%~6%范围变化时,最大发泡倍率保持在约58倍,发泡倍率几乎不再受发泡剂浓度的影响。

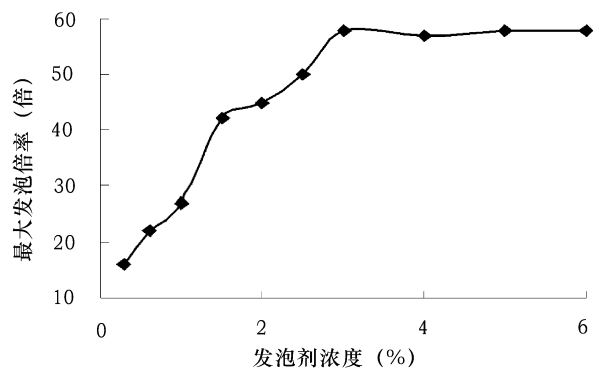


图5 发泡剂浓度与最大发泡倍率关系

Fig. 5 Relationship between the foam concentration and the foam expansion ratio

2.3 小结

(1)发泡剂浓度对气泡稳定性的影响是有一定范围的;当发泡剂浓度较低时,浓度的高低对气泡的稳定性影响显著,而发泡剂的浓度达到一定高度以后气泡的稳定性不再变化;

(2)发泡倍率对气泡的半衰期是有影响的,其发泡倍率低发泡剂溶液利用率越低,则气泡的半衰期越短,发出气泡的稳定性越差,所以在发泡剂溶液发泡时应充分发泡;

(3)发泡剂浓度较低时,最大发泡倍率随溶液浓度的升高而增大,而发泡剂浓度较高时,发泡倍率将不再提高,可见在高溶液浓度时,想再通过增大溶液浓度来提高最大发泡倍率已经不可能。

3 现场试验研究

广州市轨道交通三号线客大区间,起于客村止于大塘;当盾构机通过<5-2>、<6>、<7>地层时开挖土体不能达到土压平衡式盾构所需要的“塑性流动状态”,施工单位使用了SLF_30发泡剂进行了土体改良。由于施工单位对气泡添加量、发泡剂浓度和发泡倍率的控制都没有以往的施工经验,所以在施工中对以上参数做了大量试验研究。

3.1 工程概况

广州市轨道交通三号线客大区间,为双管圆形地下铁道,路线全长 1 887. 42 m。其中 YCK7 + 142. 176 ~ YCK8 + 668. 4 段采用盾构法施工,长 1 526. 224 m。施工单位采用德国海瑞克公司产的土压平衡式盾构机,外径 6. 28 m,其气泡注入系统可以根据地质条件的需要对发泡剂溶液的浓度、发泡倍率和气泡添加量达到完全的控制,以达到改善开挖土性质的目的。在盾构机通过 < 5 - 2 >、< 6 >、< 7 > 地层时,大量使用了 SLF-30 的发泡剂,以达到改良土体目的。< 5 - 2 > 为硬塑或中密状残积土,以粉质粘土为主,红褐色、黄褐色,由基岩风

化而成,硬塑,手捻有砂感,含少量角砾;< 6 > 为岩石全风化带,泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、细砂岩及砂砾岩,褐红色、紫红色,已风化,成土状,岩石组织结构已基本破坏,但尚可辨认,岩芯呈土柱状,硬塑~半干硬,手捏呈碎屑或碎块状;< 7 > 为强风化地层,岩性为泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、细砂岩及砂砾岩,褐红或紫红色,已风化成半岩半土状,岩石组织结构已大部分破坏,但原始构造清晰,岩芯呈碎块或短柱状,风化裂隙发育,局部有水锈斑痕,岩块用手可掰断,三个地层的各项物理力学参数见表 1; 试验位置如图 6 中第 715 环至 734 环所示。

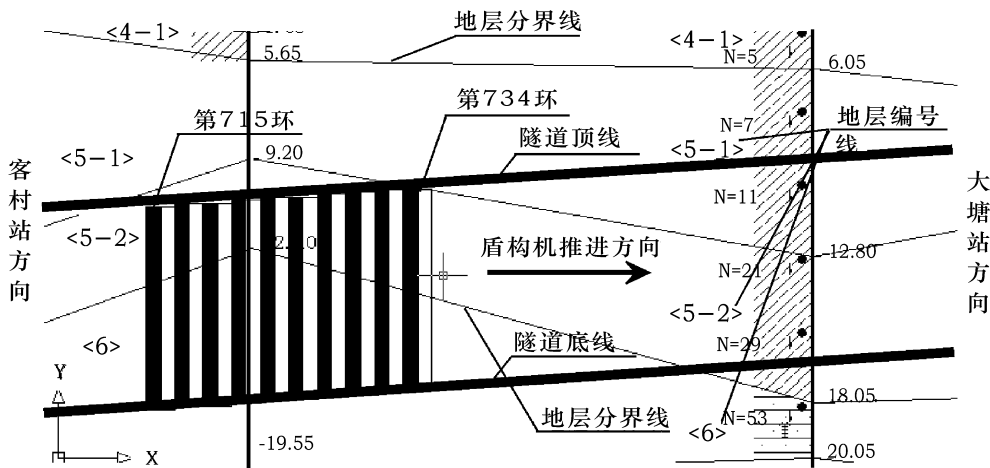


图 6 试验位置示意图

Fig. 6 Sketch of the test location

表 1 地层的各项物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical properties of the strata

地层代号	天然密度	天然含水率	孔隙比	凝聚力	内摩擦角	渗透系数	围岩类别
	(g/cm ³)	(%)		(kPa)	(°)	(m/s)	
< 5 - 2 >	1. 94	21. 2	0. 658	34	19. 4	0. 0001	
< 6 >	1. 94	19. 5	0. 631	35. 5	20	0. 0006	
< 7 >	2. 17					0. 22	

3.2 气泡添加量、发泡剂浓度、发泡倍率对盾构施工的影响分析

气泡对开挖土体的改良效果主要与三个方面有关,即:气泡添加量、发泡剂浓度、发泡倍率;由于气泡对开挖土体性质的改良效果,在盾构施工中的直接反映为千斤顶推力的降低,刀盘扭矩和螺旋排土器扭压的减小,所以作者在现场试验过程中,对

盾构机气泡添加系统中气泡添加量、发泡剂浓度和发泡倍率三个工作参数进行调整和控制,观察记录盾构机推进时的千斤顶推力、刀盘扭矩和螺旋排土器扭压的变化情况,并对以上工作参数进行分析得出了气泡添加量、气泡的稳定性和气泡的发泡倍率对盾构施工中土体改良效果的影响。螺旋排土器的扭压为驱动螺旋排土器旋转的液压装置的油压,

扭压越高则螺旋排土器的扭据越大,二者之间成正比关系。在盾构施工过程中,当运送渣土车已经装满后,推力千斤顶停止向前推进,盾构机的刀盘停止运转不再挖掘土体,同时螺旋排土器关闭,停止出土,保持压力土舱一定压力,等待下一班渣土车的到来;在新的渣土车到来后,推力千斤顶向前推进,推力上升,盾构机的刀盘又一次转动,开挖土体,螺旋排土器打开向渣土车内排土,待渣土车装满后,盾构机就会再次到停止状态;这样的循环过程称为一个推进过程。盾构机从停止到推进

再到停止的推进过程中其刀盘扭矩、千斤顶推力、螺旋排土器的扭矩三者也是按周期变化的;在盾构机后,随着推进速度的上升,刀盘扭矩由0不断上升,当推进速度稳定到达设定数值后,刀盘扭矩的上升速度减缓,并最终不再上升,扭矩趋于一个稳定的数值范围;在盾构机停止推进中,刀盘的扭矩就会由这一稳定的数值范围迅速降低到0。千斤顶推力、螺旋排土器的扭矩的变化规律与刀盘扭矩基本相同。

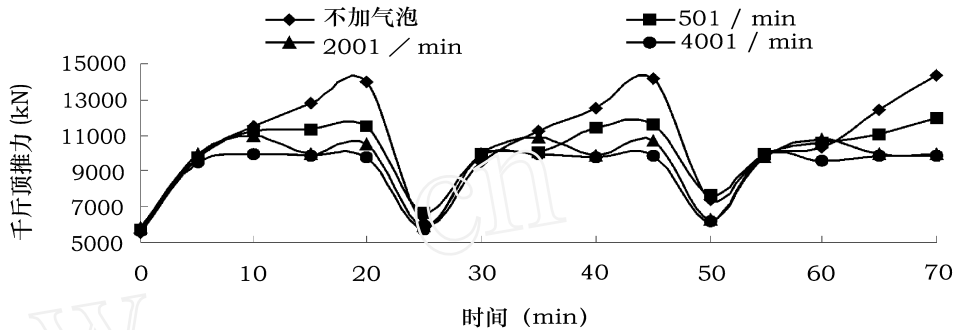


图7 不同气泡添加量时千斤顶推力随时间的变化

Fig. 7 Variation of the jack forces with the foams inject amount

3.2.1 气泡添加量对施工的影响

图7为在不同气泡添加量时千斤顶推力随时间变化的情况,其试验位置为第715~第721环(见图6),由图可以看出由不加气泡到气泡添加量为200 l/min时,推进速度:25 mm/min,千斤顶的推力由约14 000 kN降低至11 000 kN以下,降低幅度超过20%;而再增加气泡的添加量至400 l/min时,千斤顶的推力虽有一定降低,但没有200 l/min添加量前明显。

图8为发泡剂浓度为1.0%,发泡倍率25倍,添加不同量的气泡施工时,停机两小时后再开机,螺旋排土器的驱动油压(简称:扭压)随气泡添加量的变化,其试验位置为第715~第721环(见图6);由图可见随着气泡添加量的增大,螺旋排土器的扭压不断减小。

表2 刀盘扭矩与气泡添加量的关系

Table 2 Relationship between the cutter head torque and foam inject amount

气泡添加量 (l/min)	不加气泡	50	200	400
刀盘扭矩 (kN·m)	4141	3613	3213	2896
刀盘扭据降低幅度 (%)	0	12.7	22.4	30.1

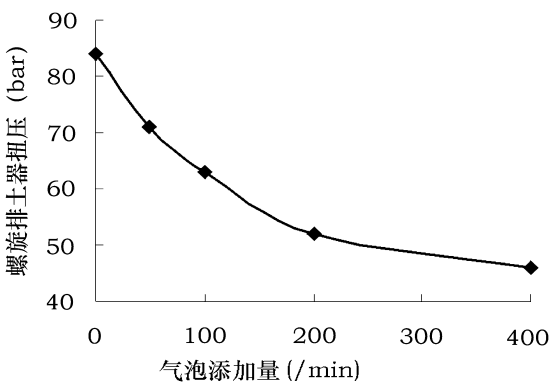


图8 气泡添加量与螺旋排土器扭压关系

Fig. 8 Relationship between the torsional pressure of soil discharge machine and foam inject amount

表2为发泡剂浓度1.0%,发泡倍率25倍,盾构机的推进速度25 mm/min,刀盘转速为2.0 rpm时,刀盘的扭矩与气泡添加量关系,其试验位置为第715~第721环(见图6);表2中,气泡添加量由0上升至400 l/min过程中,刀盘扭矩由4141 kN·m,减小到2896 kN·m,刀盘扭据不断降低,最大降低幅度达到约30%,气泡的添加量对刀盘扭矩降低显著。

3.2.2 发泡剂浓度对施工的影响

图9为不同发泡剂浓度时千斤顶推力随时间变化关系,其试验位置为第722~第727环(见图6),在试验中气泡的添加量为200 l/min,盾构机的推进速度约为25 mm/min,各浓度的溶液的发泡倍

率都为20倍;发泡剂溶液浓度为0.6%,1.0%,1.5%三个水平时,千斤顶的推力虽都有显著降低,降低幅度超过20%,但三个水平之间的降低幅度差别不大,几乎维持在同一水平上。

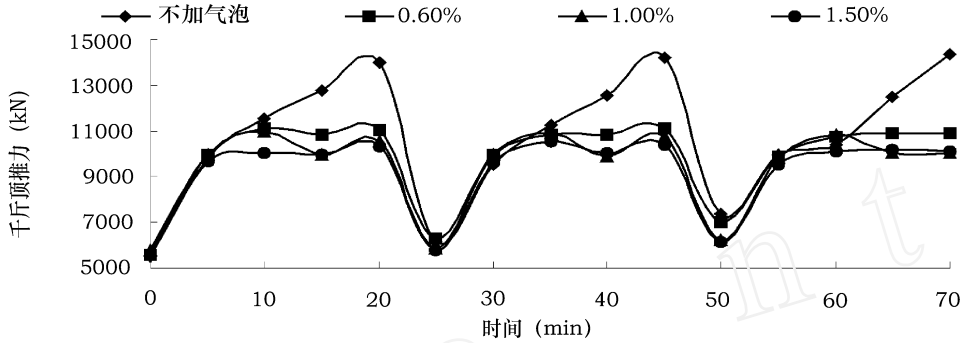


图9 不同发泡剂浓度千斤顶推力随时间变化

Fig.9 Variation of the jack forces with the foam solution concentration

图10为采用不同浓度的发泡剂溶液施工时,停机两小时后再开机继续施工,螺旋排土器扭压(bar)的变化曲线,其试验位置为第722~第727环(见图6);气泡添加量为200 l/min,盾构机的推速度约为25 mm/min,发泡倍率为各自的发泡倍率。由图可以看出,停机两小时后,发泡剂浓度对螺旋排土器的扭压影响明显,发泡剂浓度由0.3%增至1.5%后,螺旋排土器的扭压由75 bar降低到43 bar,降低了约43%,降低明显。由发泡剂的浓度对发出的气泡的稳定性影响可知,气泡的稳定性-气泡的半衰期,对开挖土的改善有一个时间效应,随着时间的推移,由于气泡的不断破灭、消散,气泡对开挖土的改善效果减低。

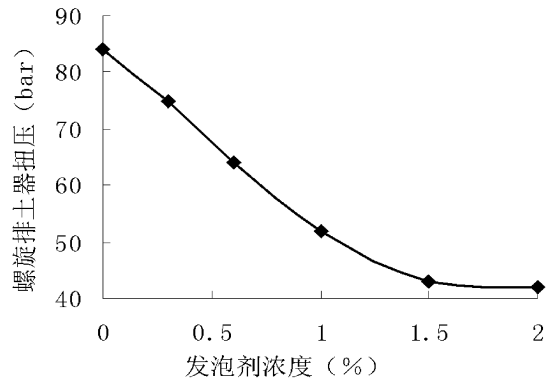


图10 发泡剂浓度与螺旋排土器扭压关系

Fig.10 Relation between the torsional pressure and foam solution concentration

3.2.3 发泡倍率对施工的影响

表3 刀盘扭矩与发泡倍率关系

Table 3 Relationship between the cutter head torque and foam expansion ratio

发泡倍率(倍)	不加气泡	15	20	25
扭矩 (kN·m)	4141	3162	3213	3258
降低幅度 (%)	0	23.6	22.4	21.3

与刀盘扭矩之间的关系,其试验位置为第727~第734环(见图6);在表3中气泡剂的发泡倍率为15、20、25倍较不添加气泡时,刀盘的扭矩降低都达到20%以上,而相同气泡添加量不同发泡倍率时,刀盘扭矩几乎没有差别。

图11为发泡剂浓度为1.0%,气泡注入量为200 l/min,推进速度为25 mm/min的情况下,不同发泡倍率时千斤顶推力随时间变化关系,其试验位置为第727~第734环(见图6);由图可以看出:发泡倍率为15、20、25倍时,千斤顶的推进推力较没有添加气泡时都有明显的降低,降低幅度都达到20%以上,但三者的降低幅度之间变化不大。

表3为发泡剂的浓度1.0%,气泡添加量200 l/min,推进速度为25 mm/min时,不同的发泡倍率

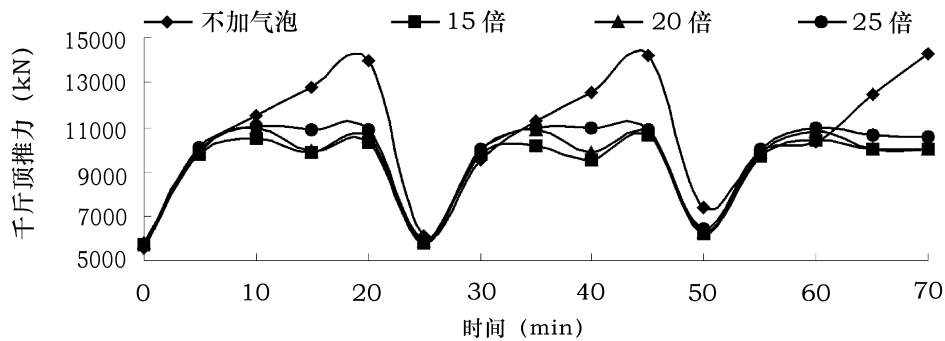


图 11 不同发泡倍率时千斤顶推力随时间变化

Fig. 11 Variation of the jack forces with the foam expansion ratio

3.3 小结

综上所述,可知:

(1) 气泡添加量对开挖土体改良效果影响显著;通过增大气泡的添加量,盾构机的千斤顶推力、螺旋排土器和刀盘的扭矩,都出现了显著的降低;

(2) 发泡剂浓度提高后,所发出气泡的稳定性提高,稳定性好的气泡较稳定性差的气泡,在开挖土与气泡混合后较短的时间内对开挖土的改良效果是相同的,但随着时间的推移,稳定性差的气泡迅速破灭、消散,其对开挖土的改良效果显著降低,而稳定性好的气泡的改良效果可以保持较长这种改良效果。

(3) 可知相同气泡添加量时,不同气泡的发泡倍率对开挖土的改善相同,所以同样可以通过加大发泡倍率的方法来减小发泡剂的用量。

4 结论

经过以上气泡室内性能研究和现场试验研究,可以总结出以下结论:

(1) 土压平衡式盾构中用气泡改良开挖土体性质,气泡的稳定性,即气泡的半衰期,对改良效果不大;对改良效果影响最大的为气泡的添加量;在实际工程应用中,在气泡的半衰期达到 6 min 以上时,可以调节气泡的注入量来控制开挖土的改良效果;

(2) 由于气泡对开挖土的改良效果的影响主

要在气泡添加量方面,则在相同气泡用量时,最大发泡倍率和发泡溶液浓度之间有一个节省发泡剂用量的最佳值;通过室内试验的最大发泡倍率与发泡剂浓度之间关系曲线,找出这一最佳值,可以指导现场施工,节约工程造价;

(3) 气泡的稳定性对开挖土改良效果的影响主要是开挖土体改良后的状态持续的时间;根据气泡稳定性与发泡剂浓度的关系,在施工过程中可以在长时间停机前加大发泡剂浓度,使发出的高稳定性气泡改良的,具有长时间改良效果土体充满土舱;而在其它时间,可以改用低浓度的发泡剂溶液发泡,以节约工程成本。

参考文献:

- [1] 朱伟译. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001
- [2] 尹旅超,朱振宏,李玉珍等译. 日本隧道盾构新技术[M]. 湖北:华中理工大学出版社, 1999
- [3] 朱伟,陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望(第2讲)[J]. 岩土工程界, 2002:1~6
- [4] 张志允. 气泡混合轻量土的制作技术及基本力学性质的研究[D]. 河海大学硕士论文, 2003
- [5] 张明晶. 土压平衡式盾构施工闭塞问题的发生机理及防治措施研究[D]. 河海大学硕士论文, 2004
- [6] 张明晶. 土压平衡式盾构气泡发泡剂的试验研究[C]. 第九界土力学及岩土工程学术会议论文集, 2003: 1321~1326