

文章编号:1007-9629(2022)08-0836-07

# 含羟乙基纤维素醚对 CSA 水泥早期水化的影响

王 茹<sup>1,2</sup>, 刘 科<sup>1,2</sup>, 万 芹<sup>1,2</sup>, 李 建<sup>1,2</sup>, 张震雷<sup>1,2,\*</sup>

(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:**研究了羟乙基纤维素(HEC)和高低取代度羟乙基甲基纤维素(H-HMEC、L-HEMC)对硫铝酸盐(CSA)水泥早期水化进程和水化产物的影响。结果表明:不同掺量L-HEMC均可促进CSA水泥在45.0 min~10.0 h内的水化;3种纤维素醚均先延缓CSA水泥溶解及其转化阶段的水化,后促进2.0~10.0 h内的水化;甲基的引入增强了含羟乙基纤维素醚对CSA水泥水化的促进作用,L-HEMC的促进作用最强;不同取代基和取代度的纤维素醚对水化前12.0 h内水化产物生成量的影响存在显著差异,HEMC对水化产物的促进作用强于HEC,L-HEMC改性CSA水泥浆体在水化2.0、4.0 h时生成钙矾石和铝胶的量最多。

**关键词:**硫铝酸盐水泥;纤维素醚;取代基;取代度;水化进程;水化产物

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.08.010

## Effect of Cellulose Ethers with Hydroxyethyl Group on Early Hydration of CSA Cement

WANG Ru<sup>1,2</sup>, LIU Ke<sup>1,2</sup>, WAN Qin<sup>1,2</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhenlei<sup>1,2,\*</sup>

(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 effects of hydroxyethyl cellulose (HEC) and hydroxyethyl methyl cellulose with high and low substitution degree (H-HEMC, L-HEMC) on the early hydration process and hydration products of calcium sulphoaluminate (CSA) cement were studied. The results show that different dosages of L-HEMC can promote the hydration of CSA cement from 45.0 min to 10.0 hours. All the three kinds of cellulose ethers firstly delay the hydration of CSA cement during the dissolution and transformation stage, and then promote the hydration of CSA cement from 2.0 hours to 10.0 hours. The introduction of methyl group enhances the hydration promotion effect of cellulose ether on CSA cement, and the promoting effect of L-HEMC is the strongest. There are significant differences in the effect of different substituent groups and substitution degree on the production of hydration products produced within 12.0 hours. The promotion effect of HEMC on hydration products is stronger than that of HEC. The amount of ettringite and aluminium hydroxide generated in L-HEMC modified cement paste are the most at hydration for 2.0 hours and 4.0 hours.

**Key words:** calcium sulphoaluminate cement; cellulose ether; substituent; substitution degree; hydration process; hydration product

以无水硫铝酸钙( $C_4A_3\check{S}$ )和硅酸二钙( $C_2S$ )为主 要熟料矿物的硫铝酸盐(CSA)水泥具有快硬早强、

收稿日期:2021-07-04; 修订日期:2021-09-25

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(GZ 1290)

第一作者: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

通讯作者:张震雷(1979—),女,河南济源人,同济大学高级工程师,博士. E-mail: zhangzhenlei@tongji.edu.cn

抗冻抗渗、碱度低等优点<sup>[1-3]</sup>,且其生产过程中热耗低,熟料易磨,被广泛应用于抢修、防渗等工程<sup>[4]</sup>.纤维素醚(CE)因具有保水增稠作用而被广泛应用于砂浆改性<sup>[5]</sup>.CSA水泥水化反应复杂,诱导期极短,加速期呈多阶段进行<sup>[6]</sup>,且其水化易受外加剂及养护温度的影响<sup>[7-8]</sup>.Zhang等<sup>[9]</sup>发现羟乙基甲基纤维素(HEMC)可延长CSA水泥水化的诱导期,并使水化放热主峰滞后.孙振平等<sup>[10]</sup>发现HEMC的吸水作用影响水泥浆体早期水化.吴凯等<sup>[11]</sup>认为HEMC在CSA水泥表面的弱吸附不足以影响水泥水化放热速率.HEMC对CSA水泥水化的影响研究结果尚不统一,可能是所用水泥熟料组分各异所致<sup>[12]</sup>.Wan等<sup>[13]</sup>研究发现HEMC的保水性优于羟乙基纤维素(HEC),高取代度HEMC改性CSA水泥浆体孔溶液的动力黏度更大,表面张力更小.李建等<sup>[14]</sup>监测了固定流动度下HEMC改性CSA水泥砂浆早期内部温度的变化,发现不同取代度HEMC的影响存在差异.

然而,目前关于不同取代基及取代度的CE对CSA水泥早期水化影响的对比研究尚不充分.本文研究了不同掺量、取代基和取代度的含羟乙基纤维素醚对CSA水泥早期水化的影响,着重分析了12 h内含羟乙基纤维素醚改性CSA水泥的水化放热规律,并定量分析了其水化产物.

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥为42.5级快硬CSA水泥,初、终凝时间分别为28、50 min,其化学组成和矿物组成(质量分数,文中涉及的掺量、水灰比等均为质量分数或质量比)见表1.改性剂CE包括黏度相近的3种含羟乙基纤维素醚:羟乙基纤维素(HEC)、高取代度羟乙基甲基纤维素(H-HEMC)、低取代度羟乙基甲基纤维素(L-HEMC),黏度分别为32、37、36 Pa·s,取代度分别为2.5、1.9、1.6.拌和水为去离子水.

表1 CSA水泥的化学组成和矿物组成  
Table 1 Chemical composition and mineral composition of CSA cement

	CaO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SrO	<i>w</i> /%
Chemical composition	50.30	17.30	12.50	8.92	1.77	2.02	0.76	0.60	0.06	0.10	
Mineral composition	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF	CT	C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	Gypsum	Dolomite	Anhydrite	Amorphous		
	28.35	17.91	3.96	2.62	1.53	1.48	6.38	9.60	19.37		

### 1.2 配合比

固定水灰比为0.54,L-HEMC的掺量(文中掺量均以水泥的质量计) $w_L=0\%$ 、 $0.1\%$ 、 $0.2\%$ 、 $0.3\%$ 、 $0.4\%$ 、 $0.5\%$ ,HEC和H-HEMC的掺量均为 $0.5\%$ .文中:L-HEMC-0.1为 $w_L=0.1\%$ 的L-HEMC改性CSA水泥,其他类推;CSA为纯CSA水泥;HEC改性CSA水泥、L-HEMC改性CSA水泥、H-HEMC改性CSA水泥分别记为HCSA、LHCSA、HHCSA.

### 1.3 试验方法

水化热测试采用八通道等温微量热仪,量程为600 mW.试验前将仪器在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度RH= $(60\pm 5)\%$ 下稳定6.0~8.0 h,按配合比将CSA水泥、CE及拌和水,以600 r/min的转速电动拌制1 min后,立即称量 $(10.0\pm 0.1)$  g浆体装入安瓿瓶中,将安瓿瓶放入仪器中并开始计时测试,水化温度为 $20^\circ\text{C}$ ,每隔1 min记录1次数据,测试至12.0 h.

热重(TG)分析:根据ISO 9597—2008《Cement—Test methods—Determination of setting time and soundness》制备得到水泥浆体.将拌制好的水泥浆体装入 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的试模中,人工振动10

次后,置于 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、RH= $(60\pm 5)\%$ 下养护,分别在龄期 $t=2.0$ 、 $4.0$ 、 $12.0$  h时取出试样.去除试样表层( $\geq 1$  mm)后将其破碎成小块浸泡在异丙醇中,连续7 d每隔1 d更换1次异丙醇,以确保水化反应完全中止,并在 $40^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重.称取 $(75\pm 2)$  mg样品放入坩埚中,绝热条件下,在氮气氛围中,以 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率将样品从 $30^\circ\text{C}$ 加热至 $1000^\circ\text{C}$ .CSA水泥水化产物的热分解主要发生在 $50\sim 550^\circ\text{C}$ ,通过计算该范围内样品的质量损失率可以得到其化学结合水的含量;钙矾石(Aft)在 $50\sim 180^\circ\text{C}$ 受热分解失去20个结晶水,铝胶(AH<sub>3</sub>)在 $230\sim 300^\circ\text{C}$ 受热分解失去3个结晶水,根据TG曲线可计算得到各水化产物的含量<sup>[15]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水化进程分析

#### 2.1.1 CE掺量对水化进程的影响

图1为不同掺量L-HEMC改性CSA水泥浆体的水化放热曲线.由图1可见,纯CSA水泥浆体( $w_L=0\%$ )的水化放热曲线上有4个放热峰,其水化进程可划分为溶解阶段(0~15.0 min)、转化阶段

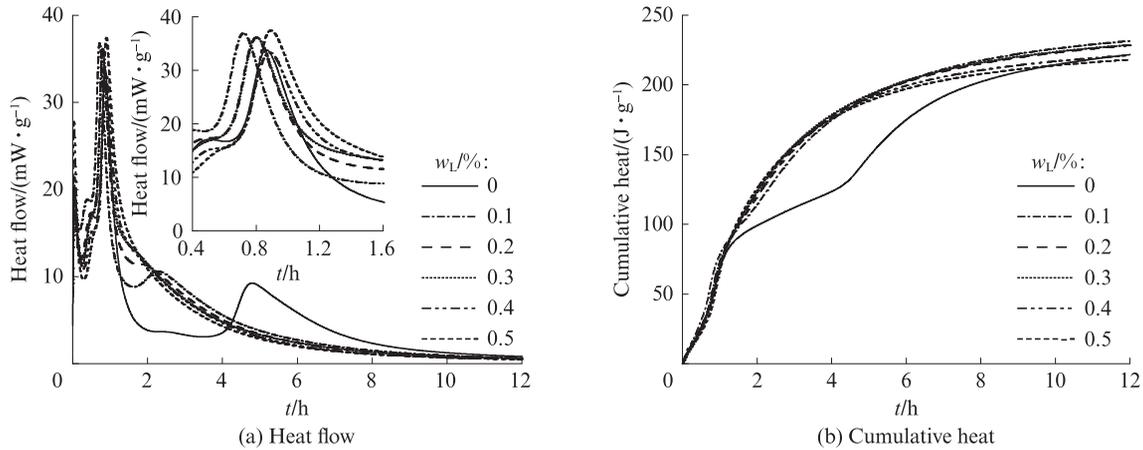


图1 不同掺量L-HEMC改性CSA水泥浆体的水化放热曲线

Fig. 1 Hydration heat release curves of L-HEMC modified CSA cement pastes with different  $w_L$ .

(15.0~45.0 min)、加速阶段(45.0~54.0 min)、减速阶段(54.0 min~2.0 h)、动态平衡阶段(2.0~4.0 h)、再加速阶段(4.0~5.0 h)、再减速阶段(5.0~10.0 h)和稳定阶段(10.0 h~)这8个阶段.水化前15.0 min内,水泥矿物快速溶解,在该阶段及15.0~45.0 min内出现的第1、2水化放热峰分别对应亚稳相AFt的生成及其向单硫型水化硫铝酸钙(AFm)的转化;水化54.0 min时的第3放热峰则用于划分水化加速与减速阶段,AFt与AH<sub>3</sub>的生成速率以此为拐点,由盛转衰,随即进入持续2.0 h的动态平衡阶段;当水化进行到4.0 h时,水化再次进入加速期,C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S快速溶解并生成大量水化产物,且在水化5.0 h出现第4水化放热峰,此后再次进入减速期;大约10.0 h后水化趋于稳定<sup>[16-17]</sup>.

L-HEMC掺量对CSA水泥水化溶解和转化阶段的影响各异:当L-HEMC掺量较低时,L-HEMC改性CSA水泥浆体第2水化放热峰的出现时间略提前,其放热速率和放热峰峰值明显高于纯CSA水泥浆体;随着L-HEMC掺量的增加,L-HEMC改性CSA水泥浆体的放热速率逐渐降低,并低于纯CSA水泥浆体.L-HEMC-0.1的水化放热曲线放热峰数量与纯CSA水泥浆体相同,但其第3、4水化放热峰分别提前至42.0 min和2.3 h,且相比于纯CSA水泥浆体的33.5、9.0 mW/g,其放热峰峰值分别提高到36.9、10.5 mW/g,这表明0.1%掺量L-HEMC加速且加强了L-HEMC改性CSA水泥相应阶段的水化;而L-HEMC掺量为0.2%~0.5%时,L-HEMC改性CSA水泥的加速减速阶段逐渐合二为一,即第4放热峰提前并与第3放热峰合并,中间的动态平衡阶段不再出现,L-HEMC对CSA水泥水化的促进作用更显著.

由图1还可见,L-HEMC显著促进了CSA水泥

在45.0 min~10.0 h的水化.在45.0 min~5.0 h,掺0.1%L-HEMC对CSA水泥水化促进作用较小,而当L-HEMC掺量增大到0.2%~0.5%时,其影响却无显著差异.这与CE对硅酸盐水泥水化的影响表现截然不同.文献[18-20]研究表明,分子内含有大量羟基的CE会因酸碱相互作用而吸附于水泥颗粒及其水化产物表面,从而延缓硅酸盐水泥的早期水化,且吸附作用越强延缓越明显.但文献[21-22]研究发现,CE在AFt表面的吸附能力弱于在水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、Ca(OH)<sub>2</sub>和水化铝酸钙表面的吸附能力,同时HEMC在CSA水泥颗粒上的吸附能力也弱于其在硅酸盐水泥颗粒上的吸附能力<sup>[23]</sup>.此外,CE分子上的氧原子能以氢键形式固定游离水为吸附水,改变水泥浆体中可蒸发水的存在状态,进而影响水泥水化.然而,CE的弱吸附作用和吸水作用均会随水化时间延长而逐渐减弱,一定时间后吸附水会被释放并与未水化水泥颗粒进一步反应,且CE的引气作用也可为水化产物提供生长空间<sup>[24]</sup>,这可能是水化45.0 min后L-HEMC促进CSA水泥水化的原因.

### 2.1.2 CE取代基及取代度对水化进程的影响

3种CE改性CSA水泥浆体的水化放热曲线见图2(图中CE的掺量均为0.5%).由图2可见,与L-HEMC相比,HEC、H-HEMC改性CSA水泥浆体的水化放热速率曲线也均出现了4个水化放热峰;3种CE均对CSA水泥水化的溶解和转化阶段具有延缓作用,其中HEC和H-HEMC延缓作用更强,推迟了水化加速阶段的出现;HEC、H-HEMC的掺入均略微延后了第3水化放热峰,显著提前了第4水化放热峰,且增大了第4水化放热峰的峰值.由图2(b)可见:在水化2.0~10.0 h内,3种CE改性CSA水泥浆体的水化放热量均大于纯CSA水泥浆体,表明这3

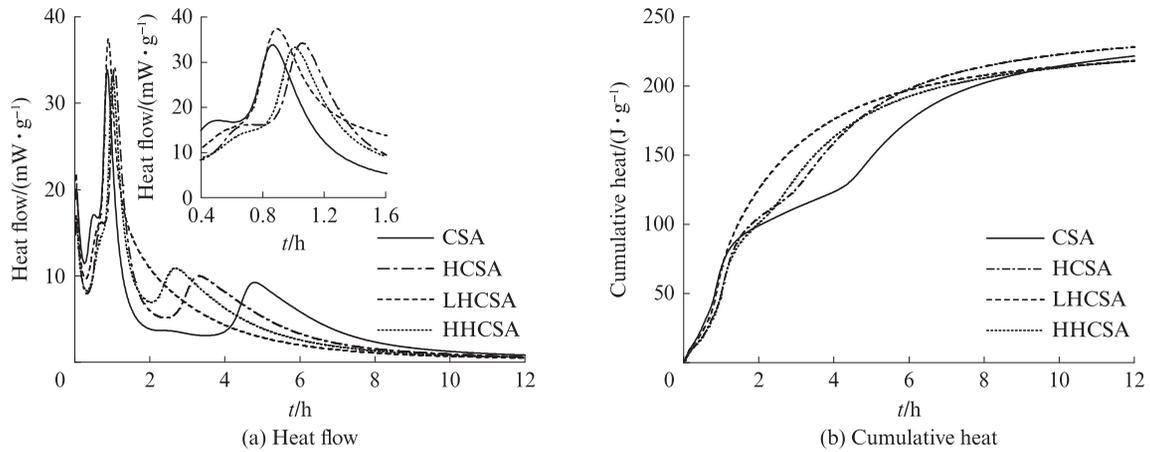


图2 3种CE改性CSA水泥浆体的水化放热曲线  
Fig. 2 Hydration heat release curves of three kinds of CE modified CSA cement pastes

种CE均促进了CSA水泥在该阶段的水化;而在水化2.0~5.0 h内,L-HEMC改性CSA水泥的水化放热量最大,H-HEMC和HEC次之,表明低取代度HEMC对CSA水泥水化的促进作用更强;HEMC的促进作用强于HEC,表明甲基的引入增强了CE对CSA水泥水化的促进作用.

CE的化学结构对其在水泥颗粒表面的吸附作用有很大影响,尤其是取代度和取代基的类型<sup>[21-22]</sup>.取代基不同,CE的空间位阻不同,HEC分子侧链上只有羟乙基,比同时含有甲基的HEMC空间位阻小,因此HEC对CSA水泥颗粒的吸附作用最强,对水泥颗粒与水接触反应的影响最大,故对第3水化放热峰的延缓作用最明显.不同取代度的CE与水泥颗粒对水分的竞争能力不同,高取代度HEMC吸水作用明显强于低取代度HEMC,导致絮凝结构间参与水化反应的自由水减少<sup>[10]</sup>,对改性CSA水泥初期水化影响较大,因此延缓了第3水化放热峰;低取代度

HEMC吸水作用弱,作用时间短,吸附水较早被释放,促使大量未水化的水泥颗粒进一步水化.这种弱吸附作用和吸水作用的强弱对CSA水泥水化溶解和转化阶段的延缓作用不同,使得CE在后期促进水泥水化上也存在差异.

2.2 水化产物分析

2.2.1 CE掺量对水化产物的影响

不同掺量L-HEMC改性CSA水泥浆体的TG-DTG曲线见图3;根据TG曲线计算化学结合水的含量 $w_w$ 和水化产物AFt、AH<sub>3</sub>的含量 $w_{AFt}$ 、 $w_{AH_3}$ ,其计算结果见图4.由图3、4可见,纯CSA水泥浆体的DTG曲线在50~180、230~300、642~975℃出现了3个峰,分别对应于AFt、AH<sub>3</sub>和白云石的分解<sup>[15]</sup>.水化2.0 h时,不同掺量L-HEMC改性CSA水泥浆体TG曲线存在差异,当水化反应至12.0 h时,其曲线已无显著差异;水化2.0 h时, $w_L=0\%$ 、 $0.1\%$ 、 $0.5\%$ 的L-HEMC改性CSA水泥浆体的化学结合水含量分别

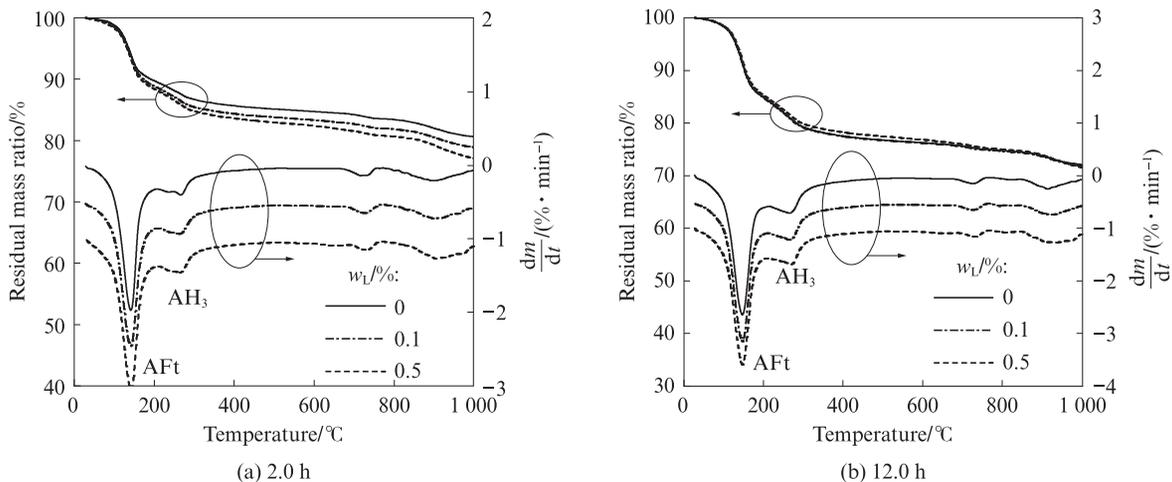


图3 不同掺量L-HEMC改性CSA水泥浆体的TG-DTG曲线  
Fig. 3 TG-DTG curves of L-HEMC modified CSA cement pastes with different  $w_L$

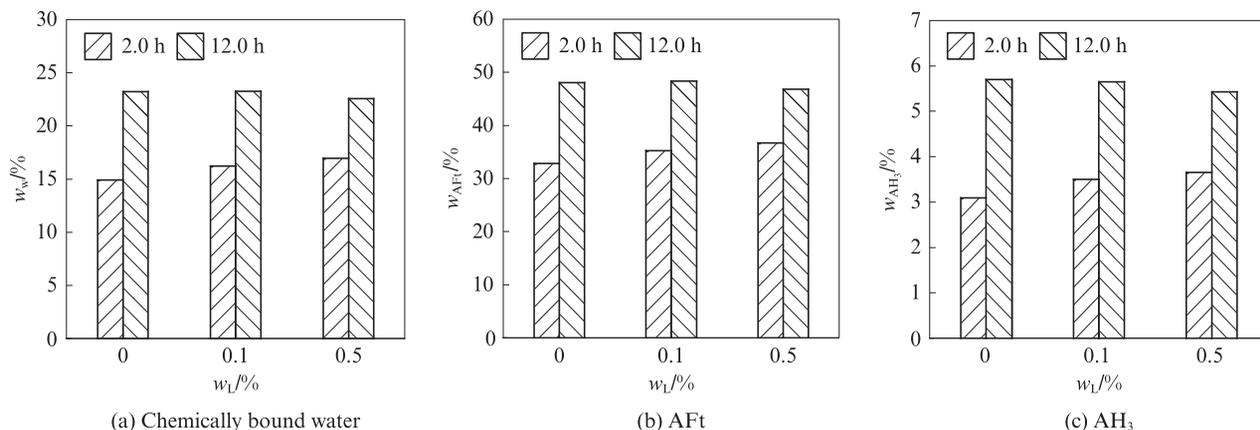


图4 不同掺量L-HEMC改性CSA水泥浆体化学结合水及水化产物AFt、AH<sub>3</sub>的含量

Fig. 4  $w_w$ ,  $w_{AFt}$  and  $w_{AH_3}$  of L-HEMC modified CSA cement pastes with different  $w_L$

为14.9%、16.2%、17.0%，AFt含量分别为32.8%、35.2%、36.7%，AH<sub>3</sub>含量分别为3.1%、3.5%、3.7%，这说明L-HEMC的掺入提高了水泥浆体水化2.0 h的水化程度，且使水化产物AFt和AH<sub>3</sub>的生成量增多，即促进了CSA水泥水化。这可能是由于HEMC既含有憎水基团甲基又含有亲水基团羟乙基，具有较高的表面活性，能显著降低水泥浆中液相的表面张力，同时具有引气作用<sup>[25]</sup>，为水泥水化产物的生成提供便利。水化12.0 h时，L-HEMC改性CSA水泥浆体与纯CSA水泥浆体中的AFt和AH<sub>3</sub>含量已无显著差异。

### 2.2.2 CE取代基及取代度对水化产物的影响

3种CE改性CSA水泥浆体的TG-DTG曲线见图5(图中CE的掺量均为0.5%)；对应的 $w_w$ 、 $w_{AFt}$ 、 $w_{AH_3}$ 计算结果见图6。由图5、6可见：水化2.0、4.0 h时，不同水泥浆体TG曲线存在显著差异；当水化至12.0 h时，不同水泥浆体TG曲线已无明显差异；水化2.0 h时，纯CSA水泥浆体以及HEC、L-HEMC、H-HEMC改性CSA水泥浆体的化学结合水含量分

别为14.9%、15.2%、17.0%、14.1%；水化4.0 h时，纯CSA水泥浆体的TG曲线下降幅度最小，3种CE改性CSA水泥浆体的水化程度均大于纯CSA水泥浆体，且此时HEMC改性CSA水泥浆体化学结合水的含量大于HEC改性CSA水泥浆体，L-HEMC改性CSA水泥浆体化学结合水含量最大。由此可见，不同取代基和取代度的CE对CSA水泥初期水化产物影响存在显著差异，其中L-HEMC对水化产物生成的促进作用最大。水化12.0 h时，3种CE改性CSA水泥浆体的质量损失率与纯CSA水泥浆体已无显著差异，这与累计放热量结果吻合，表明CE只显著影响CSA水泥12.0 h内的水化。

由图5、6还可见：水化2.0、4.0 h时，L-HEMC改性CSA水泥浆体的AFt及AH<sub>3</sub>特征峰峰强均最大；水化2.0 h时，纯CSA水泥浆体以及HEC、L-HEMC、H-HEMC改性CSA水泥浆体的AFt含量分别为32.8%、33.3%、36.7%、31.0%，AH<sub>3</sub>含量分别为3.1%、3.0%、3.6%、2.7%；水化4.0 h时，其AFt含

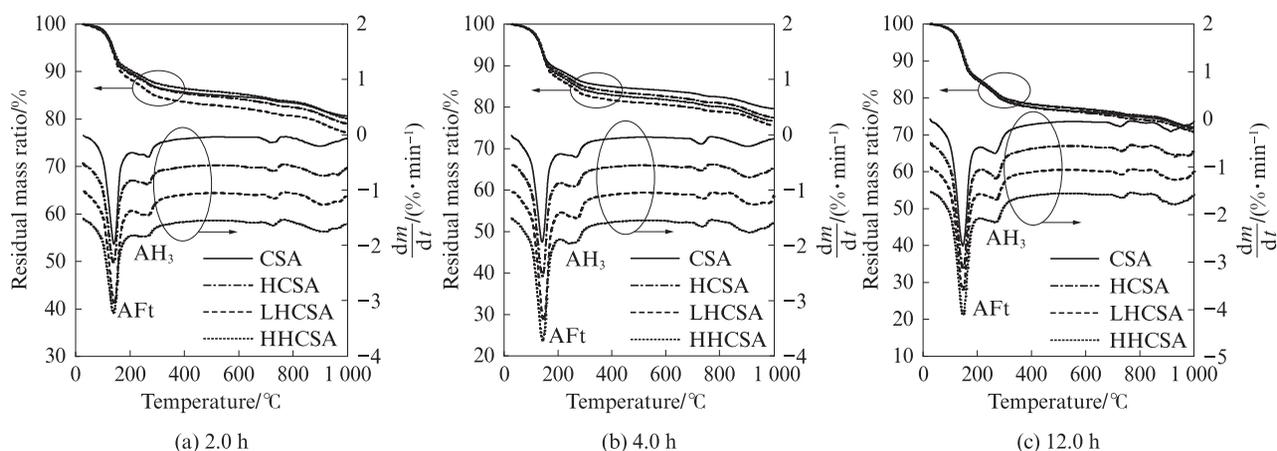


图5 3种CE改性CSA水泥浆体的TG-DTG曲线

Fig. 5 TG-DTG curves of three kinds of CE modified CSA cement pastes

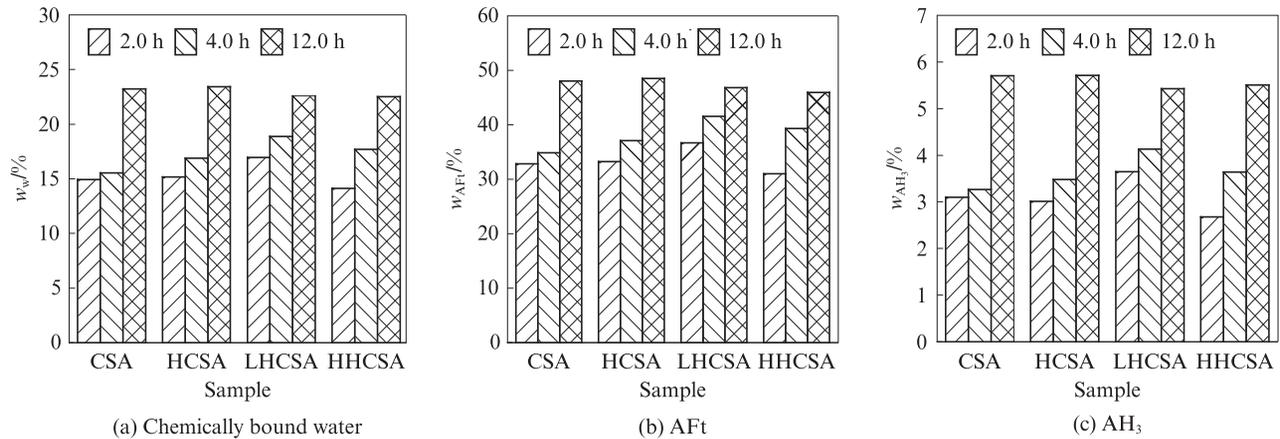


图6 3种CE改性CSA水泥浆体化学结合水及水化产物AFt、AH<sub>3</sub>的含量  
Fig. 6  $w_w$ 、 $w_{AFt}$  and  $w_{AH_3}$  of three kinds of CE modified CSA cement pastes

量分别为34.9%、37.1%、41.5%、39.4%，AH<sub>3</sub>含量分别为3.3%、3.5%、4.1%、3.6%。由此可见，L-HEMC对CSA水泥水化产物生成的促进作用最强，HEMC的促进作用强于HEC。相比于L-HEMC，H-HEMC对孔溶液动力黏度的提高更为显著<sup>[13]</sup>，进而影响水分的传输，导致浆体渗透速率降低，影响了此时水化产物生成量；相比于HEMC，HEC分子中氢键作用更明显，吸水作用更强，且持续时间更久，此时不论是高取代度HEMC还是低取代度HEMC的吸水作用均已不明显。此外，CE在水泥浆体内部微区内会形成水分传输的“闭路循环”<sup>[26]</sup>，CE缓慢释放的水分可直接与周围的水泥颗粒进一步发生反应。水化12.0 h时，3种CE对CSA水泥浆体生成AFt和AH<sub>3</sub>的量影响不再显著。

### 3 结论

(1) 不同掺量低取代度羟乙基甲基纤维素(L-HEMC)均可促进硫铝酸盐(CSA)水泥在45.0 min~10.0 h内的水化。

(2) 羟乙基纤维素(HEC)、高取代度羟乙基甲基纤维素(H-HEMC)、L-HEMC这3种含羟乙基纤维素醚(CE)均对CSA水泥水化的溶解和转化阶段具有延缓作用，对2.0~10.0 h的水化具有促进作用。

(3) 含羟乙基CE中引入甲基能显著增强其对CSA水泥2.0~5.0 h内水化的促进作用，L-HEMC对CSA水泥水化的促进作用强于H-HEMC。

(4) 当CE掺量为0.5%时，L-HEMC改性CSA水泥浆体在水化2.0、4.0 h时生成的钙矾石(AFt)和铝胶(AH<sub>3</sub>)的量均最多，其促进水化的作用最显著；H-HEMC和HEC改性CSA水泥浆体仅在水化4.0 h时生成的AFt和AH<sub>3</sub>含量高于纯CSA水泥浆体。水

化12.0 h时，3种CE对CSA水泥水化产物生成量的影响不再显著。

### 参考文献:

- [1] 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, 2006:1.  
DIAO Jiangjing, XIN Zhijun, ZHANG Qiuying. Manufacturing and application of sulphoaluminate cement[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2006:1. (in Chinese)
- [2] 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, 1999:36-49, 149-153.  
WANG Yanmou, SU Muzhen, ZHANG Liang. Sulfoaluminate cement[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1999:36-49, 149-153. (in Chinese)
- [3] SHARP J H, LAWRENCE C D, YANG R. Calcium sulfoaluminate cements-low-energy cements, special cements or what?[J]. Advances in Cement Research, 1999, 1(11):3-13.
- [4] 李启棣, 吴淑华. 硫铝酸盐水泥混凝土的特性及其应用[J]. 铁道建筑, 1985(4):16-20.  
LI Qidi, WU Shuhua. Characteristics and application of sulphoaluminate cement concrete[J]. Railway Engineering, 1985 (4):16-20. (in Chinese)
- [5] 李磊, 王茹, 武雪杉, 等. HPMC对铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):415-423.  
LI Lei, WANG Ru, WU Xueshan, et al. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose on aluminate cement-gypsum mortar[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):415-423. (in Chinese)
- [6] HE Z, YANG H M, LIU M Y. Hydration mechanism of sulphoaluminate cement[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2014, 29(1):70-74.
- [7] ZHANG M, XING F, ZHANG D C, et al. Effect of admixture on mechanical behavior and micro structure of sulphoaluminate composite material[J]. Advanced Materials Research, 2010, 113-116:2193-2196.
- [8] WANG P M, LI N, XU L L. Hydration evolution and compressive strength of calcium sulfoaluminate cement

- constantly cured over the temperature range of 0 to 80 °C[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 100:203-213.
- [ 9 ] 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(9):1-10.
- [10] 孙振平, 穆帆远, 康旺, 等. 纤维素醚改性硫铝酸盐水泥浆体中可蒸发水的 $\sim^1\text{H}$ 低场核磁弛豫特征[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(8):1109-1115.  
SUN Zhenping, MU Fanyuan, KANG Wang, et al.  $^1\text{H}$  low-field NMR relaxation characteristics of evaporable water in hydroxyethyl methyl cellulose ether modified calcium sulfoaluminate cement [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(8):1109-1115. (in Chinese)
- [11] 吴凯, 康旺, 徐玲琳, 等. 羟乙基甲基纤维素对硫铝酸盐水泥早期水化的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(5):615-621.  
WU Kai, KANG Wang, XU Linglin, et al. Influence of hydroxyethyl methyl cellulose on early hydration of calcium sulfoaluminate cement [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(5):615-621. (in Chinese)
- [12] XU L L, OUYANG 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.
- [13] 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.
- [14] 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, et al. Influence of HEMC on properties of sulphoaluminate cement mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1):199-206. (in Chinese)
- [15] LI L, WANG R, ZHANG S K. Effect of curing temperature and relative humidity on the hydrates and porosity of calcium sulfoaluminate cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213(20):627-636.
- [16] TANG S W, ZHU H G, LI Z J, et al. Hydration stage identification and phase transformation of calcium sulfoaluminate cement at early age[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75:11-18.
- [17] ZHANG L, GLASSER F P. Hydration of calcium sulfoaluminate cement at less than 24 h[J]. *Advances in Cement Research*, 2002, 14(4):141-155.
- [18] OU Z H, MA B G, JIAN S W. Influence of cellulose ethers molecular parameters on hydration kinetics of Portland cement at early ages[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 33:78-83.
- [19] LASKOWSKI J S, LIU Q, O'CONNOR C T. Current understanding of the mechanism of polysaccharide adsorption at the mineral/aqueous solution interface[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2007, 84(1-4):59-68.
- [20] 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.
- [21] POURCHEZ J, GROSSEAU P, RUOT B. Current understanding of cellulose ethers impact on the hydration of  $\text{C}_3\text{A}$  and  $\text{C}_3\text{A}$ -sulphate systems[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(8):664-669.
- [22] POURCHEZ J, GROSSEAU P, RUOT B. Changes in  $\text{C}_3\text{S}$  hydration in the presence of cellulose ethers[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(2):179-188.
- [23] 王婷, 钟世云, 徐玲琳, 等. 纤维素醚在水泥颗粒表面的吸附性能[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(5):632-637.  
WANG Ting, ZHONG Shiyun, XU Linglin, et al. Adsorption of cellulose ether on surface of cement particles[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(5):632-637. (in Chinese)
- [24] WYRZYKOWSKI M, KIESEWETTER R, KAUFMANN J, et al. Pore structure of mortars with cellulose ether additions—Mercury intrusion porosimetry study[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 53:25-34.
- [25] ZHANG S K, WANG R, XU L L, et al. Properties of calcium sulfoaluminate cement mortar modified by hydroxyethyl methyl celluloses with different degrees of substitution[J]. *Molecules*, 2021, 26(8):2136-2150.
- [26] 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.