

HECC 早期流变特性及其调控研究

李家正^{1,2}, 唐韦杰^{1,2}, 张秀贞², 石妍²

(1. 三峡大学土木与建筑学院; 2. 长江科学院材料与结构研究所)

摘要:通过流变性能试验、工作性能试验、凝结时间试验以及水化热试验,研究了水工水泥基复合材料(HECC)的早期流变特性,并分析了聚羧酸高性能减水剂(PCA-1)、非保坍型聚羧酸高性能减水剂(PCA-2)和早强型聚羧酸高性能减水剂(PCA-3)对 HECC 流变特性的调控效果。结果表明:HECC 拌合物的流变特性符合宾厄姆模型,其屈服应力和黏度均随时间延长而增大;在相同掺量下,3 种减水剂减水效果相近,但坍落度经时变化存在差异,同一测试时间内掺加 PCA-3 的拌合物屈服应力和黏度略大;贯入阻力仪法测得的初凝和终凝时间分别比维卡仪法延长 3~4 h 和 5~6 h,结合现场施工情况,证实贯入阻力仪法的结果更为准确;掺加 PCA-2 和 PCA-3 的拌合物的放热峰分别提前了 1.93 h 和 1.77 h,累计放热量在掺加 PCA-2 后减少了 1.366 J/g,掺加 PCA-3 后增加了 0.998 J/g;早强型减水剂通过促进水化反应调控 HECC 的流变特性,而非保坍型减水剂通过影响颗粒间的吸附作用发挥调控作用。

关键词:水工水泥基复合材料(HECC);流变特性;聚羧酸减水剂;水化热;凝结时间

中图分类号:TV432⁺.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0027-07

Study on early-age rheological properties of HECC and their control//Li Jiazheng^{1,2}, Tang Weijie^{1,2}, Zhang Xiuzhen², Shi Yan² (1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University; 2. Department of Material and Structure, Changjiang River Scientific Research Institute)

Abstract: The early-age rheological properties of hydraulic engineered cementitious composites (HECC) were investigated through rheological tests, workability tests, setting time tests, and hydration heat tests. The effects of three superplasticizers, a high-performance polycarboxylate superplasticizer (PCA-1), a non-slump-retaining high-performance polycarboxylate superplasticizer (PCA-2), and an early-strength high-performance polycarboxylate superplasticizer (PCA-3), on the rheological characteristics of HECC were evaluated. The results showed that the rheological behavior of fresh HECC followed the Bingham model, with both yield stress and viscosity increasing over time. At the same dosage, the three superplasticizers exhibited similar water-reducing effects but differed in slump retention. At a given testing time, mixtures containing PCA-3 exhibited slightly higher yield stress and viscosity. The initial and final setting times determined by the penetration resistance method were 3~4 h and 5~6 h longer, respectively, than those determined by the Vicat method. Field construction observations confirmed that the penetration resistance method provided more accurate results. The heat release peaks of mixtures containing PCA-2 and PCA-3 occurred 1.93 h and 1.77 h earlier, respectively. Cumulative heat release decreased by 1.366 J/g with PCA-2 and increased by 0.998 J/g with PCA-3. The early-strength superplasticizer regulated the rheological characteristics of HECC by promoting hydration, whereas the non-slump-retaining superplasticizer exerted its effect by affecting interparticle adsorption.

Key words: hydraulic engineered cementitious composites (HECC); rheological characteristics; polycarboxylate superplasticizer; hydration heat; setting time

高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)最初由美国密歇根大学 Li 等^[1]于 20 世纪 90 年代设计提出。该材料具有优异的延展性,在拉伸和剪切荷载作用下呈现应变硬化和多缝开裂特征^[2],并具有良

好的抗裂能力和变形适应性。目前 ECC 在工民建领域应用广泛,涵盖曲面墙体、边坡加固、道路施工、桥面修复、挡土墙修复、灌溉渠道修补等工程^[3-5]。水工建筑物因其特殊的运行环境、结构特点以及复

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CKSF2024I023/CL);国家自然科学基金项目(52400149,U2340229)
作者简介:李家正(1970—),男,正高级工程师,博士,主要从事水工材料与结构工程研究。E-mail:1659959395@qq.com
通信作者:唐韦杰(2000—),男,硕士研究生,主要从事水工材料研究。E-mail:18716184843@163.com

水利水电科技进展,2026,46(5) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

• 27 •

杂的荷载条件,对材料的抗裂性能及变形适应性要求极高。针对这一需求,长江水利委员会长江科学院结合 ECC 材料特性和水工工程实际,研发了适用于水利领域的水工水泥基复合材料(HECC),其在水工堆石坝防渗面板、堆石坝新型心墙结构以及碾压混凝土防渗层等水工建筑物防渗部位具有广泛的使用场景^[6]。与传统 ECC 相比,HECC 采用工程地绝缘性材料,将人工砂最大粒径增至 1.25 mm,并结合不同使用场景,对坍落度等工作性能进行按需设计。

近年来,混凝土面板堆石坝在水利水电工程挡水建筑物建设领域得到了广泛应用^[7]。在该类坝体中,混凝土面板承担着坝体主要的防渗功能,它需要承受较大水头差所带来的压力,其性能对保障坝体渗流的安全与稳定起着决定性作用。采用 HECC 面板代替传统的混凝土面板,可显著改善面板应力分布,提高其变形适应能力,从而有效抑制裂缝的产生。

与普通面板混凝土相比,HECC 剔除了粗骨料,属于水泥砂浆,其力学性能参数均满足设计指标要求,且具有优异的延性和耐久性。然而从堆石坝面板施工角度考虑,尽管 HECC 原材料粒径较 ECC 有所提升,但因缺乏粗骨料的骨架支撑,施工时 HECC 在坡面上的稳定性面临挑战。具体而言,HECC 中纤维的分散对工作性能有较高要求;坍落度过低会影响材料整体均质性,而坍落度过高会导致 HECC 的坡面稳定性较差,难以适应面板滑模施工工艺。因此,为兼顾 HECC 的施工性能和均质性,需研究其早期流变特性的发展规律并进行合理调控。

围绕上述施工需求,已有研究从材料组成和静置时间等方面探讨了水泥基材料的流变性能及工作性能。Yang 等^[8]研究了 C 类粉煤灰与 F 类粉煤灰的比例、水胶比、高效减水剂用量以及黏度调节剂用量 4 个因素对 ECC 新拌状态和硬化后性能的影响,结果表明,水胶比对 ECC 砂浆(不含纤维)塑性黏度的影响最显著,而塑性黏度又对 ECC 的极限抗拉强度和抗拉应变能力具有显著影响。Ley-Hernández 等^[9]发现,随着静置时间的延长,新拌浆体的屈服应力和塑性黏度均迅速上升。胡伟等^[10]研究表明,当水胶比由 0.25 增至 0.35、粉煤灰掺量由 40%增至 60%时,HECC 的流变性能提高;而当纤维掺量由 1%增至 2%、硅灰掺量由 0%增至 6%时,HECC 的流变性能降低。杨志全等^[11]针对不同水灰比的牛顿型水泥浆液,研究了其流变性能随时间的演变规律,结果表明,在(25±2)℃的常温条件下,水化时间和水灰比均对浆液动力黏度具有明显作用。

上述研究主要针对材料组成对 HECC 新拌浆体

流变性能的影响,而对 HECC 早期流变特性的时变性规律关注较少,难以为滑模提升速度、抹面时间等施工工艺参数提供准确的技术支撑。鉴于此,本文通过控制单方用水量和减水剂用量制备低坍落度 HECC,系统研究其早期流变特性,并对比不同类型减水剂对 HECC 早期流变时变特性的影响,以期 HECC 在面板堆石坝中的应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 原材料

试验选用华润水泥控股有限公司生产的润丰低热硅酸盐水泥,密度为 3.2 g/cm³,比表面积为 285 m²/kg,标准稠度用水量为 26.0%,使用云南曲靖的 I 级粉煤灰代替部分水泥,密度为 2.36 g/cm³,比表面积为 308 m²/kg。水泥和粉煤灰的化学成分如表 1 所示。

表 1 水泥和粉煤灰主要化学组分的质量分数

材料	化学组分的质量分数/%						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O
润丰低热水泥	61.00	22.23	4.30	4.71	4.50	2.63	0.37
I 级粉煤灰	2.50	62.73	21.15	10.10	2.09	0.13	0.99

注:R₂O 为钠当量碱含量,R₂O=Na₂O+0.658K₂O。

所用人工砂的最大粒径为 1.25 mm,细度模数为 1.62,表观密度为 2.79 g/cm³,饱和面干吸水率为 1.4%。为改善 HECC 的工作性能,减水剂采用江苏苏博特新材料股份有限公司生产的聚羧酸高性能减水剂(PCA-1)、非保坍型聚羧酸高性能减水剂(PCA-2)和早强型聚羧酸高性能减水剂(PCA-3);纤维选用深圳市维特耐新材料有限公司生产的 PE 纤维,直径为 24 μm,长度为 18 mm,断裂强度为 2900 MPa,弹性模量为 116 GPa,断裂伸长率为 2.6%,密度为 0.97 g/cm³。

1.2 配合比

试验通过控制单方用水量和减水剂掺量来制备低坍落度 HECC。在相同试验条件下,3 组 HECC 的用水量、水泥用量、粉煤灰用量和人工砂用量分别为 242、342、444、1 094 kg/m³,纤维掺量均为 1.0%,减水剂掺量均为 0.25%,仅改变减水剂品种,分别为 PCA-1、PCA-2 和 PCA-3。通过流变性能试验、坍落度损失试验、跳桌流动度试验、凝结时间试验及水化热试验,测试不同减水剂对 HECC 流变特性时变性的影响。

1.3 试验方法

1.3.1 流变性能试验

使用 RS 流变仪进行流变性能试验。该流变仪的最大扭矩为 100 mN·m,配备 VT30-15 型桨式转子。测试流程分为预剪切与数据采集两个阶段,具

体如图 1 所示。在预剪切阶段,对剪切速率进行控制,使其在 30 s 内由 0 s^{-1} 逐步提升至 100 s^{-1} ,并在接下来的 30 s 内又从 100 s^{-1} 降至 0 s^{-1} 。进行预剪切操作的目的是使各组砂浆在正式测试之前达到一致的初始剪切状态。进入数据采集阶段后,剪切速率在 75 s 内从 0 s^{-1} 匀速上升至 150 s^{-1} ,接着在随后的 75 s 内从 150 s^{-1} 匀速下降至 0 s^{-1} 。整个过程共采集 150 个数据点,据此绘制剪切应力随剪切速率变化的上行与下行曲线。

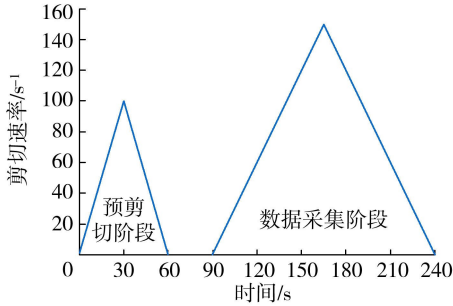


图 1 流变性测试程序

1.3.2 坍落度损失试验

根据 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测定 HECC 的坍落度及坍落度损失。将拌合物放置在湿润无明水的底板,表面加覆盖物防止水分散失,每隔 30 min 测定一次坍落度,总测试时长为 3 h。

1.3.3 跳桌流动度试验

砂浆的流动度按照 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》中规定的方法进行测量。搅拌后装入水泥胶砂流动度测定仪的圆台形容器中,测其流动度。

1.3.4 凝结时间试验

分别使用净浆(维卡仪法)和砂浆(贯入阻力法)的凝结时间测试方法:

a. 维卡仪法。根据 GB/T 1346—2024《水泥标准稠度用水量、凝结时间与安定性检验方法》,通过维卡仪测定湿气养护条件下初凝(试针距底板 $4\pm 1\text{ mm}$)和终凝(试针不沉且留痕)所需的时间。

b. 贯入阻力法。按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》,在不同贯入阻力示值下更换不同的测试针,记录贯入阻力值为 3.5 MPa 的时间作为初凝时间,贯入阻力值为 28 MPa 的时间作为终凝时间。

1.3.5 水化热试验

使用 TAM-Air 八通道微量热仪研究 3 种减水剂对 HECC 水化反应动力学的影响,试验温度为 20°C 。按照试验配合比制备 HECC 浆体(未加纤维),在测试温度条件下快速搅拌制备好浆体后,装入样品瓶中,称重并放入量热仪监测通道进行水化

热测试。

2 结果与分析

2.1 流变性能

2.1.1 流变模型分析

图 2 为掺加 PCA-1 制备的 HECC 浆体的流变曲线,其上行段呈明显的剪切变稀特性,即随着剪切速率的增大,剪切应力增加的幅度逐渐变小;而下行段近似呈直线,具备宾厄姆流体的典型特征。

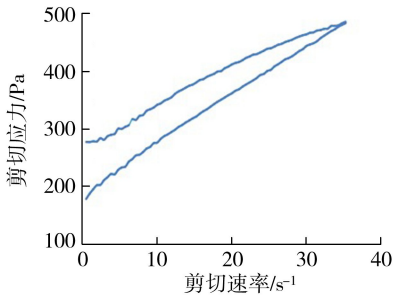


图 2 掺加 PCA-1 的 HECC 浆体的流变曲线

屈服应力反映了浆体由原本的静止状态转变为流动状态所必须克服的最小剪切应力值,而塑性黏度体现的是浆体内部结构对流动过程所产生的阻碍特性。值得注意的是,下行曲线处于上行段下方,二者共同构成了一个滞回环。这一现象表明,在测试过程中,材料内部的微结构遭到了破坏,使得在相同的剪切速率条件下,剪切应力出现了下降的情况。考虑在剪切速率下降阶段所测得的数据具有更高的可靠性和良好的重复性^[12-14],故本文选取剪切速率下降阶段所测得的数据来开展后续的流变性分析。

图 3 为不同类型减水剂的 HECC 浆体在拌和后 0、30、60、90、150、180 min 等时间节点的流变曲线,绘图时,从采集的 150 个数据点中每隔选取 15 个数据点进行展示。由图 3 可知,掺加不同的外加剂制备的 HECC 拌合物均呈现宾厄姆流体的行为特征,且在拌和后一定时间内持续保持该特征。

表 2 为掺加不同减水剂的 HECC 在不同时刻的流变性回归方程以及对应的流变参数,其中 τ 为剪切应力, γ 为剪切速率。由表 2 可知,依据宾厄姆流体对流变曲线进行拟合所得结果具有较高的相关性,相关系数均超过 0.96。由此可以推断,减水剂种类的差异并未对浆体的流变性类型产生显著影响,宾厄姆流体能够较为合理地用于 HECC 流变特性规律的研究。因此,本文借助该模型回归得出的各组流变方程来确定浆体的屈服应力与塑性黏度。

2.1.2 屈服应力

图 4 为不同减水剂对 HECC 屈服应力的影响,其中,掺加 PCA-2 和 PCA-3 的 HECC 在 210 min 时

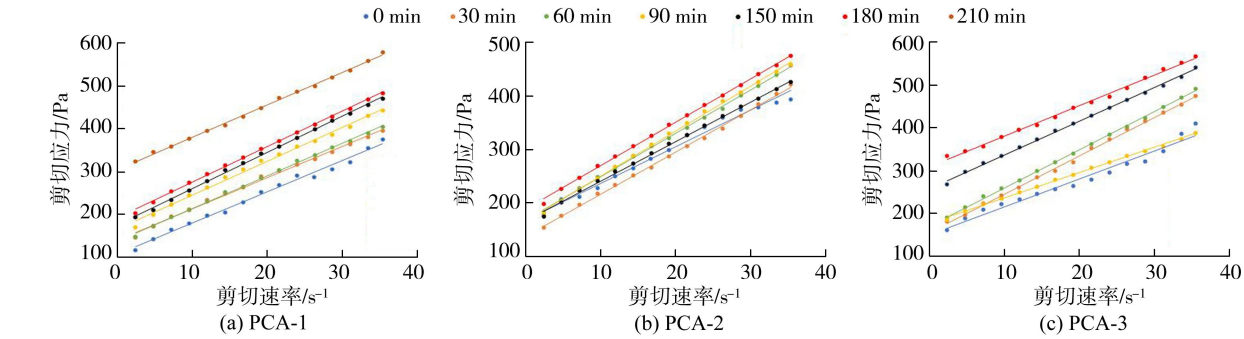


图3 掺加不同减水剂的 HECC 经时流变曲线

表2 掺加不同减水剂的 HECC 在不同时间的流变参数

减水剂	时间/min	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	回归方程	相关系数
PCA-1	0	105.31	7.36	$\tau = 7.36\gamma + 105.31$	0.990
	30	138.92	7.36	$\tau = 7.36\gamma + 138.92$	0.996
	60	136.05	7.70	$\tau = 7.70\gamma + 136.05$	0.998
	90	164.88	7.98	$\tau = 7.98\gamma + 164.88$	0.994
	150	174.93	9.00	$\tau = 9.00\gamma + 174.93$	0.999
	180	191.35	8.38	$\tau = 8.38\gamma + 191.35$	0.999
	210	305.27	7.64	$\tau = 7.64\gamma + 305.27$	0.998
PCA-2	0	168.32	6.87	$\tau = 6.87\gamma + 168.32$	0.987
	30	137.49	7.92	$\tau = 7.92\gamma + 137.49$	0.998
	60	167.43	8.14	$\tau = 8.14\gamma + 167.43$	0.999
	90	164.92	8.49	$\tau = 8.49\gamma + 164.92$	0.999
	150	166.94	7.44	$\tau = 7.44\gamma + 166.94$	0.998
	180	187.50	8.19	$\tau = 8.19\gamma + 187.50$	0.999
PCA-3	0	150.48	6.61	$\tau = 6.61\gamma + 150.48$	0.968
	30	156.09	9.06	$\tau = 9.06\gamma + 156.09$	0.998
	60	177.62	5.96	$\tau = 5.96\gamma + 177.62$	0.998
	90	171.51	8.98	$\tau = 8.98\gamma + 171.51$	0.999
	150	258.84	7.94	$\tau = 7.94\gamma + 258.84$	0.999
	180	310.55	7.20	$\tau = 7.20\gamma + 310.55$	0.996

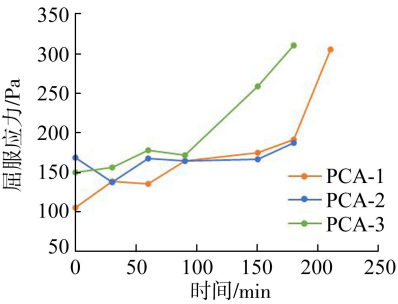


图4 不同减水剂对 HECC 屈服应力的影响

浆体屈服应力超出仪器的最大扭矩,因而未测得数据。聚羧酸减水剂加入后会吸附在水泥颗粒和水化产物表面,通过静电斥力和空间位阻作用破坏水泥颗粒的结团,使被包裹在结团内的自由水被释放出来,从而降低屈服应力^[15]。由图4可知,随着时间推移,掺加 PCA-1 的浆体屈服应力逐渐增加,这可能是因为水泥水化反应持续进行,导致浆体逐渐硬化;掺加 PCA-2 的浆体屈服应力同样呈上升趋势,但增幅较小;PCA-3 中的快凝组分会加速水泥早期水化,促进钙矾石(Aft)等水化产物的快速生成,显

著缩短凝结时间,使颗粒间结构迅速形成,导致屈服应力在短时间内急剧上升。掺加 PCA-1 的 HECC 的屈服应力在 180~210 min 之间出现大幅增长,掺加 PCA-2 和 PCA-3 的 HECC 在该时段均未测得数据,说明可能也发生了显著提升,此时间节点与采用维卡仪法测得的初凝时间相近。

2.1.3 塑性黏度

黏度是表征浆体内部结构阻碍流动的性能指标,其大小主要取决于浆体内部絮凝结构的数量及其破坏程度^[16]。图5为不同减水剂对 HECC 塑性黏度的影响。PCA-1 含有保坍组分,能有效延缓水泥颗粒的重新絮凝,其分子通过静电斥力和空间位阻作用维持水泥颗粒的分散状态,从而减缓黏度上升速度。随着时间推移,浆体流动性保持较好,塑性黏度增长平缓,体现了保坍组分对工作性能的长效维持作用。PCA-2 因缺乏保坍组分,其分散效果随时间逐渐减弱,水泥颗粒因范德华力作用快速重新聚集,导致浆体结构致密化,塑性黏度显著上升,表明保坍组分对延缓絮凝具有关键作用。PCA-3 中的快凝部分在初期加速了水泥早期水化反应,60 min 时黏度出现波动,这可能与水化反应的不均匀性以及减水剂与水化产物间复杂的相互作用有关。因此,塑性黏度在较短时间内急剧上升,流动性迅速下降,但由于早期水化较为剧烈,后期黏度水平与其他两种减水剂相近。总体而言,不同减水剂的功能组分直接影响了水泥浆体的分散状态和水化动力学特性;PCA-1 减水剂通过延缓絮凝维持低黏度;PCA-2

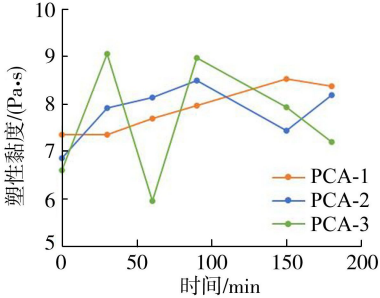


图5 不同减水剂对 HECC 塑性黏度的影响

因分散失效导致黏度快速上升;而 PCA-3 通过加速水化促使结构致密化。

2.2 工作性能

由不同减水剂对 HECC 流动度的影响(表 3)可知,在不加纤维时,掺加 PCA-1、PCA-2、PCA-3 的 HECC 的跳桌流动度分别为 215、220、203 mm;在加纤维时,跳桌流动度分别为 150、145、140 mm。由此可见,3 种减水剂的减水效果相当。

表 3 不同减水剂对 HECC 流动度的影响

减水剂	跳桌流动度/mm	
	不加纤维	加纤维
PCA-1	215	150
PCA-2	220	145
PCA-3	203	140

减水剂类型是影响混凝土坍落度损失速率、加重混凝土损失程度的主要因素之一^[17]。图 6 为不同减水剂对 HECC 坍落度损失的影响。由图 6 可知,掺加 PCA-1 的 HECC 在前两小时内保持很好的工作性能,在 2 h 至 3 h 之间的坍落度损失加快,掺加 PCA-1 的 HECC 在 2 h 和 3 h 时的坍落度分别降低了 35%和 76%,PCA-1 具有良好的缓凝效果。相比之下,掺加 PCA-2 的 HECC 的坍落度损失比 PCA-1 大、比 PCA-3 小,这是因为 PCA-2 中没有保坍组分,早期水化未被抑制,大量自由水被水化产物结合。掺加 PCA-3 的 HECC 坍落度损失最大,因为 PCA-3 中的快凝组分加速了前期的水化反应,迅速消耗水分并生成水化产物,减水剂本身也可能被快速生成的水化产物包裹或吸附,导致分散效果的衰减加速。由此可见,合理选择减水剂的种类是有效控制混凝土坍落度损失的重要举措。

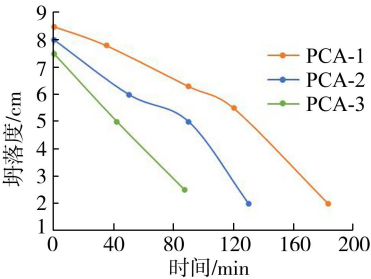


图 6 不同减水剂对 HECC 坍落度损失的影响

2.3 凝结时间

使用维卡仪法和贯入阻力仪法测试不同减水剂对 HECC 初凝和终凝时间的影响,结果见图 7。由图 7 可知,使用维卡仪法时,初凝时间由长到短依次为 PCA-1、PCA-2、PCA-3;终凝时间 PCA-1 最长,PCA-2 和 PCA-3 相同。使用贯入阻力法时,掺加 PCA-1 的 HECC 的初凝和终凝时间最长,掺加 PCA-2 的 HECC 次之,掺加 PCA-3 时时间最短。PCA-1

通常具有较好的缓凝作用,能够通过延缓水化反应维持 HECC 的工作性能,从而延长凝结时间;PCA-2 由于缺少保坍组分,减少了 HECC 的流动性保持能力,导致凝结时间较常规减水剂缩短,但缩短幅度不如 PCA-3 显著。PCA-3 可通过加速水泥水化反应,快速形成硬化结构。

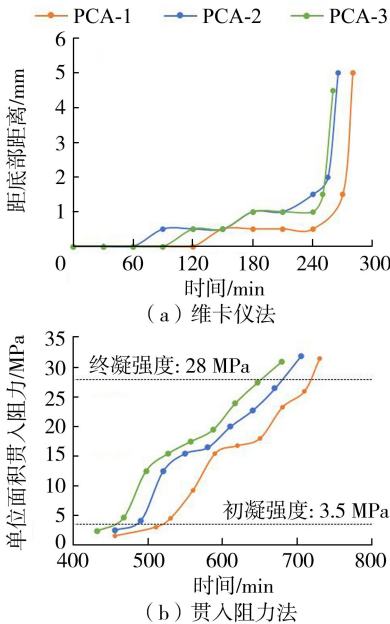


图 7 不同减水剂对 HECC 初凝和终凝时间的影响

表 4 为不同方法测得的掺加不同减水剂时 HECC 的凝结时间。由表 4 可知,贯入阻力法测得的初凝、终凝时间分别比维卡仪法延长 3~4 h 和 5~6 h,结合施工现场的实际凝结时间得出,使用贯入阻力法测得的凝结时间更为准确。

表 4 不同方法测得的使用不同减水剂时 HECC 的凝结时间

减水剂	维卡仪法		贯入阻力法	
	初凝时间/min	终凝时间/min	初凝时间/min	终凝时间/min
PCA-1	285	355	530	720
PCA-2	270	340	485	680
PCA-3	260	340	457	655

2.4 水化热

图 8 为不同减水剂对 HECC 水化进程的影响,包括对放热速率(图 8(a))和累计放热量(图 8(b))的影响。掺加 PCA-1 时,诱导期较掺加 PCA-2 和 PCA-3 时略长,到达放热峰的时间也较长,且峰值明显较低。在放热峰出现前,掺加 PCA-2 和 PCA-3 的 HECC 的放热速率比掺加 PCA-1 时略高,且放热峰的出现时间分别较掺加 PCA-1 时提前 1.93、1.77 h;掺加 PCA-1、PCA-2、PCA-3 的 HECC 放热峰值分别为 0.356、0.365、0.376 mW/g,掺加 PCA-1 的 HECC 在放热峰后其放热速率反超 PCA-2 和 PCA-3,39 h 后三组放热速率相近。在各组试验

中,水泥在水化加速期的曲线斜率大致相同。这表明,即便采用不同类型的减水剂,HECC 在水泥水化加速期的水化动力学机制保持不变^[18]。由图 8(b)可知,掺加 PCA-3 的 HECC 累计放热量最大,为 45.689 J/g,其次为 PCA-1 (44.691 J/g) 和 PCA-2 (43.325 J/g)。这可能是因为 PCA-2 在加速期的水化速率比 PCA-1 高,在放热峰后,由于被水化产物覆盖、消耗或缺乏持续补充的分散剂分子,使其分散力较快衰减,掺加 PCA-2 的 HECC 更易发生絮凝。这种絮凝阻碍了水分子向水泥颗粒内部的扩散以及水化产物向外扩散,从而减缓了 PCA-2 在减速期和稳定期的反应速率,导致掺加 PCA-2 时的累计放热量低于掺加 PCA-1 的 HECC。PCA-3 通过多种机制显著加速了水泥的水化反应进程,导致在相同时间内水化反应更彻底、程度更高,因此累计放热量高于 PCA-1。

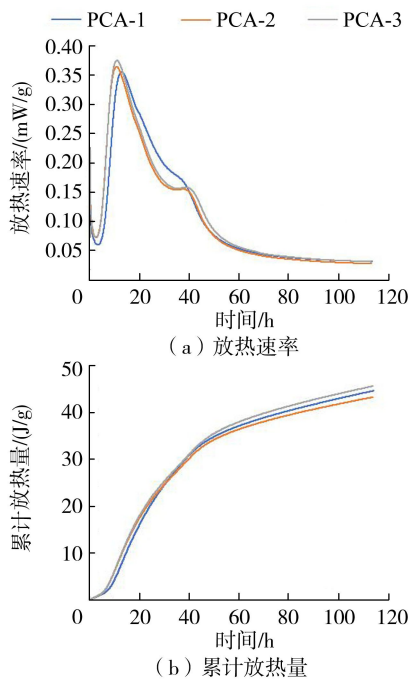


图 8 不同减水剂对 HECC 水化进程的影响

3 结 论

- a. HECC 拌合物的流变特性严格符合宾厄姆模型,其回归方程的相关系数均超过 0.96。随着时间的延长,掺加 3 种不同减水剂的 HECC 屈服应力均有所提高,且在 210 min 时出现大幅提升的拐点,该时间节点与维卡仪法测得的初凝时间相近。
- b. 3 种减水剂在相同掺量(0.25%)下减水效果相当,但对流变参数的调控差异显著:PCA-3 中的快凝组分能够直接促进水泥早期水化反应,使放热峰提前,导致掺加该减水剂的拌合物在初期黏度上升最快、坍落度损失最大、凝结时间最短。PCA-2 主

要通过改变材料颗粒间的吸附作用来调控早期流变特性。其坍落度损失速度和水化放热速率介于早强型和常规减水剂之间。

c. 当 HECC 人工砂粒径增至 1.25 mm 时,试针易受砂粒阻碍,导致维卡仪法判断凝结状态不准。贯入阻力仪法更为准确,其测得的初凝和终凝时间分别比维卡仪法长 3~4 h 和 5~6 h,更贴合滑模施工等现场实际情况。

d. 掺加 PCA-1、PCA-2、PCA-3 的 HECC 的放热峰值分别为 0.356、0.365、0.376 mW/g。尽管减水剂类型不同,但 HECC 的水化动力学机制保持一致。

参考文献:

[1] Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98 (6): 483-492.

[2] 王玉璞,李家正,石妍. 超高延性水泥基复合材料耐久性研究进展 [J]. 人民长江, 2024, 55 (1): 175-183. (Wang Yupu, Li Jiazheng, Shi Yan. Research progress on durability of ultra-high engineered cementitious composites [J]. Yangtze River, 2024, 55 (1): 175-183. (in Chinese))

[3] 韩建平,柴巧利. 高延性纤维增强水泥基复合材料研究应用新进展 [J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28 (3): 18-23. (Han Jianping, Chai Qiaoli. Research and application of engineering cementitious composite [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28 (3): 18-23. (in Chinese))

[4] Li V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用 [J]. 硅酸盐学报, 2007, 35 (4): 531-536. (Li V C. Progress and application of engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35 (4): 531-536. (in Chinese))

[5] Yücel H E, Dutkiewicz M, Yıldızhan F. Application of ECC as a repair/retrofit and pavement/bridge deck material for sustainable structures ; a review [J]. Materials, 2022, 15 (24): 8752.

[6] 李家正. 高延性水泥基复合材料在水工结构中的应用构想 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40 (2): 1-6. (Li Jiazheng. Envisaging the application of hydraulic engineered cementitious composites (HECC) in hydraulic structures [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40 (2): 1-6. (in Chinese))

[7] 孙玉莲,兰驷东,严俊,等. 混凝土面板堆石坝运行期存在的渗流问题及成因研究综述 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14 (6): 431-436. (Sun Yulian, Lan Sidong, Yan Jun, et al. Research on seepage problem and character of concrete face rock-fill dam under operating period [J]. Journal of China Institute of Water Resources

and Hydropower Research, 2016, 14 (6) : 431-436. (in Chinese))

[8] Yang Enhua,Sahmaran M, Yang Yingzi, et al. Rheological control in production of engineered cementitious composites [J]. ACI Materials Journal, 2009, 106 (4) : 357-366.

[9] Ley-Hernández A M, Feys D. Resting time effect on the rheological behavior of cement paste in presence of superplasticizer [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 142:106347.

[10] 胡伟,李家正,石妍,等. 不同配合比的 HECC 力学与干缩性能试验研究[J]. 人民长江, 2024, 55 (4) : 222-229. (Hu Wei, Li Jiazheng, Shi Yan, et al. Experimental study on mechanical and drying shrinkage properties of HECC with different mix proportions[J]. Yangtze River, 2024, 55 (4) : 222-229. (in Chinese))

[11] 杨志全,丁一,杨溢,等. 不同水灰比的牛顿型水泥浆液流变性随时间变化规律[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (19) : 161-167. (Yang Zhiquan, Ding Yi, Yang Yi, et al. Hydration-time-dependent rheological behaviors of Newtonian cement grouts with different water cement ratios [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19) : 161-167. (in Chinese))

[12] Kwan A K H, Fung W W S. Roles of water film thickness and SP dosage in rheology and cohesiveness of mortar[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34 (2) : 121-130.

[13] Kwan A K H, Fung W W S, Wong H H C. Water film thickness, flowability and rheology of cement-sand mortar [J]. Advances in Cement Research, 2010, 22 (1) : 3-14.

[14] Vikan H, Justnes H. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37 (11) : 1512-1517.

[15] 张明璇,王鹏飞,杨涛,等. 聚羧酸减水剂对硫铝酸盐水泥基注浆材料影响[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53 (4) : 348-361. (Zhang Mingxuan, Wang Pengfei, Yang Tao, et al. Effect of polycarboxylic acid superplasticizer on sulphoaluminate cement based grouting material [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53 (4) : 348-361. (in Chinese))

[16] Kuder K G, Ozyurt N, Mu E B, et al. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37 (2) : 191-199.

[17] 林宝城. 高效减水剂对新拌混凝土坍落度损失的影响 [J]. 建材与装饰, 2016 (22) : 161-163. (Lin Baocheng. Effect of high-efficiency superplasticizer on slump loss of fresh concrete [J]. Construction Materials & Decoration, 2016 (22) : 161-163. (in Chinese))

[18] 黄伟,周佳敏,衷从浩,等. 早强型聚羧酸系减水剂对基准水泥早期水化的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (4) : 1211-1221. (Huang Wei, Zhou Jiamin, Zhong Conghao, et al. Effect of early-strength polycarboxylate superplasticizer on early hydration of reference cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41 (4) : 1211-1221. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 07 - 14 编辑: 俞云利)

+++++

(上接第 10 页)

[89] 徐楚原. 机器学习在生态环境大数据中的应用[J]. 化工设计通讯, 2023, 49 (8) : 177-179. (Xu Chuyuan. Application of machine learning in ecological environment big data [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49 (8) : 177-179. (in Chinese))

[90] Yang Xinting, Zhang Song, Liu Jintao, et al. Deep learning for smart fish farming: applications, opportunities and challenges[J]. Reviews in Aquaculture, 2021, 13 (1) : 66-90.

[91] Chen Jinnan, Ding Chengzhi, He Dekui, et al. Assessing the conservation status of Chinese freshwater fish using deep learning[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2023, 33 (4) : 1505-1521.

[92] Agrawal S, Dubey S, Naik K J. Deep reinforcement learning for forecasting fish survival in open aquaculture ecosystem[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195 (11) : 1389.

[93] Yoshida K, Yajima H, Islam M T, et al. Assessment of spawning habitat suitability for Amphidromous Ayu (*Plecoglossus altivelis*) in tidal Asahi River sections in Japan; implications for conservation and restoration [J]. River Research and Applications, 2024, 40 (8) : 1497-1511.

[94] 唐希颖,李化哲,崔丽娟,等. 湿地植物物种多样性无人机高光谱遥感反演研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26 (8) : 1954-1974. (Tang Xiyang, Li Huazhe, Cui Lijuan, et al. Inversion of wetland plant species diversity using UAV hyperspectral data [J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26 (8) : 1954-1974. (in Chinese))

[95] 何博浩. 基于机器学习的潜在海草适宜性栖息地预测研究[D]. 海口:海南大学, 2024.

[96] 崔东文,金波. 基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (5) : 56-60. (Cui Dongwen, Jin Bo. Comprehensive evaluation of water ecological civilization based on random forests regression algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (5) : 56-60. (in Chinese))

[97] Kwon Y S, Kang H, Pyo J. Estimation of aquatic ecosystem health using deep neural network with nonlinear data mapping [J]. Ecological Informatics, 2024, 81 : 102588.

(收稿日期: 2025 - 10 - 19 编辑: 俞云利)