

文章编号:1007-9629(2022)04-0415-09

HPMC 对铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆性能的影响

李磊^{1,2}, 王茹^{1,2,*}, 武雪杉^{1,2}, 王培铭^{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)

摘要:研究了羟丙基甲基纤维素(HPMC)及其掺量对铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆物理力学性能的影响,并采用压汞仪和扫描电镜对砂浆宏观性能的变化作出了合理解释.结果表明:HPMC 会大幅度改变砂浆的保水率、含气量、凝结时间、流动度、稠度值和体积密度,明显提高新拌砂浆的可塑性,增加可操作时间,但却会降低硬化砂浆的抗折强度、抗压强度和拉伸黏结强度;硬化砂浆强度的降低归因于 HPMC 会大幅度增加砂浆孔隙率和孔尺寸,并改变水化产物形态.因而在实际应用中,应慎重考虑使用 HPMC 来改性铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆的两面性.

关键词:羟丙基甲基纤维素;铝酸盐水泥;石膏;砂浆性能;孔隙特征

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.013

Effect of Hydroxypropyl Methyl Cellulose on Aluminate Cement-Gypsum Mortar

LILei^{1,2}, WANG Ru^{1,2,*}, WU Xueshan^{1,2}, WANG Peiming^{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)

Abstract: The effect of hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) and its content on the physical and mechanical properties of aluminate cement gypsum mortar was investigated. The results obtained by mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electron microscopy (SEM) were used to make a reasonable explanation for the change of macro properties. The results show that HPMC can affect the water-retention rate, air content, setting time, flow, consistency and wet density which play a key role in increasing the plasticity and operational time of the fresh mortar. HPMC reduces the flexural strength, compressive strength, and tensile bond strength of the hardened mortar. The decrease of the strength is due to the fact that the HPMC increases the porosity and pore volume and changes the distribution of hydration products. Therefore, in practical application, the two sides of the HPMC modified aluminate cement- gypsum mortar should be considered carefully.

Key words: hydroxypropyl methyl cellulose(HPMC); aluminate cement; gypsum; property of mortar; pore characteristics

铝酸盐水泥的主要矿物为一铝酸钙(CA)和二铝酸钙(CA₂),还有少量七铝酸十二钙(C₁₂A₇)等,主要水化产物为水化铝酸钙(CAH₁₀、C₂AH₈、C₃AH₆)和铝胶(AH₃).各主要矿物的水化过程易受温度影响,

收稿日期:2020-12-26; 修订日期:2021-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51872203)

第一作者:李磊(1997—),男,山西晋城人,同济大学硕士生.E-mail: 1930646@tongji.edu.cn

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: ruwnag@tongji.edu.cn

如图1所示(图中H为H₂O).水化产物中的CAH₁₀和C₂AH₈为亚稳相,在水化后期易转化为稳定相C₃AH₆,此晶型转变会引起水泥浆体孔隙率急剧增加,产生强度倒缩.为减弱这一现象带来的消极影响,常在铝酸盐水泥中掺加石膏(C \bar{S} H_x)来优化水化

产物结构,使其大量生成水化硫铝酸钙,减少晶型转变的发生^[1].石膏充足时生成钙矾石,即三硫型水化硫铝酸钙(AFt),不足时有少量单硫型水化硫铝酸钙(AFm)产生.铝酸盐水泥与足量石膏复掺时,CA与CA₂的水化反应分别如式(1)、(2)所示^[2].

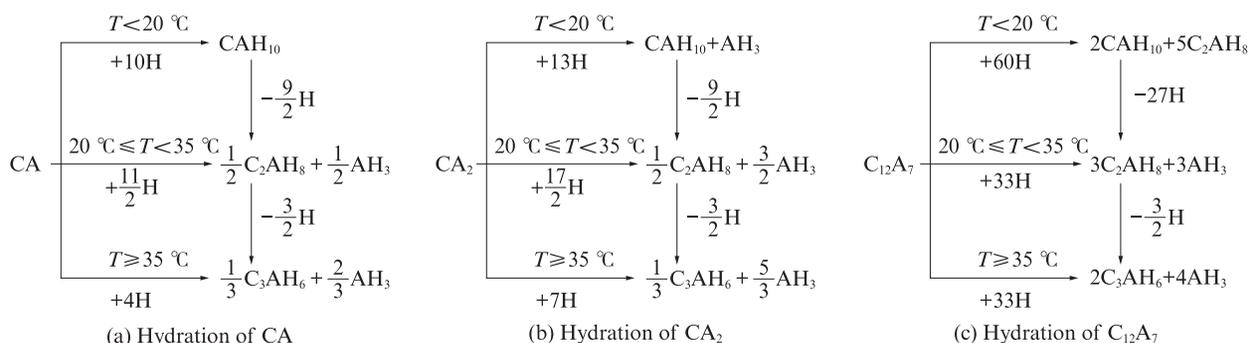
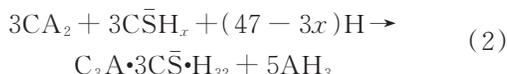
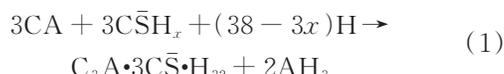


图1 铝酸盐水泥主要矿物的水化
Fig. 1 Hydration of main minerals in aluminate cement



不同种类的石膏及掺量对铝酸盐水泥基材料的影响不一^[3-7],但总的来说铝酸盐水泥中掺入石膏不仅可以减少晶型转变、提高硬化体强度,而且能使浆体发生膨胀从而应用于防渗工程^[8].此外,石膏在铝酸盐水泥基饰面砂浆中可减弱泛白^[9].但铝酸盐水泥在拌制时容易出现泌水和离析,凝结速度却很快,导致在某些环境下可操作时间太短而不利于施工.

纤维素醚是一种能够改善砂浆新拌性能的添加剂,具有优良的保水和增稠作用^[10-11],能提高水泥砂浆的拉伸黏结强度,但会降低水泥砂浆的抗折、抗压强度^[12-16].对纯铝酸盐水泥砂浆也有类似的研究结果^[17].但关于纤维素醚在铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆中的作用尚未见报道.

本文选用铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系,探究羟丙基甲基纤维素(HPMC)及其掺量对二元胶凝体系砂浆的物理力学性能(保水率、流动度、稠度、含气量、湿密度、凝结时间、抗折强度、抗压强度和拉伸黏结强度)的影响,并从微观结构对砂浆性能变化进行解释,以期对纤维素醚在铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆中的应用提供依据.

1 试验

1.1 原材料及配合比

原材料:铝酸盐水泥(CAC),比表面积为

400 m²/kg,主要矿物为CA和CA₂,X射线衍射(XRD)图谱见图2,化学组成(质量分数,本文涉及的组成、掺量、比值等除特别指明外均为质量分数或质量比)见表1;半水石膏(HG),XRD图谱见图3,化学组成见表1;羟丙基甲基纤维素(HPMC),黏度为40 000 mPa·s,180 μm筛余物不大于5%;石英砂,粒径为0.14~1.90 mm;自来水.

配合比:胶砂比为1:3;水胶比为0.6;半水石膏掺量为胶凝材料总质量的20%;纤维素醚HPMC的掺量分别为胶凝材料总质量的0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%.

1.2 试验方法

1.2.1 新拌砂浆的性能测试

新拌砂浆的性能测试均在(20±2)℃、相对湿度(60±5)%的环境下进行.其中:湿密度、稠度、保水率测试参照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法》,均以2次测试结果平均值作为最终结果;凝结时间测试参照GB 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》;流动度测试参照GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》,以2次测试结果平均值作为最终结果;含气量测试参照德国标准DIN 18555/-557,采用含气量测定仪直接读取^[18],以2次测试结果平均值作为最终结果.

1.2.2 硬化砂浆的力学性能测试

硬化砂浆试样的成型和养护均在(20±2)℃、相对湿度(60±5)%的环境下进行.其中:抗折、抗压强度测试参照GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,测试龄期为1、3、7、28 d;拉伸黏结强

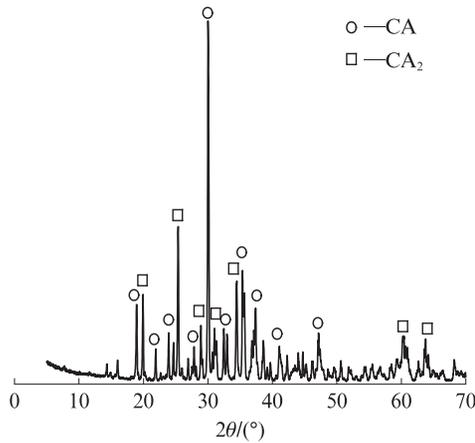


图2 铝酸盐水泥 XRD 图谱
Fig. 2 XRD pattern of aluminat cement

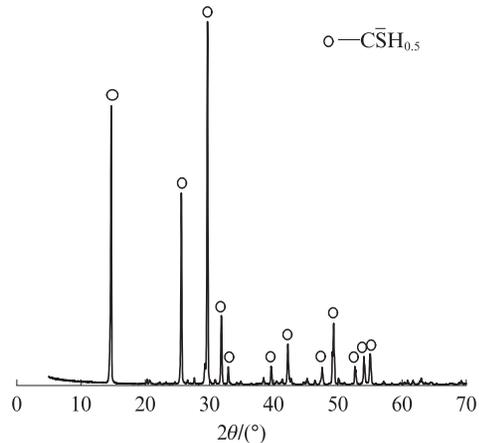


图3 半水石膏 XRD 图谱
Fig. 3 XRD pattern of hemihydrate gypsum

度测试参照 GB/T 29756—2013《干混砂浆物理性能试验方法》,测试龄期为 1、3、7、28 d,测试前 24 h 用高强黏结剂将拉拔铁块黏结在试样成型面上,继续放

置于养护环境下 24 h 后进行测试(测试龄期为 1 d 的试样需在成型 20 h 时脱模并黏结拉拔铁块,到 24 h 时进行测试)。

表 1 铝酸盐水泥和半水石膏的化学组成

Table 1 Chemical compositions of aluminat cement and hemihydrate gypsum

Raw material	Al ₂ O ₃	SO ₃	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Sum
CAC	71.89	0	26.76	0.51	0.34	0.28	0.13	0.02	0.01	0.01	0.01	99.96
HG	1.04	44.52	50.18	0.01	2.76	0.80	0.31	0.05	0.02	0	0.17	99.86

1.2.3 微观性能测试

选择 28 d 抗折、抗压强度测试完毕试样的中间部分,其中压汞(MIP)试样为尺寸不超过 15 mm 的立方体,扫描电镜(SEM)试样为尺寸约 5 mm 宽的新鲜断裂薄片.测试前,将两者分别放入 10 倍于其质量的无水乙醇中浸泡 48 h 后取出并置于真空干燥箱,在 40 °C 下烘至恒重,然后采用型号为 AutoPore Iv 9510 的压汞测试仪和型号为 ZEISS Sigma 300VP 的扫描电镜进行 MIP 和 SEM 测试。

2 试验结果

2.1 新拌砂浆的性能

图 4 显示了砂浆保水率随 HPMC 掺量的变化.由图 4 可见:当 HPMC 掺量仅为 0.2% 时,便可显著提高砂浆保水率;掺量为 0.4% 时,保水率已达 99%;掺量继续增加,保水率维持恒定.图 5 是砂浆流动度随 HPMC 掺量的变化.由图 5 可见,HPMC 会降低砂浆流动度,当 HPMC 掺量为 0.2% 时,流动度降幅很小,随着掺量继续增加,流动度下降明显.图 6 是砂浆稠度随 HPMC 掺量的变化.由图 6 可见,砂浆稠度值随着 HPMC 掺量的增加而逐渐下降,表明其流动性变差,这与流动度测试结果相符,

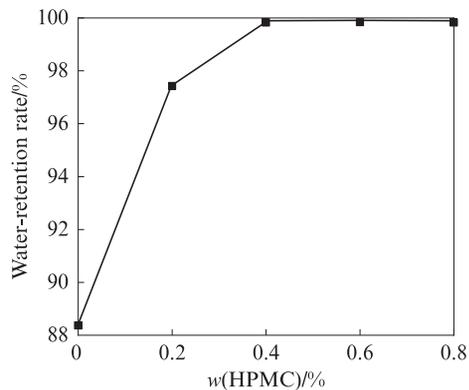


图 4 砂浆保水率
Fig. 4 Water-retention rate of mortars

不同的是砂浆稠度值随着 HPMC 掺量的增加下降越来越缓慢,而砂浆流动度的下降并无明显变缓,这可能是稠度和流动度的测试原理和方法不同所致.保水率、流动度和稠度的测试结果表明,HPMC 对砂浆有极好的保水和增稠作用,且低掺量的 HPMC 可在改善砂浆保水率的同时,不会使其流动度有较大降低。

图 7 是砂浆含气量(体积分数,下同)和湿密度随 HPMC 掺量的变化及其相关性.由图 7(a)可见,HPMC 会显著增大砂浆含气量,当 HPMC 掺量超过

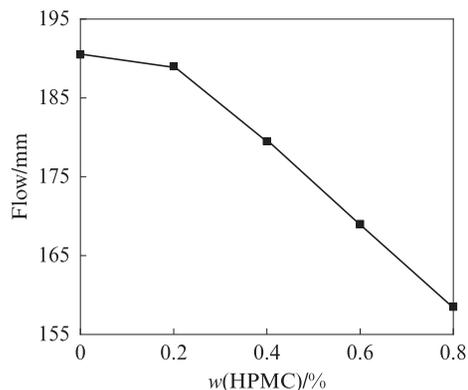


图5 砂浆流动度
Fig. 5 Flow of mortars

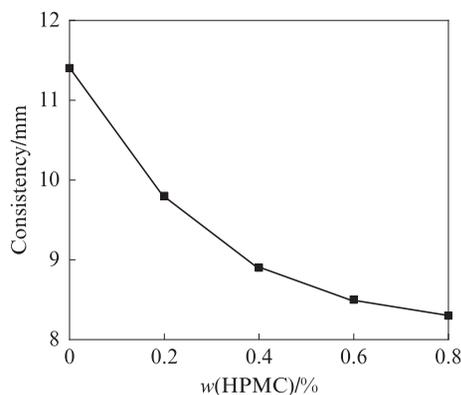
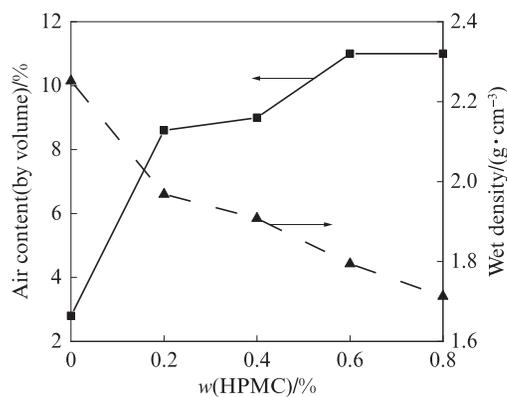


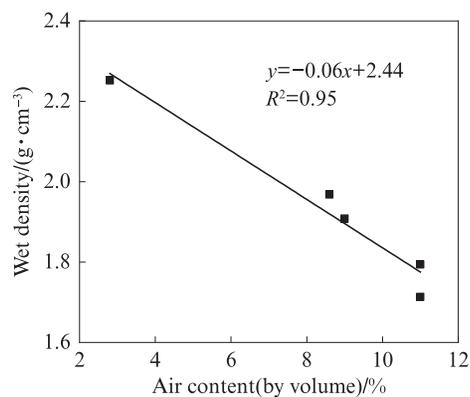
图6 砂浆稠度
Fig. 6 Consistency of mortars

0.6%时,砂浆含气量增加不再明显;与其相反,砂浆湿密度随着 HPMC 掺量的增加持续降低.图7(b)表明砂浆湿密度与含气量呈负相关,线性相关系数 R^2 为 0.95,这说明砂浆湿密度的下降与含气量的增加有

直接关系.砂浆含气量增加的原因可能是纤维素醚具有吸附作用,在浆体内形成的膜结构附着在气泡表面,起到稳定气泡的作用,同时可以使小气泡融合成大气泡^[18].



(a) Air content (by volume) and wet density



(b) Correlation between air content and wet density

图7 砂浆含气量和湿密度及其相关性

Fig. 7 Air content and wet density of mortars and their correlation

图8是砂浆凝结时间随 HPMC 掺量的变化.由图8可见:HPMC 会延长砂浆的初、终凝时间;随着 HPMC 掺量的增加,砂浆初、终凝时间差略微增大,

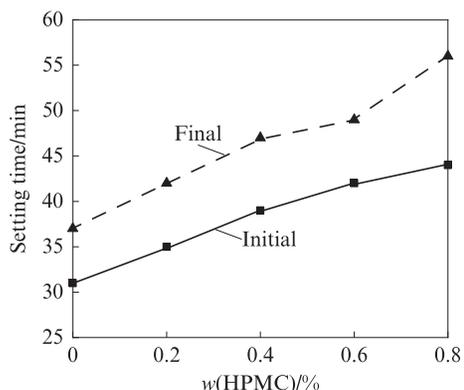


图8 砂浆凝结时间
Fig. 8 Setting time of mortars

此现象可能与纤维素醚会延缓铝酸盐水泥的水化有关^[17].

2.2 硬化砂浆的力学性能

图9、10分别是各组硬化砂浆试样的抗折强度、抗压强度测试结果.由图9、10可见,所有砂浆试样的抗折强度和抗压强度都随龄期延长而增长,这表明 HPMC 并不改变砂浆抗折、抗压强度随时间的发展趋势,但会显著降低砂浆各龄期的抗折强度和抗压强度,且其掺量越高,强度降低效果越明显.而且注意到当 HPMC 掺量为 0.6%、0.8% 时,砂浆试样的 7~28 d 抗折强度增长率仅分别为 7% 和 5%,远低于 12% 这一对比砂浆试样 (HPMC 掺量为 0%) 的相应数值,这说明高掺量的 HPMC 会严重制约砂浆抗折强度发展;抗压强度增长率最高的也是对比砂浆试样.

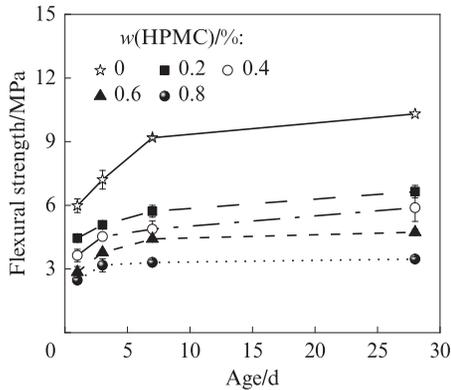


图9 砂浆试样的抗折强度

Fig. 9 Flexural strength of mortar samples

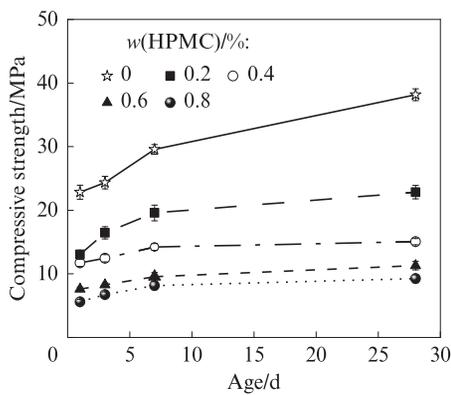


图10 砂浆试样的抗压强度

Fig. 10 Compressive strength of mortar samples

图11是各组硬化砂浆试样的拉伸黏结强度测试结果.由图11可见,HPMC会显著降低砂浆各龄期的拉伸黏结强度.当HPMC掺量分别为0.2%和0.4%或0.6%和0.8%时,相应砂浆试样的28 d拉伸黏结强度非常接近,但掺量低者强度略高,总体上强度随着HPMC掺量的增大而减小.随着龄期的增加,所有砂浆试样的拉伸黏结强度均呈现出先增后降趋势,在所测的4个龄期中,7 d强度最高,且前7 d内强

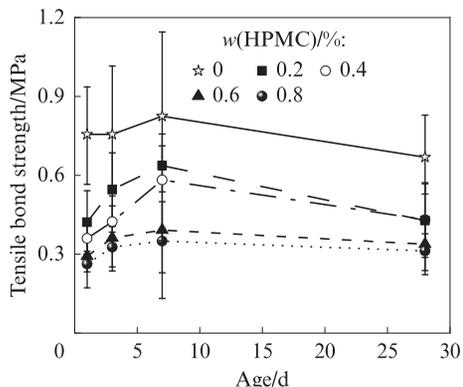


图11 砂浆试样的拉伸黏结强度

Fig. 11 Tensile bond strength of mortar samples

度增长最大的是HPMC掺量较低(0.2%和0.4%)的砂浆试样,而对比砂浆试样和HPMC掺量较高(0.6%、0.8%)的砂浆试样强度增长缓慢,前者可能是因为其1 d强度已经很高了,后者可能是高掺量纤维素醚对水化的较强抑制作用导致^[19-22].对比砂浆试样的28 d拉伸黏结强度低于其1 d强度,但高于0.6 MPa;其余砂浆试样的28 d强度均高于其1 d强度,但低于0.5 MPa.由此可见,HPMC会使砂浆的拉伸黏结强度明显下降.不过,实际工程中可通过复掺乳胶粉或乳液等来增强砂浆的拉伸黏结强度^[23-24].

2.3 微观性能

砂浆的孔隙率和孔结构与砂浆的物理力学性能密切相关.按照砂浆内部孔径大小,可以将孔分为凝胶孔、毛细孔和气孔^[25].凝胶孔为小于10 nm的孔;毛细孔分为孔径为10~50 nm的小毛细孔和孔径为50~1 000 nm的大毛细孔;气孔为孔径大于1 000 nm的孔^[26].

各组硬化砂浆试样的28 d压汞测试结果如表2和图12所示.由表2可见,砂浆孔隙率、平均孔径、总孔体积、中值孔径均随着HPMC掺量的增加而增大,体积密度则随着HPMC掺量的增加而减小.由图12可见,对比砂浆试样的孔径主要集中在50~1 000 nm,中值孔径为275.6 nm,主要为大毛细孔、小毛细孔、凝胶孔,且气孔体积很小.与对比砂浆试样相比,HPMC掺量为0.4%的砂浆试样凝胶孔分布曲线相差不大,但HPMC掺量为0.2%的砂浆试样凝胶孔体积明显减小;HPMC掺量为0.2%、0.4%的砂浆试样中,超过1 000 nm的气孔体积明显增多,且掺量为0.4%时大气孔更多,其中中值孔径为2 799.7 nm,远大于掺量为0.2%时的中值孔径1 369.7 nm. HP MC掺量为0.6%和0.8%的砂浆试样毛细孔体积较对比砂浆试样略有减小,但气孔体积显著增多,气孔体积和孔径远大于其他砂浆试样,且两者相比,孔径分布曲线相差不大,中值孔径均达到了12 μm以上.综上所述,HPMC会增大砂浆的孔隙率、孔体积、平均孔径和中值孔径,降低体积密度;掺量越高,砂浆的气孔孔径和体积越大;HPMC不会对砂浆的凝胶孔和毛细孔产生较大影响.

各组硬化砂浆试样的28 d SEM测试结果如图13所示.由图13可见,掺入HPMC的砂浆试样明显呈现出气孔,随着HPMC掺量的增加,气孔的数量和面积增多,这与压汞测试结果相符.在气孔周围几乎是棒状的AFt,原因在于气孔处空间大,利于AFt成长和保持形貌特征.

表2 砂浆试样的28 d压汞测试结果统计
Table 2 Statistics of MIP results of 28 d mortar samples

$w(\text{HPMC})/\%$	Porosity(by volume)/%	Average pore size/ nm	Median pore size/nm	Total pore volume/ ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	Volume density/ ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)
0	12.9	98.0	275.6	0.06	2.08
0.2	22.9	193.6	1 369.7	0.13	1.81
0.4	28.0	232.1	2 799.7	0.16	1.70
0.6	34.3	276.3	12 952.5	0.22	1.59
0.8	34.3	277.1	12 326.8	0.22	1.58

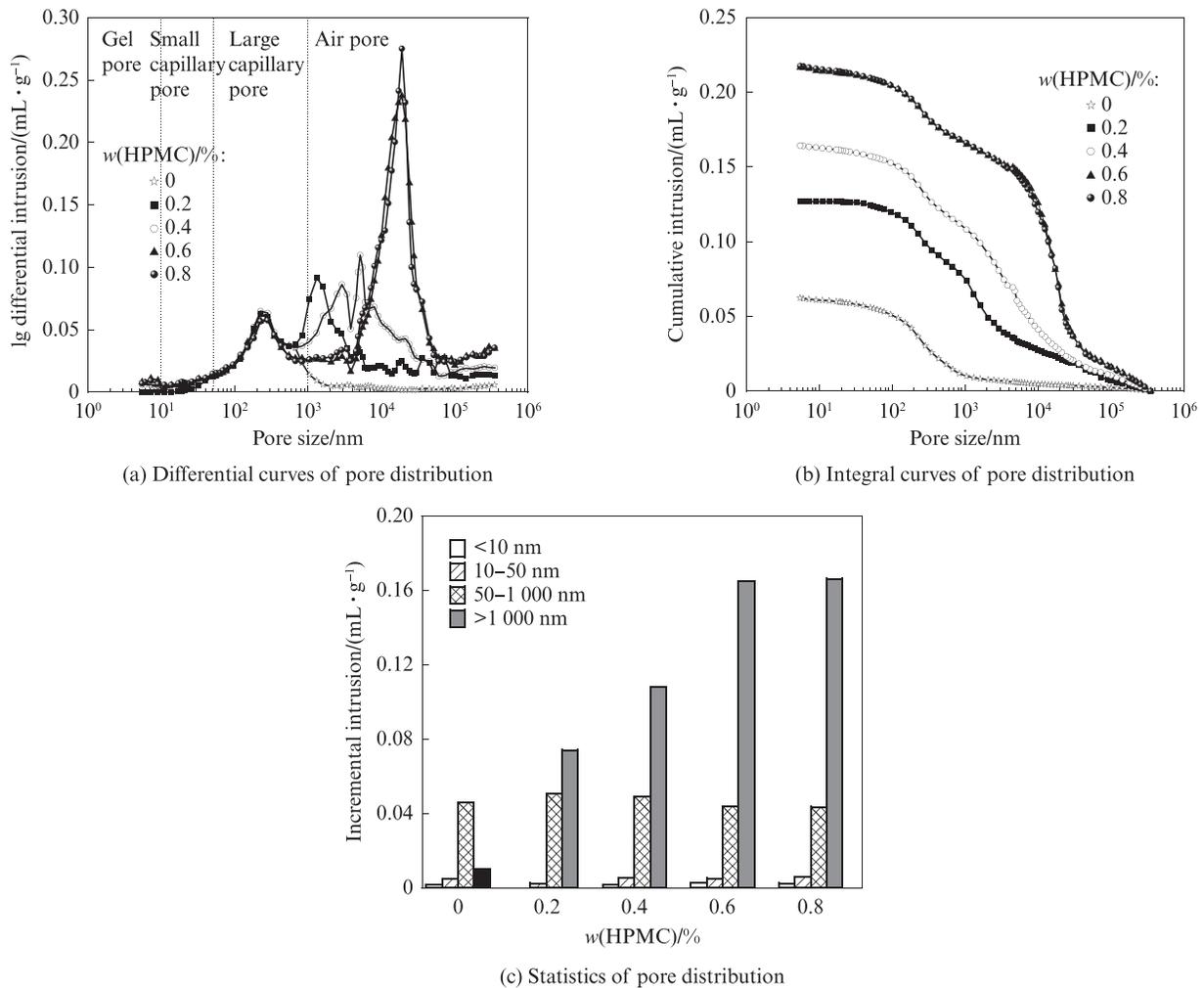


图12 砂浆试样的28 d孔径分布微分曲线、积分曲线及分布统计
Fig. 12 Differential curve, integral curve and statistics of pore distribution of 28 d mortar samples

在非气孔区,对比砂浆试样中部分AFt呈针棒状,较为密集地聚集在一起;HPMC掺量为0.2%的砂浆试样中,AFt与其他水化产物明显交织,尺寸较对比砂浆试样略显粗大,低倍数下不易看到明显的AFt形貌;HPMC掺量为0.4%的砂浆试样中,低倍数下可清晰观察到粗大和短小的AFt存在;HPMC掺量为0.6%的砂浆试样中,AFt形态与掺量为0.4%

时相似;HPMC掺量为0.8%的砂浆试样中还可可见少量板状AFm与其他水化产物交织在一起. HPMC使AFt形貌产生差异的原因可能在于其能增大孔隙液黏度,从而降低水化反应速率^[17,27],使得钙矾石缓慢生成,故改性砂浆中可形成更加粗大的钙矾石;但HPMC掺量过高时可能覆盖在钙矾石表面,从而抑制钙矾石的生成^[28-29].

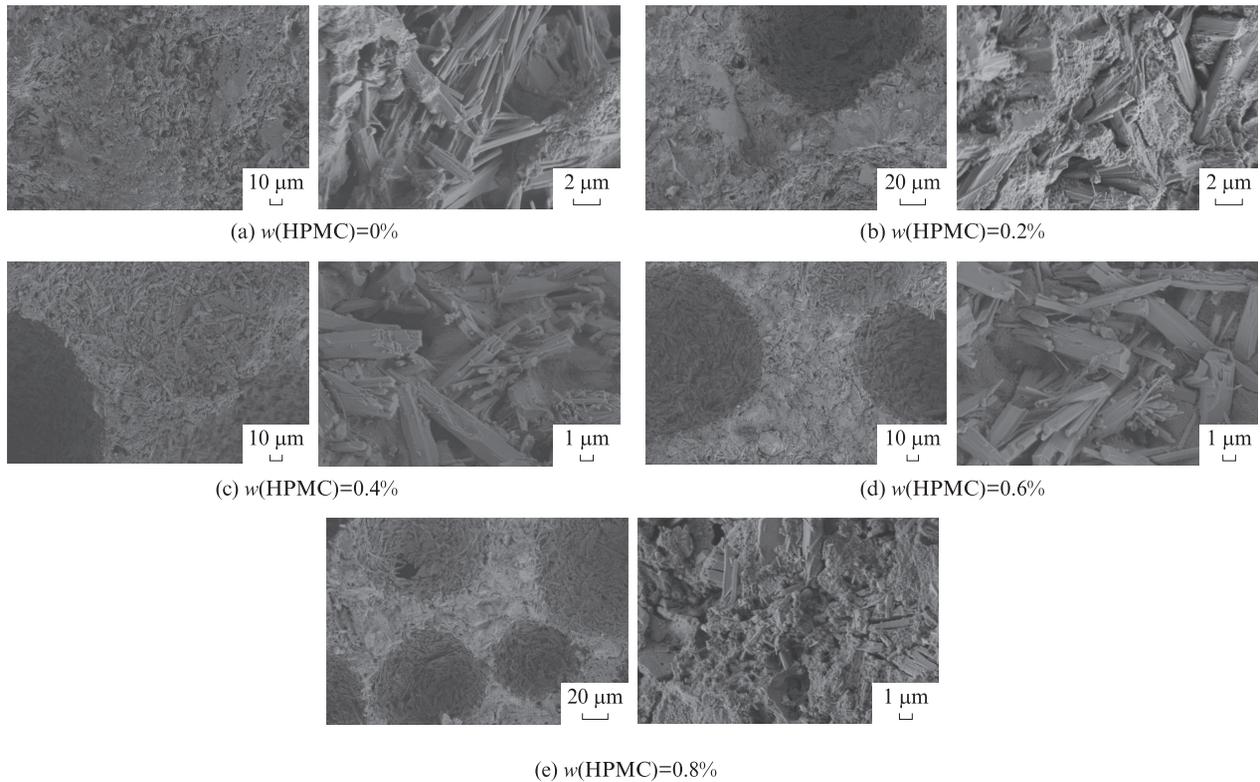


图13 砂浆试样的28 d SEM照片
Fig. 13 SEM images of 28 d mortar samples

3 分析与讨论

图14显示了硬化砂浆试样的体积密度与其孔隙率的相关性.由图14可见,由于HPMC增大了新拌砂浆含气量,导致砂浆硬化后孔隙率增加,进而引起硬化砂浆体积密度下降,两者呈负相关关系,线性相关系数 R^2 为0.99.图15是硬化砂浆试样的28 d抗折强度、抗压强度与其体积密度的相关性.由图15可见,2种强度均与硬化砂浆的体积密度呈正相关关系,线性相关系数 R^2 分别为0.85和0.99,可见HPMC导致砂浆的抗折、抗压强度下降与其增大砂浆孔隙率、降低硬化砂浆体积密度呈线性相关关系.

有研究认为,影响砂浆与基材黏结界面黏结强度的主要因素为砂浆的流变性能,流变性能决定了砂浆对基材的润湿能力,这是砂浆与基材产生有效黏结的关键^[30-32].本试验中拉伸黏结强度测试时,对比砂浆试样的破坏模式为黏结破坏或黏结破坏与内聚破坏参半,且内聚破坏部分砂浆的劈裂断裂在靠近黏结界面处;改性砂浆试样的破坏模式均为内聚破坏,且随着HPMC掺量的增加,内聚破坏断裂位置逐渐远离黏结界面,这表明改性砂浆与基材黏结界面的黏结强度大于砂浆的内聚黏结强度.HPMC虽然降低了砂浆稠度值导致其润湿能力变差,但提高

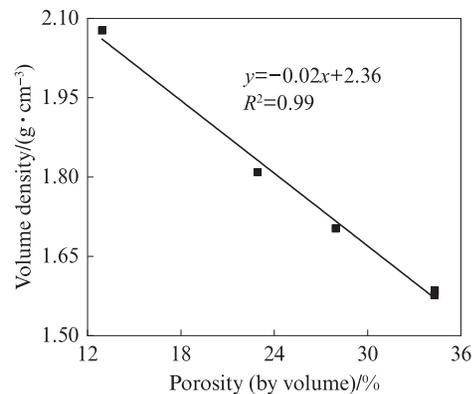


图14 硬化砂浆试样的体积密度与孔隙率的相关性
Fig. 14 Correlation between volume density and porosity of hardened mortar samples

了砂浆的保水能力,可使界面处水泥水化更充分,同时由于其增加了砂浆柔韧性,在一定程度上可以加强界面黏结.只不过掺入HPMC后,砂浆内聚黏结强度降低,于是发生了内聚破坏,这与硬化砂浆体积密度随着HPMC掺量的增加而下降这一趋势相对应.图16给出了硬化砂浆试样的28 d拉伸黏结强度与其体积密度的相关性.由图16可见,两者呈正相关,线性相关系数 R^2 为0.94,这似乎佐证了硬化砂浆体积密度的下降导致其内聚黏结强度下降,进而使拉伸黏结强度降低这一推论.

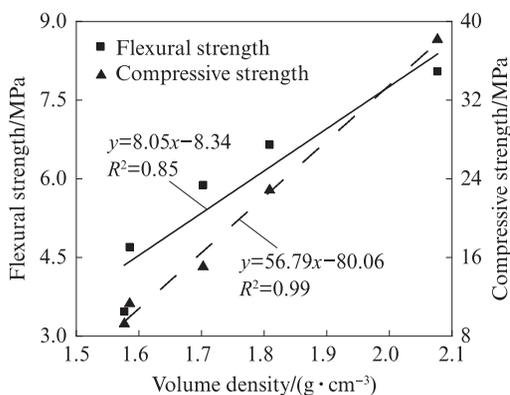


图 15 硬化砂浆试样的 28 d 抗折、抗压强度与体积密度的相关性

Fig. 15 Correlation between flexural strength, compressive strength at 28 d and volume density of hardened mortar samples

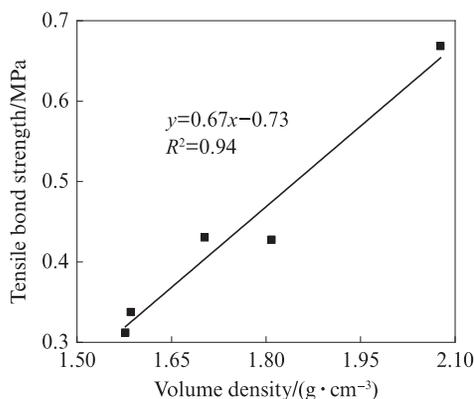


图 16 硬化砂浆试样的 28 d 拉伸黏结强度与体积密度的相关性

Fig. 16 Correlation between tensile bond strength at 28 d and volume density of hardened mortar samples

4 结论

(1) HPMC 能提高砂浆的保水率、增大含气量、延长凝结时间, 改变流动度和稠度值、降低体积密度, 且 HPMC 掺量越大, 影响越显著; 掺入 HPMC 可明显提高新拌砂浆的可塑性, 增加可操作时间。

(2) HPMC 能降低砂浆的抗折强度、抗压强度和拉伸黏结强度, 且掺量越大降低效果越显著。砂浆强度的降低归因于 HPMC 能大幅增加砂浆孔隙率和孔径尺寸, 并改变水化产物形态。因而在实际应用时, 应慎重考虑使用 HPMC 对铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆进行改性所带来的两面性。

参考文献:

[1] 彭家惠. 改性高铝水泥水化、硬化机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1999(4): 50-54.

PENG Jiahui. Study on hydration and hardening mechanism of modified high aluminum cement [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1999(4): 50-54. (in Chinese)

[2] GU P, FU Y, BEAUDOIN J J. A study of the hydration and setting behaviour of OPC-HAC pastes [J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(4): 682-694.

[3] SON H M, PARK S, KIM H Y, et al. Effect of CaSO₄ on hydration and phase conversion of calcium aluminate cement [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 40-47.

[4] DAI H, ZHANG S P, JU C L, et al. Influence of calcium sulfate varieties on properties of calcium aluminate cement-based self-leveling mortars [J]. Key Engineering Materials, 2016, 680: 455-461.

[5] ZHANG S P, XU X X, MEMON S A, et al. Effect of calcium sulfate type and dosage on properties of calcium aluminate cement-based self-leveling mortar [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 253-262.

[6] 徐玲琳, 王培铭, 张国防, 等. 石膏种类对硅酸盐-铝酸盐混合水泥强度的影响机理 [J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(11): 1499-1506. XU Linglin, WANG Peiming, ZHANG Guofang, et al. Influence mechanism of calcium sulfate variety on strength of Portland cement-calcium aluminate cement blends [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(11): 1499-1506. (in Chinese)

[7] 薛伶俐, 黎红兵, 高云龙. 铝酸盐水泥-半水石膏二元体系饰面砂浆泛白原因分析 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(10): 3213-3216, 3222. XUE Linli, LI Hongbing, GAO Yunlong. Analysis of the reasons for efflorescence performance of decorative mortar based on aluminate cement and gypsum system [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(10): 3213-3216, 3222. (in Chinese)

[8] 王燕谋, 苏慕珍, 路永华. 中国特种水泥 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012. WANG Yanmou, SU Muzhen, LU Yonghua. Special cements of China [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2012. (in Chinese)

[9] 王培铭, 薛伶俐, 朱绘美, 等. 半水石膏对硅酸盐水泥-铝酸盐水泥饰面砂浆泛白的影响 [C] // 第五届全国商品砂浆学术交流会论文集 (5th NCCM). 北京: 化学工业出版社, 2014: 254-258. WANG Pingming, XUE Lingli, ZHU Huimei, et al. The effect of hemihydrate gypsum on efflorescence resistance decorative mortars of the mixed system of Portland cement and calcium aluminate cement [C] // Proceeding of 5th National Conference on Commercial Mortar (5th NCCM). Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 254-258. (in Chinese)

[10] 王培铭, 赵国荣, 张国防. 纤维素醚在新拌砂浆中保水增稠作用及其机理 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(8): 1190-1196. WANG Peiming, ZHAO Guorong, ZHANG Guofang. Mechanism on water retention and thickening of cellulose ethers in fresh mortars [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(8): 1190-1196. (in Chinese)

[11] 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.
- [12] PIERRE A, PERROT A, PICANDET V, et al. Cellulose ethers and cement paste permeability [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 72:117-127.
- [13] 李永鹏, 何锐, 陈拴发, 等. 聚丙烯酰胺与羟乙基纤维素对砂浆性能的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(7):28-31.
LI Yongpeng, HE Rui, CHEN Shuanfa, et al. Effect of polyacrylamide and hydroxyethyl cellulose ether on the performance of the cement mortar [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(7):28-31. (in Chinese)
- [14] 刘斯凤, 王培铭, 徐勇. 纤维素醚对砂浆塑性自由收缩的影响[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(5):674-677.
LIU Sifeng, WANG Peiming, XU Yong. Effect of cellulose ether on plastic free shrinkage of mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(5):674-677. (in Chinese)
- [15] 欧志华, 马保国, 蹇守卫. 非离子纤维素醚改性水泥浆的孔结构[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(1):121-126, 137.
OU Zhihua, MA Baoguo, JIAN Shouwei. Pore structure of cement pastes modified by non-ionic cellulose ethers[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(1):121-126, 137. (in Chinese)
- [16] 张义顺, 李艳玲, 徐军, 等. 纤维素醚对砂浆性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(3):359-362.
ZHANG Yishun, LI Yanling, XU Jun, et al. Influence of cellulose ether on mortar performance [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(3):359-362. (in Chinese)
- [17] WANG Z P, ZHAO Y T, ZHOU L, et al. Effects of hydroxyethyl methyl cellulose ether on the hydration and compressive strength of calcium aluminate cement[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 140(2):545-553.
- [18] LAWRENCE P, RINGOT E, HUSSON B. About the measurement of the air content in mortar [J]. *Materials and Structures*, 1999, 32(222):618-621.
- [19] QU X L, ZHAO X G. Influence of SBR latex and HPMC on the cement hydration at early age[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2017, 6(C):213-218.
- [20] 马保国, 欧志华, 蹇守卫, 等. HEMC对水泥浆早期水化产物形成历程的影响[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(6):798-802.
MA Baoguo, OU Zhihua, JIAN Shouwei, et al. Influence of HEMC on the formation process of hydration products in cement pastes at early ages[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(6):798-802. (in Chinese)
- [21] 张国防, 王培铭. 羟乙基甲基纤维素对水泥水化的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(3):369-373.
ZHANG Guofang, WANG Peiming. Effect of hydroxyethyl methyl cellulose on cement paste hydration[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2009, 37(3):369-373. (in Chinese)
- [22] 欧志华, 毛泰威, 沈燕华, 等. 纤维素醚对不同水泥和单矿水化热的影响[J]. *硅酸盐通报*, 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)
- [23] 农金龙. 聚合物改性水泥基黏结复合材料的黏结性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014.
NONG Jinlong. Study on bonding performance of polymer-modified cement-based bonding composite[D]. Changsha:Hunan University, 2014. (in Chinese)
- [24] ZHAO G R, WANG P M, ZHANG G F. Effect of latex film distributions on flexibility of redispersible polymer powders modified cement mortar evaluated by SEM [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1129:331-338.
- [25] POWERS T C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1946, 41(1):1-6.
- [26] FAURE P F, CARE S, MAGAT J, et al. Drying effect on cement paste porosity at early age observed by NMR methods[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29:496-503.
- [27] 张国防, 王培铭. 羟乙基甲基纤维素影响水泥浆体微观结构的研究[C]//第三届全国商品砂浆学术交流会议论文集. 武汉:化学工业出版社, 2009:144-151.
ZHANG Guofang, WANG Peiming. Effects of hydroxyethyl methyl cellulose on the microstructure of cement pastes [C]// *Proceeding of 3th National Conference on Commercial Mortar*. Wuhan:Chemical Industry Press, 2009:144-151. (in Chinese)
- [28] ZHANG G F, HE R, LU X P, et al. Early hydration of calcium sulfoaluminate cement in the presence of hydroxyethyl methyl cellulose[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 134(3):1429-1438.
- [29] ZHANG G F, ZHAO J B, WANG P M, et al. Effect of HEMC on the early hydration of Portland cement highlighted by isothermal calorimetry [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, 119(3):1833-1843.
- [30] CARASEK H, JAPIASSUACUTE P, CASCUDO O, et al. Bond between 19th century lime mortars and glazed ceramic tiles [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 59:85-98.
- [31] STOLZ C M, MASUERO A B, PAGNUSSAT D T, et al. Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength of rendering mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 128:298-307.
- [32] WETZEL A, ZURBRIGGEN R, HERWEGH M. Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(5):327-338.