

HPMC 对水泥稳定全深式冷再生材料的性能影响研究

高种晟¹, 诸剑峰², 方磊³, 李秀君¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 浙江省桐乡市公路管理局, 桐乡 314500;
3. 襄阳华昇工程检测咨询有限公司, 襄阳 441000)

摘要: 针对水泥稳定全深式冷再生混合料的泌水、施工操作时间短、黏结力不足等诸多问题, 通过在水泥胶砂试件中添加羟丙基甲基纤维素醚 (HPMC), 研究 HPMC 对水泥胶砂试件抗折及抗压强度的影响; 进而探讨在再生混合物中掺入 HPMC 的可行性, 重点研究了不同掺量的 HPMC 对水泥稳定全深式冷再生材料的性能影响。研究发现: HPMC 由于引气作用会降低水泥水化后水泥胶砂试件的抗折及抗压强度; 水泥在 HPMC 溶于水后的分散液中进行水化, 与水泥先水化再掺入 HPMC 相比, 水泥胶砂试件抗折及抗压强度有所增大。掺入 HPMC, 对水泥稳定全深式冷再生材料的无侧限抗压强度有削弱作用; 再生混合物具有一定黏聚性能不易离析, 且在常温及高温下保水性能较好, 基本无泌水现象。

关键词: 羟丙基甲基纤维素醚; 水泥稳定; 再生混合物; 性能影响

中图分类号: U 416.217 **文献标志码:** A

Effects of Hydroxypropyl Methyl Cellulose Ether on the Full-Deep Cold Regenerated Mixture Stabilized with Cement

GAO Zhongsheng¹, ZHU Jianfeng², FANG Lei³, LI Xiujun¹

(1. Department of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Tongxiang Highway Administration Bureau, Tongxiang 314500, China; 3. Xiangyang Huasheng Engineering Inspection Consulting Co., Ltd., Xiangyang 441000, China)

Abstract: Aiming at the problem of bleeding, short construction operation time and insufficient cohesive force of cement stabilized full-deep cold regenerated mixtures, the effect of hydroxypropyl methyl cellulose ether (HPMC) on flexural and compressive strength of cement mortar specimens was studied by adding HPMC to cement sand specimens. The feasibility of adding HPMC into the regenerated mixtures was discussed, and the effects of different HPMC content on the properties of cement stabilized deep cold regenerated mixtures were studied. It is found that HPMC reduces the flexural and compressive strength of cement sand specimens due to air entrainment. Cement hydration in HPMC solution increases the flexural and compressive strength of cement sand specimens compared with

收稿日期: 2018-05-02

第一作者: 高种晟 (1994-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 道路工程. E-mail: 842324568@qq.com

通信作者: 李秀君 (1976-), 女, 副教授. 研究方向: 沥青路面结构与路面材料. E-mail: 363096289@qq.com

cement hydration before HPMC is added. The addition of HPMC reduces the unconfined compressive strength of cement stabilized full-deep cold recycled regenerated specimens. The regenerated mixture has a certain cohesive property and is not easy to segregate, and has good water retention at room temperature and high temperature, basically without bleeding phenomenon.

Keywords: *hydroxypropyl methyl cellulose ether; cement stability; regenerated mixture; performance impact*

道路再生技术是指将旧路面材料(主要是面层、基层材料)经过铣刨、回收、破碎和筛分,再与适量新集料和稳定剂一同拌合,重新形成能够满足设计要求的再生混合料,之后经摊铺、压实,形成具有一定承载能力的路面结构层的再生方法。目前,基于水泥稳定的全深式就地冷再生方式作为低成本、低能耗、高效率和高质量的节能降耗养护技术已经在国内外得到普遍应用。以沥青面层铣刨料以及水稳基层铣刨料为主要原材料进行再生利用的混合料作为路面基层或底基层,其强度形成主要取决于水泥作为稳定剂水化后的强度。道路施工通常处于夏季,气温高,水份蒸发快,水份损失越多,水泥水化后强度损失越大。因此,外界环境因素对实际施工中拌和混合料的含水量产生较大且不可避免的影响,如何保证混合料的保水性能,使其在最佳含水量的情况下,水泥能够充分水化达到目标强度,成为亟待解决的问题。

为了使干混砂浆能够达到适宜施工的稠度和易性^[1],作为保水和增稠剂的羟丙基甲基纤维素醚(hydroxypropyl methyl cellulose ether, HPMC)已被普遍运用。随着砂浆商品化的发展,以及纤维素生产技术的不断进步,HPMC本身所具有的保水、保塑性使其在建筑行业得到广泛应用^[2-3]。苏雷^[4]通过研究掺入 HPMC 改性砂浆发现,随着 HPMC 掺量的增加,砂浆的保水性能不断提高,失水量逐渐减少;袁伟等^[5]通过在泡沫混凝土中添加 HPMC 的试验和应用研究发现,HPMC 提高了新拌混凝土的保水性能,减小了硬化泡沫混凝土的失水速率,降低拌合物对温度的敏感性,会使泡沫混凝土的抗压强度明显降低。

针对就地再生实际施工中再生混合料最佳含水量难以控制的问题,本文先通过在水泥胶砂试件中添加 HPMC,研究 HPMC 对于水泥水化的影响机理,进而探讨在再生混合料中掺入 HPMC 的可行性,重点研究不同掺量的 HPMC 对水泥稳定全深式就地冷再生材料的性能影响。

1 HPMC 的作用机理

HPMC 是由纤维素碱活化处理后与醚化剂氯甲烷和环氧丙烷进行醚化反应^[6],在醚化反应中纤维素分子上的羟基(—OH)被甲氧基(—OCH₃)和羟丙基取代生成,其分子结构图如图 1 所示,图中,*n* 表示聚合度,R 代表—H,—CH₃ 或—CH₂CHOHCH₃。

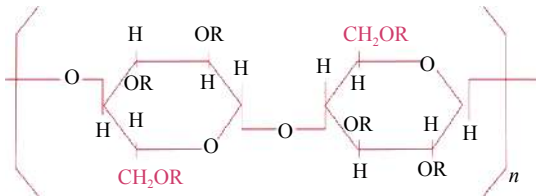


图 1 HPMC 的分子结构图
Fig.1 Molecular structure of HPMC

纤维素分子上的羟基被取代的基团数可用醚化度(也叫取代度)表示,HPMC 的醚化度在 1.2~1.5 之间^[7]。因此,高分子聚合物 HPMC 的大分子线状结构中官能团上存在的羟基(—OH)能与拌和水分子形成氢键,使拌和水黏度增加;HPMC 的长分子链间会相互吸引,使 HPMC 分子间相互缠结形成网状结构,把水泥、拌和水包裹起来;醚键(—O—)以及脱水葡萄糖环等重要基团对再生混合料性能产生一定的影响。

2 HPMC 对水泥胶砂性能的影响

2.1 原材料

试验采用 42.5 R 硅酸盐水泥,其比表面积为 398.1 m²/kg,80 μm 筛余为 0.2%(质量分数);HPMC 黏度为 200 000 MPa·s;标准砂。

2.2 试验方法

根据《水泥胶砂强度试验》(GB/T 17671-1999),测定 40 mm×40 mm×160 mm 水泥棱柱体试件的抗压强度和抗折强度。

由水泥 450 g、标准砂 1 350 g 和水 225 g，按照其质量比 1:3:0.5 拌制成一组塑性胶砂成型 3 个水泥试件。试件连模标准养护 24 h，然后脱模在水中养护 48 h；龄期结束，进行 3 d 抗折强度试验，折断后每截再进行抗压强度试验。

试验选择 HPMC 掺量为 0%，0.2%，0.4%，0.6%（水泥、标准砂及水的混合料的质量分数）。为探究 HPMC 掺入方式对胶砂强度的影响，根据掺配方式不同拟定两组试验，每组 3 个平行试件。方式Ⅰ：在标准砂中先加入水，再加入水泥，最后添加 HPMC（水+水泥+HPMC）；方式Ⅱ：在标准砂中加入水再添加 HPMC，最后加入水泥（水+HPMC+水泥）。固定水泥、标准砂和水的质量比为 1:3:0.5，试验温度为 24 ℃。

2.3 HPMC 分散液状态

掺量为 0%，0.2%（1.35 g），0.4%（2.7 g）及 0.6%（4.05 g）的 HPMC 溶于水（75 g）后形成的分散液如图 2 和图 3 所示。

HPMC 为水溶性高分子化合物又称水溶性树

脂或水溶性聚合物，通过增加拌和水的黏度来增加拌合物稠度，在水中能溶解而形成溶液或分散液。

2.4 HPMC 引气作用

掺量为 0.4%（2.7 g）及 0.6%（4.05 g）的 HPMC 溶于水（75 g）后形成的分散液中含有气泡，如图 4 和图 5 所示。

HPMC 的引气作用是指由于纤维素醚中含有烷基基团，能使水溶液的表面能降低，使分散液中的含气量增加，并且气泡膜的韧性和纯水气泡的韧性相比较为高，不易排出^[8]。

2.5 水泥砂浆试件抗折强度及抗压强度

不同 HPMC 掺量、相同成型条件下，HPMC 掺量与水泥砂浆试件的抗折强度和抗压强度的关系，如图 6 和图 7 所示。

水泥胶砂试件抗折强度和抗压强度降低的主要原因是由于纤维素醚的引气作用^[9]。HPMC 中含有烷基基团，能使水溶液的表面能降低，造成水泥胶浆中含有较多气体且难以排出；浸水养护过

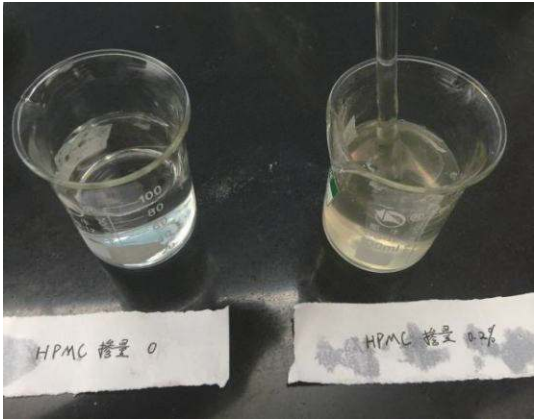


图 2 HPMC 掺量为 0% 和 0.2% 分散液
Fig. 2 HPMC content of 0% and 0.2% dispersion

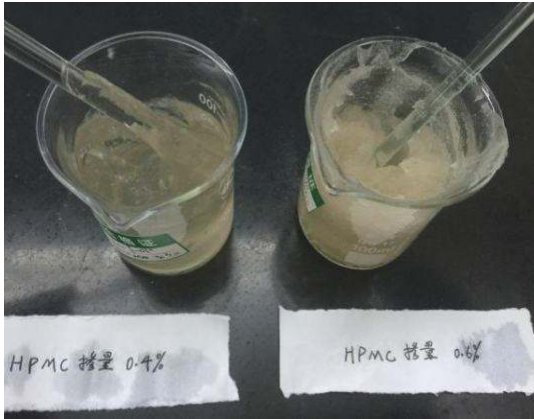


图 3 HPMC 掺量为 0.4% 和 0.6% 分散液
Fig. 3 HPMC content of 0.4% and 0.6% dispersion

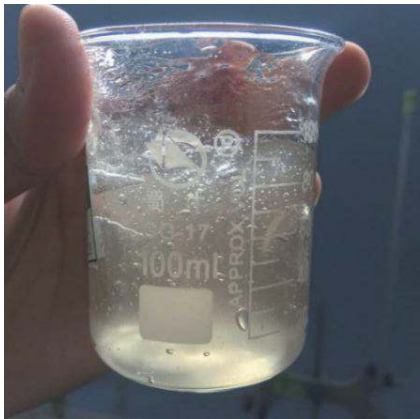


图 4 HPMC 掺量为 0.4% 分散液中气体
Fig. 4 Gases in 0.4% HPMC dispersion

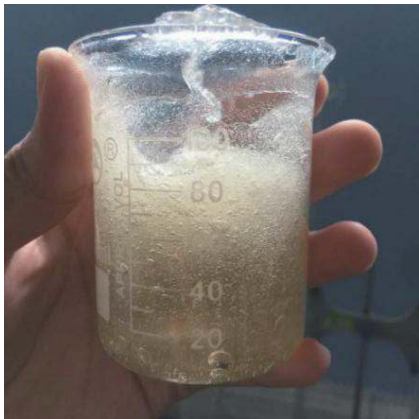


图 5 HPMC 掺量为 0.6% 分散液中气体
Fig. 5 Gases in 0.6% HPMC dispersion

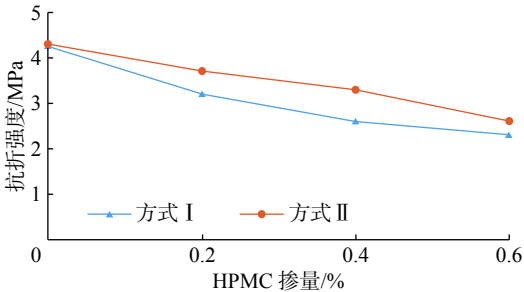


图 6 HPMC 掺量对水泥试件抗折强度的影响

Fig. 6 Effect of HPMC content on flexural strength of cement specimens

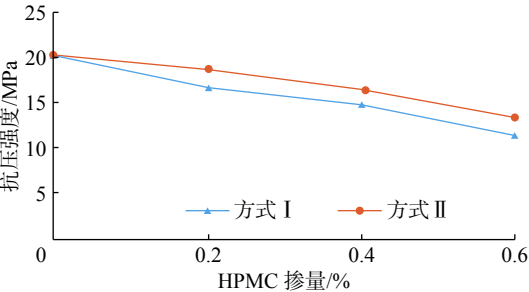


图 7 HPMC 掺量对水泥试件抗压强度的影响

Fig. 7 Effect of HPMC content on compressive strength of cement specimens

程中,纤维素醚吸水膨胀进一步增大砂浆内部孔洞,致使水泥胶砂试件密度下降,这是降低水泥试件强度的影响因素之一。纤维素醚的引气作用虽然能够改善砂浆的和易性,但由于含气量增大,引起硬化体结构疏松,导致强度等力学性能下降的负面作用。因此在使用 HPMC 作为外掺剂应用于水泥基材料中应合理考虑其掺量^[10]。

另一方面,纤维素醚的结构特征导致其对于水泥水化具有缓凝的作用。纤维素醚保留着纤维素的基本骨架,在纤维素醚的分子结构中依然存在脱水葡萄糖环结构,脱水葡萄糖环作为引起水泥缓凝的主要基团,它能够与水泥水化水溶液中的钙离子生成糖钙分子化合物(或叫络合物)^[4, 11],降低水泥水化诱导期的钙离子浓度,阻止 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和钙盐晶体的生成、析出,从而延缓水泥水化的进程。试验结果显示,方式 II 水泥试件的抗折强度和抗压强度大于方式 I。掺配方式 I 中水泥水化后再加入外掺剂 HPMC,而在方式 II 中水泥是在 HPMC 溶于水后的分散液中进行水化。这说明 HPMC 的缓凝作用虽然会延缓水泥水化的进程,但并不会影响水泥水化后的强度。HPMC 溶于水形成类似薄膜的网状结构,有效包裹着水,从而防止水泥胶浆中水分的挥发,在搅拌机充分搅拌

的情况下,规定养护时间内,水泥能够充分水化形成强度。

3 HPMC 对水稳再生混合料性能的影响

试验所用材料取自浙江省桐乡市某公路。材料 A: 沥青面层(3 cm 厚)以及二灰碎石基层铣刨料;材料 B: 沥青面层(6 cm 厚)以及二灰碎石基层铣刨料。

3.1 再生混合料合成级配曲线

根据原路面铣刨材料的规格选用《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41-2008)表 5.6.2 中 1 号级配上下线范围。再生混合料组成: 70% 铣刨料+30% 石屑(0~5 mm)。

材料 A,B 对应再生混合料合成级配如图 8 所示。

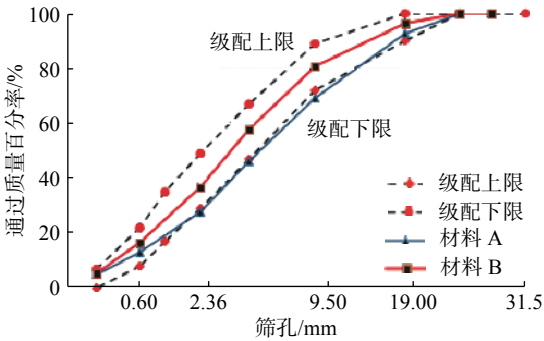


图 8 材料 A、材料 B 再生混合料级配曲线

Fig.8 Gradation curve of material A and B recycled mixtures

3.2 再生混合料粗集料密度

再生材料 A,B 粗集料密度如表 1 所示。

表 1 材料 A 和材料 B 粗集料的密度
Tab.1 Density of coarse aggregate of material A and B

材料	表观相对密度 /(g·cm ⁻³)	表干相对密度 /(g·cm ⁻³)	毛体积相对密度 /(g·cm ⁻³)
A	2.634	2.591	2.566
B	2.620	2.542	2.494

3.3 再生混合料最佳含水量和最大干密度

根据规范 T 0804-1994,通过击实试验确定:材料 A 再生基层混合料的最佳含水量为 7%,最大干密度为 2.221 g/cm³;材料 B 再生基层混合料的最佳含水量为 7%,最大干密度为 2.208 g/cm³。

3.4 再生混合料保水性

保水性是指再生混合料能保持水分的能力,也是衡量再生混合料在运输以及停放时内部组分

稳定性的性能指标。保水性可用失水率指标评价,即失水率越大,保水性能越差;失水率越小,保水性能越好。通过失水率实验测定掺入 HPMC 的再生混合料分别在常温(室内温度 24 ℃,空气湿度 75%)及 60 ℃ 高温环境下的保水性能。

3.4.1 再生混合料常温下保水性能

常温下失水率试验是通过滤纸与规定面积的圆柱形水泥稳定再生试件上表面接触一定时间后,测量滤纸前后质量变化,从而计算出失水率。

由于滤纸具有很好的吸水性,即使再生混合料的保水性很高,滤纸仍能吸附再生混合料中的水分。试验使用圆柱形 φ150 mm×150 mm 标准水泥稳定再生试件,上表面覆盖一层纱布,再放置 8 张滤纸以及不透水盖板,采用 2 kg 重物静压 15 min,测定滤纸前后的质量变化,计算失水率,以此反映常温下再生混合料的保水性。

滤纸:选用超白滤纸,直径 110 mm,性能指标符合 GB/T 1914—200《化学分析滤纸》中规定的速定性滤纸要求。纱布:市售医用纱布,尺寸为 110 mm×110 mm。

常温下材料 A, B 对应再生混合料失水率与 HPMC 掺量关系如图 9 所示。

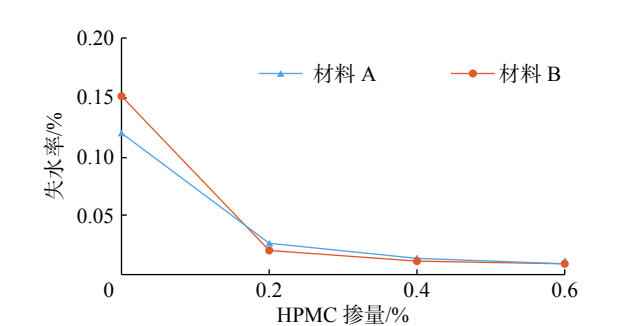


图 9 常温下 HPMC 掺量与再生混合料失水率的关系
Fig.9 Relationship between HPMC content and water loss rates of regenerated mixtures at room temperature

纤维素醚结构中含有的羟基和醚键,这些基团上的氧原子与水分子缔合成氢键,使游离水分子变成结合水,从而很好地起到保水作用^[3]。从图 9 中可以看出,在试验掺量范围内,再生混合料的失水率与 HPMC 掺量呈现良好的对应关系,HPMC 掺量越高,再生混合料失水率越小,其保水性越好。再生混合料随着 HPMC 的掺入表现出较为黏稠的状态。当 HPMC 掺量达到 0.4% 时,再生混合料基本无泌水现象;当掺量达到 0.6% 以后,失水率变化不再明显。

3.4.2 再生混合料高温下保水性能

高温下失水率试验是模拟夏季道路施工的环境条件,称量一定质量的再生混合料,将其放入恒定温度 60 ℃ 的烘箱,5 h 后测定其质量前后变化,然后计算出失水率。

60 ℃ 高温下材料 A, B 对应再生混合料失水率与 HPMC 掺量关系如图 10 所示。

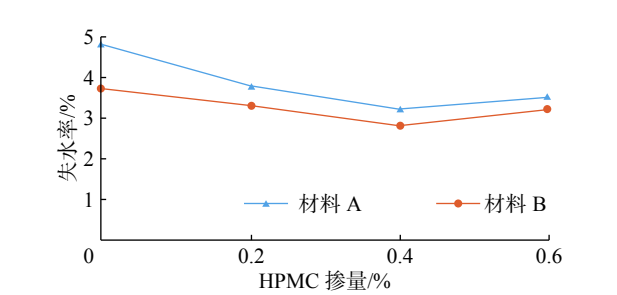


图 10 高温下 HPMC 掺量与再生混合料失水率的关系
Fig.10 Relationship between HPMC content and water loss rates of regenerated mixtures at high temperature

从图 10 可以看到,未掺 HPMC,材料 A 再生混合料失水率达到 4.8%,材料 B 再生混合料失水率达到 3.7%,相较于 7% 的最佳含水量而言,在高温环境下施工,温度对再生混合料的含水量影响较为严重。当 HPMC 掺量达到 0.4% 时,材料 A 失水率为 3.2%,材料 B 为 2.8%;掺入 HPMC 后,材料 A, B 再生混合料失水率都有明显下降,说明外掺剂在高温情况下仍具有一定的保水性能。HPMC 掺量为 0.6% 时,材料 A, B 再生混合料失水率有所增长是因为掺入过量 HPMC,再生混合料黏聚性能增加,表现为细集料包裹在粗骨料表面。外掺剂的引气作用使得再生混合料内部气孔增多,从而导致水分蒸发流失较快。

再生混合料本身对水分非常敏感,极易出现拌合后短时间内因为水分散失而出现和易性严重下降的问题,即施工可操作时间极短;另外,对于再生混合料来讲,原材料往往较为干燥,在施工过程中,由于混合料对水分的保持能力不足,大量水分会被原材料吸走,导致黏结骨料局部缺水,水化因此不充分,出现强度降低、黏结力下降的现象。HPMC 具有出色的吸水保水能力,能够很好地解决再生混合料的泌水、施工可操作时间短、黏结力不足、混合料松散易离析等问题。因此,HPMC 作为外掺剂添加到水泥稳定全深式冷再生混合料中具有一定必要性。

3.5 无侧限抗压强度

材料 A, B 再生混合料最佳含水量 7%,水泥

剂量 5%; HPMC 掺量 0%, 0.2%, 0.4% 及 0.6% (质量分数); 根据规范 T 0843-2009 成型 4 组, 每组 13 个 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 圆柱形标准试件; 进行龄期 7 d 的标准养护 (温度为 $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度 $\geq 95\%$), 最后一天浸泡于 $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水中, 水面高出试件顶部约 2.5 cm。

HPMC 掺量为 0.4% 时, 水泥稳定再生混合料强度一定程度增长是由于适量纤维素醚的掺入, HPMC 所具有的成膜和网状结构, 以及大分子长链上羟基的吸附作用, 使再生混合料中水泥与拌和水形成絮凝状, 水泥能够充分水化, 并且增加拌和水的黏度。再生混合料具有一定的黏聚性, 保证了成型后的稳定结构, 使强度有所增长。此时, HPMC 的引气作用对于再生混合料试件无侧限抗压强度减小的程度较小。

HPMC 掺量达到 0.6%, 水泥稳定再生混合料强度降低是因为掺入过量亲水性的高分子材料 HPMC, 其遇水溶解后所形成的胶体吸附水泥颗粒, 与细集料包裹在粗骨料表面, 形成一定的阻隔作用。此时, 再生混合料较为松散, 粒径大小不同的集料出现离析, 导致再生混合料成型后无侧限抗压强度降低。

试验结果显示, 合理的 HPMC 掺配比例对水泥稳定全深式冷再生混合料的强度更为有利。HPMC 作为外掺剂应用于水泥稳定全深式冷再生混合料具有可行性, 建议 HPMC 适宜掺量为 0.3%~0.5%, 最佳掺量为 0.4%。

浸水 1 d 后, 材料 A, B 再生试件吸水率与 HPMC 掺量关系如图 11 所示。从图 11 中可以看到, 掺入 HPMC 后, 材料 A, B 再生试件吸水率明显上升且吸水率较大, 表明再生试件内部孔洞

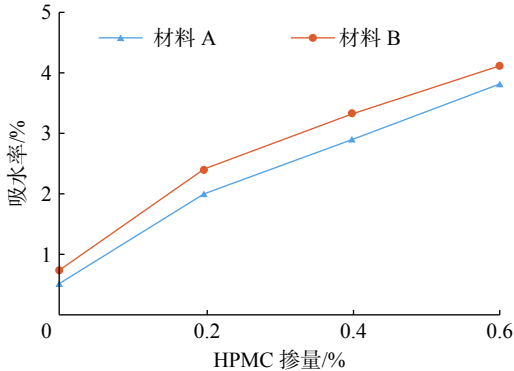


图 11 HPMC 掺量与再生混合料吸水率的关系
Fig. 11 Relationship between HPMC content and water absorption rates of regenerated mixtures

较多。外掺剂 HPMC 的引气作用导致成型后的再生混合料试件孔隙率增加。

材料 A, B 再生混合料无侧限抗压强度与 HPMC 掺量关系如图 12 所示。

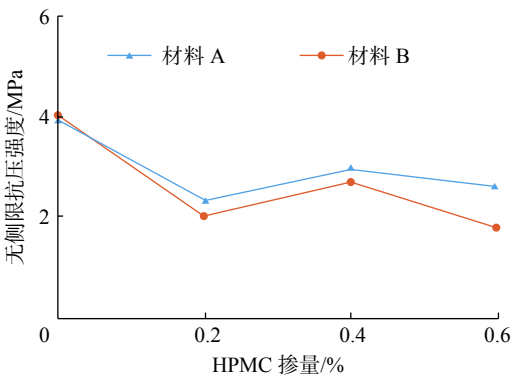


图 12 HPMC 掺量与再生混合料无侧限抗压强度的关系
Fig. 12 Relationship between HPMC content and the unconfined compressive strength of regenerated mixtures

HPMC 掺量在 0.2% 以下, 水泥稳定再生混合料无侧限抗压强度降低主要影响因素是由于 HPMC 的掺入增加再生混合料的含气量, 造成再生混合料成型后试件的孔隙率较大, 试件内部结构疏松, 导致试件强度降低。

4 结 论

通过对掺入 HPMC 的水泥胶砂试件和水泥稳定全深式就地冷再生基层混合料的研究, 得出以下主要结论:

- a. HPMC 由于引气作用会降低水泥胶砂试件的抗折强度及抗压强度。
- b. HPMC 溶于水形成类似薄膜的网状结构, 有效包裹着水, 防止水分的挥发。在标准砂中加水后掺入 HPMC 再添加水泥与水泥先水化再掺入 HPMC 的掺配方式相较而言, 水泥在 HPMC 溶于水后的分散液中更能够充分水化, 水泥胶砂试件抗折及抗压强度大于水泥先水化再掺入 HPMC 后的水泥胶砂试件。
- c. 随着 HPMC 掺配比例增加, 常温下水泥稳定全深式冷再生混合料的稠度增大, 黏度增大, 失水率减小, 保水性能增强; 当掺量在 0.4% 以上时, 再生混合料基本不再有泌水现象产生; $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温情况下, 掺入 HPMC 的再生混合料仍具有一定保水性能。
- d. HPMC 由于引气作用会增加再生混合料中

气泡含量,对于水泥稳定全深式冷再生混合料的无侧限抗压强度有一定的削弱作用。适量掺入HPMC,可增强再生混合料的保水性能,保证水泥充分水化。本试验条件下,建议使用HPMC掺量为0.3%~0.5%,最佳掺量为0.4%(再生混合料的质量分数),这对水泥稳定全深式冷再生混合料的强度更为有利。

参考文献:

- [1] 徐迅,郝益,郑成章. 纤维素醚对普通砂浆保水性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2017(4): 69-71.
- [2] 蹇守卫,马保国,苏雷,等. 纤维素醚改性砂浆的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2011, 30(3): 560-566.
- [3] 唐明,李晓明. 羟丙基甲基纤维素对水泥基材料的改善效应[J]. *混凝土*, 2009(10): 50-52.
- [4] 苏雷. 纤维素醚改性水泥浆体性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

- [5] 袁伟,秦岷,丁来彬,等. 纤维素醚对泡沫混凝土性能影响研究[J]. *粉煤灰*, 2012(5): 34-37.
- [6] 黄连根. 纤维素醚对水泥砂浆性能的影响[J]. *江西建材*, 1995(3): 14-17.
- [7] 詹镇峰,李从波,陈文钊. 纤维素醚的结构特点及对砂浆性能的影响[J]. *混凝土*, 2009(10): 110-112.
- [8] PATURAL L, MARCHAL P, GOVIN A, et al. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(1): 46-55.
- [9] 赖建清. 纤维素醚在 EPS 保温砂浆中的作用研究[J]. *福建建材*, 2011(6): 17-18.
- [10] 蔡希高. 缓凝外加剂缓凝作用的化学本质[J]. *化学建材*, 2007, 23(2): 41-44.
- [11] 管学茂,罗树琼,杨雷,等. 纤维素醚对加气混凝土用抹灰砂浆性能的影响研究[J]. *混凝土*, 2006(10): 35-37.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 280 页)

- [6] 马林山,郭磊. 基于主题模型(LDA)的查新辅助分析系统设计研究[J]. *现代情报*, 2018, 38(2): 111-115.
- [7] 刘冰玉,王翠荣,王聪,等. 基于动态主题模型融合多维数据的微博社区发现算法[J]. *软件学报*, 2017, 28(2): 246-261.
- [8] ROSEN-ZVI M, CHEMUDUGUNTA C, GRIFFITHS T, et al. Learning author-topic models from text corpora[J]. *ACM Transactions on Information Systems*, 2010, 28(1): Article No. 4.
- [9] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I. Latent Dirichlet allocation[J]. *Machine Learning Research*, 2003, 3: 993-1022.
- [10] HEINRICH G. Parameter estimation for text analysis[R]. Technical Report, 2008.
- [11] GRIFFITHS T L, STEYVERS M. Finding scientific topics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(S1): 5228-5235.
- [12] ENDRES D M, SCHINDELIN J E. A new metric for

probability distributions[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(7): 1858-1860.

- [13] GANESH H B B, KUMAR M A, SOMAN K P. From vector space models to vector space models of semantics[M]//MAJUMDER P, MITRA M, MEHTA P, et al. Text Processing. FIRE 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 10478. Springer International Publishing, 2018: 50-60.
- [14] MAJTEY A P, LAMBERTI P W, PRATO D P. Jensen-Shannon divergence as a measure of distinguish ability between mixed quantum states[J]. *Physical Review A*, 2005, 72: 052310.
- [15] 李梦杰,刘建国,郭强,等. 基于文本挖掘的互联网教育课程主题发现与聚类研究[J]. *上海理工大学学报*, 2018, 40(3): 259-266.
- [16] 陈新泉. 聚类算法中的优化方法应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2014: 13-14.

(编辑: 董伟)