

# CMC-g-AA 对掺污泥泡沫混凝土 吸水保水性能的影响

陶艳<sup>1,2</sup>, 苏冰琴<sup>1,2,3\*</sup>, 张弛<sup>1,3</sup>, 刘一清<sup>1,2</sup>, 林昱廷<sup>4</sup>

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600;

2. 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 晋中 030600;

3. 山西省污泥处置与资源化技术研究中心, 山西 晋中 030600;

4. 太原科技大学环境与安全学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**探讨了羧甲基纤维素钠聚合物(CMC-g-AA)对掺污泥泡沫混凝土的抗压强度、抗折强度、干密度、吸水率、保水率的影响及作用机理。结果表明,掺污泥泡沫混凝土的抗压强度、抗折强度、吸水率随 CMC-g-AA 掺量的增加呈现先增大后减小的趋势;掺污泥泡沫混凝土的干密度随 CMC-g-AA 掺量的增加呈现先减小后增大的变化。XRD、FT-IR、SEM 分析表明,添加 CMC-g-AA 能通过改善水化反应进程、引入亲水性活性基团等促进掺污泥泡沫混凝土中水化矿物的结晶、毛细孔隙的形成、改善掺污泥泡沫混凝土的空间结构,进而改善其性能。

**关键词:**CMC-g-AA; 掺污泥泡沫混凝土; 抗压强度; 抗折强度; 干密度; 吸水率; 保水率

中图分类号:TU528.01; X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)S-0151-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.S.033

## Effect of CMC-g-AA on water absorption and retention of foam concrete mixed with sludge

TAO Yan<sup>1,2</sup>, SU Bing-qin<sup>1,2,3\*</sup>, ZHANG Chi<sup>1,3</sup>, LIU Yi-qing<sup>1,2</sup>, LIN Yu-ting<sup>4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. Shanxi Provincial Municipal Engineering Graduate Education Innovation Center, Jinzhong 030600, China;

3. Shanxi Provincial Research Center for Sludge Disposal and Recycling, Jinzhong 030600, China;

4. School of Environment and Security, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The effect and mechanism of carboxymethylcellulose sodium polymer (CMC-g-AA) on the compressive strength, flexural strength, dry density, water absorption rate, water retention rate of foam concrete mixed with sludge were discussed. The results show that the compressive strength, flexural strength, and water absorption of the sludge-mixed foam concrete increase with the increase of CMC-g-AA, and then show a tendency to increase first and then decrease; the dry density of the sludge-mixed foam concrete increases with the CMC. The increase in the amount of CMC-g-AA showed a decrease first and then an increase. XRD, FT-IR, SEM analysis shows that the addition of CMC-g-AA can promote the crystallization of hydrated minerals and the formation of capillary pores in the foamed concrete mixed with sludge by improving the progress of the hydration reaction and introducing hydrophilic active groups. Improve the spatial structure of foam concrete mixed with sludge, thereby improving its performance.

**Key words:** CMC-g-AA; foam concrete mixed with sludge; compressive strength; flexural strength; dry density; water absorption rate; water retention rate

随着经济社会的快速发展以及居民生活水平的提高,人们对城市生活质量、居住舒适度、居住环境的安全性提出了更高要求。然而大规模的城市建设也引发了热岛效应、水资源短缺、水环境污染、洪涝灾害频发、雾霾污染、生态环境质量下降等一系列环境问题<sup>[1-2]</sup>。海绵城市提出的雨洪管理理念,旨在通过对城市的地面和基层采用透水铺装,自然打通

地面上下水分的流通,能够有“弹性”地适应环境变化和应对自然灾害。下雨时,存储大量的雨水,减少城市洪涝灾害发生的频率;晴天时,蓄存的水分“释放”可供植物吸收利用,缓解热岛效应,形成良好的水资源循环利用系统<sup>[3-4]</sup>。而实现这一规划的关键是吸水性材料。

透水性泡沫混凝土是一种兼具吸水透水性和绿

收稿日期:2020-04-17;修回日期:2020-06-27

基金项目:山西省重点研发计划(社会发展领域)项目(201803D31039;201703D321005)

作者简介:陶艳(1992-),女,硕士生,研究方向为污泥资源化处置和利用,1252237815@qq.com;苏冰琴(1972-),女,博士,副教授,研究方向为污泥资源化处置和利用,通讯联系人,1251345607@qq.com。

化性能的生态混凝土,因内部多孔的蜂窝状结构,具有质轻、透水透气性较好的特点,逐渐在城市市政建设中得到广泛应用<sup>[5]</sup>。近年来,国内外学者针对吸水透水性泡沫混凝土的制备过程和原材料以及影响其性能的因素展开了大量研究<sup>[6-7]</sup>。柯旭等<sup>[4]</sup>研究了成型工艺对再生骨料透水性混凝土性能的影响。丁向群等<sup>[8]</sup>分析了超细矿粉对植生混凝土抗压强度和 pH 的影响。康治金等<sup>[9]</sup>研究了生活垃圾焚烧飞灰对植草砖强度性能和水化过程的影响。梁慷<sup>[10]</sup>对大掺量粉煤灰植生混凝土的抗压强度、孔隙率等进行了深入分析。陈艳等<sup>[11]</sup>的研究表明,添加污泥灰对泡沫混凝土的孔隙结构有显著影响,进而影响其力学性能。

与密实性水泥混凝土相比,透水性泡沫混凝土普遍存在强度低、收缩率高、易开裂等问题,严重束缚了这种新型环保混凝土的推广<sup>[12-13]</sup>。因此,在保证良好吸透水性性能的同时,提高其力学性能成为目前研究的重点方向。林铁华等<sup>[14]</sup>的研究表明,高吸水性聚合物可通过改良水泥浆与骨料界面情况,提高浆体的力学性能。赵春新<sup>[13]</sup>和 Khozin 等<sup>[15]</sup>的研究证实了聚合物乳液能通过对物料浆体反应进程和泡沫稳定性的影响改善泡沫混凝土的孔结构、矿物成分、微观结构等,进而对其吸水透水性及力学性能进行改善。

羧甲基纤维素钠(CMC)与丙烯酸(AA)等单体进行接枝共聚反应,合成的三元接枝共聚物乳液 CMC-g-AA 对水泥砂浆力学性能改善效果显著。将该乳液应用于泡沫混凝土的制备,对改善其性能具有重大意义,但尚需进一步研究。为此本文通过室内实验,以 CMC-g-AA 代替普通掺污泥泡沫混凝土材料中的一部分胶结材料,探讨了其掺量对试样抗压强度、抗折强度、干密度、吸水率、保水率等的影响,为兼具吸水保水性能的生态混凝土的制备提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 材料和试剂

脱水污泥取自山西省晋中市某污水处理厂,含水率为 72.00%~73.00%,pH 为 7.08~7.21;普通硅酸盐水泥为山西狮头中联水泥有限公司生产。污泥和水泥的化学成分见表 1。AA(分析纯),天津市致远化学试剂有限公司;CMC(分析纯)、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(交联剂),天津市大茂化学试剂厂;

过硫酸钾(引发剂),天津市恒兴化学试剂制造有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),上虞市浙东化工厂。

表 1 污泥和水泥的化学成分 %

成分	污泥	水泥	成分	污泥	水泥
SiO <sub>2</sub>	18.0	22.36	MgO	2.4	2.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.8	4.12	Na <sub>2</sub> O	1.0	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.6	8.01	K <sub>2</sub> O	0.8	0.21
CaO	5.8	54.85	烧失量	60.0	2.23

### 1.2 CMC-g-AA 的制备

向装有搅拌装置、球形冷凝管、氮气套管、温度计的 1 000 mL 四口瓶中加入 CMC 和适量的水,用水浴锅控制温度至(70±5)℃,待 CMC 溶解,通氮气驱除体系中的氧气,加入引发剂引发反应 5~10 min;加入已经中和的 AA(中和度 72%),搅拌均匀,加入交联剂溶液,恒温搅拌 2.5 h,制得 CMC-g-AA,固含量为 30.56%,调节 pH 为 7 左右备用<sup>[14]</sup>。

### 1.3 掺污泥泡沫混凝土的制备

将除发泡剂和水以外的原材料倒入搅拌器中,搅拌 2 min,混合均匀;取一定量(25±3)℃的水,加入盛有发泡剂的发泡装置中,搅拌发泡 15 s;将泡沫加入搅拌器中与物料混合,倒入模具中,模具表面覆一层保鲜膜,静置发泡;2 d 后脱模,将样品放入 30℃ 恒温养护箱中养护。实验过程中污泥和 CMC-g-AA 均以干基计算掺量。

### 1.4 性能测试

#### 1.4.1 力学性能及干密度测定

依据 JG-T 266-2011《泡沫混凝土》测试掺污泥泡沫混凝土的抗压强度、抗折强度、干密度。

#### 1.4.2 吸水率测定

取每组 3 块试样,称取每块试样烘干后的质量( $M_0$ ),将试样放入水温(20±5)℃的恒温水槽内,试样间距不小于 20 mm,加水至高出试样 30 mm 以上。0~24 h 内每隔一段时间将试样取出,用湿抹布抹去表面水分,立即称取每块试样质量( $M_g$ ),精确至 0.001 kg。质量吸水率采用式(1)计算,精确至 0.1%。

$$W_m = [(M_g - M_0)/M_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $W_m$  为试样的质量吸水率,%; $M_g$  为试样吸水后质量,kg; $M_0$  为试样烘干后质量,kg。

#### 1.4.3 保水率测定

将吸水饱和后的样品置于 30℃ 恒温条件下进行养护,每隔时间  $t$ (h) 测定样品的质量。每组样品

取3块。保水率按式(2)计算:

$$W_p = [(m_a - m_t) / m_a] \times 100\% \quad (2)$$

式中: $W_p$ 为保水率,%; $m_a$ 为试样吸水饱和时的总吸水量,g; $m_t$ 为试样30℃养护 $t$ 时间时的剩余水量,g。

### 1.5 表征方法

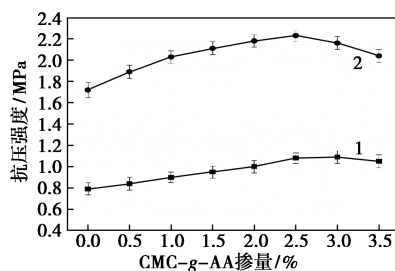
将养护龄期达28 d的部分样品浸没在乙醇中终止水化,24 h后取出,将试样研磨,使细度小于200目,磨细后的试样放在50℃的烘箱中烘至恒重,进行XRD和FT-IR测试,用SEM观察不同放大倍数下的形貌和微观结构。

## 2 结果与讨论

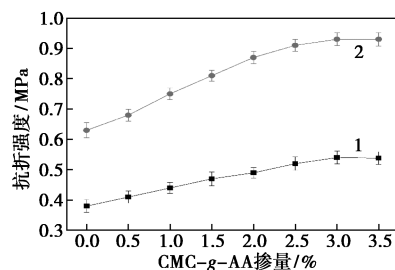
实验中掺污泥泡沫混凝土的基准配比为水灰比0.60、污泥掺量30%。分别将占总物料0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%的CMC-g-AA加入浆体中,与不掺CMC-g-AA的空白组对比。通过测试不同试样养护7、28 d时的抗压强度、抗折强度、干密度以及吸水率、保水率等指标进行分析。

### 2.1 CMC-g-AA对掺污泥泡沫混凝土强度的影响

力学性能决定着掺污泥泡沫混凝土的推广使用范围。实验条件下制备的掺污泥泡沫混凝土强度随CMC-g-AA掺量的变化如图1所示。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

1—7 d; 2—28 d

图1 CMC-g-AA掺量对掺污泥泡沫混凝土强度的影响

由图1可以看出,少量的CMC-g-AA对掺污泥泡沫混凝土的强度有改善,相同养护期内力学强度随掺量的增加都呈递增的趋势,但增幅较小。掺量为2.5%时改善抗压强度的效果最为明显,养护7 d时的抗压强度较掺量为0时提升了34.6%,养护28 d时提高了29%。抗折强度在掺量3%时达最大,养护7 d时较掺量为0时提高了48%,养护28 d时提高了41%。但掺量超过3%后,两种力学强度均呈下降的趋势。

掺污泥泡沫混凝土的强度特性取决于其结构各部分的均匀性、孔隙率、矿物成分的种类及颗粒间的粘结力<sup>[16]</sup>。CMC-g-AA优异的分散性和和易性使浆体快速均匀地混合,促进活性胶凝成分的水化反应,有助于形成孔径均匀的毛细孔隙,因形成的孔隙在掺污泥泡沫混凝土内部分布均匀,对抗压强度的降低作用不明显<sup>[17]</sup>。在反应初期,CMC-g-AA因具有疏水性的内核和亲水性的外部,可吸收浆体中大量水分子储存在网状的三维结构内部,能有效地避免混合浆体过快地干燥和后期水化用水不足导致的开裂、脱落等现象<sup>[18]</sup>,改善了掺污泥泡沫混凝土的结构形态,提高了力学性能。

### 2.2 CMC-g-AA对掺污泥泡沫混凝土干密度和吸水率的影响

吸水能力是衡量掺污泥泡沫混凝土质量的重要性能指标。掺污泥泡沫混凝土的干密度和吸水率随CMC-g-AA掺量的变化如图2所示。

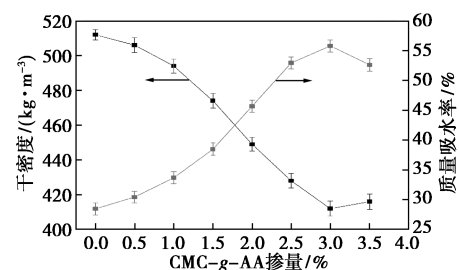


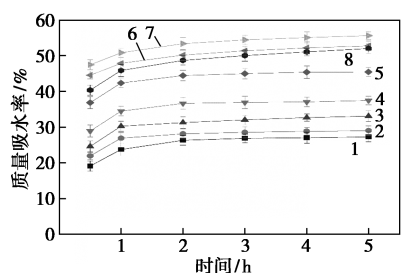
图2 掺污泥泡沫混凝土干密度和吸水率随CMC-g-AA掺量的变化

由图2可以看出,随CMC-g-AA掺量的增加,掺污泥泡沫混凝土的干密度呈现先减小后增大的趋势,而质量吸水率则是先增大后减小,密度降低会使吸水率明显增加。当掺量为3.0%时,质量吸水率达到最高,为55.79%,较掺量为0时提高了49.24%。一方面,掺加CMC-g-AA使掺污泥泡沫混凝土内部形成孔径均匀的毛细孔隙,保证其具有一定的吸水能力;另一方面,部分CMC-g-AA乳液

包裹在浆体固体颗粒的表面形成亲水性薄膜,对泡沫表面水分子的吸收加速了液膜在重力和表面张力排液以及料浆挤压等作用下产生的不均匀扩散,导致封闭的泡沫孔产生缺陷,凝结成不完整的贯通孔道<sup>[19]</sup>,最终引起掺污泥泡沫混凝土干密度的降低,吸水率随之提高。同时,CMC-g-AA 分子链上的醚键、—OH、—COOH 等亲水基团与游离水分子通过氢键作用生成结合水,也增强了掺污泥泡沫混凝土的吸水性。CMC-g-AA 掺量超过 3% 时,干密度开始增大,可能是 CMC-g-AA 吸收大量水分影响了初始阶段浆体的水化反应,泡沫的加速破裂引起塌模现象,破坏了掺污泥泡沫混凝土的完整性进而使其性能受到影响。

### 2.3 掺污泥泡沫混凝土质量吸水率随时间的变化

为探究掺污泥泡沫混凝土的吸水过程,在吸水率测试实验中取 0~5 h 内不同吸水时段的样品计算其吸水率,结果如图 3 所示。



1—0; 2—0.5%; 3—1.0%; 4—1.5%; 5—2.0%;  
6—2.5%; 7—3.0%; 8—3.5%

图 3 不同 CMC-g-AA 掺量掺污泥泡沫混凝土吸水率随时间的变化

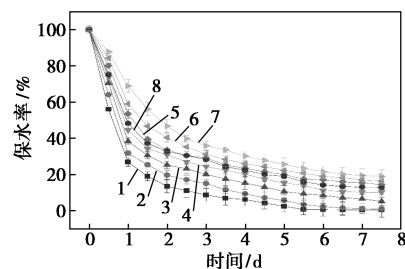
由图 3 可知,第 1 h 内的吸水量几乎占总吸水量的 75% 以上,这说明掺污泥泡沫混凝土的吸水过程是迅速进行的,水分能够快速进入到掺污泥泡沫混凝土孔隙中。对比 CMC-g-AA 掺量为 0~3% 的试样可知,CMC-g-AA 掺量越大吸水进行的越快,掺量为 3% 的试样第 1 h 的吸水率约占最终吸水率的 85%,而掺量为 0 时,试样的这一比例为 76%,1~5 h 期间吸水量增加变得缓慢。

同时可以看出,不同 CMC-g-AA 掺量掺污泥泡沫混凝土的吸水率随时间变化曲线开始部分的斜率不同。CMC-g-AA 掺量小于 3% 时,掺量越大曲线开始阶段的斜率越小,说明一定量的 CMC-g-AA 可缩短掺污泥泡沫混凝土吸水达到近似饱和的时间,即具有快速吸水的性能。结合图 2 分析认为,掺加 CMC-g-AA 使掺污泥泡沫混凝土密度减小,密度越

小气孔越多,水分流动越快,能在很短的时间内充满掺污泥泡沫混凝土内部的毛细孔和连通孔。密度稍大时气孔少、固体多,水分不容易流动和分散<sup>[20]</sup>。

### 2.4 掺污泥泡沫混凝土保水率随时间的变化

保水能力是衡量掺污泥泡沫混凝土储蓄水分能力的重要指标。实验中取吸水饱和后的掺污泥泡沫混凝土至于 30℃ 恒温条件下,测试 7.5 d 内每隔 0.5 d 的保水率,结果见图 4。



1—0; 2—0.5%; 3—1.0%; 4—1.5%; 5—2.0%;  
6—2.5%; 7—3.0%; 8—3.5%

图 4 不同 CMC-g-AA 掺量掺污泥泡沫混凝土保水率随时间的变化

由图 4 可知,第 1 d 内的保水率下降最快,失去的这部分水主要为附着在试样表面和孔隙中的自由水,CMC-g-AA 掺量越大水分散失的越慢,掺量为 3% 的试样第 1 d 保水率下降 31.15%,而掺量为 0 时,保水率下降了 44.01%;从第 2 d 开始保水率曲线下下降趋势开始变缓,2~4 d 内保水率下降归因于毛细孔隙中吸附的水和 CMC-g-AA 表面附着水的散失;第 5~7 d 散失的水分为水化产物结合的化学结合水以及 CMC-g-AA 通过氢键作用生成的结合水。

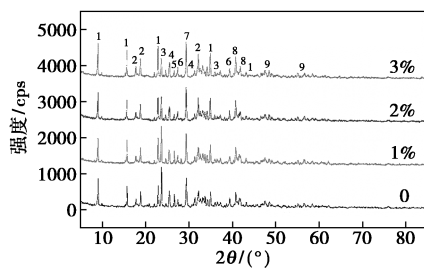
从图 4 中可以看出,不同 CMC-g-AA 掺量的试样,保水率随时间变化曲线开始部分的斜率不同。掺量越大曲线开始阶段斜率越小,说明 CMC-g-AA 能增强掺污泥泡沫混凝土的保水能力。Fang 等<sup>[21]</sup>的研究表明,CMC-g-AA 可吸收大量的自由水储存在网状结构内,使水分子运动受到限制。结合 CMC-g-AA 的这一特性分析认为,掺污泥泡沫混凝土吸收在孔隙中的水分,一部分以自由水的形式存在,还有一部分被附着在孔壁的 CMC-g-AA 储存,而这部分储存在 CMC-g-AA 网络中的水分散失需要克服膜的阻力,较难失去。

### 2.5 CMC-g-AA 对掺污泥泡沫混凝土作用的表征分析

#### 2.5.1 XRD 分析

图 5 为不同 CMC-g-AA 掺量掺污泥泡沫混凝土

土试样养护 28 d 时的 XRD 分析图谱。分析显示,主要的水化产物有钙矾石 (AFt)、单硫型水化硫酸钙 (AFm)、氢氧化钙、硅酸二钙 ( $C_2S$ )、硅酸三钙 ( $C_3S$ )、水化铝酸钙 (C-A-H)、白云母 [ $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ ]、水化硅酸钙 ( $\alpha-C_2SH$ )、方解石 ( $CaCO_3$ ) 等。空白组试样中  $Ca(OH)_2$  的衍射强度最高,并且含有大量未水化的  $C_2S$ 、 $C_3S$ 。随 CMC-g-AA 掺量的增加, $Ca(OH)_2$  的衍射峰显著降低, $C_2S$ 、 $C_3S$  衍射峰减弱,AFt 和 AFm 的衍射峰明显增强,并且 C-A-H、 $\alpha-C_2SH$  以及亲水性较强的白云母量也略有增加,这说明添加 CMC-g-AA 有助于水化产物的结晶。水化阶段后期,CMC-g-AA 释放的水分子使污泥中无定型玻璃态的  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  与水泥水化过程中析出的  $Ca^{2+}$  进行“二次反应”,生成结晶性更好的 AFm 和具有胶凝性能的 AFt,填充在水化物颗粒之间形成紧密的结构<sup>[22-23]</sup>。而  $Ca(OH)_2$  的消耗使碱性降低,有助于 C-A-H 的形成<sup>[24]</sup>。白云母量的增加进一步说明 CMC-g-AA 促进了污泥中  $K_2O$  等参与水化反应。



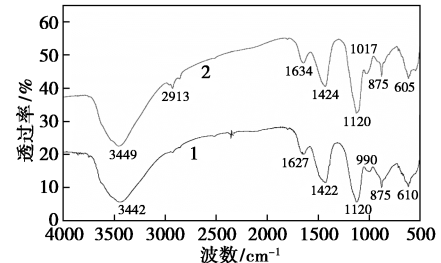
1—AFt; 2—AFm; 3— $Ca(OH)_2$ ; 4— $C_2S$ ; 5— $C_3S$ ; 6—C-A-H;  
7— $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ ; 8— $\alpha-C_2SH$ ; 9— $CaCO_3$

图5 空白组和添加 CMC-g-AA 试样的 XRD 图

### 2.5.2 FT-IR 分析

图 6 为添加 CMC-g-AA 试样与空白组的红外光谱对比。3 442、3 449  $cm^{-1}$  处是羧酸中—OH 的伸缩振动吸收峰<sup>[21]</sup>; 2 913  $cm^{-1}$  处为饱和—CH 的伸缩振动峰<sup>[17]</sup>; 1 627、1 634  $cm^{-1}$  处为—COO<sup>-</sup> 和—CONH<sub>2</sub> 中羰基的不对称振动吸收峰,CMC-g-AA 中的羰基等基团与  $Ca^{2+}$  等形成配合物,改变浆体的水化过程,加速了水化物的结晶,对掺污泥泡沫混凝土的力学性能起到了增强作用<sup>[25]</sup>。1 422、1 424  $cm^{-1}$  处为—CH<sub>2</sub> 的弯曲振动; 1 120  $cm^{-1}$  为 C—O—C 的伸缩振动吸收峰,是纤维素醚环结构的特征<sup>[13]</sup>; 与空白组相比,添加 CMC-g-AA 的试样在 1 017  $cm^{-1}$  处是—SO<sub>3</sub>H 内 S=O 的反对称伸缩振动峰,引入磺酸基有助于提高物料的减水率,改善多孔掺污泥泡

沫混凝土的力学性能<sup>[14]</sup>。990  $cm^{-1}$  处为 C—O 的弯曲振动峰; 875  $cm^{-1}$  处为 Si—C 键的伸缩振动; 605、610  $cm^{-1}$  处为含硅和卤素的聚合物吸收峰。



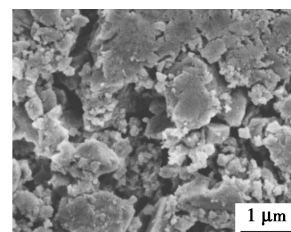
1—0; 2—3%

图6 空白组和添加 CMC-g-AA 试样的红外光谱图

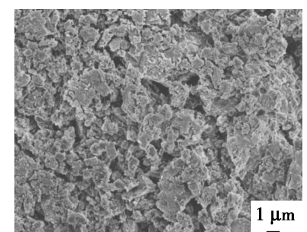
### 2.5.3 SEM 分析

图 7 为空白组和添加 CMC-g-AA 的试样分别在放大 20 000 倍和 5 000 倍时的 SEM 图。如图 7 (a) 所示,放大 20 000 倍时,在空白组试样表面可看到大量大小不一且表面粗糙的矿物颗粒,水化结构不致密,有较多松散的空隙,一定程度上可促进试样的吸水,但减弱了试样的承压能力。结合图 7 (b) 可知,空白组表面的孔隙多为依附于表面的开口孔,贯穿试样内部的连通孔较少,不利于水分子在试样内部的流通。

从图 7 (c)、(d) 可以看出,掺加 CMC-g-AA 的试样表面和内部存在着大量鳞片状的白云母、针棒状的 AFt,纤维状的水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶穿插其中。这些层状结构间通过聚合物膜胶结成空间三维连续或半连续状的网络结构,相当于“微纤维”的作用,形成桥链从而增强试样抵抗裂纹扩展的能力和孔壁的内聚力,对试样的抗折和抗压强度均有促进作用<sup>[25]</sup>。同时,在这种互穿的网状结构中分布着大量的毛细孔隙,证实了 Hajimohammadi 等<sup>[26]</sup>关于聚合物的引气作用使硬化砂浆的毛细孔隙率增大、体积密度下降的观点。从图 7 (d) 中可看到明显的孔径不一的贯通孔道,这些孔道与网状结构中的毛细孔隙相通,不仅能促进水分子在试样中的流通,而且增大了试样的储蓄水空间。



(a) 空白组 (×20 000 倍)



(b) 空白组 (×5 000 倍)

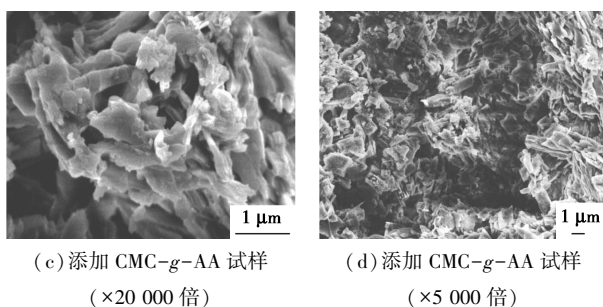


图 7 空白组和添加 CMC-g-AA 试样的 SEM 图

### 3 结论

在不同 CMC-g-AA 掺量条件下,测试了掺污泡沫混凝土的抗压强度、抗折强度、干密度、吸水率、保水率等指标,并对不同试样进行表征分析,得出如下结论:

(1)少量的 CMC-g-AA 有助于增强掺污泡沫混凝土的抗压强度、抗折强度,掺量超过 3%时,两种力学强度均开始下降。

(2)随 CMC-g-AA 掺量增加掺污泡沫混凝土的干密度先减小后增大,质量吸水率的变化趋势则相反。掺量为 3%时,质量吸水率达最大值 55.79%,吸水饱和的试样 30℃养护 7.5 d 时,仍保持着占总吸水量 19.02%的水分。

(3)XRD 分析显示,CMC-g-AA 促使掺污泡沫混凝土中形成了单硫型 C-A-H、白云母等结晶性更好的矿物成分;FT-IR 分析表明,CMC-g-AA 中的—OH、—COO<sup>-</sup>和—CONH<sub>2</sub>等活性基团可与浆体中阳离子形成络合物,增加水化程度;SEM 分析表明,CMC-g-AA 能促进掺污泡沫混凝土中毛细孔隙和贯通孔道的形成,改善掺污泡沫混凝土的空间结构,进而改善其性能。

### 参考文献

- [1] 倪凯翔.透水混凝土基本性能试验研究[D].南京:东南大学,2018.
- [2] 程晓琳,张柔祉,韩清忠.浅析透水性材料在海绵城市铺装设计中的应用与发展[J].砖瓦,2018,(1):61-63.
- [3] 吴梦柯,赵金辉,林晨彤,等.透水混凝土路面净化雨水径流研究进展[J].现代化工,2017,37(10):25-28,30.
- [4] 柯旭,崔凯,张晓玲,等.再生骨料透水混凝土蓄水植草砖[J].四川建材,2016,42(11):15-16,18.
- [5] Shen F C,Zhou Y X,Li Z D.Study on mechanical properties of polymer pervious cement concrete[J].IOP Conference Series Materials Science and Engineering,2019,479:1-7.
- [6] 石立国,杜垚,文韬,等.海绵城市建设中的透水混凝土性能及应用效果[J].中国给水排水,2019,35(12):39-43.
- [7] Azmi N B,Khalid F S,Irwan J M,et al.Performance of composite sand cement brick containing recycle concrete aggregate and waste polyethylene terephthalate with different mix design ratio[J].IOP Conference Series Earth and Environmental Science,2018,140(1):1-7.
- [8] 丁向群,尹思安,孙畅,等.超细矿粉对植生再生混凝土抗压强度及 pH 值的影响[J].硅酸盐通报,2019,38(5):1545-1549.
- [9] 康治金,刘志英,徐学骁,等.生活垃圾焚烧飞灰制备植草砖的研究[J].环境污染与防治,2018,40(9):58-61.
- [10] 梁慷.大掺量粉煤灰植生混凝土制作与性能试验[J].混凝土,2016,(3):151-154.
- [11] 陈艳,李庚英,熊光晶.大掺量污泥灰对泡沫混凝土孔结构和性能的影响研究[J].汕头大学学报:自然科学版,2016,31(3):55-61.
- [12] Xu X L,Zhang D C,Liu F T.Ceramsite foam concrete insulation block[J].Applied Mechanics & Materials,2014,723:400-405.
- [13] 赵春新.聚合物改性水泥基泡沫混凝土的试验研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [14] 林铁华,韩福芹,张春涛,等.CMC-g-PSS/PBMA 改性水泥砂浆力学性能研究[J].混凝土与水泥制品,2013,(12):11-14.
- [15] Khozin V G,Gizdatullin A R.Collaboration of polymer composite reinforcement and cement concrete[J].Journal of Physics:Conference Series,2018,991(1):1-12.
- [16] Wang G L,Wang L Z,Zhang H X,et al.Research on construction technology of planting eco-concrete[J].Concrete,2013,30(5):151-150.
- [17] 韩福芹,林铁华,张春涛,等.CMC-g-AA 对水泥砂浆力学性能的影响[J].建筑科学,2015,31(1):70-74.
- [18] 胡建城,吕阳,何晨昊,等.纳米二氧化硅粉末对水泥-粉煤灰体系泡沫混凝土力学性能及水化的影响[J].硅酸盐通报,2019,38(5):1390-1394.
- [19] 刘中炜,赵康,汤玉斐,等.轻骨料对泡沫混凝土性能的影响[J].新型建筑材料,2019,(10):19-23.
- [20] 张启.寒冷地区超轻泡沫混凝土的制备与性能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [21] Fang Y,Bi X,Liang X,et al.Preparation and characterization of hygroscopic CMC graft copolymer/silica gel composite adsorbent[J].Journal of Chemical Engineering of Japan,2016,49(7):622-629.
- [22] 褚会超,房杰,臧浩宇,等.羧甲基纤维素钠对轻质泡沫混凝土强度的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2017,36(3):63-69.
- [23] 王开松,浦旭清,陈介民,等.生活垃圾焚烧炉渣负载 TiO<sub>2</sub> 自清洁泡沫混凝土的制备[J].科学技术与工程,2019,19(10):282-286.
- [24] Puligilla S,Mondal P.Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer[J].Cement and Concrete Research,2013,43(1):70-80.
- [25] 张磊蕾,王武祥.聚合物对泡沫混凝土孔结构和性能的影响研究[J].混凝土与水泥制品,2011,(9):9-12.
- [26] Hajimohammadi A,Ngo T,Mendis P.Enhancing the strength of pre-made foams for foam concrete applications[J].Cement & Concrete Composites,2018,87:164-171.■