

# 高性能轻质注浆材料制备与微观结构分析

高培伟<sup>1</sup>, 仲建军<sup>1</sup>, 邓岩松<sup>2</sup>, 徐小凤<sup>1</sup>, 李妹昱<sup>3</sup>, 张俊<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学土木系, 江苏南京 210016; 2. 江西昌铜高速公路有限责任公司, 江西南昌 330025;  
3. 水利部堤防与病害防治工程技术研究中心, 河南郑州 450003)

**摘要:**隧道工程长期处于潮湿环境,对壁后注浆材料要求较高。针对隧道工程的特点,采用阴离子表面活性剂改性动物蛋白母液,通过添加醇类稳泡剂,制备新型发泡剂;通过掺入不同极性大分子物质的方式逐步提升母液的起泡及稳泡能力,最终确定最佳配比。研究表明,掺适宜的发泡剂和稳泡剂,可提高泡沫的强度、韧性和黏度,减少沉降和泌水;当起泡组分为0.8%,稳泡组分为0.15%时,发泡剂起泡和稳泡性能最好,所制备的注浆材料结构和性能优良;通过微观结构分析发现水胶比从0.40增大到0.48,泡沫量多,易产生连通孔,孔径均匀性变差,沉降增加。

**关键词:**隧道工程;注浆材料;试验研究;发泡剂;形貌

**中图分类号:** U25; TU528.2

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 高培伟, 仲建军, 邓岩松, 等. 高性能轻质注浆材料制备与微观结构分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 29-35.

## Preparation and Microstructure Analysis of High Performance Lightweight Grouting Materials

Gao Peiwei<sup>1</sup>, Zhong Jianjun<sup>1</sup>, Deng Yansong<sup>2</sup>, Xu Xiaofeng<sup>1</sup>, Li Meiyu<sup>3</sup>, Zhang Jun<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Jiangxi Changtong Highway Co., Ltd., Nanchang 330025, China;  
3. The Research Center on Levee Safety Disaster Prevention MWR, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The subway tunnel project is usually in a long-term humid environment, which requires high grouting material behind the wall. It should not only undergo the erosion of mud water, but also have good fluidity and fillability. According to the characteristics of subway engineering, a new type of foaming agent was prepared by using anionic surfactant to modify the mother liquor of animal protein and adding alcohol to stabilize the foaming agent. The foaming ability and bubble stabilization ability of mother liquor were improved successively by being mixed with different polar macromolecular substance. The results show that the appropriate foaming agent and foaming stabilizer can improve the strength, toughness and viscosity of the foam, and reduce the sedimentation and bleeding. When the foaming group is 0.8% and the foaming group is 0.15%, the foaming agent and foaming stabilizer have the best foaming and foaming stabilizer performance, and the prepared grouting material has excellent structure and performance. Micro-structure analysis found that when the water binder ratio increased from 0.40 to 0.48, the amount of foam is large and connected pores are easily generated, which makes the uniformity of the pore size deteriorate and the settlement increases.

**Key words:** tunnel project; grouting material; experimental study; foaming agent; morphology

**Citation format:** GAO P W, ZHONG J J, DENG Y S, et al. Preparation and microstructure analysis of high performance lightweight grouting materials[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 29-35.

**收稿日期:** 2020-12-04

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51908285);水利部堤防与病害防治工程技术研究中心项目(2019004);江西省科技厅项目(2020H0047);南京航空航天大学创新基金项目(2019CX00715);中国博士后基金项目(2020M671485, 2020Z321)

**作者简介:** 高培伟(1963—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为土木工程材料结构与性能。E-mail: gpw1963@163.com。

盾构施工技术在我国地下轨道工程中的应用越来越广泛,已经成为地下工程施工的主要方法,壁后注浆是盾构施工关键工序之一,对于控制地层位移,减少对周边地下结构物的扰动和维持盾构隧道的稳定性十分重要<sup>[1-2]</sup>。我国在地铁施工中常用水泥和化学注浆材料,化学注浆材料具有黏度低、流动性好的特点,可注入到细微缝隙中,但造价高且有一定毒性,应用和施工不太方便;水泥注浆材料具有强度高、来源广泛、造价低、配制和施工方便等特点,但沉降量大,有时达 20 cm,需二次注浆<sup>[3]</sup>。管片同步注浆料在管片与围岩间存在流动水,水下抗分散能力差;胶缩减材流失量大,饱满度差;凝结时间超过 24 h,结石率低;二次注浆量大、成本高、环保不良等问题。传统的壁后注浆材料和方法已不能满足地铁工程对施工质量、进度和安全的严格要求,探求新颖的管片壁后同步注浆填充材料和技术,已成为地铁工程部门急需解决的技术难题。

近年来,轻质泡沫注浆材料以其轻质、保温、气孔均匀和绿色环保等特点在多个领域得到了广泛研究和应用<sup>[4-5]</sup>。其中,发泡剂是制备和决定泡沫注浆材料力学性能与微观结构的关键因素。泡沫注浆材料发泡剂直接影响新拌浆体的流动性和稳定性,还决定注浆材料物理与力学性能、气孔结构、沉降变形和塌陷等,其质量优劣评价标准主要是起泡及稳泡性能等指标<sup>[6-7]</sup>。国内外研究表明,发泡剂的组成对泡沫注浆材料的性能影响较大<sup>[8-11]</sup>,Korat L<sup>[12-13]</sup>研究了蛋白复合类发泡剂对泡沫注浆材料性能的影响,发现不同品种发泡剂对泡沫注浆材料力学性能影响较小,对其热工和吸附性能影响较大;闫秋会等<sup>[14-15]</sup>通过将十二烷基硫酸钠(SDS)、 $\alpha$ -烯基磺酸钠(AOS)和动物蛋白(APFA)3种发泡剂进行复掺来提高发泡剂性能;He Juan<sup>[16]</sup>对比  $\alpha$ -烯基磺酸盐(AOS)、十二烷基硫酸钠(K12)和乙醇醚硫酸钠(AES)3种发泡剂对注浆材料泡沫稳定性的影响,结果表明 AOS、K12 和 AES 共 3 种发泡剂的泡沫稳泡性能略有差异,AOS 的泡沫稳定性最好。

目前国内对地铁管片壁后注浆材料研究和应用较少,针对不同地质环境下地铁工程中注浆材料更是鲜见报道,地铁工程所处环境比较复杂,加上长期处于潮湿环境,经受泥水冲蚀作用,对壁后注

浆材料要求更高,应具有较好的填充性;通过优化设计和改性,研制了适用于地铁壁后注浆新型发泡剂,并研究了发泡剂对注浆材料发泡、稳泡方面能力,为广泛应用于地铁管片壁后回填等领域提供理论依据和应用参考。

## 1 试验原材料和方法

### 1.1 试验主要原材料

母液:以牛蹄角为原料,在碱性条件下水解一定时间后制备出深褐色牛蹄角蛋白,能与水任意比例互溶;化学外加剂:为了提高溶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外加剂(见表 1),改善母液性能,以满足工程需要。

表 1 化学试剂  
Tab.1 Chemical admixtures

试剂	功能	性质(外观,可溶性)
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

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 注浆材料发泡剂制备

按一定比例称取适量化学试剂,用适宜温度热水溶解,掺到母液中,按规定的稀释倍数将母液稀释,制备成注浆材料专用的发泡剂,利用高压发泡机将发泡剂打出泡沫。

#### 1.2.2 注浆材料发泡剂性能测定

采取机械搅拌方法进行泡沫性能测试,主要包括发泡倍数、1 h 沉降距和 1 h 泌水量 3 项性能指标,测定方法参考《泡沫混凝土》(JG/T266-2011)进行,并观察泡沫形貌。

1) 发泡倍数:准备 5 L 容器,测定其质量  $G_1$ ,将利用发泡剂制备的泡沫在 30 s 内装入容器中,测定质量  $G_2$ ,代入公式

$$M = \frac{V}{(G_2 - G_1) \rho}$$

式中: $M$  为发泡倍数; $V$  为容器容积,  $\text{mm}^3$ ;  $G_1$  为容器

质量,  $g$ ;  $G_2$  为容器和泡沫质量,  $g$ ;  $\rho$  为发泡剂水溶液密度,  $g/mm^3$ 。

2) 1 h 沉降距: 将制备好的泡沫在 30 s 内装入沉降距测定仪的容器中, 将浮标轻轻放在泡沫上, 开始计时, 测定 1 h 泡沫的沉降距,  $mm$ 。

3) 1 h 泌水量: 利用泡沫质量测定仪测定泡沫泌水量, 根据量管上刻度, 测定 1 h 由破裂泡沫所分泌出的水量,  $mL$ 。

### 1.2.3 注浆材料制备及微观结构分析

在注浆材料的制备过程中, 泡沫掺量是决定其密度等级的核心因素, 通过优化设计, 将泡沫掺量初步定在胶凝材料质量分数的 3% 进行试配, 通过调配水胶比, 制备了 600 级泡沫注浆材料, 其中注浆材料主要成分为水泥、砂、粉煤灰、原料土、外加剂和泡沫剂。

1) X 射线衍射分析: 在样品达到相应龄期后用无水乙醇浸泡 3 d, 研磨后进行筛分、干燥 1 d, 采用 Bruker-Axs D8 DISCOVER 型仪器进行测试, 扫描速度为 0.30 s/step, 角度为  $5^\circ \sim 80^\circ$ , 步长为 0.02。

2) CT 法测孔隙率: 将试件置于 CT 扫描仪器上, 设置扫描断面间隔后确定正立面方位, 将得到的断面图使用图像处理方法进行三维结构重建, 观察和分析孔结构。

## 2 高性能发泡剂起泡与稳泡性能研究

### 2.1 高性能发泡剂母液稀释倍数研究

选取纯度为 98% 的动物蛋白作为原始母液, 根据课题组前期研究, 选取具有代表性的稀释倍数对母液进行稀释和发泡, 研究稀释倍数对发泡剂性能的影响, 得到不同稀释倍数下的发泡倍数、1 h 沉降距和 1 h 泌水量, 通过数据对比分析, 确定泡沫性能最优时的适宜稀释倍数, 探究注浆材料专用发泡剂的起泡和稳泡能力, 见表 2 和图 1。

表 2 稀释倍数对母液发泡倍数的影响

Tab.2 Influence of dilution factor on mother liquor foaming factor

稀释倍数	发泡倍数	稀释倍数	发泡倍数
30	21.5	50	14.3
35	20.1	55	13.0
40	19.2	60	11.4
45	16.7	65	6.8

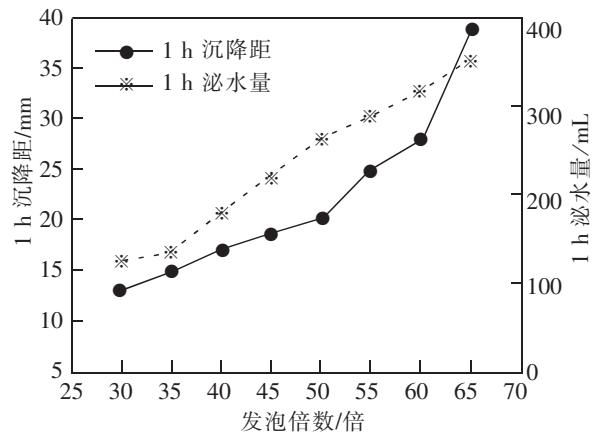


图 1 稀释倍数对母液 1 h 沉降距和泌水量影响  
Fig.1 Effect of dilution factor on the settling distance and bleeding volume of mother liquor at 1 h

从表 2 可见, 随母液稀释倍数增加, 发泡剂的发泡倍数呈下降趋势。当稀释倍数为 65 时, 发泡剂的发泡倍数较稀释 30 倍时下降了 68.4%; 当稀释 40 倍时, 发泡倍数较稀释 30 倍时下降了 10.7%; 当稀释 45 倍时, 发泡倍数较稀释 30 倍时下降了 22.3%, 由此可见, 当稀释倍数超过 40 倍后, 用于注浆材料的发泡剂发泡倍数下降的趋势越来越明显。

由图 1 可见, 随母液稀释倍数增加, 1 h 沉降量和泌水量呈增加趋势。稀释 35 倍较稀释 30 倍时, 1 h 沉降量和泌水量分别增加了 14.4% 和 8.0%; 稀释 40 倍较稀释 30 倍, 1 h 沉降量和泌水量分别增加了 30.0% 和 44.8%; 稀释 45 倍较稀释 30 倍时分别增加了 41.7% 和 76.0%; 稀释 50 倍较稀释 30 倍分别增加了 53.0% 和 110.4%。结合母液稀释倍数、起泡和稳泡性能和成本, 选用 40 倍的稀释倍数进行深入研究。

### 2.2 不同起泡剂对高性能发泡剂性能影响研究

选用 40 倍作为母液的标准稀释倍数, 并记为 A 溶液, 以 SDS 和 SDBS 两种阴离子作起泡剂, 取一定量 A 溶液, 分别用拟定的 0.2%~1.2% 掺量范围的 SDS 和 SDBS 对 A 液进行改性, 从发泡倍数、1 h 沉降距和 1 h 泌水量探究起泡剂品种和掺量对高性能发泡剂性能的影响, 试验结果见图 2 和图 3。

由图 2 可见, 高性能发泡剂发泡倍数与起泡剂掺量呈正相关, SDBS 起泡剂掺量为 0.2% 时, 发泡倍数为 22.4, 随 SDBS 掺量逐步提高, 发泡倍数依次增加了 20%, 7.4%, 31%, 10.52% 和 4.76%, 对比不同掺量活性剂对发泡倍数影响程度, 前期增幅较大, 掺量为 0.8% 后增幅变缓。SDS 起泡剂掺量为 0.2%



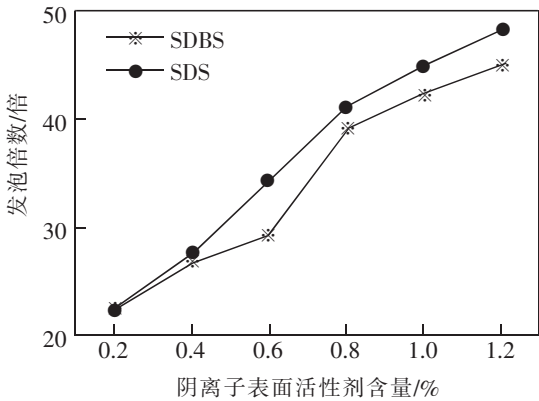


图2 阴离子表面活性剂掺量对发泡倍数的影响

Fig.2 Effect of anionic surfactant content on foaming ratio

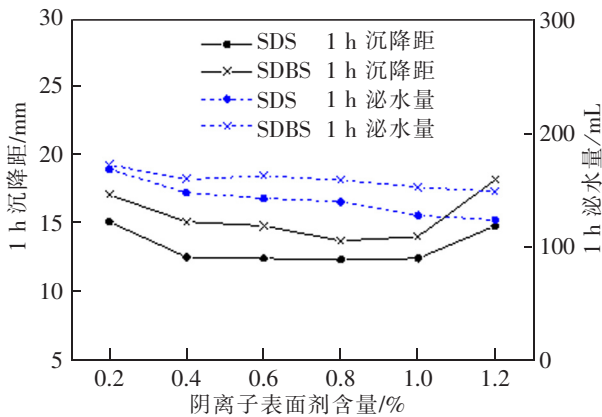


图3 阴离子表面活性剂对1 h沉降距和泌水量影响

Fig.3 Effect of anionic surfactant on settling distance and bleeding volume at 1 h

时,发泡倍数为 22.5,随 SDS 掺量逐步提高,发泡倍数依次增加了 25%,20%,21%,10%和 7.95%,与掺 SDBS 结果类似,掺量 0.8%后,发泡倍数增加幅度开始逐渐减缓。这是因为阴离子表面活性剂在降低表面张力同时,削减了液膜厚度,有利于发泡;由于表面活性剂仅能降低而不能消除表面张力,致使发泡倍数不能无限增大,当液膜厚度趋向法向承载力极限时,发泡倍数达到极限。考虑到发泡倍数和经济等方面因素,选取阴离子表面活性剂掺量为 0.8%比较适宜。

由图 3 可见,SDS 掺量不同,发泡剂发泡后 1 h 泌水量和 1 h 沉降量变化趋势不同,1 h 泌水量随掺量增加逐渐降低;而 1 h 沉降量随 SDS 掺量增加先下降,掺到 1%后逐渐上升。当 SDS 掺量为 0.8%,1 h 沉降量较掺 0.2%时下降了 18.5%,泌水量下降了 17.2%。当 SDBS 掺量为 0.8%时,1 h 沉降距较掺量为 0.2%下降了 19.9%,泌水量下降了 8.1%。由图可见,当掺量为 0.8%,1 h 沉降距和泌水量较小,故

选取阴离子表面活性剂掺量为 0.8%进行下一步研究。

由图 2 和图 3 可见,在 0.8%掺量下 SDS 和 SDBS 发泡性能,SDS 发泡倍数比 SDBS 增加了 5%,1 h 沉降距和 1 h 泌水量下降了 10%和 12%,掺 0.8%SDS 的母液发泡剂的起泡能力较好,将此溶液记为 B 溶液,并在此基础上探究其稳泡性能。

2.3 不同稳泡剂对高性能发泡剂性能影响研究

依据课题组前期大量研究,选取 MJ,SA,C12,CS 和 CMC 共 5 种稳泡剂和 3 个适宜掺量 A1,A2 和 A3 分别加入 B 溶液中,研究其发泡倍数、1 h 沉降距和泌水量,探究不同稳泡剂及其最佳掺量对稳泡性能的影响,试验结果见表 3 和图 4。

由表 3 可见,使用 MJ,SA,C12,CS 和 CMC 共 5 种稳泡剂,在 3 种掺量下,掺 C12 稳泡剂发泡倍数最大,在 C12 的掺量为 A1 时,发泡倍数最高,达 46.7 倍,同其它同掺量的稳泡剂相比,分别高出 7%,13.3%,4.9%和 17.3%。

由图 4 中 1 h 沉降距可见,C12 掺量为 A1 时,1 h 沉降距 7.1 mm 为最低,比其它稳泡剂分别低 42.3%,69.0%,54.9%和 38.0%。与前述类似,其它掺量下稳泡剂差异性较小。由图 4 中 1 h 泌水量结果可见,C12 掺量为 A1 时 1 h 泌水量最低,为 55 mL,分别低于其它稳泡剂 89.0%,45.4%,134.5%和 123.6%。由此可见,其它稳泡剂在同掺量下,对发泡剂改善效果没有 C12 明显,C12 在掺量为 A1 时,对发泡剂具有显著改善效果,对 1 h 泌水量改善尤为突出,这是因为 C12 醇类分子使液膜具有更高黏性,抑制了其排液效果,本研究选取 C12 作为稳泡剂,进一步探究 C12 稳泡剂不同掺量对发泡剂泡沫性能的影响。

表 3 不同稳泡剂及掺量对发泡倍数影响

Tab.3 Effect of different foam stabilizer and dosage on the foaming ratio

不同掺量的 稳泡剂	发泡倍数/倍		
	A1	A2	A3
MJ	43.5	40.0	38.0
SA	41.2	40.2	38.3
C12	46.7	40.3	37.5
CS	44.5	40.8	38.0
CMC	39.8	41.0	40.0

注: MJ,SA 和 C12 的 A1,A2 和 A3 级最佳掺量:0.1%,0.2%和 0.3%;CS,CMC 的 A1,A2 和 A3:0.01%,0.02%和 0.03%

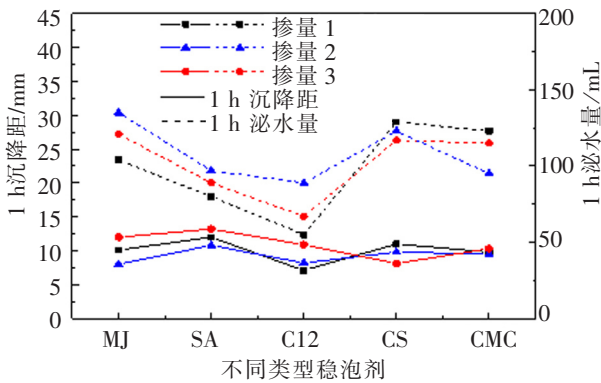


图 4 不同稳泡剂及掺量对 1 h 沉降距和泌水量影响  
Fig.4 Influence of different foam stabilizer and dosage on 1 h settling distance and bleeding volume

表 4 和图 5 是 C12 稳泡剂在不同掺量对发泡剂发泡倍数、1 h 沉降距和 1 h 泌水量影响示意。

表 4 C12 掺量对发泡倍数影响

Tab.4 Effect of C12 content on the foaming factor

C12 掺量/%	发泡倍数	C12 掺量/%	发泡倍数
0	41.0	0.15	48.3
0.07	43.8	0.17	44.1
0.10	46.1	0.21	39.8
0.12	47.2	0.24	38.9

由表 4 可见, 注浆材料发泡剂的发泡倍数随 C12 掺量增加呈先增后降趋势, 掺量为 0.15% 时, 发泡倍数最大, 约 48.3 倍; 比不掺 C12 稳泡剂, 其发泡倍数增加了 17.8%。随 C12 掺量逐渐增加, 发泡倍数呈下降趋势, 掺 0.21% 时发泡倍数为 39.8, 比掺量为 0.15% 时下降了 17.6%。C2 过量, 液膜厚度增加, 表面活性剂分子突破液面阻力增强, 发泡倍数降低。

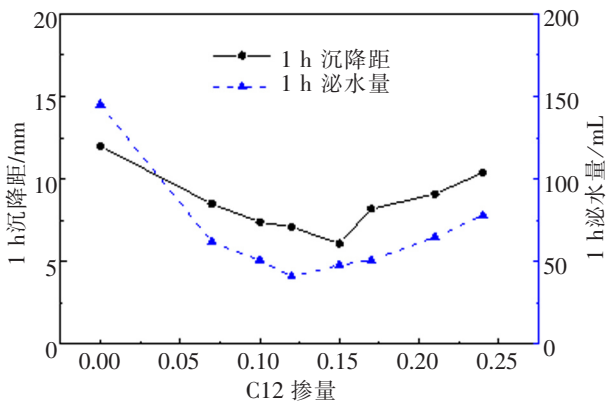


图 5 C12 掺量对 1 h 沉降距和 1 h 泌水量影响  
Fig.5 Effect of the content of C12 on 1 h settling distance and bleeding volume

由图 5 可见, 在泡沫稳定性方面, 1 h 沉降距及 1 h 泌水量均随 C12 掺量增加呈现先减小后增加的趋势。1 h 沉降距在掺量为 0.15% 最小, 比不掺 C12 稳泡剂降低了 49.2%; 当 C12 掺量为 0.21% 时, 沉降距比掺量为 0.15% 时增加了 49.2%, 随 C12 掺量进一步增加, 沉降距出现上升趋势。由图 5 还可见, 1 h 泌水量在 C12 稳泡剂掺 0.12% 时最小, 比不掺 C12 稳泡剂的发泡剂降低了 71.7%; 随 C12 掺量进一步增加, 泌水量出现上升趋势, 当 C12 掺量为 0.21%, 泌水量比掺量为 0.12% 时发泡剂增加了 58.5%。醇类分子可增加液膜黏度, 随黏度提高, 液膜流动阻力增大, 依靠自重排液和张液排液均受到限制, 泡沫稳定性增加, 进一步增加醇类分子掺量, 过高黏度使液膜的弹性减弱, 液膜抵抗变形能力减弱, 在切向力作用下, 液膜破裂增加, 稳泡性降低。

2.4 发泡剂对注浆材料孔结构作用机理研究

图 6 是采用光学显微镜观察到发泡剂发泡后的泡沫在不同时期形貌。由图 6 可见气泡孔径整体比较均匀、统一, 平均孔径约 0.05 mm, 小的液泡自动填充在大液泡中, 空隙较少; 曲率半径越大, 液泡内部压力也就越高, 相对较小的液泡就易破裂, 以液体形式排出, 不可避免地产生泌水并导致沉降距增加。由放置了 1 h 后泡沫形貌可见, 气泡分布比较清晰, 孔径更加均匀、统一, 没有看到大液泡破裂现象; 部分小液泡破裂后进入大液泡间隙, 使大的泡沫孔径有所增大, 但液泡厚度无明显降低, 说明发泡剂发出来液泡较稳定, 破裂的气泡较少。通过两图对比可知, 新型发泡剂所发的泡沫薄膜有较高强度、韧性、黏度, 这是因为使用稳泡剂增加了泡沫稳定性, 提高了注浆材料发泡剂性能。

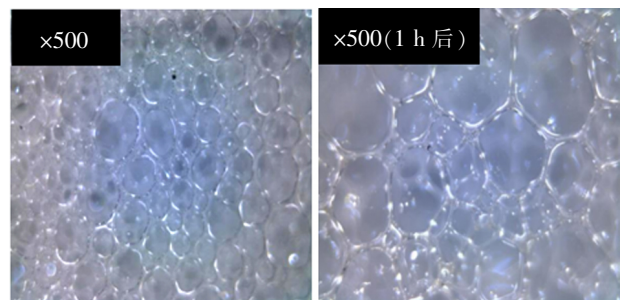


图 6 泡沫的微观形貌  
Fig.6 Morphology of foam in curing time

为进一步探讨发泡剂对注浆材料内部孔结构与性能的影响,通过 XRD 和 CT 扫描仪器对制备的 600 级泡沫注浆材料分析,研究其内部产物和孔结构及分布,见图 7 和图 8。

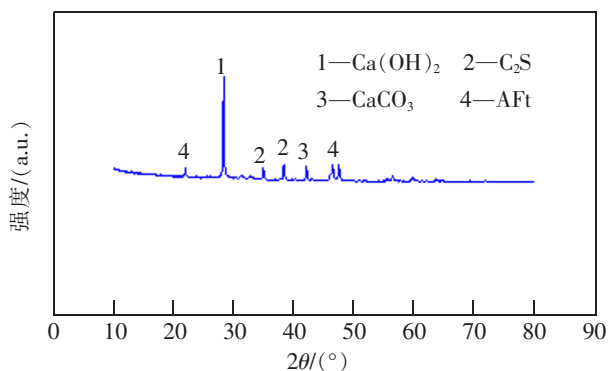


图 7 注浆材料基体 XRD

Fig.7 XRD pattern of grouting material matrix

图 7 为注浆材料基体的 XRD 图谱,由图 7 分析结果可得,在  $2\theta$  为  $10^\circ\sim 80^\circ$  时,注浆材料主要有 4 种物相的特征峰:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{CaCO}_3$  和 AFt。

图 8 是利用 CT 扫描测试在相同放大倍数下拍摄的注浆材料的内部孔结构,由图 8 可见,水胶比对相同密度的注浆材料孔结构有显著影响,而孔结构也决定了注浆材料的性能。当水胶比较小 ( $W/C=0.40$ ),注浆材料的孔结构开始变差(对比  $W/C=0.44$ ),原因是黏度较高造成泡壁周围受力不同,使部分气泡在拌合时发生变形;在 0.48 水胶比下,因泡沫量多黏度高,造成部分泡沫没有分开而形成了连通孔;当水胶比增大,孔结构大多为球状,但孔径也较大,尤其在 600 级注浆材料内部结构中,较大水胶比使大孔径泡沫的比例有所增加,造成孔径均匀性变差,强度降低,沉降增加。

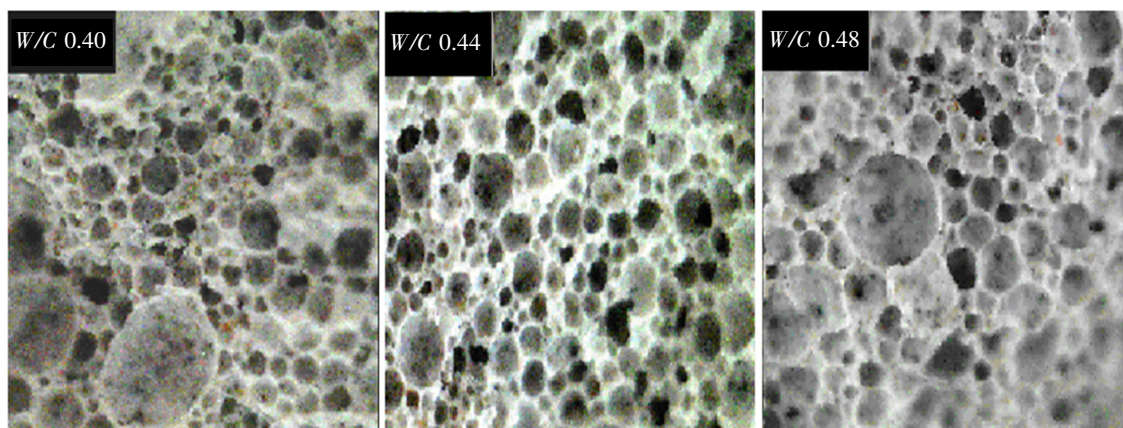


图 8 不同水胶比下的注浆材料孔结构

Fig. 8 Pore structure of grouting materials with different water-binder ratios

### 3 结论

1) 以牛蹄角蛋白稀释液作为母液,并选择作为蛋白液研制发泡剂,当母液稀释倍数超过 40 倍后,所研制的发泡剂发泡倍数下降趋势明显,在综合考虑泡沫性能和经济性的情况下稀释 40 倍较好。

2) 从起泡能力对母液稀释并进行改进和探究,掺 0.8% SDS 发泡倍数比掺 SDBS 增加了 5%,1 h 沉降距和 1 h 泌水量下降了 10% 和 12%,起泡能力较好,掺 0.8% SDS 为起泡组分。

3) 使用 5 种稳泡剂,在 3 种掺量下研究表明掺 C12 的稳泡剂发泡倍数最大,达到 46.7 倍,比其它同掺量的稳泡剂分别高出 7.0%, 13.3%, 4.9%。

17.3% 和 0.15%, 作为稳泡组分,可使泡沫性能达到最佳。

4) 使用适宜的发泡剂和稳泡剂可提高泡沫的强度、韧性和黏度,较小的液泡自动填充在大液泡中,空隙较少,减少沉降和泌水,提高泡沫质量,改善了注浆材料的孔结构和力学性能。

5) 通过微观结构分析发现水胶比从 0.40 增大到 0.48 时,泡沫量多,易产生连通孔,孔径均匀性变差,沉降增加。



## 参考文献:

- [1] 孙连勇,黄永亮,尹长风,等. 富水砂层浅埋地铁隧道深孔注浆扰动机理研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(1):184-193.
- [2] 雷贺彩. 越江隧道深切槽段上浮机理分析及控制研究[J]. 华东交通大学学报,2016,33(6):50-57.
- [3] 张骏,高培伟. 用于地下潮湿环境聚合物改性修补材料的粘结性能研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(4):210-215.
- [4] WANG R,GAO P W. Experimental study on mechanical and waterproof performance of lightweight foamed concrete mixed with crumb rubber[J]. Construction and Building Materials,2019,209(6):655-664.
- [5] ZHANG H Y,YANG J M,WU H J,et al. Dynamic thermal performance of ultra-light and thermal-insulative aerogel foamed concrete for building energy efficiency[J]. Solar Energy,2020,204(4):569-576.
- [6] ZHU H,CHEN L L,XU J. Experimental study on performance improvement of anionic surfactant foaming agent by xanthan gum[J]. Construction and Building Materials,2020,230:116993
- [7] 张文超,于方,薛炜. 临海软弱土注浆加固选材及工艺的试验研究[J]. 工程勘察,2019,47(2):15-20.
- [8] SUN Y F,GAO P W. Thermal conductivity and mechanical properties of porous concrete materials[J]. Material Letter,2017,209(8):349-352.
- [9] 郑晨,李博,吴基文. 粘土-水泥浆室内实验研究及其在煤层底板注浆改造中的应用[J]. 工程勘察,2014,42(3):5-10.
- [10] SUN C,ZHU Y. Effects of foaming agent type on the workability,drying shrinkage,frost resistance and pore distribution of foamed concrete[J]. Construction and Building Materials,2018,186(10):833-839.
- [11] 刘继强,许俊伟,董宗磊,等. 地铁隧道全断面注浆对地表隆起影响分析[J]. 现代隧道技术,2020,57(3):147-153.
- [12] 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(3):168-174.
- [13] 史星祥. 蛋白质型发泡剂的制备及其对泡沫混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2013(11):23-28.
- [14] 闫秋会,秦周浩,刘倩,等. 高性能混凝土发泡剂的制备方法研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(1):270-275.
- [15] 杨元龙,徐宇亮,于方. 拱北隧道灌浆加固中注浆材料室内试验研究[J]. 广州化学,2014,39(1):24-29.
- [16] HE J,GAO Q,SONG X F,et al. Effect of foaming agent on physical and mechanical properties of alkali-activated slag foamed concrete[J]. Construction and Building Materials,2019,226(7):280-287.