

文章编号: 1005-0523(2021)05-0048-08



养护温度对陶瓷粉-水泥复合胶体水化的影响

陈梦成^{1,2}, 张锐², 赵旺平², 肖建庄³

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 将废弃陶瓷材料加工成陶瓷粉, 通过对陶瓷粉-水泥复合胶凝材料硬化浆体形貌观察, 化学结合水含量和孔溶液碱度的测定, 进行了早期高温养护对陶瓷粉-水泥复合胶凝材料水化特性影响的研究。研究表明: 相同养护条件下, 水泥硬化浆体的化学结合水含量和孔溶液碱度随陶瓷粉掺量的增大而减小; 当陶瓷粉掺量低于 20% 时, 早期高温养护对孔溶液碱度的提高有促进作用, 且对整体水化程度的影响较大; 早期高温养护提高了陶瓷粉-水泥复合胶凝材料的早期水化速率, 使得早期硬化浆体的微观结构更加致密, 但是对后期硬化浆体水化程度的提高有抑制作用。研究成果为陶瓷粉-水泥复合胶凝材料在早期高温养护条件下水化特性的进一步研究提供了试验基础。

关键词: 高温养护; 陶瓷粉; 孔溶液碱度; 化学结合水; 微观形貌

中图分类号: TU528

文献标志码: A

本文引用格式: 陈梦成, 张锐, 赵旺平, 等. 养护温度对陶瓷粉-水泥复合胶体水化的影响[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5): 48-55.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20211026.004

Effect of Curing Temperature on Hydration of Ceramic Powder-Cement Composite Colloid

Chen Mengcheng^{1,2}, Zhang Rui², Zhao Wangping², Xiao Jianzhuang³

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protection of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The ceramic waste materials were processed into ceramic powder and the hydration performance of ceramic powder-cement composite binders under different curing conditions were studied by observing the micro-morphology, measuring the chemically combined water content and the alkalinity of pore solution. It was shown that at the same curing conditions, the greater the adding rate of ceramic powder is, the more the chemically combined water content along with the alkalinity of pore solution of the hardened cement paste decreases; when the adding rate of ceramic powder is less than 20%, the earlier high temperature curing can increase the alkalinity of pore solution and has a great impact on the overall hydration degree; the earlier high temperature curing promotes the earlier hydration rate of ceramic powder-cement composite binders, which makes the micro-structure of the hardened cement paste at the prophase of hydration more compact, but it has an inhibitory effect on the improvement of the hydration degree of the later hardened paste. The results provide an experimental basis for further research on the hydration performance of ceramic powder-cement composite binders under early high

收稿日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51878275)

temperature curing conditions.

Key words: high temperature curing; ceramic powder; alkalinity of pore solution; chemically combined water; micro-morphology

Citation format: CHEN M C, ZHANG R, ZHAO W P, et al. Effect of curing temperature on hydration of ceramic powder-cement composite colloid[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 48-55.

我国作为陶瓷制品的生产和消费大国,每年会产生约1 000万t的陶瓷废弃料,多采用直接倾倒或填埋的方式进行处理,致使废弃料挤占耕地,同时对填埋处周围的土壤、水体和大气造成了严重的污染^[1-5]。已有研究表明,磨细后的陶瓷粉具有一定的火山灰活性^[6-10],可作为水泥的替代品应用于混凝土结构中^[11-15];Huang等^[16],Zhou等^[17]和 Pacheco等^[18]通过试验证明了添加陶瓷粉可以提高混凝土的抗压强度;Raval等^[19]认为将陶瓷粉作为辅助胶凝材料应用于混凝土结构中,既保证了力学性能,也降低了经济成本,是安全处理陶瓷废料的可行性方案。明确“陶瓷粉-水泥复合胶凝材料的水化特性”对于正确评价工程中混凝土结构的耐久性、经济性和环保效益等有重要意义。在项目施工过程中,混凝土浇筑后其中心温度会明显升高,这是由2个原因导致的:①水泥基材料水化放热;②混凝土导热性能差。对于复合胶凝材料,温度的升高会直接影响到其后续的水化反应,水化过程和水化机理将变得更加复杂^[20]。目前国内外关于养护温度对复合胶凝

材料水化特性影响的研究主要集中在粉煤灰-水泥、矿渣-水泥等复合胶凝材料上,而有关养护温度对陶瓷粉-水泥复合胶凝材料性能的研究则鲜有报道。

为此,本文对陶瓷粉-水泥复合胶凝材料硬化浆体的化学结合水量,孔溶液碱度和微观形貌进行测试,并进行了早期高温养护对陶瓷粉-水泥复合胶凝材料水化特性影响的研究,为将废弃陶瓷粉作为混凝土掺合料应用到混凝土结构中提供试验依据。

1 实验

1.1 原材料与配合比

1) 水泥:采用P·O 42.5级水泥。

2) 陶瓷粉:收集陶瓷生产过程中产生的废弃陶瓷料,人工将其破碎,放入水泥试研磨,研磨2h后取出备用。水泥和陶瓷粉两种胶凝材料的化学组成,见表1。

3) 实验所用水泥净浆配合比,见表2。

表1 陶瓷粉和水泥的化学组成(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of ceramic powder and cement (Mass fraction)

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Loss
Cement	21.78	5.71	4.4	57.23	4.83	3.29	0.09	0.63	2.04
Ceramic powder	62.56	23.41	1.32	6.34	0.64	0.06	0.91	1.34	3.42

表2 胶凝材料的净浆配合比

Tab.2 Mixing proportions of cement pastes

Sample	Mixing proportion (by mass)/%		m_w/m_b (Water binder ratio)
	Cement	Ceramic powder	
PC	100	0	
CP10	90	10	
CP20	80	20	0.4
CP30	70	30	

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

注:“PC”代表纯水泥净浆试样;“CP10”代表陶瓷粉掺量为10%的陶瓷粉-水泥净浆试样。

1.2 试件制备

按表2配合比制备水泥净浆,倒入15 mL离心管中,密封养护。采用两种早期高温养护(即7 d内采用高温养护,7 d后采用标准养护)方式,早期高养护温度分别为45 °C和60 °C,相对湿度大于95%,测试龄期分别为1,3,7,28,90 d和180 d。

早期高温养护的具体制度:将成型的净浆试样放置在试验设计的恒温水箱中养护。对于养护龄期在7 d内的试样,直接从恒温水箱中取出进行测试;对于养护龄期超过7 d的试样,在恒温水箱中养护7 d后取出,放置于标准养护室进行标准养护,直至养护时间达到规定的测试时间,取出样品进行测试。

对比试验采用标准养护(温度为 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度大于95%)。

1.3 表征

待陶瓷粉-水泥净浆试样养护至规定龄期,去掉试样两端部分,取试样中间部分破碎并留样,用无水乙醇浸泡7 d以上以中止胶凝材料的水化。

1.3.1 孔溶液碱度的测定

将待测试样碎块研磨成细粉,放入75 °C烘干箱中干燥24 h,用方孔筛(孔径为0.08 mm)收集目标细粉末。称取5 g目标细粉末放入烧杯中,加50 ml蒸馏水搅拌30 min,静置2 h,用pH计测定上层清液的pH值。每组设置3个平行试样,取其平均值用于表征孔溶液碱度。

1.3.2 化学结合水的测定

将待测试样碎块研磨成细粉,取部分粉末试样放入75 °C烘箱中,干燥24 h至恒重,记录此时粉末质量为 m_1 ;然后将粉末试样置于马弗炉中,用1 000 °C高温灼烧3 h,待粉末试样逐渐降温至恒温时,记录此时粉末质量为 m_2 。式(1)和式(2)给出了单位质量陶瓷粉-水泥复合浆体化学结合水含量 W_{nc} 的计算方法,如下所示

$$W_{nc} = \frac{(m_1 - m_2) / m_2 - L_B}{1 - L_B} \quad (1)$$

$$L_B = (1 - \beta)L_C + \beta L_S \quad (2)$$

式中: L_C 和 L_S 分别为水泥和陶瓷粉的烧失量,%; L_B 为单位质量复合胶凝材料硬化浆体中原材料的烧失量,%; β 为复合胶凝材料中陶瓷粉的质量分数,%。每组设置3个平行试样,取其平均值用于表征化学结合水含量。

1.3.3 SEM扫描电镜分析准备

将净浆试样破碎后,取其中部分碎片制成不超过 1 cm^2 的小试样,然后将小试样固定于粘有导电胶的样本台上,并对观测表面进行喷铂处理,将小试样放入SU8010型场发射扫描电子显微镜设备中,然后对小试样的微观形貌进行测试分析。

2 结果与讨论

2.1 孔溶液碱度

图1为标准养护,45 °C和60 °C早期高温养护条件下,不同陶瓷粉掺量的水泥硬化浆体的孔溶液碱度随养护龄期变化的曲线。

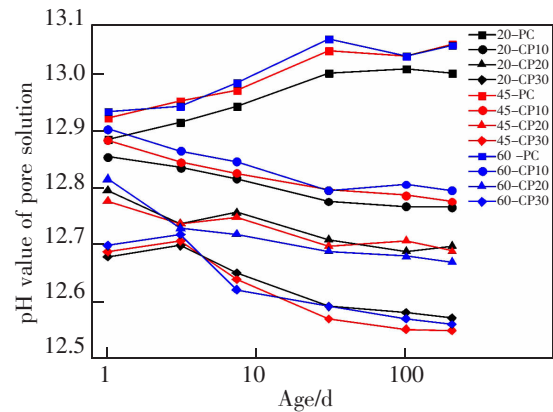


图1 不同养护条件下陶瓷粉-水泥复合浆体的孔溶液pH值
Fig.1 pH value of the pore solution of ceramic powder-cement composite slurry under different curing conditions

由图1可见,当养护温度相同时,掺入陶瓷粉会降低硬化浆体的孔溶液碱度,且陶瓷粉掺量越大,孔溶液碱度降低值越大;纯水泥硬化浆体28 d前的孔溶液碱度随养护龄期的增大呈增大的趋势,掺陶瓷粉的水泥硬化浆体28 d前的孔溶液碱度随养护龄期的增大呈减小的趋势。这可能是由2个因素导致:①掺入陶瓷粉后,水泥的质量分数相应减少,水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及溶出的碱金属离子也随之减少;②陶瓷粉具有火山灰活性,可消耗掉一部分溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。在水化反应中后期,纯水泥硬化浆体与掺陶瓷粉的水泥硬化浆体中孔溶液碱度均呈现出随养护龄期的增大而趋于稳定的趋势,这是由于此时陶瓷粉的活性基本已经完全激发,水化不需要消耗较多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,孔溶液pH值开始保持稳定。

早期高温养护下,纯水泥硬化浆体(PC)和掺10%陶瓷粉(CP10)的水泥硬化浆体中孔溶液碱度

均高于标准养护下的孔溶液碱度,且 CP10 组孔溶液碱度受早期高温养护影响的程度小于 PC 组;掺 20%陶瓷粉(CP20)的水泥硬化浆体中孔溶液碱度受早期高温养护的影响最小;掺 30%陶瓷粉(CP30)的水泥硬化浆体在早期高温养护作用下孔溶液碱度有低于标准养护的趋势。究其原因:①早期高温养护使得水泥水化反应加快,导致水化产生的碱金属离子和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 相应增多;②当陶瓷粉掺量越多,消耗掉的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 越多,在两种因素共同作用下出现了上述现象。由图 1 还可以看出,当陶瓷粉掺量相同时,不同早期高温养护条件对硬化浆体中孔溶液碱度的影响很小。

2.2 化学结合水

图 2 为标准养护,45 °C 和 60 °C 早期高温养护条件下,不同陶瓷粉掺量的水泥硬化浆体的化学结合水量随养护龄期变化的曲线。

由图 2 可见,当养护条件相同时,掺陶瓷粉的水泥硬化浆体的化学结合水量均低于纯水泥硬化

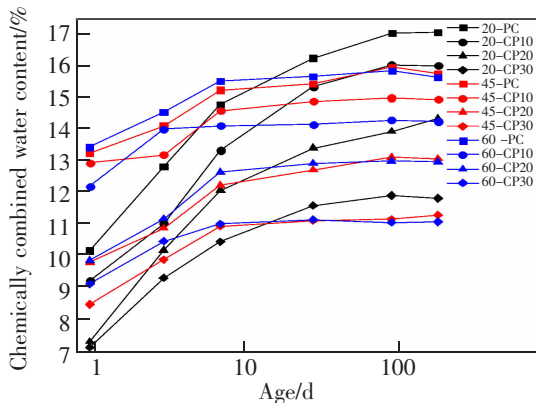


图 2 不同养护条件下陶瓷粉-水泥复合浆体的化学结合水量

Fig.2 Chemically combined water content of ceramic powder-cement composite slurry under different curing conditions

浆体的化学结合水量,且陶瓷粉掺量越大,化学结合水含量越低。从整个养护龄期来看,1 d 时陶瓷粉-水泥硬化浆体中化学结合水的含量最低,增长速率最快;7 d 前硬化浆体中化学结合水的保持较快增长速率,7 d 后硬化浆体中化学结合水的增长速率逐渐放缓;28 d 后硬化浆体中化学结合水的增长速率进一步减缓且趋于稳定;90 d 后硬化浆体中化学结合水量几乎无变化,这一现象从孔溶液碱度

的变化规律中也可以看出。

与标准养护相比,纯水泥硬化浆体(PC)在 45 °C 和 60 °C 早期高温养护条件下,1 d 时化学结合水分别提高了 30.29%,31.56%;90 d 时,化学结合水分别下降了 6.11%,6.70%。说明,在水化反应前期,早期高温养护对提高水泥的水化速率有积极的作用;从长期来看,早期高温养护对纯水泥硬化浆体最终水化程度的影响不利。还可以看出,45 °C 早期高温养护对纯水泥硬化浆体水化程度的影响规律与 60 °C 早期高温养护对纯水泥硬化浆体水化程度的影响规律相似。这是因为,在水化反应前期,早期高温养护会加速水泥颗粒的水化速率,生成大量的水化产物沉积在尚未水化的水泥颗粒表面,对水泥水化程度的进一步提高起到了抑制作用,使得水化反应提前进入扩散阶段。由图 2 还可以看出,对于不同陶瓷粉掺量的硬化浆体,早期高温养护对化学结合水含量影响的变化规律与标准养护对化学结合水含量影响的变化规律相似。

为了讨论早期高温养护对化学结合水的影响,定义了温度影响系数 Δw_n ^[21],其计算如式(3)所示。

$$\Delta w_n = \frac{w_{n2} - w_{n1}}{w_{n1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: w_{n1} 为标准养护条件下硬化浆体中化学结合水含量; w_{n2} 为 45 °C 或 60 °C 早期高温养护条件下硬化浆体中化学结合水含量。

图 3 和图 4 分别为 45 °C 和 60 °C 早期高温养护条件下,陶瓷粉-水泥复合胶凝材料硬化浆体的温度影响系数的变化规律。

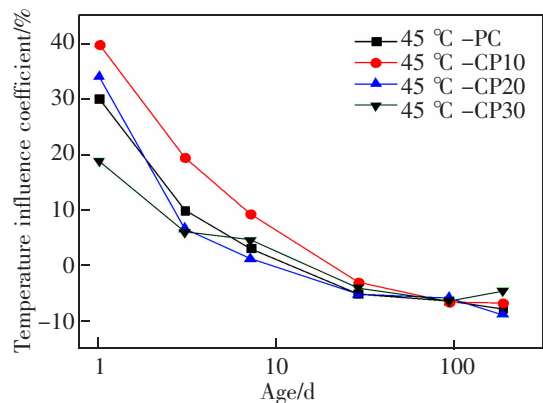


图 3 45 °C 早期高温养护时各组试样的温度影响系数
Fig.3 Temperature influence coefficient of each group of samples during early high temperature curing at 45 °C

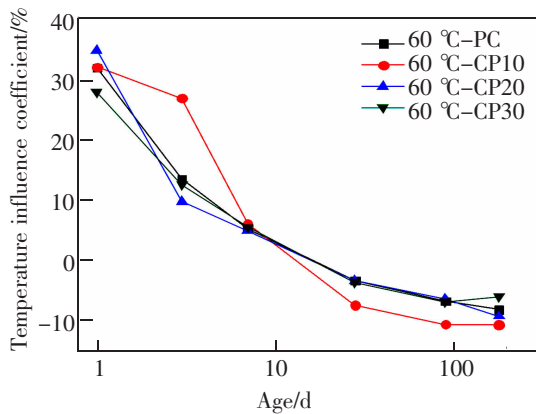


图4 60 °C早期高温养护时各组试样的温度影响系数
Fig.4 Temperature influence coefficient of each group of samples during early high temperature curing at 60 °C

由图3、图4可知,随着养护龄期的增加,各组试样的温度影响系数逐渐降低。从整体来看,1 d时温度影响系数最高,说明1 d时水化反应速率最快;7 d时温度影响系数下降到10%左右;180 d时温度影响系数均为负值。这进一步说明在水化反应前期,早期高温养护可以加快胶凝材料水化反应的速率;在水化反应后期,早期高温养护会降低陶瓷粉-水泥复合浆体的水化程度。表3给出了早期高温养护下各试验组温度影响系数的变化幅值,可以看出:试验组CP10的温度影响系数变化幅值最大,试验组CP30的温度影响系数变化幅值最小。说明陶瓷粉掺量为10%的陶瓷粉-水泥硬化浆体中化学结合水量受早期高温养护影响的程度最大,随着陶瓷粉掺量的增大,陶瓷粉-水泥硬化浆体中化学结合水量受早期高温养护影响的程度逐渐降低。从表3中还可以看出,试验组CP10和CP20的温度影响系数变化幅度均高于试验组PC,试验组CP30的温度影响系数变化幅度低于试验组PC。由此,可以推断,当陶瓷粉掺量低于20%时,陶瓷粉-水泥复合浆体

的水化程度受早期高温养护的影响较大,且超过早期高温养护对纯水泥硬化浆体的影响程度;当陶瓷粉掺量高于20%时,早期高温养护对陶瓷粉-水泥复合浆体水化程度的影响开始降低。

2.3 微观形貌

图5和图6分别为标准养护,45 °C和60 °C早期高温养护条件下,纯水泥硬化浆体(PC)和掺20%陶瓷粉(CP20)的水泥硬化浆体养护3 d和28 d时的SEM图。

从图5可以看出,早期高温养护3 d时,纯水泥硬化浆体(PC)的水化产物含量相比标准养护明显增多,C-S-H凝胶也更加密实;早期高温养护28 d时,PC组的微观结构相比标准养护更加疏松,水化产物的搭接处存在较多孔隙。从图6可以看出,试验组CP20硬化浆体在早期高温养护3 d时的致密程度明显高于标准养护3 d时的致密程度,絮状的C-S-H凝胶与片状Ca(OH)₂相互搭接形成更为致密的结构,并且微观形貌中未出现明显的薄弱界面;早期高温养护28 d时,CP20组的微观形貌表面含有大量的絮状C-S-H凝胶,较标准养护28 d时更加疏松。随着龄期的增长,纯水泥浆体(PC)和掺20%陶瓷粉(CP20)的水泥硬化浆体,在标准养护28 d时的微观形貌均比标准养护3 d时更加致密,而在早期高温养护28 d时的微观形貌与早期高温养护3 d时相差不大,这与前面的化学结合水试验结果相吻合。这进一步说明,在水化反应前期,早期高温养护能够促进胶凝材料水化反应快速进行,生成大量水化产物,在水化反应后期(28 d后),标准养护对胶凝材料最终水化程度的影响较早期高温养护更加有利。从图5、图6还可以看出45 °C和60 °C两种早期高温养护对浆体的微观形貌产生的影响差异较小。

表3 温度影响系数的变化幅值

Tab.3 Variation amplitude of temperature influence coefficient

Temperature/°C	PC	CP10	CP20	CP30
45	37.75	46.40	42.47	23.33
60	40.32	43.85	42.91	33.86

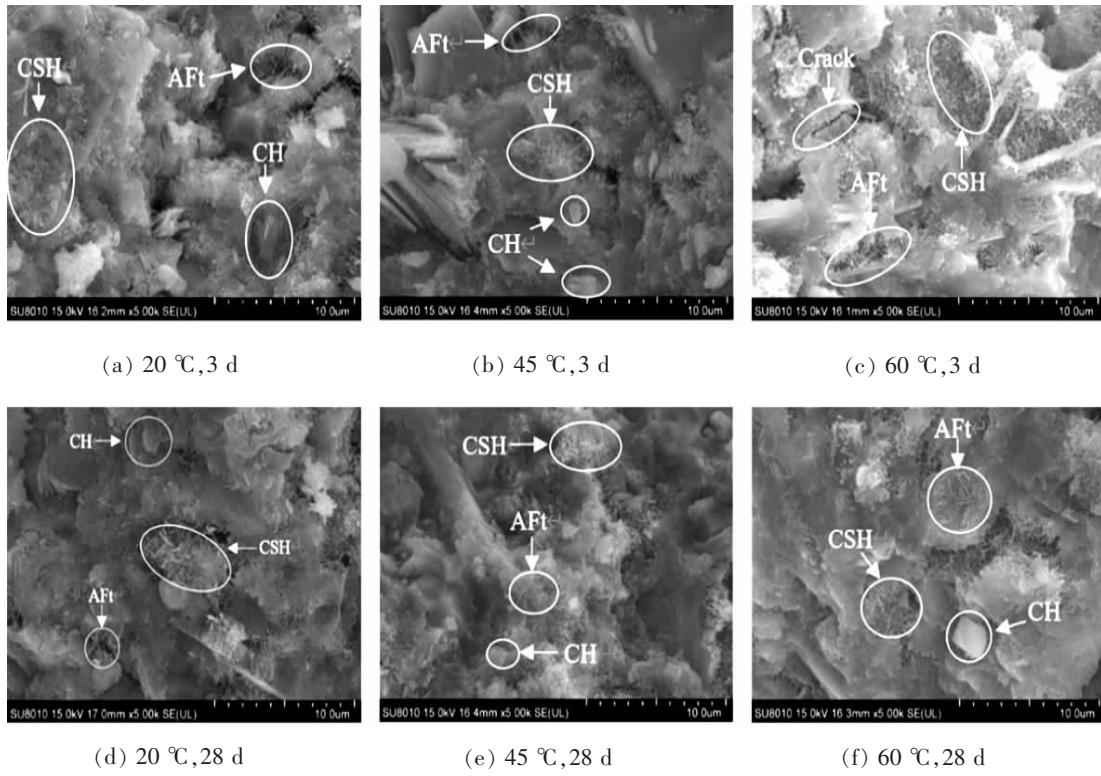
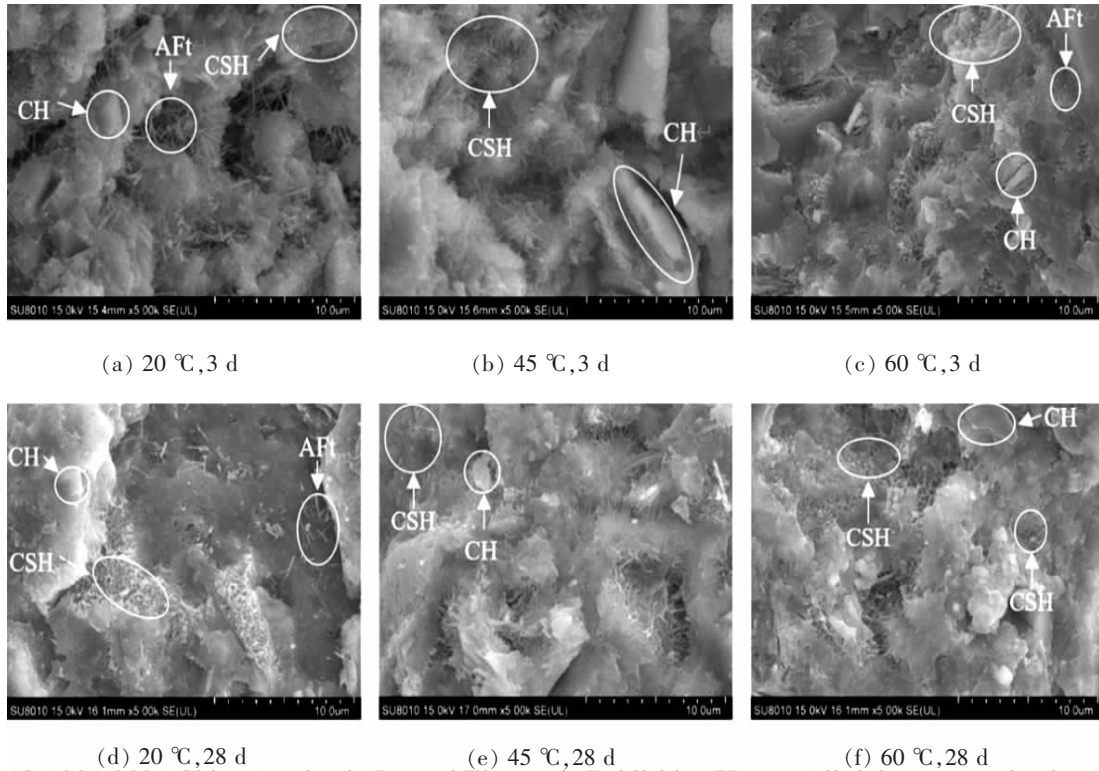


图5 不同养护条件下 PC 组水化 3,28 d 时 SEM 图

Fig.5 SEM photographs of PC group hydration at 3,28 d under different curing conditions



(d) 20 °C, 28 d

(e) 45 °C, 28 d

(f) 60 °C, 28 d

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 6 不同养护条件下 CP20 组水化 3,28 d 时 SEM 图

Fig.6 SEM photographs of CP20 group hydration at 3,28 d under different curing conditions

3 结论

1) 在标准养护、45℃和60℃早期高温养护条件下,水泥硬化浆体的孔溶液碱度和化学结合水量均随着陶瓷粉掺量的增大而减小;45℃早期高温养护对陶瓷粉-水泥复合胶凝材料水化特性的影响与60℃早期高温养护产生的影响一致。

2) 当陶瓷粉掺量小于20%时,温度影响系数的变化幅度均高于纯水泥硬化浆体,对整体水化程度的影响较大,且早期高温养护对孔溶液碱度的提高有促进作用;当陶瓷粉掺量大于20%时,温度影响系数的变化幅度要低于纯水泥硬化浆体,对整体水化程度的影响逐渐降低,且早期高温养护对孔溶液碱度的提高有抑制的趋势;当陶瓷粉掺量在20%附近时,早期高温养护对孔溶液碱度的影响不明显。

3) 在水化反应前期,早期高温养护对激发陶瓷粉的火山灰活性、加快水泥的水化速率、提高硬化浆体微观结构的致密性有积极的作用。从整个水化过程来看,早期高温养护对后期硬化浆体整体水化程度的提高有抑制作用。

参考文献:

- [1] 梁向峰,曹远尼,肖理红,等. 陶瓷废料在建筑材料中的应用进展[J]. 材料导报,2015,29(13):145-150.
LUAN X F, CAO Y N, XIAO L H, et al. Progress in application of ceramic waste in building materials[J]. Materials Reports, 2015, 29(13): 145-150.
- [2] 曹雅娴,侯慧芳,刘曙光,等. 固废陶瓷在水泥基材料中的应用和研究进展[J]. 中国陶瓷,2020,56(12):53-60.
CAO Y X, HOU H F, LIU S G, et al. Application and research progress of solid waste ceramics in cement based materials[J]. China Ceramics, 2020, 56(12): 53-60.
- [3] KANNAN D M, ABOUBAKR S H, EL-DIEB A S, et al. High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144(30): 35-41.
- [4] 彭跃辉,黄琳雅,陈梦成,等. 陶瓷粉再生混凝土氯离子扩散性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 177-185.
PENG Y H, HUANG L Y, CHEN M C, et al. Study on chloride diffusion properties of reclaimed concrete from ceramic powder[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(2): 177-185.
- [5] MOHAMMADHOSSEINI H, LIM N H A S, TAHIR M M, et al. Performance evaluation of green mortar comprising ceramic waste as cement and fine aggregates replacement[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(6): 1-7.
- [6] NURAN A, MEVLUT U. The use of waste ceramic tile in cement production[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(3): 497-499.
- [7] 黄丹,王功勋,卢胜男,等. 水热条件下陶瓷抛光砖粉的水化活性[J]. 硅酸盐通报,2016,35(2):561-567.
HUANG D, WANG G X, LU S N, et al. Hydration activity of ceramic polishing powder at hydrothermal conditions[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(2): 561-567.
- [8] 陈梦成,方苇,许开成. 陶瓷掺合料对水泥胶砂性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(3):793-798.
CHEN M C, FANG W, XU K C. Effect of ceramic admixtures on performance of cement mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(3): 793-798.
- [9] 王功勋. 陶瓷抛光砖粉作辅助胶凝材料的火山灰活性[J]. 硅酸盐学报,2010,38(7):1229-1234.
WANG G X. Pozzolanic activity of ceramic polishing powder as supplementary cementitious material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7): 1229-1234.
- [10] 王功勋,谭琳,田蕊,等. 陶瓷抛光砖粉与水泥熟料的相互作用[J]. 硅酸盐通报,2012,31(6):1586-1592.
WANG G X, TAN L, TIAN B, et al. Interaction between ceramic polishing powder and cement clinker[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1586-1592.
- [11] LI L, LIU W, YOU Q, et al. Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120853.
- [12] ALARAB A A, HAMAD B S, CHEHAB G, et al. Use of ceramic-waste powder as value-added pozzolanic material with improved thermal properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9): 04020243.
- [13] HUSEIEN G F, SAM A R M, SHAH K W, et al. Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted alkali-activated concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117574.
- [14] LI L, LIU W, YOU Q, et al. Relationships between microstructure and transport properties in mortar containing recycled ceramic powder[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121384.
- [15] HOSSEIN M, NOR H A S L, MAHMOOD M, et al. Effects of waste ceramic as cement and fine aggregate on durability performance of sustainable mortar[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(6): 3623-3634.
- [16] HUANG B S, DONG Q, BURDETTE E G. Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic material into Portland cement and asphaltic concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(12): 3451-3456.

- [17] ZHOU C L,ZHANG Z X,ZHANG J. Effect of ceramic waste powder on the performance of concrete[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2017, 12 (9): 899-902.
- [18] PACHECO-TORGAL F,JALALI S. Reusing ceramic wastes in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 24(5):832-838.
- [19] RAVAL A D,PATEL I N,PITRODA J,et al. Eco-efficient concretes:Use of ceramic powder as a partial replacement of cement[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2013, 3(2): 1-4.
- [20] WANG Q,YAN P Y,FENG J J. Design of high-volume fly ash concrete for a massive foundation slab[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(2):71-81.
- [21] 韩方晖. 复合胶凝材料水化特性及动力学研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2015.
- HAN F H. Study on hydration characteristics and kinetics of composite binder[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing),2015.



第一作者:陈梦成(1962—),男,二级教授,博士生导师,博士。华东交通大学党委委员、副校长,江西省先进工作者,中国优秀留学回归人员,赣鄱英才555工程领军人才,江西省优势科技创新团队学术带头人。研究方向为工程结构材料耐久性,组合结构。E-mail:531782112@qq.com。

(责任编辑:吴海燕 刘棉玲)