

文章编号:1007-9629(2025)03-0236-08

HPMC 对 PC-CSA 复合浆体流变性的影响及机理分析

郭川川^{1,2}, 陈宁³, 王茹^{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. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 研究了高低黏度羟丙基甲基纤维素(HPMC)对硅酸盐水泥(PC)-硫铝酸盐水泥(CSA)复合浆体流变性的影响及其机理。结果表明: HPMC 在水泥颗粒表面的吸附及其对孔溶液动力黏度的提高阻碍了颗粒的迁移, 进而增加了复合浆体的初始表观黏度; HPMC 掺量越大, 初始表观黏度越高, 且高黏度 HPMC 改性浆体的初始表观黏度比低黏度 HPMC 改性浆体更高; 随着时间的推移, HPMC 逐渐吸水膨胀, 导致其改性浆体的表观黏度也逐渐增大; HPMC 的吸水效果受孔溶液性质的影响, 低黏度、低掺量 HPMC 改性浆体孔溶液的动力黏度较小, 溶液在孔隙中的传输阻力也较小, HPMC 更容易吸水; 高黏度、高掺量 HPMC 改性浆体孔溶液的动力黏度较大, 溶液在孔隙中的传输阻力也随之增大, 从而阻碍了 HPMC 的吸水。

关键词: 硅酸盐水泥; 硫铝酸盐水泥; 羟丙基甲基纤维素; 流变性; 机理分析

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.006

Effect of HPMC on Rheological Properties of PC-CSA Composite Pastes and Its Mechanism Analysis

GUO Chuanchuan^{1,2}, CHEN Ning³, WANG Ru^{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. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The effect and its mechanism of high and low viscosity hydroxypropyl methylcellulose(HPMC) on the rheological properties of Portland cement(PC)-calcium sulfoaluminate cement(CSA) composite pastes were investigated. The results indicate that the adsorption of HPMC on the surface of cement particles and its enhancement in the dynamic viscosity of the pore solution hinder particle migration, thereby increasing the initial apparent viscosity of the composite pastes. The higher the dosage of HPMC, the higher the initial apparent viscosity. The initial apparent viscosity of the composite paste modified with high viscosity HPMC is even higher than that of low viscosity HPMC. Over time, HPMC gradually absorbs water and swells, resulting in a gradual increase in the apparent viscosity of the modified pastes. The water absorption capacity of HPMC is affected by the properties of the pore solution. For low viscosity and low dosage HPMC-modified paste, the dynamic viscosity of the pore solution is low, resulting in smaller transport resistance to solution within the pores, making it easier for HPMC to absorb water. However, the dynamic viscosity of the pore solution in a high viscosity and high dosage HPMC-modified paste is relatively high,

收稿日期: 2024-03-22; 修订日期: 2024-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51872203); 中德科学中心资助项目(GZ 1290)

第一作者: 郭川川(1988—), 男, 河南浚县人, 同济大学博士生. E-mail: guochchch@126.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

leading to increased transport resistance to solution within the pores, which hinders the water absorption of HPMC.

Key words: Portland cement; calcium sulfoaluminate cement; hydroxypropyl methylcellulose; rheological property; mechanism analysis

近年来,硅酸盐水泥(PC)-硫铝酸盐水泥(CSA)作为一种复合胶凝材料受到了广泛的关注,这主要源于二者的复合能够充分发挥各自的特点,比如缩短凝结时间、增加早期强度、抵抗收缩、优化耐久性以及降低碳排放等^[1-3].但其明显的缺点是和易性下降,这主要是由于CSA的快速水化.纤维素醚(CE)在改善水泥基材料和和易性方面有其独特的优势,它在新拌水泥基材料中主要起到保水、增稠、引气以及延缓凝结的作用.关于CE在水泥基材料中的作用及机理,国内外学者已经进行了广泛研究,并取得了一系列成果^[4-9].在增稠方面,国内外学者^[7,10]研究发现:CE的保水和增稠作用具有一致性,即在增大新拌水泥基材料稠度的同时,也提高了其保水性能;具有良好保水性能的水泥基材料,其稠度也能保持一定的时间.关于增稠机理,内在因素是CE本身具有一定的黏度,而外在因素则归因于CE与水、水泥颗粒之间的相互作用.Paiva等^[11]研究了CE对砂浆流变性的影响,发现CE含量的增加能够提升浆体的黏度.随后该团队在另一篇文献中报道了CE使砂浆增稠的原因是CE增加了物料颗粒之间的内聚力,能有效将水分子固定在其结构内^[12].Brumaud等^[8]发现,当掺加CE后,纯水泥颗粒之间的范德华力消失,这是由于水泥表面吸附的CE分子所产生的排斥力造成的,且CE的掺入使得水泥浆体中产生了新的交互网络,这个网络的形成源于吸附的CE分子对水泥颗粒的桥接.然而,这些研究主要关注CE对纯硅酸盐水泥基材料静态流变性的影响,关于CE改性PC-CSA复合胶凝体系流变性的系统研究则相对较少.为此,本文研究了羟丙基甲基纤维素(HPMC)对PC-CSA复合胶凝材料流变性的影响及其机理,以期对相关领域的研究和应用提供参考.

1 试验

1.1 原料及配合比

胶凝材料为P·II 52.5R硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥和无水石膏(CS),其氧化物组成(质量分数,文中涉及的掺量、比值均为质量分数或质量比)见表1.黏度为4 000、40 000 mPa·s的HPMC,分别记为HPMC-L和HPMC-H.减水剂为聚羧酸减水剂,以胶凝材料的总质量计,其掺量为0.25%.试验用水为去离子水.

表1 PC、CSA和CS的氧化物组成

Material	Unit: %				
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃
PC	72.2	12.9	4.5	4.3	2.4
CSA	43.1	7.7	1.9	33.6	9.3
CS	42.1	0.1			57.7

净浆水胶比为0.4,胶凝材料PC、CSA和CS的质量比为92.50:7.50:0.75.设置HPMC的掺量 w_{HPMC} 为0.1%、0.3%,采用高黏度和低黏度HPMC制备的对应样品分别记为H1、H3和L1、L3.为了对比,制备了不掺HPMC($w_{\text{HPMC}}=0\%$)的样品,记为R.

1.2 样品制备

样品的制备过程为:称量一定质量的减水剂,在搅拌锅里与水混合均匀;将拌和好的干混材料倒入搅拌锅搅拌,先慢速搅拌120 s、停15 s、再快速搅拌120 s.得到的浆体用于流变性及¹H低场核磁共振测试.

为方便得到更多孔溶液,将水胶比增大为5.0.采用高速离心机制备浆体的孔溶液,首先将水泥与水充分混合5 min,随后将离心管放入离心机离心5 min,转速设定为4 000 r/min,旋转后取其上清液作为孔溶液,测定其表面张力和动力黏度.

1.3 试验方法

1.3.1 流变性测试

流变性测试参考课题组前期研究^[13]和GB/T 10247—2008《粘度测量方法》.当水与胶凝材料静置时间 $\theta=7$ min时,开始第1次流变测试,测试持续时间为120 s;当 $\theta=15$ min时,进行第2次测试;接着每隔15 min测试1次,直至1 h,停止试验.

1.3.2 表面张力及动力黏度测试

孔溶液表面张力参照GB/T 8077—2023《混凝土外加剂匀质性试验方法》,采用上海衡平BZY-2全自动界面张力仪进行测试.

孔溶液动力黏度的测试参照GB/T 265—1988《石油产品运动黏度测定法和动力黏度计算法》,采用毛细管内径为1 mm的乌氏黏度计,测试孔溶液的流出时间.孔溶液的动力黏度 η_t 为:

$$\eta_t = \rho_t c \theta_t \quad (1)$$

式中: ρ_t 为样品在测定温度 t 下的密度, g/cm^3 ; c 为黏度计常数,其值为 $0.1076 \text{ mm}^2/\text{s}^2$; θ_t 为样品在测定温度 t 下的流出时间,s.

1.3.3 ^1H 低场核磁共振测试

采用 ^1H 低场核磁共振仪CPMG脉冲序列测定氢质子的横向弛豫时间 T_2 。仪器永磁体磁场为0.28 T,质子共振频率为11.9 MHz。浆体拌制完成后立即倒入高度60.0 mm、直径27.4 mm的玻璃瓶中,控制浆体高度在20 mm以下,质量为 (14.00 ± 0.05) g,密封后即放入核磁共振管中,分别测试浆体静置15、30、45、60 min的弛豫信号,将采样数据进行反演得到浆体横向弛豫时间的分布情况。

2 结果与讨论

2.1 HPMC对浆体流变性的影响

样品表观黏度随静置时间的变化见图1(图中 γ 为剪切速率)。由图1可见:样品R、L1和H1初始($\theta=7$ min)表观黏度基本接近0 Pa·s;随着HPMC掺量的

增加,样品L3和H3的表观黏度在低剪切速率($\gamma < 10 \text{ s}^{-1}$)下出现剪切变稀的行为,样品H3的剪切变稀行为更加明显;随着剪切速率的增加($\gamma > 10 \text{ s}^{-1}$),样品的表观黏度趋于稳定,样品H3的表观黏度高于样品L3。这说明HPMC的掺入使得PC-CSA复合浆体在低剪切速率下呈现剪切变稀的行为,且HPMC掺量越高、黏度越大,剪切变稀行为越明显;但在高剪切速率下,其表观黏度逐渐趋于稳定,且HPMC掺量越高、黏度越大,PC-CSA浆体的表观黏度越大。另外,随着时间的推移,不同黏度、不同掺量HPMC改性样品的表观黏度也出现了不同程度的变化:样品R和L1的表观黏度随时间基本没有太大变化;样品H1的表观黏度随时间的延长略有增大;而样品L3和H3的表观黏度出现了明显的增长,且样品L3的表观黏度增长幅度高于样品H3。

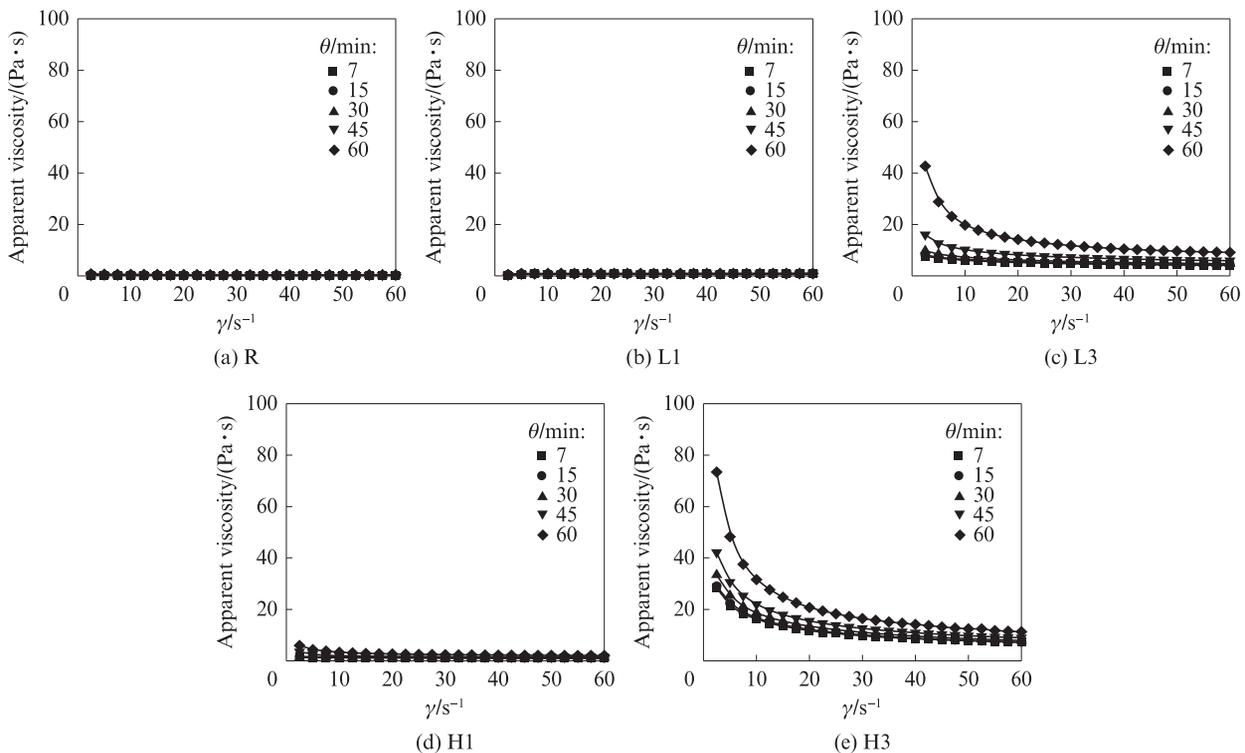


图1 样品表观黏度随静置时间的变化

Fig. 1 Change of apparent viscosity of samples with resting time

需要说明的是,在实际施工过程中,为了避免因设备剪切速率而导致的复合浆体表观黏度不稳定现象,一般选择较高的剪切速率以获取稳定表观黏度的浆体,因此本文选择高剪切速率下的剪切应力 τ 进行分析。为了量化样品在不同静置时间下的流变行为,给出了其高剪切速率下的剪切应力,结果见图2。由图2可见,样品的剪切应力随剪切速率的增加呈现直线上升趋势,且这种上升趋势受HPMC黏度和掺量的影响展现出不同的变化过程。

为了更直接地说明HPMC对浆体流变性的影响,引入宾汉姆模型来拟合剪切应力和剪切速率的关系。宾汉姆模型的数学表达式为:

$$\tau = \tau_0 + \eta\gamma \quad (2)$$

式中: τ_0 为屈服应力,Pa; η 为塑性黏度,Pa·s。

依据宾汉姆模型,样品在不同静置时间下剪切应力的拟合结果见图2。由图2可见,剪切应力的拟合结果与浆体流变数据有很好的对应性。在此基础上可以得到样品的屈服应力和塑性黏度随静置时间的

变化,结果见图3.由图3可见,在相同静置时间下,样品的屈服应力和塑性黏度随着HPMC掺量的增加逐渐变大;在相同掺量下,HPMC-H改性样品的屈服应力和塑性黏度高于HPMC-L改性样品;随着静置时间的延长($\theta \leq 60$ min),样品R和L1的屈服应力和塑

性黏度并没有太大的变化,样品H1略有增加,样品L3和H3的增加幅度较为明显,但样品L3的增加幅度要高于样品H3.综上,HPMC的掺入影响了PC-CSA复合浆体的屈服应力和塑性黏度,这可能源于HPMC、水泥颗粒和水之间的相互作用.

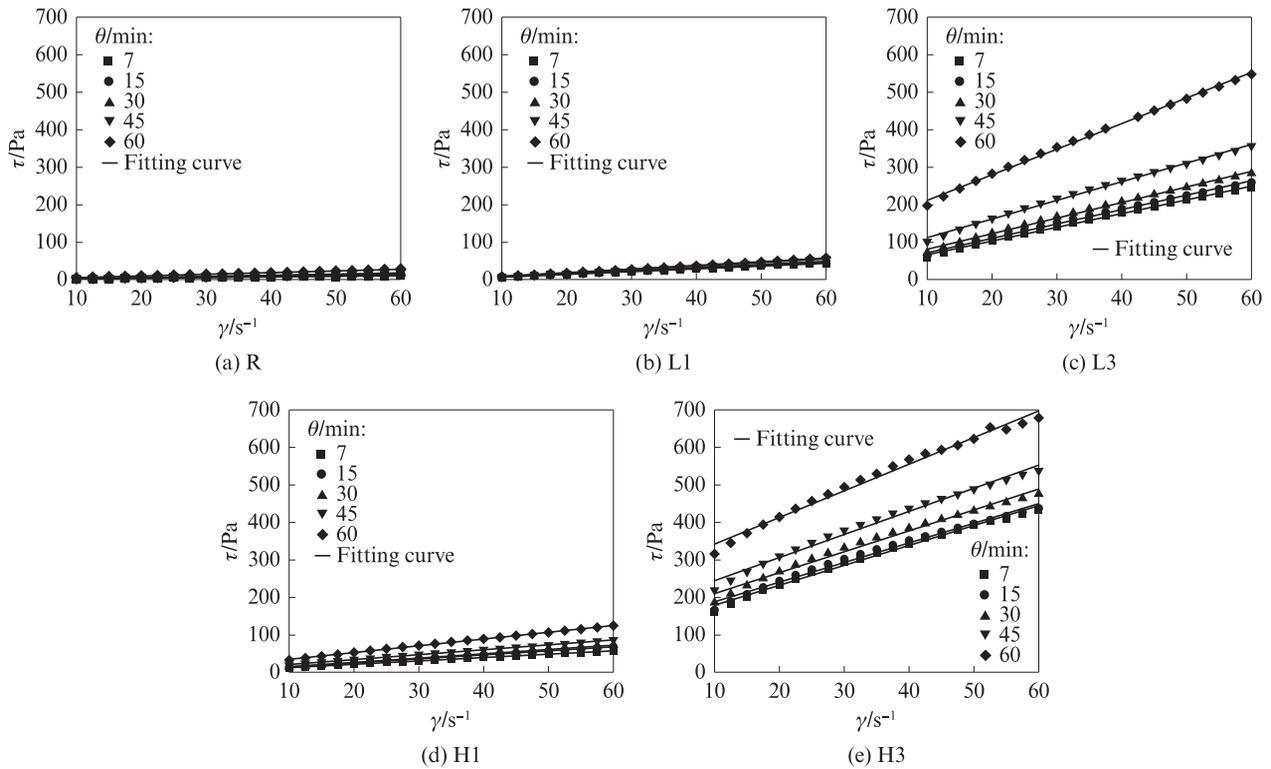


图2 样品在不同静置时间下剪切应力的拟合结果
Fig. 2 Fitting results of shear stress of samples at different resting time

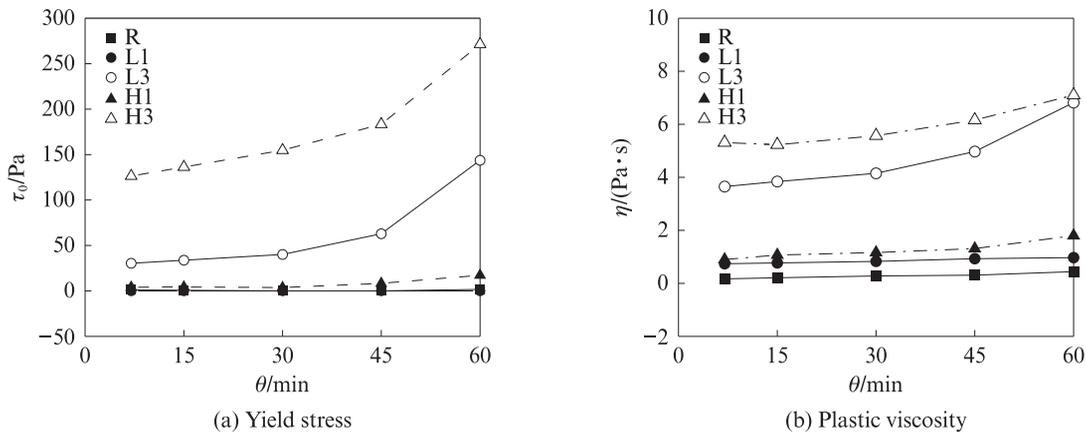


图3 样品屈服应力和塑性黏度随静置时间的变化
Fig. 3 Variation of yield stress and plastic viscosity with resting time for samples

在本研究中,由于样品R在前60 min的屈服应力和塑性黏度并没有太大改变,这说明复合体系水泥颗粒在前60 min发生水化反应的程度并不深,可能更多的只是溶解.另外,较多文献^[5-6,14-15]均报道过CE能够明显延缓水泥的水化,因此推断HPMC改性样品在前60 min发生水化反应的可能性也不大.也

正因为此,本文可以忽略水泥水化对样品流变性的影响,取而代之的是需要考虑HPMC对PC-CSA复合浆体的物理作用.通常情况下,新拌浆体的流变性与其内部水的分布状态及含量有关.进一步地,当水与水泥搅拌形成稳定浆体后,浆体可以看作是由反应物和少量水化产物组成的悬浮体系,静电吸引、热

运动和范德华力等潜在的相互作用力在该体系中共存,使浆体内部的物质絮凝成各种团簇网络结构,因此浆体可以看成是由絮凝结构和絮凝结构之间的孔隙(液)组成.在这种情况下,当CE存在时,其可通过物理效应改变浆体的絮凝结构以及絮凝结构之间的孔隙(液),进而影响浆体的流变性.¹H低场核磁共振测试可以监测到水泥基材料中水的分布状态及半定量其含量^[13,16].因此,下文首先采用¹H低场核磁谱来表征胶凝体系中水的分布状态,再讨论HPMC对孔

溶液性质的影响.

2.2 HPMC对浆体中水分分布状态的影响

样品在不同静置时间下的 T_2 分布图见图4.由图4可见:(1)样品R产生了4个弛豫信号峰. $T_2=0.1$ ms处的峰为凝胶水峰或层间结合水峰,此峰与凝胶的生成有关^[16],在水与水泥接触的较短时间内产生,可能只发生在水泥颗粒的表面,含量较少,随后在较长时间内不再发生明显变化,直至诱导期结束; $T_2=1.0$ ms处的峰为转化水峰; $T_2=8.0$ ms左右的主

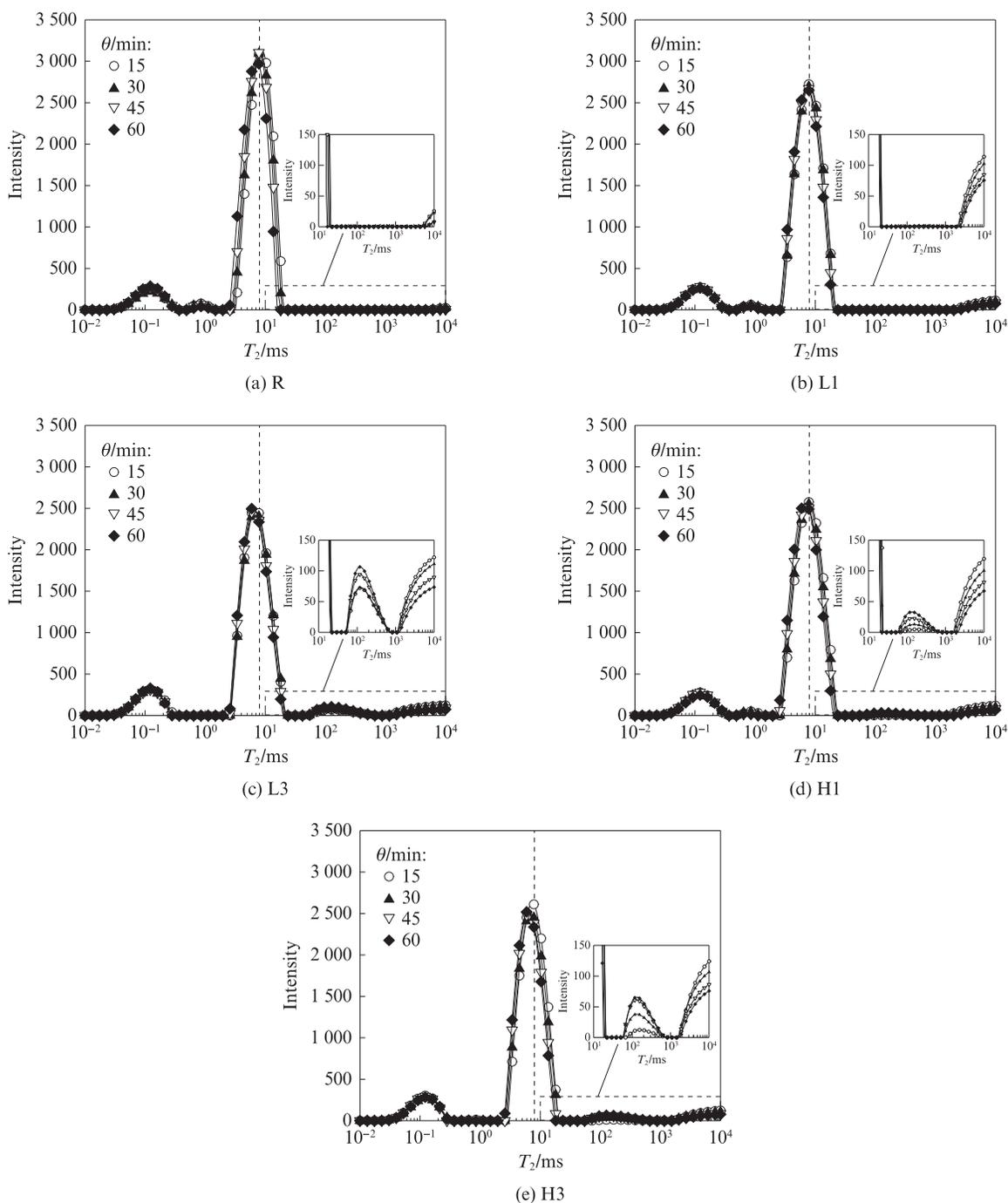


图4 样品在不同静置时间下的 T_2 分布图

Fig. 4 T_2 distribution diagrams of samples at different resting time

峰为絮凝结构水峰;接近 $T_2=10\ 000.0$ ms 处的峰是自由水峰^[16]. 随着时间的推移,样品 R 的主峰(絮凝结构水峰)强度在前 60 min 略有减小,可能在此阶段只涉及到水泥矿物的溶解以及极少量凝胶的产生. 关于 $T_2=10\ 000.0$ ms 处的自由水峰,它可能是由聚羧酸减水剂的添加导致的. 聚羧酸减水剂是一种表面活性剂,它能够使被水泥颗粒包裹的水释放出来一部分,也可以认为这部分水是表面活性剂在与水泥颗粒竞争水的过程中被释放出来的自由水,但这部分水会逐渐参与水泥颗粒的分散或产生泌水现象,因此该峰的峰强逐渐降低.(2)当向体系中加入 HPMC 时,各样品的主峰强度相比样品 R 均出现了明显的降低($\theta=15$ min). 一般情况下,峰强度的降低或峰面积的减少表示此类水含量降低^[4],因此,HPMC 的掺入降低了絮凝结构水的含量. HPMC 的掺入使得样品 L1、L3、H1 和 H3 在 $T_2=10\ 000.0$ ms 处均出现了比较强的自由水峰,这说明 HPMC 的掺入使得部分絮凝结构水转化成了自由水,这可能与 HPMC 在水泥颗粒表面的吸附有关. Nguyen 等^[17]认为 CE 在水泥颗粒上存在 4 种吸附机理,分别为氢键、化学络合、憎水以及静电作用. 当 CE 吸附在水泥颗粒表面时,水泥颗粒所占据的水分子容易被释放出来成为自由水. 不仅如此,随着时间的推移,该自由水峰的面积在逐渐减小. 另外,HPMC 的掺入使得 $T_2=100.0$ ms 左右处出现了 1 个新峰,该峰被认为是 CE 的吸水峰^[4,18-20],且此吸水峰的峰面积随着时间的推移逐渐增大,其增加幅度受 HPMC 掺量和黏度的影响.

为了便于分析,绘制了 HPMC 吸水峰积分强度(峰面积)随静置时间的变化情况,结果见图 5. 由图 5 可见:样品 L3、H1 和 H3 在 $\theta=15$ min 时的吸水峰峰面积均大于零,说明 HPMC 在前 15 min 已经吸收了一定的水;对于 $\theta=60$ min 内的吸水量,样品中 HPMC 的相对吸水量(HPMC 的吸水峰峰面积)大小排序为 R(面积为 0) $<$ L1 $<$ H1 $<$ H3 $<$ L3. 可见相同黏度 HPMC 的掺量越大,HPMC 的吸水量越大;当 HPMC 掺量相同时,样品 H1 中 HPMC 的吸水量大于样品 L1,但样品 H3 中 HPMC 的吸水量小于样品 L3. 已有研究^[18,21]表明,CE 的吸水会产生溶胀现象,使其体积增大,在这个过程中,浆体中粒子的迁移所受阻力也增大,从而导致新拌浆体的屈服应力和黏度也随之增大,这是 CE 改性 PC-CSA 复合浆体屈服应力和黏度随时间增加的根本原因.

2.3 HPMC 对孔溶液性质的影响

HPMC 既有表面活性剂的性质又属于黏度改性剂,其掺入很大可能将改变新拌浆体中孔溶液的性质,

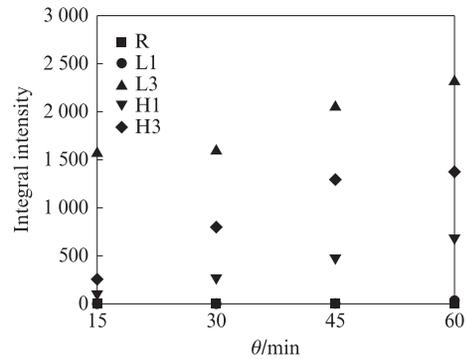


图5 HPMC吸水峰积分强度随静置时间的变化

Fig. 5 Change of HPMC water absorption peak integral intensity with resting time

质,比如表面张力和动力黏度. 而对于多孔介质,溶液在孔隙中的迁移速率可能受到孔溶液表面张力和动力黏度的影响,CE具有表面活性剂的性质,它能够降低孔溶液的表面张力,使得浆体在搅拌的过程中容易引入气泡. 在这种情况下,CE在气孔界面积累,从而可以稳定气泡^[22-23]. 这些气泡的存在会细化甚至阻塞孔隙,使得孔隙中水的迁移变得困难,进而影响到CE的吸水效果. CE吸水产生的溶胀是复合胶凝体系流变性随时间变化的直接原因,因此表面张力的改变是影响浆体流变性的原因之一. 另外,溶液动力黏度的提高增加了水分迁移的阻力,也会影响浆体的流变性.

为此,测试并计算了孔溶液的表面张力和动力黏度,结果见图 6. 由图 6 可见:HPMC 的掺入降低了孔溶液的表面张力,但随着 HPMC 掺量的增大其变化不明显;孔溶液的表面张力受 HPMC 黏度的影响,HPMC-L 改性样品的孔溶液表面张力低于 HPMC-H 改性样品. HPMC 对孔溶液表面张力的降低源于其分子结构中包含亲水基团和憎水基团,当 HPMC 溶解到孔溶液中时,部分憎水基团会分散至液体表面,朝向空气,这种情况下会降低液体的表面张力. HPMC-L 对表面张力的降低程度高于 HPMC-H,这可能是因为分子量低的分子更容易在溶液中迁移,更容易抵消水表面形成的张力. 含 HPMC 孔溶液表面张力较低,使得样品更容易引入气泡,气泡的存在会阻碍孔溶液的迁移. 一般情况下,高黏度 CE 的引气作用更明显,因此 HPMC-H 改性浆体中溶液的迁移会更加困难.

由图 6 还可见:HPMC 的掺入增大了孔溶液的动力黏度;HPMC 掺量越高,孔溶液的动力黏度越大;在相同掺量下,HPMC-H 对孔溶液动力黏度的提升幅度要高于 HPMC-L. HPMC 对孔溶液动力黏度的提升可能是因为相邻的 HPMC 分子侧链会相互吸引,致使凝胶网状结构的形成和缠结^[24],进而抑制自

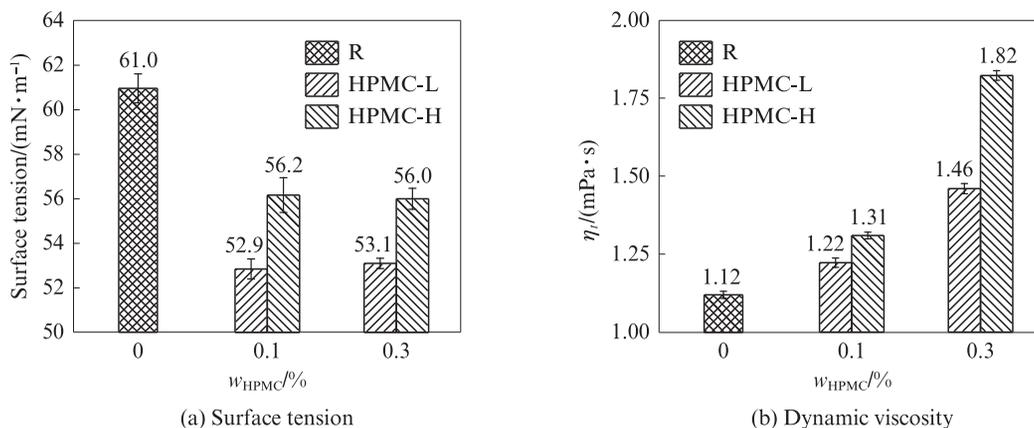


图6 孔溶液表面张力和动力黏度随HPMC掺量的变化

Fig. 6 Changes of surface tension and dynamic viscosity of pore solution with HPMC dosages

由水的迁移,增加孔溶液的动力黏度。

综上,HPMC的掺入降低了孔溶液的表面张力,增加了其动力黏度,这在一定程度上增加了溶液迁移过程中的阻力;HPMC掺量越高,阻力越大;相同掺量下,HPMC-H改性体系的阻力高于HPMC-L改性体系。

2.4 机理分析

HPMC的掺入增加了PC-CSA复合胶凝体系的静态黏度(初始表观黏度)。主要原因有2个:一是HPMC在水泥颗粒表面的吸附,增加了水泥颗粒迁移的阻力;二是HPMC增大了孔溶液的动力黏度,进而增加了各种粒子之间的迁移阻力,这均源于HPMC分子的链状结构。

HPMC的掺入使得PC-CSA复合胶凝体系的表观黏度随时间发生了有规律的变化,这取决于HPMC的吸水效果。HPMC吸水产生溶胀,进而增大胶凝体系的表观黏度,而HPMC的吸水效果又受孔溶液性质的影响。当孔溶液易于传输时,HPMC对水的吸收能力决定了其吸水效果,掺量越高,吸水效果越明显(对比试件L1和L3);在相同掺量下,高黏度HPMC吸水效果更好(对比试件L1和H1)。但是,当孔溶液的传输所受阻力较大时,HPMC的吸水效果就会变慢(对比试件L3和H3)。

3 结论

(1)羟丙基甲基纤维素(HPMC)在水泥颗粒表面的吸附及其对孔溶液黏度的提高,阻碍了颗粒的迁移,从而增加了硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥(PC-CSA)复合浆体的初始表观黏度,且HPMC掺量越大,初始表观黏度越高,且高黏度HPMC改性浆体的初始表观黏度比低黏度HPMC改性浆体更高。

(2)随着时间的推移,HPMC逐渐吸水膨胀,导

致其改性浆体的表观黏度也逐渐增加。HPMC的掺入使得PC-CSA复合浆体的表观黏度随时间发生了有规律的变化:HPMC掺量越高,浆体表观黏度随时间增长的幅度越大;对于不同黏度HPMC,低掺量(0.1%)时,高黏度HPMC改性浆体的表观黏度随时间增长的幅度高于低黏度HPMC改性浆体,当掺量达到0.3%时,低黏度HPMC改性浆体的表观黏度随时间增长的幅度高于高黏度HPMC改性浆体。

(3)HPMC的吸水效果受孔溶液性质的影响,低黏度、低掺量HPMC改性浆体孔溶液动力黏度较小,溶液在孔隙中的传输阻力较小,HPMC容易吸水;高黏度、高掺量HPMC改性浆体孔溶液动力黏度较大,溶液在孔隙中的传输阻力也随之增大,从而阻碍HPMC的吸水。

参考文献:

- [1] GUO C C, WANG R. Influence of calcium sulfoaluminate cement on early-age properties and microstructure of Portland cement with hydroxypropyl methyl cellulose and superplasticizer[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45:103470.
- [2] 王洪镇,邵方杰,曹万智,等. 普硅水泥和低碱度硫铝酸盐水泥复合体系性能的研究[J]. 混凝土, 2018(9):89-92.
WANG Hongzhen, SHAO Fangjie, CAO Wanzhi, et al. Study on ordinary Portland cement and low alkalinity sulphoaluminate cement composite system performance[J]. Concrete, 2018(9): 89-92. (in Chinese)
- [3] 王博,闫铁成. 普通硅酸盐-硫铝酸盐水泥复合凝胶体系的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(7):7079-7084.
WANG Bo, YAN Tiecheng. Study on preparation and properties of ordinary Portland sulphoaluminate cement composite gel system [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(7):7079-7084. (in Chinese)
- [4] WAN Q, WANG Z J, HUANG T Y, et al. Water retention mechanism of cellulose ethers in calcium sulfoaluminate

- cement-based materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301:124118.
- [5] LI J, WANG R, XU Y. Influence of cellulose ethers chemistry and substitution degree on the setting and early-stage hydration of calcium sulphoaluminate cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 344:128266.
- [6] 李建,王肇嘉,黄天勇,等. HEMC对硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1):199-206.
LI Jian, WANG Zhaojia, HUANG Tianyong. Influence of HEMC on properties of sulphoaluminate cement mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1):199-206.(in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] BRUMAUD C, BESSAIES-BEY H, MOHLER C, et al. Cellulose ethers and water retention[J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 53:176-184.
- [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] PAIVA H, SILVA L M, LABRINCHA J A, et al. Effects of a water-retaining agent on the rheological behaviour of a single-coat render mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7):1257-1262.
- [12] PAIVA H, ESTEVES L P, CACHIM P B, et al. Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2):1141-1146.
- [13] GUO C C, WANG R, CHEN N. Rheological behavior and early-age reaction kinetics of Portland cement-sulphoaluminate cement blend pastes containing superplasticizer and cellulose ether[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 394:132242.
- [14] POURCHEZ J, PESCHARD A, GROSSEAU P, et al. HPMC and HEMC influence on cement hydration [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(2):288-294.
- [15] 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.
JIAN Shouwei, MA Baoguo, SU Lei, et al. Research progresses of cellulose ether-modified mortar[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 30(3):560-566. (in Chinese)
- [16] LIU H, SUN Z P, YANG J B, et al. A novel method for semi-quantitative analysis of hydration degree of cement by ^1H low-field NMR[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 141:106329.
- [17] NGUYEN D D, DEVLIN L P, KOSHY P, et al. Impact of water-soluble cellulose ethers on polymer-modified mortars[J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(3):923-951.
- [18] XU L L, OU Y J, HECKER A, et al. State of water in calcium sulfoaluminate cement paste modified by hydroxyethyl methyl cellulose ether[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43:102894.
- [19] JUMATE E, MOLDOVAN D, MANEA D L, et al. The effects of cellulose ethers and limestone fillers in Portland cement-based mortars by ^1H NMR relaxometry [J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2016, 47(12):1353-1373.
- [20] WANG S X, ZHANG G F, LIANG C F, et al. Insight into the early hydration characteristics of Portland cement with hydroxyethyl methyl cellulose highlighted by ^1H low-field NMR [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 424:135904.
- [21] BÜLICHEN D, KAINZ J, PLANK J. Working mechanism of methyl hydroxyethyl cellulose(MHEC) as water retention agent [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(7):953-959.
- [22] JENNI A, HOLZER L, ZURBRIGGEN R, et al. Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(1):35-50.
- [23] DU L X, FOLLIARD K J. Mechanisms of air entrainment in concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(8):1463-1471.
- [24] POINOT T, GOVIN A, GROSSEAU P. Importance of coil-overlapping for the effectiveness of hydroxypropylguars as water retention agent in cement-based mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 56:61-68.