

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201707025

渣土改良剂对黏土液塑限影响及机理分析

刘朋飞,王树英,阳军生,胡钦鑫

(中南大学 土木工程学院,长沙 410075)

摘要: 针对盾构穿越黏土地层时渣土改良剂类型和添加量难以确定的问题,进行了液塑限测定试验.通过研究不同改良剂对土样液塑限的影响特征,确定改良剂的地层适用性,对比分析分散剂对不同土样的改良效果;通过黏土颗粒 Zeta 电位测定和颗粒间互斥能的分析,探究分散剂的作用机理.研究表明:在黏性较大的渣土中,单独使用阴阳离子复配型泡沫剂难以达到理想的改良效果;絮凝剂能够增大黏土的液限和塑性指数,增加黏土的抗剪强度,而分散剂能够减小黏土的液塑限和塑性指数,减小黏土的抗剪强度,因此分散剂适用于黏土地层;相对于高岭土,由于高蒙混合土(高岭土与蒙脱土质量比=1:1)和蒙脱土结合水含量高,需要更多分散剂和作用时间,改良作用才能稳定发挥;当分散剂添加至一定量后,改良效果基本不再变化;随着分散剂添加比的增加,蒙脱土、高蒙混合土、高岭土的 Zeta 电位减小(即负电荷增多)后趋于稳定,黏土颗粒聚团的位置 V_{\max}/R 增高,即颗粒间排斥能增加,因此黏土利于分散.

关键词: 盾构;渣土改良剂;黏土;液塑限;Zeta 电位

中图分类号: TU94 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)06-0091-06

Effect of soil conditioner on Atterberg limits of clays and its mechanism

LIU Pengfei, WANG Shuying, YANG Junsheng, HU Qinxin

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To select ideal type and content of soil conditioner in clay formation, the Atterberg limits of clay were measured. The applicability of soil conditioners was determined and the effects of dispersant on different clays were compared by analyzing the influence of soil conditioners on the clays. The Zeta potentials with different dispersant contents and repulsive energy among particles were also measured to analyze action mechanism of the dispersants. The results show that it is difficult to achieve ideal effect only by using anionic-cationic foam individually. The flocculant increases the liquid limit and plasticity index of the bentonite, so it also contributes to the increase of the shear strength. In the contrary, the dispersant decreases the liquid limit and plasticity index of the clay, thus it can decrease the shear strength, which makes the dispersant more suitable for clay conditioning. Compared with kaolin, the mixture (the mass ratio of bentonite to kaolin is 1:1) and bentonite require much time and dispersant due to high content of bonding water in bentonite. The effect of dispersant keeps unchanged after the injection ratio of dispersant reaching a certain value. With the increase in dispersant content, the Zeta potential decreases (i.e., negative charge increased) and tends to a lower constant in bentonite, kaolin and their mixture. The mean barrier potential V_{\max}/R of clayey particles get higher with more dispersant, thus it is more difficult for the clays to be agglomerated and easier to disperse.

Keywords: shield; soil conditioner; clayey soil; Atterberg limits; Zeta potential

由于施工安全快速,盾构法已成为城市地铁工程的主要施工工法.当土压平衡盾构穿越黏土地层时,黏土极易粘附在刀盘、土舱隔板或螺旋输送机内,造成掘进扭矩过大、土舱压力控制困难、排土不畅等问题.有学者指出当地层中的黏土矿物超过25%时,刀盘将发生结泥饼现象^[1];当渣土的塑性指数大于20%时,盾构中发生“堵塞”的风险大大提

高^[2].以上问题目前最有效的解决办法之一就是渣土改良,常用的改良剂主要有分散剂、泡沫剂和絮凝剂,而目前对于渣土改良效果仍没有统一的评价方法.液限表征土由流塑状态转入可塑状态的界限含水率,塑限表征土由可塑状态转变为坚硬状态的界限含水率,结合土的实际含水率,可判定土的流塑性.另外,扬西夫等利用室内小十字板,测得土样在含水率为液限时不排水抗剪强度平均值为1.7 kPa^[3];国内外普遍认为当土含水率为液限时抗剪强度是1.6~1.7 kPa,含水率等于塑限时抗剪强度一般为110~120 kPa^[4].因此,用联合测定法测得的液、塑限反映土样的抗剪强度,即液限或塑限的减小

收稿日期:2017-07-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778637)

作者简介:刘朋飞(1990—),男,博士研究生;

王树英(1982—),男,副教授,博士生导师

通信作者:王树英, sywang@csu.edu.cn

表明土样不排水抗剪强度减小,反之亦然。

目前关于改良剂对渣土液塑限影响的研究较少, Merrit^[5]测定了高岭土加入部分水解聚丙烯酰胺后液塑限的变化; Spagnoli 等^[6]研究了钠基蒙脱土中液体介电常数对其液限的影响; Maines 等^[7]发现随着土样液体中酸、碱或者盐质量分数增加,蒙脱土的液限由 436% 减小至 100% 后不再变化, Ye 等^[8]测定了不同泡沫添加比对泥质粉砂岩地层液塑限的影响。虽然以上少数学者研究了改良前后黏土液塑限的变化,但是缺乏对不同改良剂作用效果的对比以及改良剂对液塑限的影响机理分析。目前盾构改良剂的选型主要依据现场经验,深入研究渣土改良剂对黏土液塑限影响及机理显得尤为必要。

本文通过研究不同改良剂对蒙脱土的液塑限影响,对比分析改良剂的地层适用性;将分散剂作用于高岭土和高蒙混合土(蒙脱土质量:高岭土质量=1:1),分析分散剂对不同土样液塑限影响的差异;测定分散剂对黏土颗粒 Zeta 电位的影响,并基于 DLVO 理论,研究不同分散剂添加比时颗粒间互斥能的变化,旨在从化学和微观角度阐述分散剂的作用机理。研究成果可提升对渣土改良内在机理认识,为现场盾构渣土改良选型提供理论依据。

1 试验研究

1.1 试验材料

采用 X 射线衍射(XRD)仪测定高岭土、蒙脱土矿物成分,分析结果见表 1、2。分散剂采用六偏磷酸钠,呈颗粒状,泡沫剂和絮凝剂为液体溶液,各改良剂的化学成分见表 3~5。六偏磷酸钠的主要成分为多偏磷酸钠;泡沫剂主要成分是阳离子表面活性剂十二烷基三甲基氯化铵、复配有阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠以及非离子表面活性剂氯代十二烷等,属于阴阳离子复配型泡沫剂,泡沫剂发泡率为 21,产生的泡沫半衰期为 16 min;絮凝剂中有效成分是非离子型聚丙烯酰胺。由表 4、5 可以看出泡沫剂、絮凝剂含水率较高,为表面活性剂和絮凝剂溶液。

表 1 钠基蒙脱土矿物成分

成分	化学式	质量分数/%
钠基蒙脱石	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	48.8
钙基蒙脱石	$\text{Ca}_{0.2}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	14.1
钠长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	28.3
微斜长石	$(\text{K}_{0.95}\text{Na}_{0.05})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	5.5
石英	SiO_2	2.5
方解石	CaCO_3	0.8

表 2 高岭土矿物成分

成分	化学式	质量分数/%
高岭石	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	83.7
白云母	$\text{KAl}_2.2(\text{Si}_3\text{Al})_{0.975}\text{O}_{10}((\text{OH})_{1.72}\text{O}_{0.28})$	14.0
石英	SiO_2	2.3

表 3 分散剂化学成分表

成分	化学式	质量分数/%
多聚磷酸钠	$(\text{NaPO}_3)_n$	73~74
硅胶	$\text{mSiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	4~5
十四烷基二甲叔胺	$\text{C}_{16}\text{H}_{35}\text{N}$	18~19
十四醇聚氧乙烯醚-3	$\text{C}_{17}\text{H}_{36}\text{O}_3$	2~3
氯代十二烷	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{Cl}$	2~3
月桂醇醚-8	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}\text{O}_7$	1~2

表 4 泡沫剂化学成分表

成分	化学式	质量分数/%
十二烷基硫酸钠	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{O}_4\text{NaS}$	1.0~1.5
氯代十二烷	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{Cl}$	0.2~0.3
十二烷基三甲基氯化铵	$\text{C}_{15}\text{H}_{34}\text{ClN}$	3.0~3.5
硅油	$[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n$	1.0~2.0
乙二醇单丁醚	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_2$	1.0~2.0
十六醇聚氧乙烯醚-9	$\text{C}_{25}\text{H}_{44}\text{O}_9$	0.1~0.2
十五醇聚氧乙烯醚-9	$\text{C}_{24}\text{H}_{42}\text{O}_9$	0.1~0.2
水	H_2O	93.0~94.0

表 5 絮凝剂化学成分表

成分	化学式	质量分数/%
非离子型聚丙烯酰胺	$[\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CONH}_2)]_n$	13~14
月桂醇醚-7	$\text{C}_{19}\text{H}_{40}\text{O}_7$	0.5~1.0
二甲基硅油	$[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n$	1.0~2.0
异辛醇聚氧乙烯醚-6	$\text{C}_{14}\text{H}_{30}\text{O}_6$	0.5~1.0
硅胶	$\text{mSiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	1.0~2.0
氯代十二烷	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{Cl}$	1.0~2.0
水	H_2O	81.0~83.0

1.2 试验方法

1) 液塑限测定试验

采用落锥法测定黏土的界限含水率,液限和塑限时的锥入深度分别为 17 mm 和 2 mm^[9]。将干燥土样与蒸馏水混合均匀后静置 24 h,分别控制蒙脱土、高蒙混合土和高岭土的含水率为 200%、150%、50%。将泡沫剂配制成 3% 溶液后,采用抽液泵将泡沫剂溶液抽入发泡枪,同时通入空气产生泡沫;絮凝剂、分散剂的浓度分别为 20% 和 10%。按照不同改良

剂添加比向润湿后的土样中加入泡沫或改良剂溶液,搅拌均匀后测定其液塑限,其中改良剂添加比表示改良剂质量与干燥土样质量的比值。

盾构机主要有正常掘进和停机两种状态.当盾构机正常掘进时,改良剂与渣土作用时间较短,而在处理“泥饼”等停机状态时,改良剂与渣土作用时间较长.为探究改良剂的时间效应,分别测定加入絮凝剂 0、5、29、53 h 后土样的液塑限。

2) Zeta 电位测定试验

带负电的黏土颗粒将金属阳离子吸附在颗粒表面,形成双电层.当黏土颗粒在电场中运动时,双电层将出现剪切面,此剪切面处的电位即为 Zeta 电位.由于当土样含水率为液限和塑限时,透光性较差,难以测定其 Zeta 电位,因此需对土样加水稀释.改变分散剂的添加量,保持土样与水的质量比不变,仍能反映出分散剂的作用效果.具体步骤如下:将 1 g 土样与蒸馏水混合均匀,然后分别按照不同的添加比加入质量分数为 1% 的分散剂溶液,搅拌均匀后静置 5 min 后取上层清液,运用 Malvern Zetasizer Nano ZS90 纳米粒径电位分析仪测定其 Zeta 电位.需要加入蒸馏水和分散剂溶液的质量见表 6,土样的最终含水量包含加入的蒸馏水和分散剂溶液,控制土样与加入水的质量比为 1 : 1 000。

表 6 测定 Zeta 电位时各成分添加量

Tab.6 The content of each component when determining the Zeta potentials of the clays

分散剂添加比/%	分散剂溶液质量/g	初始加入水质量/g	加入水总质量/g
0	0	1 000	1 000
2	2	998	1 000
4	4	996	1 000
6	6	994	1 000
8	8	992	1 000
10	10	990	1 000

2 结果及分析

2.1 不同改良剂作用下蒙脱土界限含水率变化特征

2.1.1 泡沫剂对蒙脱土界限含水率的影响

泡沫剂的添加比分别为 0.2%、0.6%、0.8%,蒙脱土的液塑限测定结果见图 1.随着泡沫剂添加量的增加,液限逐渐减小,塑限则基本不发生变化.总体而言,泡沫剂对液塑限的影响较小,主要原因是:当泡沫加入蒙脱土中后,由于土样吸水性较强,泡沫基本全部消散,虽然阴离子表面活性剂能够增大黏土颗粒间的静电斥力,减小颗粒间的连接^[10],但阳离子表面活性剂的存在减弱了阴离子表面活性剂的作用效果,且溶液中阴离子表面活性剂含量较少,故此

泡沫剂对土样的液塑限基本没有影响。

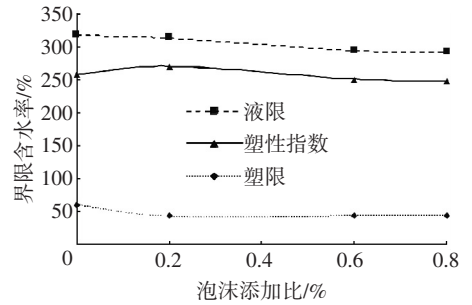


图 1 蒙脱土界限含水率随泡沫剂添加比变化

Fig.1 Atterberg limits changes of bentonite with foam agent content

2.1.2 絮凝剂对蒙脱土界限含水率的影响

当添加比为 2% 时,絮凝剂改良蒙脱土 0、5、29、53 h 后液塑限变化见图 2.加入絮凝剂 0 h 与 5 h 后相比,液限减小,塑限基本没有变化,而加入絮凝剂 5 h 后液限和塑限基本趋于稳定.因此选取加入改良剂 0 h 和 5 h 后的液塑限值,研究盾构机两种工作状态时改良渣土的性质变化。

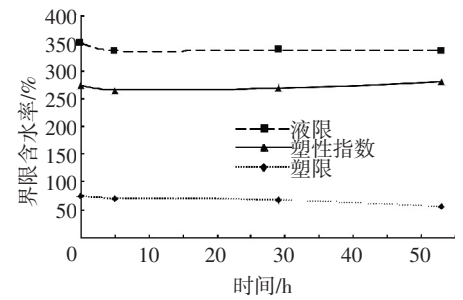


图 2 蒙脱土界限含水率随加入絮凝剂时间变化

Fig.2 Atterberg limits changes of bentonite with time after adding flocculant

絮凝剂的添加比分别为 2%、4% 和 8%,加入絮凝剂 0 h 和 5 h 后的液塑限随絮凝剂添加比的变化见图 3.加入絮凝剂 0 h 和 5 h 后,随着添加比的增加,蒙脱土的液限逐渐增加,而塑限基本不发生变化,塑性指数的变化趋势与液限基本相同。

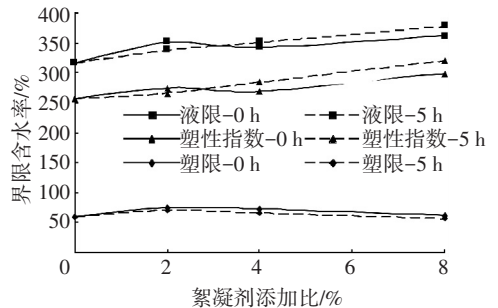


图 3 加入絮凝剂 0 h、5 h 后蒙脱土界限含水率随絮凝剂添加比变化

Fig.3 Atterberg limits changes of bentonite with flocculant content 0 hour and 5 hours after adding flocculant, respectively

2.1.3 分散剂对蒙脱土界限含水率的影响

蒙脱土的分散剂添加比分别为 2%、4%、6%、

8%、10%，加入分散剂 0h 和 5h 后其液塑限变化见图 4。加入分散剂 0 h 后，土样的液限基本随着添加比的增大而减小，添加比小于 2% 时液限减小最快；塑限则变化较小，主要因为蒙脱土的液塑限较大，含水率较低时分散剂难以在短时间内与蒙脱土颗粒充分作用使土颗粒释放出结合水。加入分散剂 5 h 后随着分散剂添加比增加，蒙脱土的液塑限和塑性指数均减小，且添加比小于 4% 时液塑限减小较快，随着添加比的增加，液塑限减小速率逐渐变缓。

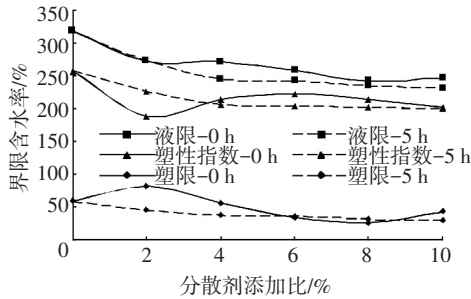


图 4 加入分散剂 0 h、5 h 后蒙脱土界限含水率随分散剂添加比变化

Fig. 4 Atterberg limits changes of bentonite with dispersant content 0 hour and 5 hours after adding dispersant, respectively

对比图 3、4 可知，土样中加入改良剂后，蒙脱土液限变化量明显大于塑限变化量，这表明含水率越高，改良前后抗剪强度变化越大，即改良效果越明显。Zumsteg 等^[11]类似地发现黏土越软（即含水率越高），高分子分散剂作用效果越明显，但并未从分散剂改变黏土液塑限角度揭示改良机理。

由上述可知，阴阳离子复配型泡沫剂改良塑性指数较大的黏土时，由于黏土的吸水性较强易造成泡沫消散，黏土的液塑限变化较小，故在塑性指数较大的黏土地层单独使用阴阳离子复配型泡沫剂难以达到理想的改良效果；絮凝剂能够显著增加黏土的界限含水率，增强黏土的抗剪强度，而分散剂能够显著减小黏土界限含水率和抗剪强度。黏土地层中加入改良剂的目的主要是减弱颗粒间的连接，减小其黏性^[12]，因此分散剂更适用于黏土地层。

2.2 分散剂对不同黏土界限含水率的影响

为分析分散剂对不同黏土的改良效果，进一步测定高岭土和高蒙混合土加入分散剂后的液塑限变化，并与蒙脱土测定结果对比。高岭土、高蒙混合土分散剂添加比分别为 2%、4%、6%、8%，土样分别加入分散剂 0 h 和 5 h 后的液塑限变化曲线见图 5、6。由图 5 可知，高岭土与分散剂混合 0 h 和 5 h 后测得的液塑限结果基本相同，原因是高岭土的液塑限较小，土颗粒中包含的结合水较少，分散剂在较短时间

内即可使高岭土充分释放出结合水。分散剂加入高岭土中对于其塑限影响较小，而液限在添加比小于 2% 时减小较快，添加比大于 2% 时液限基本保持不变，塑性指数与液限的变化趋势基本相同。由图 6 可知，随着分散剂添加比的增加，高蒙混合土的液限先减小然后趋于稳定，塑性指数变化趋势与液限相同，塑限基本不发生变化。

对比图 4~6 蒙脱土、高岭土、高蒙混合土加入分散剂 5 h 后的试验结果可知，塑性指数较大的蒙脱土需要更多的分散剂进行改良，且由于结合水含量大，蒙脱土需要与分散剂混合更长时间，才能充分发挥分散剂的作用效果；改良剂添加量达到一定值后，改良效果不再变化。

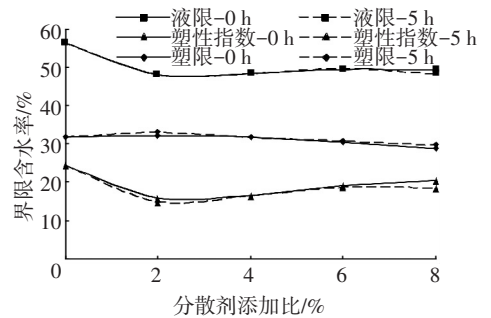


图 5 加入分散剂 0 h、5 h 后高岭土界限含水率随分散剂添加比变化

Fig. 5 Atterberg limits changes of kaolin with dispersant content 0 hour and 5 hours after adding dispersant, respectively

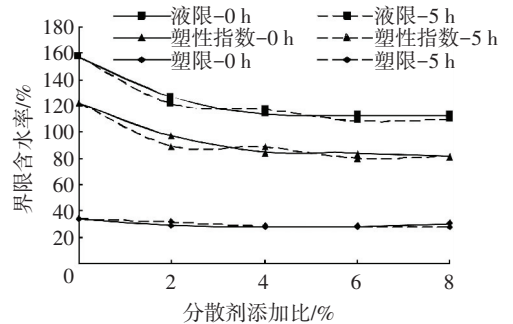


图 6 加入分散剂 0 h、5 h 后高蒙混合土界限含水率随分散剂添加比变化

Fig. 6 Atterberg limits changes of mixture consisting of bentonite and kaolin with dispersant content 0 hour and 5 hours after adding dispersant, respectively

3 分散剂作用机理分析

3.1 加入分散剂前后 Zeta 电位变化

蒙脱土、高岭土、高蒙混合土的 Zeta 电位测试结果见图 7，随着分散剂添加比的增加，蒙脱土、高岭土、高蒙混合土在加入分散剂后其 Zeta 电位减小后趋于稳定；同一分散剂添加比时高蒙混合土的 Zeta 电位介于蒙脱土与高岭土之间。

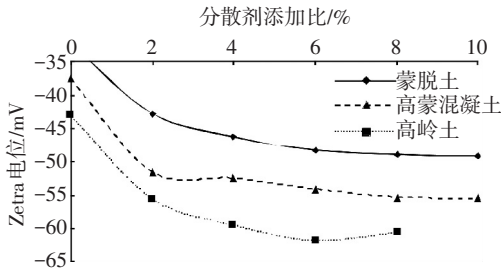


图7 Zeta 电位随分散剂添加比变化

Fig.7 Changes of Zeta potential with dispersant content

3.2 加入分散剂前后颗粒间互斥能变化

根据 DLVO 理论,分散剂主要是通过增大颗粒间的排斥作用能达到分散效果,颗粒间的总势能等于范德华力作用势能与静电作用势能之和,即

$$V_T = V_A + V_E, \quad (1)$$

式中: V_T 表示颗粒间作用总势能, V_A 表示范德华力作用势能, V_E 表示静电斥力作用势能.对于半径为 R_1 和 R_2 的颗粒有^[13]:

$$V_A = -\frac{A}{6h} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2)$$

$$V_E = \frac{\pi \varepsilon R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} (\varphi_1^2 + \varphi_2^2) \cdot$$

$$\left\{ \frac{2\varphi_1 \varphi_2}{(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)} \ln \frac{1 + \exp(-\kappa h)}{1 - \exp(-\kappa h)} + \ln[1 - \exp(-2\kappa h)] \right\}. \quad (3)$$

式中: A 为哈梅克常数, ε 为介电常数, φ_1 、 φ_2 分别为两颗粒的表面电位; κ 为德拜常数, h 为两颗粒的表面距离.假设相邻两颗粒粒径相等,即 $R_1 = R_2 = R$,对于单位长度半径的颗粒有

$$\frac{V_T}{R} = -\frac{A}{12h} + \frac{\pi \varepsilon}{2} (\varphi_1^2 + \varphi_2^2) \cdot$$

$$\left\{ \frac{2\varphi_1 \varphi_2}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \ln \frac{1 + \exp(-\kappa h)}{1 - \exp(-\kappa h)} + \ln[1 - \exp(-2\kappa h)] \right\}. \quad (4)$$

Novich^[14]测得蒙脱土、高岭土在水中的哈梅克常数分别为 $A_m = 2.2 \times 10^{-20} \text{J}$ 、 $A_g = 3.1 \times 10^{-20} \text{J}$,物质 1、2 在介质 3 中的哈梅克常数为

$$A_{132} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}), \quad (5)$$

式中: A_{11} 、 A_{22} 、 A_{33} 分别表示物质 1、2、3 在真空中的哈梅克常数,而蒙脱土、高岭土、水在真空中的哈梅克常数分别为 $1.3 \times 10^{-19} \text{J}$ 、 $1.5 \times 10^{-19} \text{J}$ 、 $4.4 \times 10^{-20} \text{J}$ ^[14],利用式(5)得到高蒙混合土的哈梅克常数 $A_{gm} = 2.68 \times 10^{-20} \text{J}$.由于分散剂含量较小,可近似认为分散剂溶液与水的介电常数相等,即 $\varepsilon = 7.08 \times 10^{-10} \text{F/m}$; κ 的取值主要取决于土样中改良剂的离子浓度和化合价,参考文献[15]取 $\kappa = 1.471 \times 10^8 \text{m}^{-1}$;根据邱冠周等^[16]所述,当添加剂含量较小

时可近似认为表面电位 φ_1 、 φ_2 等于 Zeta 电位.图 8~10 表示不同六偏磷酸钠添加量时单位直径蒙脱土、高岭土、高蒙混合土颗粒间作用总势能 V_T/R 随颗粒间距的变化曲线,位能曲线上出现一个峰值 V_{\max}/R ,称为“位垒”.随着六偏磷酸钠用量的增加,蒙脱土、高岭土、高蒙混合土的颗粒间位垒 V_{\max}/R 不断增高.分散的蒙脱土、高岭土颗粒若发生连接必须克服这一位垒,因此位垒 V_{\max}/R 不断增高使蒙脱土、高岭土难于聚团,利于分散.

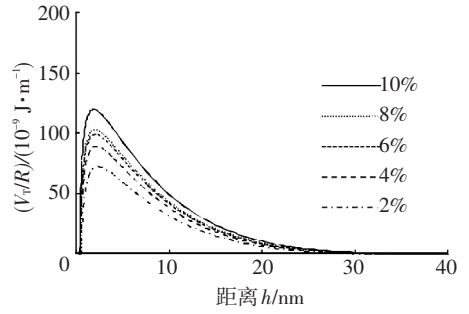


图8 不同分散剂添加比条件下蒙脱土颗粒间总作用能随距离变化曲线

Fig.8 Changes of repulsive energy among bentonite particles under different dispersant contents with particle distance

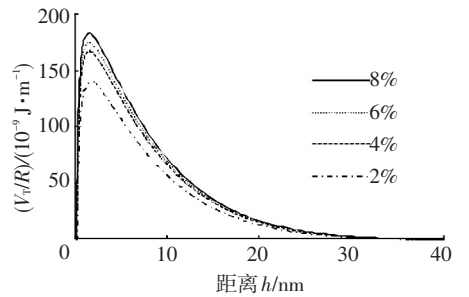


图9 不同分散剂添加比条件下高岭土颗粒间总作用能随距离变化曲线

Fig.9 Changes of repulsive energy among kaolin particles under different dispersant contents with particle distance

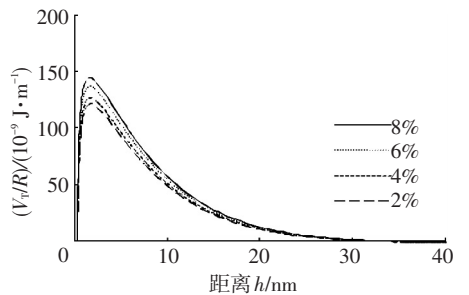


图10 不同分散剂添加比条件下高蒙混合土颗粒间总作用能随距离变化曲线

Fig.10 Changes of repulsive energy among mixture particles of kaolin and bentonite under different dispersant contents with particle distance

黏土中加入分散剂后,蒙脱土、高岭土、高蒙混合土界限含水率逐渐减小,即相同含水率时的不排水抗剪强度减小,主要是因为黏土颗粒整体带负电,

但是在片状黏土的边角处,由于断键作用将会有部分带正电^[17],六偏磷酸钠中每个多偏磷酸钠阴离子中含有 30~90 个 PO_3 基团,可形成一条类似有机物的长链^[18],多磷酸根离子能够吸附在片状黏土的边角带正电处,增强黏土颗粒的负电荷量和 Zeta 电位,颗粒间聚团需要克服的最大排斥能 V_{\max}/R 增加,黏土颗粒间的连接减弱,因此相同含水率时加入分散剂后土样的抗剪强度降低,土样的液限和塑限也逐渐减小;当分散剂添加量较大时,黏土颗粒的边角带正电处被分散剂中的阴离子占满,分散剂作用效果减弱,液塑限也基本趋于稳定.含水率越高,土样中溶解的分散剂含量越大,土样的抗剪强度减小幅度越大,因此加入分散剂后黏土的液限减小量大于塑限的减小量,土样的塑性指数降低.

4 结 论

1) 蒙脱土的吸水性较强,泡沫易消散,泡沫剂对蒙脱土的液塑限影响有限;随着添加比的增加,絮凝剂改良后的蒙脱土液限和塑性指数逐渐增加,而分散剂改良后的蒙脱土液限、塑限和塑性指数都在减小,且分散剂添加比小于 4% 时液限和塑限减小较快.因此分散剂可减小其抗剪强度,利于改良黏性渣土.

2) 相对于高岭土,由于高蒙混合土和蒙脱土结合水含量高,需要更多的分散剂和作用时间,改良作用才得以稳定发挥;当分散剂添加到一定量后,改良效果基本不再变化.

3) 随着分散剂添加比的增加,蒙脱土、高岭土、高蒙混合土的 Zeta 电位减小(即负电荷量增加)后趋于稳定.添加分散剂,可使黏土颗粒聚团的位垒 V_{\max}/R 不断增高,利于黏土颗粒分散.

参 考 文 献

- [1] 李志军, 翟志国, 赵康林. 泥水盾构刀盘结泥饼形成原因及防治技术[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊 2): 1866-1871.
LI Zhijun, ZHAI Zhiguo, ZHAO Kanglin. Causes of mud cake formation on cutter head of slurry shield and its control technology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(s2): 1866-1871.
- [2] HOLLMANN F S, THEWES M. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37(13): 96-106.
- [3] SHERWOOD P T, RYLEY M D. An investigation of a cone-penetrometer method for the determination of the liquid limit[J]. Géotechnique, 1970, 20(2): 203-208.
- [4] 周序源, 张剑峰. 界限含水量试验的现状 & 展望[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(3): 90-99.
ZHOU Xuyuan, ZHANG Jianfeng. Research status and outlook of Atterberg limits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(3): 90-99.
- [5] MERRITT A S. Conditioning of clay soils for tunnelling machine screw conveyors[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2005.
- [6] SPAGNOLI G, FERNANDEZ-STEGER T, FEINENDEGEN M, et al. The influence of the dielectric constant and electrolyte concentration of the pore fluids on the undrained shear strength of smectite[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(5): 757-763.
- [7] MAINES M, GAJO A. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay [J]. Géotechnique, 2007, 57(8): 687-699.
- [8] YE X Y, WANG S Y, YANG J S, et al. Soil conditioning for EPB shield tunnelling in argillaceous siltstone with high content of clay minerals: case study [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 17(4): 05016002.
- [9] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [10] LANGMAACK L. Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling [C]// Proceedings of North American tunneling. Rotterdam, Netherlands: MBT Publication, 2000: 525-542.
- [11] ZUMSTEG R, PUZZIN A M. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31(5): 86-96.
- [12] EFNARC A. Specifications and guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock [DB/OL]. [2017-07-06]. <http://www.efnarc.org/pdf/TBMGuidelinesApril05.pdf>.
- [13] 张志军, 刘炯天, 冯莉, 等. 基于 DLVO 理论的煤泥水体系的临界硬度计算[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 120-125.
ZHANG Zhijun, LIU Jiongtian, FENG Li, et al. Calculation of critical hardness of coal slime water system based on DLVO theory [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(1): 120-125.
- [14] NOVICH B E. Colloid stability of clays using photon correlation spectroscopy [J]. Clays and Clay Minerals, 1984, 32(5): 400-406.
- [15] 夏启斌, 李忠, 邱显扬, 等. 六偏磷酸钠对蛇纹石的分散机理研究[J]. 矿冶工程, 2002, 22(2): 51-54.
XIA Qibin, LI Zhong, Qiu Xianyang, et al. Investigation of action mechanism between sodium hexametaphosphate and serpentine [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(2): 51-54.
- [16] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 颗粒间相互作用与细粒浮选[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993.
QIU Guanzhou, HU Yuehua, WANG Dianzuo. Interactions between particles and flotation of fine particles [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993.
- [17] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
LI Xueyuan. Soil chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [18] 刘亚川, 张克仁. 六偏磷酸钠的作用机理研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1993, 14(3): 231-235.
LIU Yachuan, ZHANG Keren. Mechanism of the function of sodium hexametaphosphate [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1993, 14(3): 231-235.