

文章编号 1007-9629 2021 01-0199-08

HEMC 对硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响

李 建^{1,2} 王肇嘉³ 黄天勇³ 王 茹^{1,2} 王思云^{1,2}

1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室 上海 201804

2. 同济大学 材料科学与工程学院 上海 201804

3. 北京建筑材料科学研究总院有限公司 固废资源化利用与节能建材国家重点实验室 北京 100041

摘要 研究了固定流动度下高、低 2 种取代度的羟乙基甲基纤维素 HEMC 对硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响。结果表明,随着 HEMC 掺量的增加,硫铝酸盐水泥砂浆的需水量和凝结时间大幅增加,湿密度和强度大幅降低。HEMC 掺量对硫铝酸盐水泥砂浆抗折强度的影响显著小于其抗压强度。相对于低取代度 HEMC,高取代度 HEMC 改性硫铝酸盐水泥砂浆具有稍低的需水量、湿密度和强度以及相近的凝结时间。HEMC 的加入延缓了初期声波传播速度的增长,显著延长了新拌砂浆的可使用时间,降低了最终声波在砂浆内部的传播速度,且其声波传播速度同时受 HEMC 掺量和取代度的影响。HEMC 改性硫铝酸盐水泥砂浆强度与湿密度以及声波的传播速度均具有良好的线性相关性。

关键词 硫铝酸盐水泥 羟乙基甲基纤维素 取代度 强度 超声法

中图分类号 TU528.01

文献标志码 A

doi 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.026

Influence of HEMC on Properties of Sulphoaluminate Cement Mortar

LI Jian^{1,2}, WANG Zhaojia³, HUANG Tianyong³, WANG Ru^{1,2}, WANG Siyun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. State Key Laboratory of Solid Waste Reuse for Building Materials, Beijing Building Materials Academy of Science Research, Beijing 100041, China)

Abstract: The effects of hydroxyethyl methyl cellulose (HEMC) with high and low substitution degrees on the properties of sulphoaluminate cement mortar under fixed fluidity were studied. Test results show that water demand and setting time increase significantly while wet density and strength decrease significantly with the increase of HEMC content. Flexural strength is less influenced than compressive strength by HEMC content. Compared with the low substitution degree HEMC, high substitution degree HEMC to some extent leads to lower water demand and wet density together with lower strength and similar setting time of sulphoaluminate cement mortar. Incorporation of HEMC slows down the acceleration of sound velocity at early stage which is in favor of pot life, and leads to the decrease of final sound velocity. Moreover, the acoustic wave propagation speed is affected by the content and the degree of substitution of HEMC. The strength of HEMC modified sulphoaluminate cement mortar has good liner correlation with both sound velocity and wet density.

Key words: sulphoaluminate cement; hydroxyethyl methyl cellulose; substitution degree; mechanical strength; ultrasonic method

收稿日期 2019-09-09 修订日期 2020-02-13

基金项目 国家自然科学基金资助项目 51872203 51572196 中德科学中心资助项目 GZ1290

第一作者 李 建 1980 男 江苏南京人 同济大学博士生. E-mail muzishe@hotmail.com

通讯作者 王 茹 1975 女 辽宁昌图人 同济大学教授 博士生导师 博士. E-mail ruwang@tongji.edu.cn

硫铝酸盐水泥从发明至今已有超过 40 a 的历史,具有早强、高强、抗冻、抗渗、耐蚀、碱度低以及生产过程中能耗低、排放低等优良特性^[1-3],目前已广泛应用于建筑工程、冬季施工、海港工程、地下工程、水泥制品、预制构件、水泥压力管和各种玻璃纤维增强混凝土(GRC)制品.但应用过程中依然存在一些问题,如硫铝酸盐水泥砂浆保水性差、流动度损失快、施工时间短^[4-5]、抗折强度倒缩^[6-9]等,需要进一步改进和优化.

在水泥砂浆中添加高分子聚合物是提高其特定性能的简单而有效的方法.纤维素醚(CE)是最重要的添加剂之一,它是一种优良的保水增稠剂. CE 结构属多糖类高分子,根据取代基类型可分为不同种类,其中羟丙基甲基纤维素(HPMC)和羟乙基甲基纤维素(HEMC)被广泛应用于建筑砂浆改性. CE 的取代基团类型相同时,取代程度的高低也会对改性砂浆的性能产生影响. CE 对硅酸盐水泥的改性已有广泛而深入的研究,大量的研究表明:CE 能够有效改善新拌砂浆的性能^[10-13],并对其抗压抗折强度^[14]、拉伸黏结强度^[15]、孔结构^[16-18]和水化进程^[19-21]等产生重大影响.相比之下,CE 在硫铝酸盐水泥砂浆中应用的研究仍非常有限.武斌等^[22]研究了掺量在 0.05%~0.25%之间的 HPMC 对硫铝酸盐水泥防水砂浆性能的影响,发现 HPMC 的加入会降低砂浆的早期强度,但对其后期强度影响不大,且明显降低了防水砂浆的吸水率.欧志华等^[23]研究发现 CE 降低硫铝酸盐水泥水化放热速率的效果非常弱,主要是延迟了其 2 h 以后的水化. Zhang 等^[24]研究了一种改性 HEMC 对硫铝酸盐水泥早期水化的

影响,发现 HEMC 的加入导致了 2 次放热时间的推迟,延缓了水化 12 h 内高硫型水化硫铝酸钙(AFt)和铝胶(AH₃)的形成,水化 24 h 时,限制了 AFt 向低硫型水化硫铝酸钙(AFm)的转换,并且显著影响了体系中 AFt 的形貌. Shi 等^[25]研究了一种改性 HPMC 对硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响,发现该 HPMC 延长了砂浆的凝结时间,缩短了其初凝和终凝的时间间隔,有助于提高砂浆的抗折强度,防止倒缩,降低了砂浆 6 h 和 3 d 的抗压强度,提高了其 7 d 抗压强度. 这些研究结果在一定程度上说明了 CE 在硫铝酸盐水泥砂浆中的作用与其在硅酸盐水泥砂浆中有所差异,需要更为广泛和深入的研究.

为了深入理解 CE 在硫铝酸盐水泥中的作用,本文选取了 2 种黏度相似而取代度不同的 HEMC 对硫铝酸盐水泥砂浆进行改性,在控制砂浆流动度的条件下研究了 HEMC 取代度及掺量对砂浆性能及强度的影响,并通过超声法在线监测砂浆早期内部结构的变化,对砂浆湿密度、声波传播速度与强度的相关性进行了分析.

1 试验

1.1 原材料

水泥为 52.5 级快硬硫铝酸盐水泥(CSA),其化学和矿物组成¹⁾见表 1、2. 集料为水泥胶砂强度检验用 ISO 标准砂. 改性剂为黏度接近且均未改性的高取代度和低取代度的 HEMC(文中取代度指甲基和羟乙基的总取代度),分别记为 H-HEMC 和 L-HEMC,其基本性能参数见表 3. 拌和水为自来水.

表 1 硫铝酸盐水泥化学组成

Table 1 Chemical composition of sulphoaluminate cement

Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Mn ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	TiO ₂	IL
23.84	44.20	15.04	9.82	1.95	0.26	2.46	0.02	0.08	0.11	0.10	0.95	1.17

表 2 硫铝酸盐水泥矿物组成

Table 2 Mineral composition of sulphoaluminate cement

C ₄ A ₃ S̄	C ₂ S	C ₃ S̄	C ₄ AF	C ₁₂ A ₇	CT	CaMg(CO ₃) ₂	MgO	Amorphous
35.4	26.4	14.3	4.6	3.1	1.0	1.5	1.9	11.7

表 3 HEMC 的基本性能参数

Table 3 Basic properties of HEMC

Type	Viscosity(Haake,2%)/(mPa·s)	Total substitution degree
H-HEMC	42 500	1.85
L-HEMC	42 700	1.55

1.2 试验方法

试验采用 1:3 的灰砂比,HEMC 掺量为 0%、0.3%、0.6%、0.9%(以水泥质量计). 文中:PM 表示 HEMC 掺量为 0%时的纯硫铝酸盐水泥砂浆;L-03 表示 L-HEMC 掺量为 0.3%的改性硫铝酸盐水泥砂浆,其他以此类推. 参照 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》控制所有砂浆流动度为(170±5)mm 的条件下确定其需水量. 参照 GB/T 29756—2013《干混砂浆物理性能试验方法》测定新拌砂浆的体积密度. 参照 JGJ/T 70—2009《建筑砂

1)文中涉及的组成、掺量、需水量、比值等均为质量分数或质量比.

浆基本性能试验方法》测定砂浆凝结时间. 参照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》测定硬化砂浆 1、28 d 的抗压抗折强度, 养护条件为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(50 \pm 10)\%$. 采用德国 UltraTest GmbH 的 IP8 超声波测试仪测试水泥水化 24 h 内声波传播速度的变化, 发射和接收传感器的距离为 40 mm, 同步 控砂浆内部温度的变化.

2 结果与讨论

2.1 需水量

CE 的增稠作用是其在砂浆应用中的重要作用之一, 固定流动度下砂浆需水量的高低可以反映 CE 的增稠效果. 图 1 为砂浆需水量随 HEMC 掺量的变化. 由图 1 可见: HEMC 掺量的增加对砂浆需水量的影响较大; L-HEMC 掺量从 0% 增加到 0.3% 时, 砂浆需水量提高了 8%, 此后需水量线性增大, 掺量每增加 0.3% 需水量提高 14%; H-HEMC 改性砂浆的需水量比 L-HEMC 稍低, 掺量为 0.3% 时砂浆需水量比掺量为 0% 时提高了 6%, 此后掺量每增加 0.3% 需水量提高 13%. CE 中 基基团的引入使含有 CE 的水溶液表面能降低, 因此具有引气作用^[26]. H-HEMC 具有较强的表面活性, 掺入 H-HEMC 时易引入更多的微气泡 (由 H-HEMC 改性砂浆具有更低的湿密度可以看出, 见 2.2 分析), 而气泡在砂浆中具有一定的“珠效应”, 因此相对于 L-HEMC, H-HEMC 改性砂浆在 试验中更易获得更高的流动度, 从而具有较低的需水量.

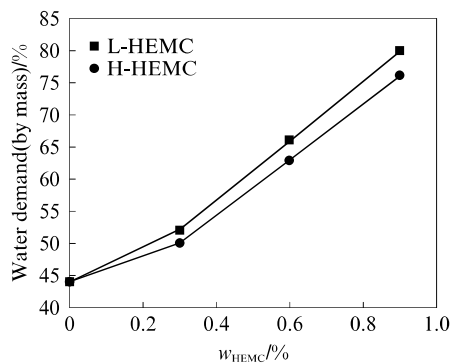


图 1 砂浆需水量随 HEMC 掺量的变化

Fig. 1 Change of water demand of mortar with increase of HEMC contents

2.2 湿密度

CE 的表面活性会导致新拌砂浆中引入更多的气泡, 从而显著降低硅酸盐水泥砂浆的湿密度^[27]. 图 2 为新拌砂浆的湿密度随 HEMC 掺量的变化. 由图 2 可见: HEMC 在硫铝酸盐水泥砂浆中具有降低

砂浆湿密度的作用; HEMC 掺量低于 0.6% 时, 新拌砂浆的湿密度几乎随着掺量的增加呈线性下降的趋势; 继续增加 HEMC 掺量至 0.9%, 新拌砂浆的湿密度变化趋于平缓, 仅有少量的下降; 与纯砂浆相比, HEMC 改性砂浆的湿密度下降均超过 30%; H-HEMC 改性砂浆的湿密度略低于 L-HEMC 改性砂浆, 但两者差距较小, 这也是由于 H-HEMC 具有更高的表面活性所致.

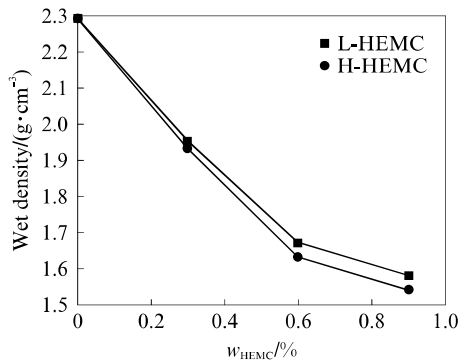


图 2 新拌砂浆的湿密度随 HEMC 掺量的变化

Fig. 2 Change of wet density of fresh mortars with HEMC contents

2.3 凝结时间

凝结时间采用贯入阻力法测得, 结果如图 3 所示. 由图 3 可见: 未掺 HEMC 时, 纯砂浆的凝结时间非常短, 仅为 14 min; 随着 HEMC 掺量的增加, 砂浆凝结时间几乎呈线性增长; HEMC 掺量为 0.9% 时, 砂浆凝结时间超过了 90 min. 这是因为 HEMC 的掺入阻止了水泥颗粒的溶解和初期水化产物的沉淀, 从而延缓了水化反应^[24], 且 HEMC 的引气效应能够 水泥或者水泥水化产物之间的距离增大; 而随着 HEMC 掺量的增加, 砂浆水灰比增大, 浆体凝结时需要水化产物填充的结构孔隙增多. 由图 3 还可见: 取代度不同的 HEMC 对砂浆凝结时间的影响无明显差异, 这与 CE 在硅酸盐水泥中的表现不同. CE 对硅酸盐水泥进行改性时, 高甲基取代度的 CE 具有更少的缓凝^[20], 这种缓凝程度的区别是由于水化产物对不同 CE 的吸附程度不同所致.

2.4 抗压和抗折强度

图 4 为水泥砂浆的抗压强度和抗折强度. 由图 4(a) 可见, HEMC 的掺入对水泥砂浆的抗压强度影响较大: (1) 养护时间为 1 d 时: L-03、L-06 改性砂浆抗压强度约为纯砂浆的 40%、11%; HEMC 掺量继续增大, 抗压强度下降变化平缓; L-09 的抗压强度仅为 3.5 MPa, 约为纯砂浆的 7%. (2) 养护到 28 d 时, 不同 HEMC 掺量改性砂浆的抗压强度均有一定

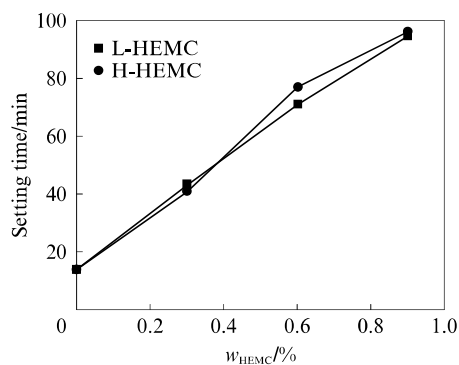
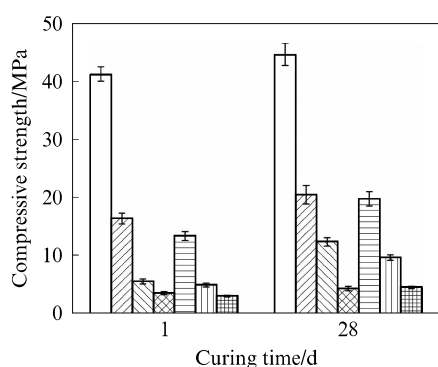
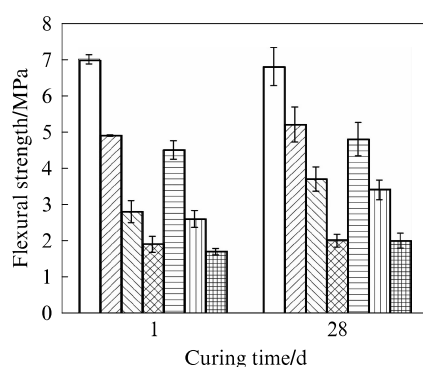


图 3 区时间随 HEMC 胶 为剂
Fig. 3 Setting time change with increase of HEMC contents



(a) Compressive strength



(b) Flexural strength

□PM; ▨L-03; ▩L-06; ▤L-09; ▥H-03; ▦H-06; ▧H-09

图 4 砂浆 压 度析 折 度

Fig. 4 Compressive strength and flexural strength of cement mortars

2.5 超声法测试分析

图了更 地观察 HEMC 改子硫铝酸晶 砂浆早现 剂别内部区 展, 声法 砂浆 剂 24 h 进行监 试. 声法主 声波 部不同介质 播速度不同 变,通过监 声波 部 砂浆 播速度,进 宏征砂浆内部区 为剂. 试强 增意同步监 砂浆内部 温度, 辅 判断. 需 ,由 声波 试 并非采 全封闭区 ,温度值增 孔时 内温度波动 , 需 格 时内温度 稳定子,同时区 声波 播速度为剂趋势判断温度 信号为剂 真压子,避免单独利 温度信号. 声波 播速度别砂浆内部温度随时间 为剂见图 5.

由图 5 增见,纯砂浆 声波 播速度别内部温度随时间 为剂增意 图 4 个阶段:(1)阶段 I 图 0~1.0 h, 阶段声波 播速度急剧液 ,说 随着 内部反试 进行,砂浆区 迅速为得 密;且砂浆 温度主本稳定并 沿终 时温,说 该阶段没更 线热或线热 图更 .(2)阶段 II 图 1.0~4.5 h,

液加:纯砂浆 压 度约更 8% 泡 ;L-03、L-06、L-09 改子砂浆 压 度 别液加约 25%、120%、22%,但绝 值仍很 . H-HEMC 改子砂浆 更相似趋势,总 压 度略 L-HEMC 改子 砂浆. 由图 4(b)增见,HEMC 砂浆 折 度 式小 醇 压 度 :养护 1 d 时, L-03、L-06 析 L-09 改子砂浆 折 度 别约图 纯砂浆 70%、40%析 27%;养护至 28 d 时,除 L-06 改子砂浆 折 度更式 液加(约 32%)外,醇 他为剂均不 式. H-HEMC 改子砂浆 折 度 更相似 趋势,与 压 度相同,均稍 L-HEMC 改子砂浆.

阶段声波 播速度 液速出现样 1 次加速并减缓. 1.0~1.4 h 声波 播速度液长 式加速;1.4~4.5 h 声波 播速度 液速为得平缓;温度为剂曲线上也 增意 式地观察孔砂浆部 1.4 h 出现样 1 个温度 峰.(3)阶段 III 图 4.5~11.0 h, 阶段声波 播速度 为剂出现样 2 次加速并减缓. 4.5 h 含,声音 播速度又经历了 1 波相 温析 加速,并部 6.5 h 之含 始减缓,直至 11.0 h 左右主本区束. 与 相 试, 温度为剂曲线 6.5 h 出现样 2 个温度峰;与样 1 个温度峰相比,该峰 图平缓,峰值温度式 样 1 个峰,并且 续时间 长.(4)阶段 IV 图 11.0~24.0 h, 阶段声波 播速度几乎没更为剂,砂浆内部也没更式 温度为剂.

加入 HEMC 含,声波 播速度曲线仍 更相似 4 个阶段,且与温度为剂存部 试子,但与 纯砂浆相比,存部 些为剂. 意 L-03 图例,不同 现部:首先 反试 初始阶段,1.0 h 意 声波 播速度 液速小 纯砂浆,液速 减缓随着 L-HEMC 胶 液加为得更图式 ,这宏 改子砂浆内部固

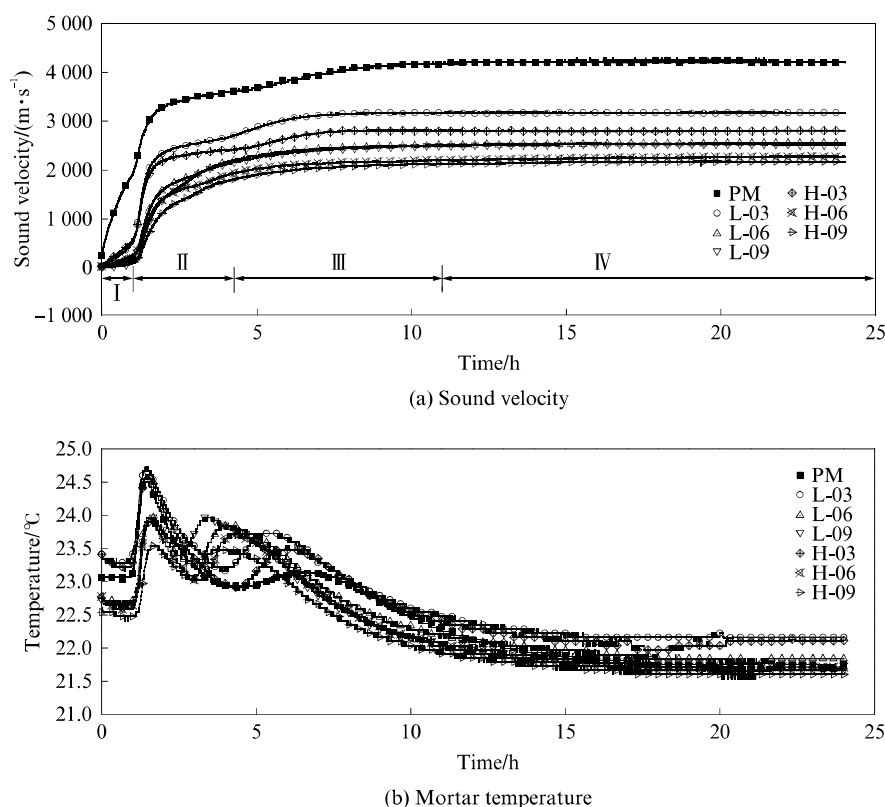


图5 波传速度及砂浆内部温度随时间的变化
Fig. 5 Sound velocity and mortar temperature change with time

态的水化产物增加较少,砂浆具有足够的工作性,因此有助于提高硫铝酸盐水泥新拌砂浆的可使用时间;其次,第2次波传速度的加速过程显著提前,L-03波传速度的加速起点和峰值出现时间分别提前了约0.6、1.0 h;最后,波传速度稳定以后,波在改性砂浆中的传速度明显低于纯砂浆,说明加入L-HEMC后砂浆内部的致密度显著变差,L-06的波传速度较纯砂浆下降了约24%,进一步提高L-HEMC掺量,改性砂浆的波传速度信与L-06无显著差异.H-HEMC对硫铝酸盐水泥砂浆波传速度的影响与L-HEMC类似,只是相同掺量下稳定后的波传速度进一步降低约10%~15%.

由图5还可见:所有砂浆的第1个温度峰出现的时间非常接近,与HEMC的种类和掺量无关;HEMC的掺入使砂浆的第2个温度峰出现的时间显著提前,且其掺量越高,出现时间提前越多;与L-HEMC相比,H-HEMC改性砂浆第2个温度峰出现时间晚.2个温度峰中,第1个峰通常认为是源于AFt和AH₃的形成,第2个峰是由于C₄A₃S₃的快速溶解和大量水化物的形成(包括AFt,AFm,和AH₃)^[24,28].HEMC的掺入导致第2个放热峰前移

的现象可能归因于2个变动因素:HEMC掺量和加水量的增加.两者均会导致砂浆结构变得疏松,而疏松的浆体能够为水化产物提供更多的生长空间,使水化产物的生成变得相对容易.而对于第1个放热峰,可能由于处于反应初期,水化产物较少,无论是加HEMC,浆体均较为疏松,因而所有配方差别并不明显,关于这一点仍需后期进一步研究证实.

2.6 强度与声波传播速度及湿密度的相关性

2.6.1 强度与波传速度的相关性

对砂浆的1 d抗压、抗折强度与波传速度进行线性回归分析,结果见图6.由图6可见:砂浆抗压强度与波传速度具有很好的相关性,相关系数 R^2 达到了0.95;而砂浆抗折强度与波传速度线性回归分析的相关系数 R^2 低,其值为0.88,相关性也较好.强度与波传速度较好的相关性可归因于两者均与砂浆内部的致密程度相关.因此,在某种程度上可以根据波传速度的大小推测砂浆强度的高低.

2.6.2 强度与湿密度的相关性

对砂浆1、28 d抗压、抗折强度与新拌砂浆湿密度进行线性回归分析,结果见图7.由图7可见:无论是1 d或28 d,砂浆的抗压、抗折强度与新拌砂浆

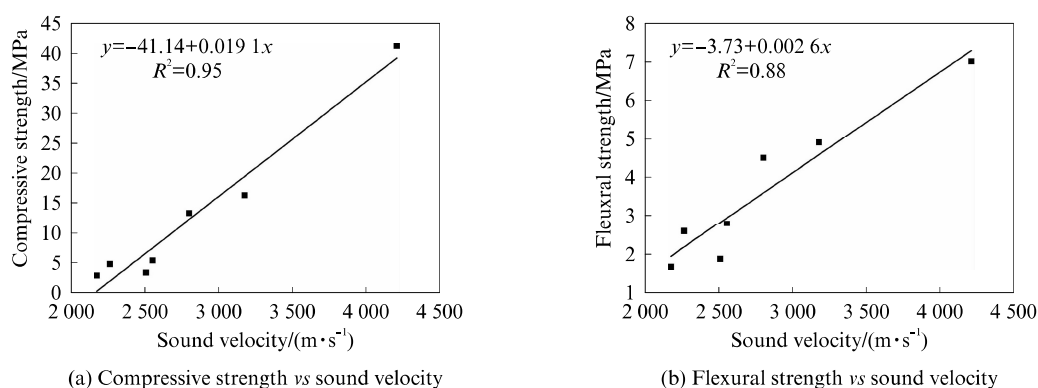


图6 砂浆抗压、抗折强度与声波传播速度的关系

Fig. 6 Relation between compressive strength, flexural strength and sound velocity of mortars

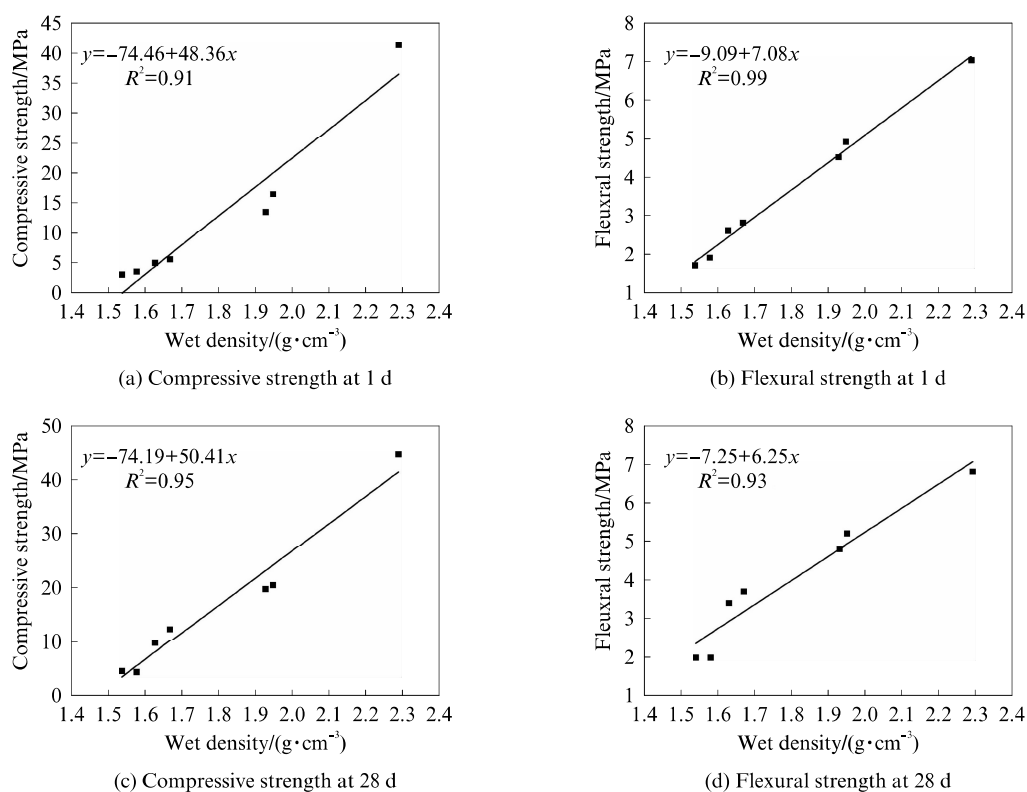


图7 砂浆抗压、抗折强度与湿密度的关系

Fig. 7 Relation between compressive strength, flexural strength and wet density of mortars

湿密度的相关系数 R^2 均不小于 0.91, 表明砂浆强度与湿密度具有较好的线性相关性. 因此, 在实践中也可以通过湿密度粗略估计砂浆之间强度的相对高低.

3 结论

(1) HEMC 掺量对砂浆性能影响显著: 掺量每增加 0.3%, 砂浆的需水量提高 6%~14%. 随着 HEMC 掺量的增加, 凝结时间近似呈线性增加, 湿

密度快速降低, 且掺量大于 0.6% 之后降速趋于平缓.

(2) HEMC 掺量对硫铝酸盐水泥砂浆抗折强度的影响显著小于对抗压强度的影响: 随着 HEMC 掺量的增加, 砂浆抗压强度损失严重, 0.9% 掺量时 L-HEMC 改性砂浆的抗压强度约为纯砂浆的 7%; 抗折强度的损失相对较小, 0.9% 掺量时 L-HEMC 改性砂浆的抗折强度约为纯砂浆的 27%.

(3) 取代度的高低对砂浆性能影响较小: 与 H-

HEMC相比,L-HEMC改性水泥砂浆具有稍低的需水量和湿密度、稍高的强度和相近的凝结时间;2种HEMC掺量的变化对这些性能变化趋势的影响相似。

(4)HEMC的掺入延缓了初期声波传播速度的增长,显著延长了新拌砂浆的可使用时间,降低了最终声波在砂浆内部的传播速度,且其声波传播速度同时受HEMC掺量和取代度的影响。

(5)HEMC改性砂浆的强度与湿密度以及声波的传播速度均具有良好的线性相关性。

:

- [1] 王燕谋,苏慕珍,张量.硫铝酸盐水泥[M].北京:北京工业大学出版社,1999:187-215.
WANG Yanmou, SU Muzhen, ZHANG Liang. Sulphoaluminate cement [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1999:187-215. (in Chinese)
- [2] 刁江京,辛志军,张秋英.硫铝酸盐水泥的生产与应用[M].北京:中国建材工业出版社,2006:2.
DIAO Jiangjing, XIN Zhijun, ZHANG Qiuying. Manufacturing and application of sulphoaluminate cement [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2006:2. (in Chinese)
- [3] GARTNER E. Industrially interesting approaches to “low- CO_2 ” cements[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9):1489-1498.
- [4] 王燕谋,苏慕珍,张量.硫铝酸盐水泥的分类及其各品种间的区别[J].中国水泥,2007,22(2):32-36.
WANG Yanmou, SU Muzhen, ZHANG Liang. Classification of sulphoaluminate cement and their difference[J]. China Cement, 2007, 22(2):32-36(in Chinese)
- [5] 杨克锐,张彩文,郭永辉,等.延缓硫铝酸盐水泥凝结的研究[J].硅酸盐学报,2002,46(2):155-160.
YANG Kerui, ZHAGN Caiwen, GUO Yonghui, et. al. Study on retarding the set of sulphoaluminate cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 46(2):155-160. (in Chinese)
- [6] 肖忠明,郭俊萍.混合材对硫铝酸盐水泥抗折强度倒缩的抑制作用及机理[J].水泥,2017,44(3):10-13.
XIAO Zhongming, GUO Junping. Inhibiting effect of admixture on shrinkage of flexural strength of sulphoaluminate cement and its mechanism[J]. Cement, 2017, 44(3):10-13. (in Chinese)
- [7] 肖忠明,郭俊萍.快硬硫铝酸盐水泥抗折强度倒缩机理的探讨[J].水泥,2016,43(12):3-5.
XIAO Zhongming, GUO Junping. Discussion on reduction mechanism of flexural strength of quick hardening sulphoaluminate cement[J]. Cement, 2016, 43(12):3-5. (in Chinese)
- [8] 丁益,王爱国,张伟.硫铝酸盐水泥后期强度的改进研究[J].广东建材,2009,25(4):8-11.
DING Yi, WANG Aiguo, ZHANG Wei. Research on improving strength of sulphoaluminate cement at later hydration stage[J]. Guangdong Building Materials, 2009, 25(4):8-11. (in Chinese)
- [9] 周建启.提高硫铝酸盐水泥质量的措施[J].水泥,2003,30(9):23-25.
ZHOU Jianqi. Measures to improve the quality of sulphoaluminate cement[J]. Cement, 2003, 30(9):23-25. (in Chinese)
- [10] BRUMAUD C, BESSAIES-BEY H, MOHLER C, et al. Cellulose ethers and water retention[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 53:176-184.
- [11] BRUMAUD C, BAUMANN R, SCHMITZ M, et al. Cellulose ethers and yield stress of cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 55:14-21.
- [12] 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.
- [13] MARLIERE C, MABROUK E, LAMBLET M, et al. How water retention in porous media with cellulose ethers works[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42:1501-1512.
- [14] 张建新,彭家惠,李青,等.羟丙基甲基纤维素醚对特细砂水泥砂浆性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2009,36(1):7-9.
ZHANG Jianxin, PENG Jiahui, LI Qing, et al. Influences of hydroxypropyl methylcellulose ether on the properties of cement mortar made with ultra-fine sand [J]. China Concrete and Cement Products, 2009, 36(1):7-9. (in Chinese)
- [15] PETIT J Y, WIRQUIN E. Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 40:202-209.
- [16] POURCHEZ J, RUOT B, DEBAYLE J, et al. Some aspects of cellulose ethers influence on water transport and porous structure of cement-based materials[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2):242-252.
- [17] WYRZYKOWSKI M, KIESEWETTER R, KAUFMANN J, et al. Pore structure of mortars with cellulose ether additions-Mercury intrusion porosimetry study [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 53:25-34.
- [18] WYRZYKOWSKI M, KIESEWETTER R, MÜNCH B, et al. Pore structure of mortars with cellulose ether additions-Study of the air-void structure [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62:117-124.
- [19] SINGH N K, MISHRA P C, SINGH V K, et al. Effects of hydroxyethyl cellulose and oxalic acid on the properties of cement [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(9):1319-1329.
- [20] WEYER H J, MÜLLER I, SCHMITT B, et al. Time-resolved monitoring of cement hydration:Influence of cellulose ethers on hydration kinetics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:Beam Interactions with Materials and Atoms, 2005, 238(1-4):102-106.
- [21] KNAPEN E, VAN GEMERT D. Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(1):6-13.

- [22] 武 , 赵劲松, 其家, 等. 一种新型高抗渗防水的浆的研制[J]. 广东建材, 2014, 30(11): 98-101.
WU Bin, ZHAO Jingsong, ZHOU Qijia, et al. The development of an innovative waterproofing mortar with high impermeability[J]. Guangdong Building Materials, 2014, 30(11): 98-101. (in Chinese)
- [23] 华, 毛 对, 华, 等. 纤维素醚对 微水泥和单矿水化热的影响[J]. 盐 报, 2016, 35(5): 1606-1611.
OU Zhihua, MAO Taiwei, SHEN Yanhua, et al. Influence of cellulose ethers on hydration heat of different cements and single mines [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(5): 1606-1611. (in Chinese)
- [24] ZHANG G F, HE R, LU X P, et al. Early hydration of calcium sulphoaluminate cement in the presence of hydroxyethyl methyl cellulose[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 134(3): 1429-1438.
- [25] SHI C, ZOU X W, WANG P. Influences of ethylene-vinyl acetate and methylcellulose on the properties of calcium sulphoaluminate cement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 474-480.
- [26] 张号, 贺 , 钟世 . 纤维素醚在水泥的浆中的作用机理及影响因素[J]. 海建材, 2008, 27(3): 32-34.
ZHANG Bin, HE Hongzhu, ZHONG Shiyun. Functions and mechanism of cellulose ether in modifying cement mortar[J]. Shanghai Building Materials, 2008, 27(3): 32-34. (in Chinese)
- [27] 管学茂, 琼, 杨章, 等. 纤维素醚对 气混凝土用 响的浆性能的影响研究[J]. 混凝土, 2006, 28(10): 35-37.
GUAN Xuemao, LUO Shuqiong, YANG Lei, et al. Study on influences of cellulose ether on performances of plaster for aerated concrete[J]. Concrete, 2006, 28(10): 35-37. (in Chinese)
- [28] ZHANG L, GLASSER F P. Hydration of calcium sulphoaluminate cement at less than 24 h[J]. Advances in Cement Research, 2002, 14(4): 141-155.