

隧道壁后注浆材料发泡剂的制备与性能<sup>\*</sup>陈佩韦 仲建军 顾兴庆 徐小凤 张俊 高培伟<sup>\*\*</sup>

(南京航空航天大学土木与机场工程系, 210016, 南京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 传统的壁后注浆材料及技术已不能满足城市轨道交通的施工要求, 探索新型壁后注浆材料和技术成为了交通施工部门急需解决的技术难题。针对城市轨道交通工程项目的特征, 通过在改性动物蛋白母液中添加阴离子表面活性剂和稳泡剂, 研究了壁后注浆材料专用的新型发泡剂。通过对比掺入不同极性大分子物质的起泡及稳泡效果, 确定发泡剂的最佳配比, 起泡和稳泡组分为 0.8% SDS(十二烷基硫酸钠)+0.15% C12(苯扎氯铵)时, 发泡剂性能最好。研究结果表明, 利用所提发泡剂制备注浆材料, 其力学性能较好且内部结构致密。

**关键词** 城市轨道交通; 壁后注浆材料; 发泡剂; 性能

**中图分类号** TU528; U239.5

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2023.05.013

## Preparation and Properties of Foaming Agent for Tunnel Backwall Grouting Materials

CHEN Peiwei, ZHONG Jianjun, GU Xingqing, XU Xiaofeng, ZHANG Jun, GAO Peiwei

**Abstract** Conventional backwall grouting material and technology already cannot meet urban rail transit construction requirements. Research of new backwall grouting material and technology has become an urgent technical challenge for transportation construction department. According to the characteristics of urban rail transit project, by adding anionic surfactant and bubble stabilizing agent to modify animal protein mother liquor, a new foaming agent special for backwall grouting material is studied. By comparing the foaming and stabilizing effects of mixing macromolecular substance between different polarity properties, the optimal ratio of foaming agent is determined. When the foaming and stabilizing group is 0.8% SDS+0.15% C12, the foaming agent performs the best. Research results show that the grouting material prepared using the developed foaming agent has good mechanical properties and dense internal structure.

**Key words** urban rail transit; backwall grouting material; foaming agent; property

**Author's address** Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016, Nanjing, China

壁后注浆是盾构施工中主动控制地层沉降的关键措施, 通过壁厚注浆可以使土压力均匀作用, 其对提高隧道抗渗性及管片衬砌的早期稳定具有十分重要的作用。化学和水泥注浆材料是国内外地铁施工中常用的壁后注浆材料, 化学注浆材料具有黏度低、流动性好、固化时体积收缩较小及固化产物耐久性良好等特点, 可用泵灌入裂缝来堵塞渗透水, 但其造价较高且具有一定的毒性, 施工操作有诸多不便<sup>[1]</sup>。水泥注浆材料则恰恰相反, 其具有强度高、造价低、溶液配制方便和易于施工等特点, 但水泥具有凝结时间较慢、收缩性较大、容易浮浆等缺点, 限制了水泥注浆材料的广泛应用<sup>[2]</sup>。目前, 传统的壁后注浆材料及方法存在的问题有水下抗分散性能较差、凝结时间超过 24 h、胶材流失较大、饱满度和结石率较差、二次注浆成本高且不利于环保。由于这些问题, 传统的壁后注浆材料及技术已不能满足城市轨道交通的施工要求, 探索新型壁后注浆材料和技术成为了交通施工部门急需解决的技术难题。泡沫注浆材料凭借其轻质、流动性好、耐火性强和绿色环保等优点被广泛应用于国内外的各个领域<sup>[3-5]</sup>, 其中发泡剂的性能优劣是影响注浆材料物理与力学性能及微观结构的重要因素。

注浆材料发泡剂的发泡能力、起泡与稳泡性能等直接影响到新拌浆体的流动性和稳定性, 还决定了注浆材料的物理与力学性能、气孔结构和沉降变形等, 评价指标选用 1 h 沉降距和 1 h 泌水量<sup>[6-7]</sup>。有研究

<sup>\*</sup> 江苏省青年基金项目(BK20200429); 陕西省科技基金项目(2023-JC-YB-375); 山西省技术创新中心项目(202104010); 中国博士后科学基金面上资助项目(2022M711608); 中铁四局基金项目(KFA22040); 华设有限公司基金项目(KFB21498)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

表明,发泡剂的成分对泡沫注浆材料的性能影响较大<sup>[8-9]</sup>。文献[10]研究了泡沫混凝土孔隙率对渗透性的影响,发现泡沫混凝土孔隙率与其干密度成反比、与吸水率成正比,掺粉煤灰会造成泡沫吸附,进而使吸水率变大。文献[11]研究了蛋白复合类发泡剂对泡沫注浆材料性能的影响,发现泡沫注浆材料的力学性能受不同种类发泡剂的影响较小,但其受热工性能和吸附性能的影响较大。文献[12]以碳酸氢钾和稀盐酸为发泡组分,研究了聚乙烯醇和十二醇等稳泡物质对发泡剂发泡性能的影响,在一定程度上改善了发泡剂的性能。文献[13]通过对比研究,分析了3种阴离子表面活性剂的发泡倍数和稳定性能,研究了发泡剂对注浆材料结构与性能的影响。

目前,国内对隧道壁后注浆材料专用发泡剂的研究不多,而对不同地质环境下,地铁隧道工程壁后注浆料适用的发泡剂研究更是鲜见报道。城市地下空间环境复杂、空气湿度大,且经受地下水和上部雨水等侵蚀,要求壁后注浆材料具有较好的填充性和优良的耐久性。本文通过优化发泡剂的配比设计,研制了适用于城市轨道交通地下空间的壁后注浆材料新型发泡剂,并分析了发泡剂对注浆材料泡沫性能和结构的影响。本文研究可为所提新型发泡剂日后应用于隧道壁后注浆材料提供理论依据。

## 1 试验原材料及方法

### 1.1 试验原材料及制备

将牛蹄角作为主要原料,在碱性环境下水解一定时间,以此制备与水互溶的母液;为提高母液的发泡能力和泡沫稳定性,在母液里加入适量不同品种和质量的化学试剂,以改善母液性能。所用化学试剂的功能与物理性质如表1所示。注浆材料发泡

表 1 所用化学试剂的功能与物理性质  
Tab. 1 Functional and mechanical properties of the applied chemical admixtures

试剂名称	功能	物理性质
SDS	起泡	针状粉末,呈白色,溶于热水
SDBS	起泡	粉末状,呈白色,溶于热水
C12	稳泡	白色状固体,不溶于水,溶于乙醇乙醚
MJ	稳泡	淡黄色颗粒,溶于热水
CMC	稳泡	白色粉末,溶于水
CS	稳泡	淡黄色粉末,溶于水
SA	稳泡	黏稠状液体,溶于水
YC	溶解	无水乙醇,易挥发

注:SDS为十二烷基硫酸钠;SDBS为十二烷基苯磺酸钠;CMC为羧甲基纤维素钠;C12为苯扎氯铵;MJ为分端改性聚醚;CS为硬脂酰乳酸钙;SA为仲烷基磺酸钠;YC为无水乙醇。

剂的制备过程为:先按一定比例称取适量化学试剂,然后用适宜温度的热水溶解并掺到母液中,接着按一定倍数将母液稀释制备成注浆材料专用的发泡剂,最后利用高压发泡机将发泡剂打出泡沫。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 注浆材料发泡剂性能测定

采取机械搅拌方法进行发泡倍数、1 h 沉降距和 1 h 泌水量三项性能测试,参考 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》进行测定,同时观察泡沫形貌。采用质量为  $m_1$  的 5 L 容器,将发泡剂所制备的泡沫装到容器中并测定容器和泡沫总质量  $m_2$ ,发泡倍数  $M$  可以表示为:

$$M = \frac{V}{(m_2 - m_1) / \rho} \tag{1}$$

式中:

- $V$ ——容器容积;
- $\rho$ ——发泡剂水溶液密度。

采用沉降距测定仪确定 1 h 沉降距,先将浮标轻放在泡沫上,开始计时并测定 1 h 泡沫沉降距。采用测定仪测定 1 h 泡沫泌水量,根据量管上的刻度测定 1 h 所分泌出的水量。

#### 1.2.2 注浆材料抗压强度与微观结构试验

参照 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》进行泡沫混凝土抗压强度成型及测定,按设计好的配比称取各种原料,加入拌合机中搅拌均匀,同时将发泡剂制备泡沫掺入搅拌并倒入模具,24 h 后拆模并将试块放置于标准养护箱中养护至不同龄期,取 3 个试件作为一组,计算其平均值。

微观结构试验采用 CT(计算机层析成像)技术。将测试试件完整放置于 CT 扫描仪器上进行微观结构分析,设置适宜的扫描断面间隔,并确定正立面方位。将得到的断面图进行灰度处理并组成三维图,计算其孔隙率和平均孔径。

## 2 注浆材料发泡剂的制备及其性能

### 2.1 发泡剂母液制备注浆材料

选用具有代表性的稀释倍数范围(30~45 倍),研究在不同稀释倍数下的发泡剂性能变化。选用不同稀释倍数下的母液发泡倍数、1 h 沉降距和 1 h 泌水量作为评价指标,基于对比分析确定泡沫性能适宜的稀释倍数,分析注浆材料专用发泡剂的起泡和稳泡能力。选用纯度为 98% 的动物蛋白母液,不同稀释倍数下的母液发泡性能、1 h 沉降距和 1 h 泌

水量如图 1 所示。

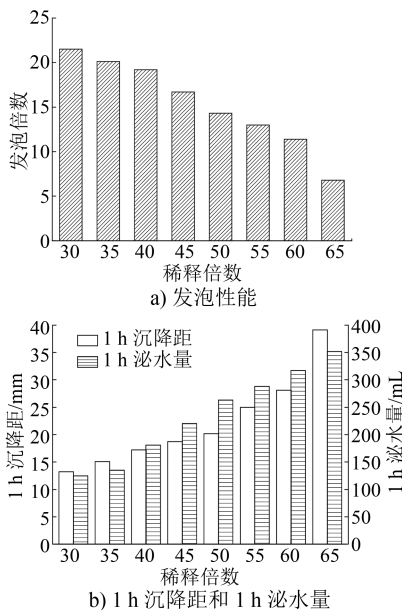


图 1 母液稀释倍数对母液泡沫性能的影响

Fig. 1 Influence of mother liquor dilution ratio on its foam performance

由图 1 a) 可知:发泡剂的发泡倍数随着母液稀释倍数的增加呈下降趋势;当稀释倍数为 30 时,发泡剂的发泡倍数为 21.5;当稀释倍数为 35、40、45、50 和 55 时,其发泡倍数较稀释 30 倍时的发泡倍数分别下降了 6.5%、10.7%、22.3%、33.5% 和 39.5%。由此可见,当稀释倍数超过 40 后,发泡剂发泡倍数下降趋势明显。由图 1 b) 可知:母液泡沫的 1 h 沉降距和 1 h 泌水量均随着母液稀释倍数的增加而增加;稀释倍数从 35 增至 50 的过程中,1 h 沉降距较稀释 30 倍时的 1 h 沉降量分别增加了 14.4%、30.0%、41.7% 和 53.0%;1 h 泌水量较稀释 30 倍时的 1 h 泌水量分别增加了 8.0%、44.8%、76.0% 和 110.4%。本文选取母液稀释倍数为 40 进行发泡和稳泡性能研究。

## 2.2 发泡剂的发泡及稳泡性能

以 SDS 和 SDBS 两种阴离子表面活性剂作为发泡剂,取一定量的制备溶液分别用一定掺量的 SDS 和 SDBS 对母液进行改性,选用发泡剂的发泡倍数、1 h 沉降距和 1 h 泌水量作为评价指标,在母液稀释倍数为 40 的条件下,分析不同发泡剂对注浆材料发泡剂性能的影响。发泡剂掺量对发泡剂的发泡性能、1 h 沉降距和 1 h 泌水量的影响如图 2 所示。

由图 2 a) 可知:注浆材料发泡剂的发泡性能随

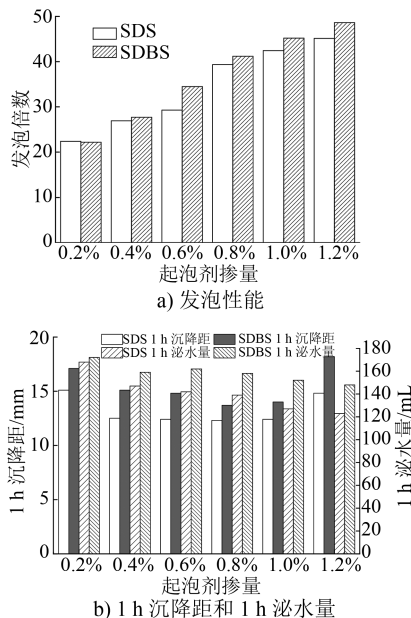


图 2 起泡剂掺量对发泡剂泡沫性能的影响

Fig. 2 Influence of foaming agent dosage on foam performance

着起泡剂掺量的增加而增加;当 SDS 起泡剂掺量为 0.2% 时,发泡倍数为 22.5;当 SDS 起泡剂掺量由 0.4% 增至 1.2% 的过程中,其发泡倍数较掺量为 0.2% 时的发泡倍数分别提高了 25.0%、20.0%、21.0%、10.0% 和 8.0%;当 SDBS 起泡剂掺量为 0.8% 时,发泡倍数为 22.4;当 SDBS 起泡剂掺量由 0.4% 增至 1.2% 的过程中,其发泡倍数较掺量为 0.2% 时的发泡倍数分别提高了 20.0%、7.4%、31.0%、10.5% 和 4.8%。发泡剂的发泡倍数前期增幅较大,后期增幅变缓。这是由于起泡剂作为阴离子表面活性剂使液膜变薄,降低了其表面张力,有利于发泡。表面活性剂只能在一定程度上降低表面张力,发泡倍数受到限制,当液膜厚度减小到一定程度时,发泡倍数达到最大值。

由图 2 b) 可知:发泡剂发泡后,其 1 h 泌水量随着起泡剂掺量的降低而降低,其 1 h 沉降距随着起泡剂掺量的增加先下降后逐渐上升;当起泡剂掺量为 0.2% 时,掺 SDS 起泡剂的发泡剂发泡后的 1 h 沉降距和 1 h 泌水量分别为 15.1 mm 和 168 mL,掺 SDBS 起泡剂的发泡剂发泡后的 1 h 沉降距和 1 h 泌水量分别为 17.1 mm 和 172 mL;当起泡剂掺量为 0.8% 时,掺 SDS 起泡剂的发泡剂发泡后的 1 h 沉降距和 1 h 泌水量较表面活性剂掺量为 0.2% 时分别下降了 18.5% 和 17.2%;掺 SDBS 起泡剂的发泡剂发泡后的 1 h 沉降距和 1 h 泌水量较表面活性剂掺

量为0.2%时分别下降了19.9%和8.1%。由于起泡剂掺量为0.8%时泡沫的1 h 沉降距和1 h 泌水量较小,所以选取起泡剂掺量为0.8%进行研究。

综上所述,当掺量为0.8%时,相较于SDBS 起泡剂,掺 SDS 起泡剂的发泡剂发泡倍数增加了5.0%,1 h 沉降距和1 h 泌水量下降了10.0%和12.0%。因此,选择起泡剂 SDS 作为母液发泡剂,掺量取为0.8%,将其记为B 溶液研究其稳泡性能。

选取 MJ、SA、C12、CS 和 CMC 这5 种稳泡剂,MJ、SA 和 C12 的适宜掺量为0.1%、0.2%和0.3%,CS 和 CMC 的适宜掺量为0.01%、0.02%和0.03%,加入掺0.8%SDS 起泡剂且稀释倍数为40 的母液中,选择泡沫的发泡倍数、1 h 沉降距和1 h 泌水量作为评价指标,研究不同种类和掺量的稳泡剂对泡沫性能的影响。不同稳泡剂对稳泡剂泡沫的发泡性能、1 h 沉降距和1 h 泌水量的影响如图3 所示。

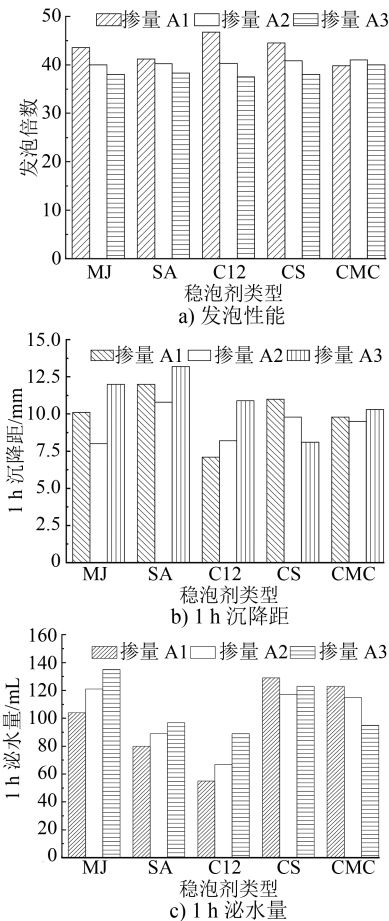


图3 不同稳泡剂及其掺量对稳泡剂泡沫性能的影响

Fig. 3 Influence of different foam stabilizers and dosages on its foam performance

由图3 a)可知,C12 稳泡剂的发泡倍数最大,掺

0.1%C12 稳泡剂的发泡剂发泡倍数最高,为46.7 倍,较其他同掺量的稳泡剂分别提高了7.0%、13.3%、4.9%和17.3%,发泡效果最好。由图3 b)和图3 c)可知:当C12 稳泡剂的掺量为0.1%时,稳泡剂泡沫的1 h 沉降距和1 h 泌水量分别为7.1 mm 和55 mL;C12 稳泡剂的1 h 沉降距较其他稳泡剂在同掺量下分别降低了42.3%、69.0%、54.9%和38.0%;C12 稳泡剂的1 h 泌水量较其他稳泡剂在同掺量下分别降低了89.0%、45.4%、134.5%和123.6%。当稳泡剂 MJ、SA 和 C12 掺量为0.2%和0.3%、CS 和 CMC 掺量为0.02%和0.03%时,各稳泡剂的差异性较小。综上所述,同掺量下,C12 稳泡剂对泡沫性能的改善效果最明显,掺量为0.1%的C12 稳泡剂显著改善了泡沫性能,特别是对1 h 泌水量的改善表现尤为突出。这是由于C12 醇类分子赋予了液膜更高的黏性,其排液效果有所下降,所以选取C12 作为稳泡剂,研究稳泡剂对发泡剂泡沫性能的影响。

不同掺量的C12 稳泡剂对稳泡剂泡沫1 h 沉降距和1 h 泌水量的影响如图4 所示。由图4 可知:随着C12 稳泡剂掺量的增加,稳泡剂泡沫的1 h 沉降距和1 h 泌水量均呈现先减小后增大的趋势;掺0.15% C12 稳泡剂时的1 h 沉降距最小,较未掺C12 稳泡剂时的1 h 沉降距降低了49.2%;掺0.21% C12 稳泡剂时的泡沫1 h 沉降距较掺0.15% C12 稳泡剂时增加了49.2%;随着C12 掺量的增加,1 h 沉降距也有所增

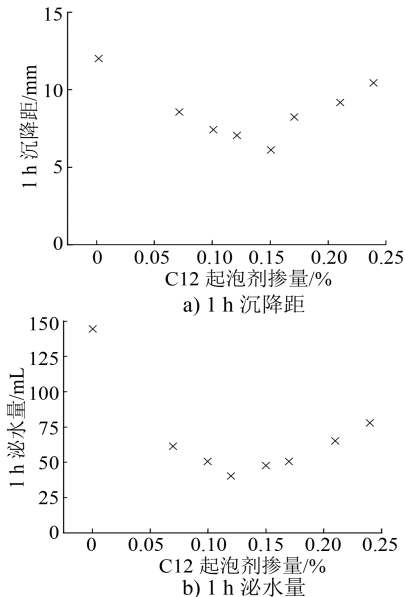


图4 不同C12 稳泡剂掺量对稳泡剂性能的影响

Fig. 4 Influence of different C12 foam stabilizer dosages on its foam performance



加;掺 0.12% C12 稳泡剂时,1 h 泌水量最低,为 41 mL,较未掺 C12 稳泡剂的发泡剂降低了 71.7%;随着 C12 掺量的增加,1 h 泌水量也出现了上升趋势,分别较掺 0.12% C12 稳泡剂时增加了 17.1%、24.3%、58.5% 和 90.2%。这是由于醇类分子会增加液膜的黏性,其流动阻力随着黏度的提高会有所增大,其自重排液和张力排液均受到了限制,从而增加了其稳泡性能。

### 2.3 发泡剂对注浆材料强度与微观结构影响

不同龄期下,4 种水胶比注浆材料(重度为  $600 \text{ kg/m}^3$ ) 的抗压强度如图 5 所示。由图 5 可知:随着水胶比的增大,注浆材料的抗压强度呈先增大后减小的趋势;当龄期为 7 d 时,4 种不同水胶比的抗压强度分别为 0.65 MPa、0.75 MPa、0.88 MPa 和 0.77 MPa;当龄期为 28 d 时,4 种不同水胶比的抗压强度分别为 0.76 MPa、0.89 MPa、0.98 MPa 和 0.85 MPa;4 种不同水胶比的 7 d 抗压强度约为其 28 d 抗压强度的 85%、84%、90% 和 91%。随着水胶比的增大,浆体内的摩擦力、泡沫融合所面临的阻力及基体孔隙率均有所减少,抗压强度有所增大。水胶比的进一步增大导致了孔隙半径变大,易导致注浆材料内部应力集中、抗压强度有所降低。同时,由于基体内存在大量的孔隙结构,其增加了水泥基与空气的接触面积,进而加快了水化反应并提升了注浆材料的早期强度,这有利于提高地下隧道的壁后注浆早期性能。

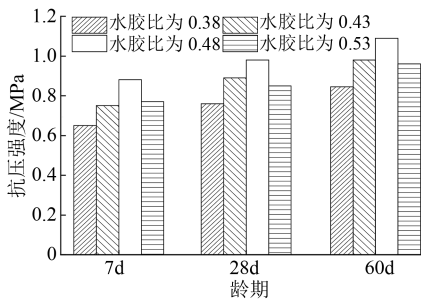


图 5 不同龄期下 4 种水胶比注浆材料的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of grouting materials with 4 water-binder ratios under different ages

不同水胶比下,注浆材料的形貌软件截图如图 6 所示。由图 6 可知,注浆材料孔隙随着水胶比的增大呈现出融合的趋势。由图 6 a) 可知,当水胶比为 0.43 时,注浆材料孔隙总体呈现均匀分布且孔径较均一,部分孔径较大但孔隙间的分隔界限清晰,无相互融合迹象。由图 6 b) 可知,当水胶比增大至 0.53 时,注浆材料内部泡沫量增多、黏度变大,部分

泡沫没有分开进而形成了连通孔,孔的结构大多为球状且孔径较大,孔隙间的分隔界限开始模糊,大孔出现融合趋势。在注浆材料内部结构中,较大的水胶比使大孔径泡沫有所增加,孔径均匀性变差、强度降低、沉降量增大。由图 6 c) 和图 6 d) 可知,当水胶比由 0.43 增长至 0.53 时,图中黑色阴影区域有较为明显的融合趋势。这是由于水胶比增大后,浆体黏聚力有所下降,导致部分孔隙间已无清晰的分隔界限。

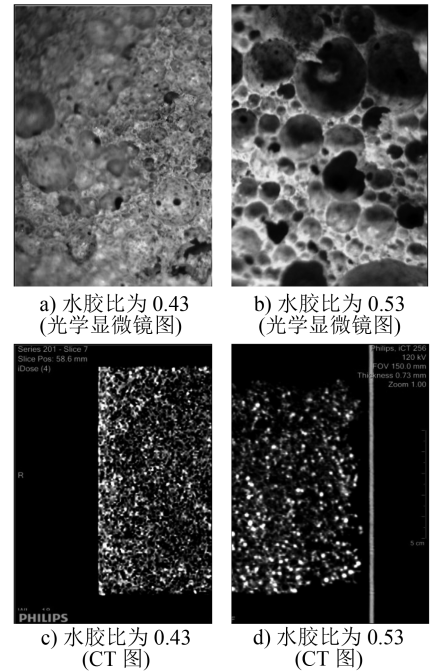


图 6 在不同水胶比下注浆材料的形貌软件截图

Fig. 6 Software screenshot of grouting materials morphologies with different water-binder ratios

### 3 结论

1) 以改性动物蛋白稀释液作为母液,研究不同稀释倍数对泡沫性能的影响,综合考虑泡沫性能和经济性,母液稀释倍数选为 40。

2) 从起泡和稳泡能力两方面来看,选取 SDS 作为起泡剂、C12 作为稳泡剂效果最好,其最佳掺量分别为 0.8% SDS 起泡剂和 0.15% C12 稳泡剂。

3) C12 醇类分子会增加液膜黏性,降低自重排液及张力排液效果,对降低泡沫泌水量改善效果较明显,减少泌水量和沉降量可提高泡沫稳定性。

4) 适宜水胶比下的注浆材料内部孔隙分布均匀且孔隙间无相互融通迹象,水胶比增大后,浆体黏聚力有所下降,导致大孔相互融合、孔径均匀性

变差、抗压强度有所降低且稳定性能变差。

## 参考文献

- [1] 蒋硕忠. 建筑防水材料的重要成员: 化学灌浆材料[J]. 中国建筑防水, 2005, 22(6): 7.  
JIANG Shuozhong. One of building waterproof materials—chemical grouting materials[J]. China Building Waterproofing, 2005(6): 7.
- [2] 尹润平, 朱玉雪. 中国建材总院科技在行动: 低粘注浆材料在混凝土中的应用[J]. 中国建材, 2018, 67(6): 120.  
YIN Runping, ZHU Yuxue. Applications of low-viscous grouting material in concrete[J]. China Building Materials, 2018, 67(6): 120.
- [3] 宋强, 张鹏, 鲍玖文, 等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 398.  
SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Research progress and application of foam concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2): 398.
- [4] WANG R, GAO P, TIAN M, et al. Experimental study on mechanical and waterproof performance of lightweight foamed concrete mixed with crumb rubber[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 655.
- [5] 石丹丹, 张怡博. 泡沫混凝土特性及其应用现状[J]. 居舍, 2020(35): 25.  
SHI Dandan, ZHANG Yibo. Characteristics and application status of foamed concrete[J]. Jushe, 2020(35): 25.
- [6] 刘继胜. 憎水剂改性低密度泡沫混凝土及其物理力学性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(4): 154.  
LIU Jisheng. Study of water repellent modified low-density foamed concrete and its physical mechanical properties[J]. New Building Materials, 2020, 47(4): 154.
- [7] ZHU H, CHEN L, XU J, et al. Experimental study on per-

formance improvement of anionic surfactant foaming agent by xanthan gum[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116993.

- [8] 张磊, 张静, 张颖, 等. 生物基发泡剂泡沫特征及其对泡沫混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 589.  
ZHANG Lei, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Foam characteristics of biological based foaming agent and its effect on properties of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 589.
- [9] 何娟, 高愷, 宋学锋, 等. 发泡剂的发泡性能及其应用于碱矿渣水泥的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(9): 2995.  
HE Juan, GAO Qie, SONG Xuefeng, et al. Study on the foaming property of foaming agent and its application to the mechanical properties of alkali-activated slag cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2995.
- [10] NAMBIAR E K K, RAMAMURTHY K. Influence of filler type on the properties of foam concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(5): 475.
- [11] KORAT L, DUCMAN V. The influence of the stabilizing agent SDS on porosity development in alkali-activated fly-ash based foams[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 80: 168.
- [12] 佟建楠, 张素敏. 新型泡沫混凝土发泡剂的制备与研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(9): 140.  
TONG Jiannan, ZHANG Sumin. Preparation and research of a novel foamed concrete foaming agent[J]. New Building Materials, 2018, 45(9): 140.
- [13] ZHAO J, DENG Y, GAO P, et al. Pore structure, morphology, and strength of self-compacting foam material backfilled behind the underground pipe-wall of Yellow River[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(24): 5724.

(收稿日期: 2020-12-03)

(上接第 69 页)

当所增加的隔离桩桩长超过 1 m 后, 施作隔离桩对高铁承台的减振效果不明显。

4) 在行车最不利情况(1 号线和 2 号线 4 条隧道同时有列车通过)下, 由地铁列车运行引起的承台竖向位移最大值为 0.074 mm, 竖向振动加速度最大值为 0.278 m/s<sup>2</sup>。

## 参考文献

- [1] 李雪, 周顺华, 王培鑫, 等. 隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 235.  
LI Xue, ZHOU Shunhua, WANG Peixin, et al. Analysis of impact of isolation piles and shield tunnelling on adjacent high-speed railway pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 235.

- [2] 吴颖宁. 盾构隧道近距离下穿城市立交桥施工安全性分析[J]. 铁道建筑技术, 2020(12): 124.  
WU Yingning. Analysis on the construction safety of shield tunnel crossing underneath urban overpass with short distance[J]. Railway Construction Technology, 2020(12): 124.
- [3] 郭波. 盾构隧道下穿高速铁路桥梁施工影响数值分析[J]. 铁道建筑技术, 2019(7): 105.  
GUO Bo. Numerical analysis on impact of shield tunnel undercrossing high-speed rail bridge[J]. Railway Construction Technology, 2019(7): 105.
- [4] SHAN Y, CHENG G H, GU X Q, et al. Optimization of design parameters of displacement isolation piles constructed between a high-speed railway bridge and a double-line metro tunnel: from the view point of vibration isolation effect[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 140: 104460.

(收稿日期: 2021-12-06)