

文章编号:1007-9629(2022)07-0677-09

水泥-淤泥焚烧灰复合胶凝材料的 抗压强度与流动性

倪彤元^{1,2}, 马文斌¹, 杨 杨^{1,2,*}, 陈阁翰¹, 张睿泽¹

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023;

2. 浙江省工程结构与防灾减灾技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310023)

摘要:将湖、河淤泥焚烧后的残渣灰(淤泥焚烧灰,简称焚烧灰)在建材领域进行资源化处置,对比了焚烧灰与粉煤灰的火山灰活性,探讨了养护龄期、焚烧灰掺量和水胶比对水泥-焚烧灰复合胶凝材料净浆硬化浆体(简称为硬化浆体)抗压强度的影响;对比了焚烧灰与粉煤灰对新拌砂浆流动性的影响,探讨了焚烧灰掺量对砂浆流动性的影响规律;采用X射线衍射仪(XRD)和扫描电镜(SEM)研究了硬化浆体的微观结构.结果表明:焚烧灰的28 d抗压强度活性指数达到83%,可作为部分替代硅酸盐水泥的胶凝材料使用;随着焚烧灰掺量的增加,含焚烧灰新拌砂浆的流动性显著下降,硬化浆体的抗压强度早期下降明显,但后期有所提高;当焚烧灰掺量为20%时,硬化浆体的抗压强度达到最大值;水胶比越小,焚烧灰对硬化浆体抗压强度的影响越显著;焚烧灰的火山灰活性促进了复合胶凝材料后期的水化反应.

关键词:淤泥焚烧灰;复合胶凝材料;活性指数;抗压强度;流动性

中图分类号:TU528.09

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.07.004

Compressive Strength and Fluidity of Cement-Sludge Incineration Ash Composite Cementitious Materials

NI Tongyuan^{1,2}, MA Wenbin¹, YANG Yang^{1,2,*}, CHEN Gehan¹, ZHANG Ruize¹

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Structures & Disaster Prevention and Mitigation Technology of
Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The residual ash from incinerating lake and river sludge was used as raw material in the field of building materials. The pozzolanic activities of sludge incineration ash (SIA) and fly ash (FA) were compared, and the effects of curing age, the addition of SIA and the water-binder ratio on the compressive strength of hardened cement-SIA composite cementitious materials paste (abbreviated as hardened cement paste) were investigated. The influences of SIA and FA on mortar fluidity were compared, and the influence of SIA addition on mortar fluidity was analyzed. The microstructure of hardened cement paste was analyzed by using X-ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the compressive strength activity index of SIA reaches 83% in 28 d, which can be used as a partial substitute for cement. With the increase of SIA addition, the fluidity of mortar containing SIA decreases significantly, and the compressive strength of hardened cement paste at early ages decreases sharply, while

收稿日期:2021-04-27; 修订日期:2021-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778583);浙江省基础公益项目(LGE20E080021);浙江省科技计划项目省级重点研发项目(2021C1060)

第一作者:倪彤元(1971—),男,浙江金华人,浙江工业大学高级工程师,博士.E-mail: hznity@zjut.edu.cn

通讯作者:杨 杨(1962—),男,江苏扬中人,浙江工业大学教授,博士生导师,博士.E-mail: yangyang@zjut.edu.cn

that at late ages increases to some extent. The compressive strength of hardened cement paste reaches the maximum value when the SIA addition is 20%. The smaller water-binder ratio is, the more significant the influence of SIA on the compressive strength of hardened cement paste is. The pozzolanic activity of SIA can promote the hydration of cement-SIA composite cementitious materials at later ages.

Key words: sludge incineration ash; composite cementitious material; activity index; compressive strength; fluidity

淤泥是在静水或缓慢的流水环境中经生物化学作用形成的富含有机物的沉积物,其天然含水量大于液限,天然孔隙比大于或等于1.5,是引起河床、湖床上升的主要原因^[1].近年来,随着社会的发展及人们环保意识的增强,在“五水共治”政策下,大规模开展了许多河道和湖泊的清淤工作,在此过程中产生了大量淤泥,对淤泥进行处置已成为环保亟需解决的新问题^[2-3].淤泥的传统处置方法主要包括用作耕植土、填埋或海洋倾倒等^[4-6],而焚烧处理高燃值淤泥的方法因其速度快、减量化程度高而愈发得到重视^[7].如何采取适当的技术进一步处理焚烧后产生的淤泥焚烧灰(sludge incineration ash, SIA,下文简称焚烧灰),使其达到稳定化、无害化和资源化,已成为当前亟需解决的新课题.

本文在对比焚烧灰(SIA)与粉煤灰(FA)抗压强度活性指数的基础上,研究了养护龄期、焚烧灰掺量(质量分数,文中涉及的掺量、水胶比等均为质量分数或质量比)和水胶比(m_w/m_b)对硅酸盐水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度的影响,以分析焚烧灰用于水泥基材料的可行性;对比了采用焚烧灰和粉煤灰分别部分替代水泥制备的砂浆的流动性,以及焚烧灰掺量对砂浆流动性的影响;并用X射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)研究了水化产物种类及硬化浆体的微观结构.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)采用产自浙江桐乡的运河牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,表观密度为3.08 g/cm³,比表面积为358 m²/kg,其各项性能指标均符合GB 175—2020《通用硅酸盐水泥》的要求;焚烧灰(SIA)由太湖淤泥经800~900℃高温自持焚烧处理后得到,表观密度为2.46 g/cm³,比表面积为597 m²/kg,平均粒径为15 μm;粉煤灰(FA)为Ⅱ级粉煤灰,表观密度为2.39 g/cm³,比表面积为442 m²/kg,平均粒径为19 μm.

采用ARL ADVANT'X 4200型X射线荧光光谱仪(XDF)对比分析焚烧灰、粉煤灰及普通硅酸盐

水泥的化学组成,结果见表1.采用基于Mastersizer 3000型激光衍射技术的粒度仪测量分析上述3种材料的粒度分布情况;采用X'Pert PRO型X射线衍射仪(XRD)分析焚烧灰与粉煤灰的矿物组成;采用GeminiSEM 500型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察焚烧灰与粉煤灰的微观形貌.其结果分别见图1~3.

表1 水泥、焚烧灰和粉煤灰的主要化学组成
Table 1 Main chemical compositions of cement, SIA and FA
w/%

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅
C	24.95	6.99	54.33	2.83	0.21	2.16	2.89	0.66	0
SIA	42.11	29.06	11.68	6.82	2.15	1.91	1.86	0.90	1.19
FA	48.70	35.85	6.10	3.94	0.76	1.17	0.59	0.67	0.53

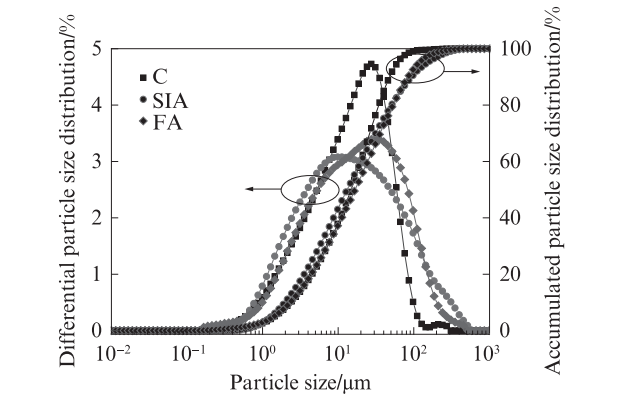


图1 水泥、焚烧灰与粉煤灰的粒度分布
Fig. 1 Particle size distribution of cement, SIA and FA

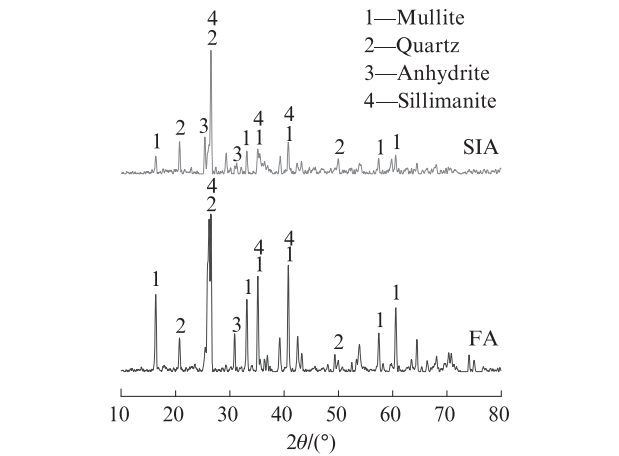


图2 焚烧灰与粉煤灰的矿物组成
Fig. 2 Mineral compositions of SIA and FA

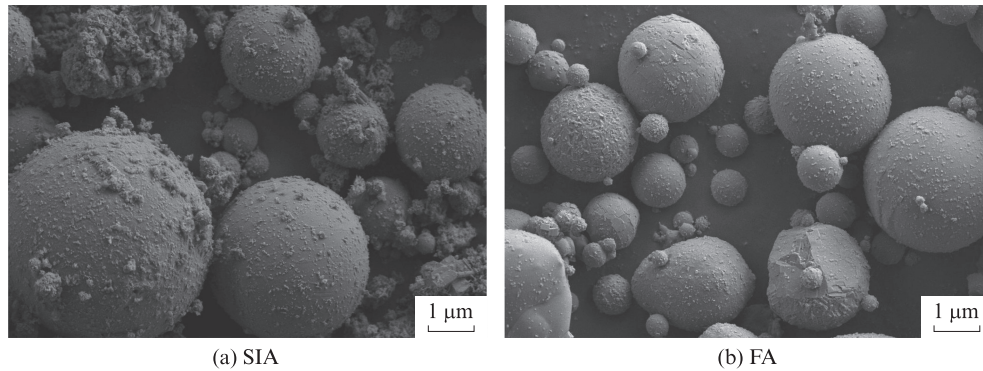


图3 焚烧灰和粉煤灰的微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of SIA and FA

粉煤灰可以部分替代水泥用于制备复合胶凝材料及混凝土,并对水泥及混凝土性能有显著影响^[8-11].由表1和图2可见,焚烧灰与粉煤灰的主要化学组成和矿物组成相似.由图3可见:焚烧灰颗粒与粉煤灰颗粒形状相似,大小不一,但球形度更好,具有一定的形态效应;焚烧灰中有较多呈蜂窝状物质,是淤泥中未燃尽的有机物所形成的炭粒,该炭粒疏松多孔且比表面积大,从而使焚烧灰具有较强的吸水性.

1.2 焚烧灰的抗压强度活性指数

参照GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》,进行焚烧灰的抗压强度活性指数试验,并与粉煤灰的抗压强度活性指数进行对比.试验砂浆(Ref-RI, SIA-RI和FA-RI)的配合比及抗压强度活性指数试验结果见表2,并用跳桌法测定砂浆试件的流动度.由表2可见,焚烧灰的28 d抗压强度活性指数大于粉煤灰,表明该焚烧灰具有类似粉煤灰的火山灰活性^[9,12-13],可以作为辅助胶凝材料部分替代水泥用于混凝土中^[14-15].

表2 砂浆配合比及抗压强度活性指数试验结果

Table 2 Mix proportion and experiment results of compressive strength activity index of cement mortars

Sample	Mix proportion/g					Activity index		
	C	SIA	FA	Standard sand	Water	Flexural strength of 28 d/MPa	Compressive strength of 28 d/MPa	Compressive strength activity index of 28 d/%
Ref-RI	450	0	0	1 350	225	7.3	45.7	100
SIA-RI	315	135	0	1 350	225	6.2	38.1	83
FA-RI	315	0	135	1 350	225	7.0	35.9	79

2 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体的抗压强度

分别以焚烧灰掺量(0%、10%、20%、30%、40%、50%)和水胶比(0.30、0.35、0.40)为试验参数,来研究养护龄期、焚烧灰掺量和水胶比对水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度的影响.为表达方便,将试件分组编号,其中Ref表示对照组,焚烧灰掺量为0,“-”后的数字代表水胶比;对于SIA××-××,“-”前的数字代表焚烧灰掺量,“-”后的数字代表水胶比.参照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》拌制水泥净浆,水泥净浆试件尺寸为40 mm×40 mm×40 mm.

2.1 养护龄期的影响

由1.2中焚烧灰抗压强度活性指数分析结果可知,焚烧灰是一种与粉煤灰类似的辅助胶凝材料,掺入复

合胶凝材料体系初期时会被一层水膜包裹,其活性难以被激发^[16],因此在水泥中掺入焚烧灰会导致胶凝体系早期强度有所降低^[13,17].另外,与粉煤灰类似,焚烧灰也具有形态效应、微集料效应和火山灰效应:在胶凝体系水化反应初期,未反应的焚烧灰颗粒可以填充浆体中的孔隙,形成致密的微观结构;随着水化反应的进行,早期未反应的焚烧灰开始参与二次水化,使得硬化浆体的微观结构更加密实,特定条件下复合胶凝体系硬化浆体的强度甚至可以超过纯水泥硬化浆体的强度^[17-19].

图4为水泥-焚烧灰胶凝材料硬化浆体抗压强度的经时发展.由图4可以看出:各硬化浆体的抗压强度随着养护龄期的延长而增大,纯水泥硬化浆体(Ref)养护28 d后的抗压强度基本达到稳定,后期强度增长较少;低焚烧灰掺量复合胶凝材料硬化浆体,如SIA10-0.30、SIA10-0.35和SIA10-0.40的28 d抗

压强度分别为180 d时的83%、86%和82%;高焚烧灰掺量复合胶凝材料硬化浆体,如SIA50-0.30、SIA50-0.35、SIA50-0.40的28 d抗压强度分别为180 d时的76%、80%和68%。总体而言,掺加了焚烧灰的硬化水泥浆体,其抗压强度在28 d后还有一定程度的增长,且后期强度增速随焚烧灰掺量的增加而增

大。这是因为水化早期焚烧灰活性较低,替代部分水泥后使胶凝体系中的水泥用量减少,浆体中的 Ca^{2+} 浓度降低,导致水化产物量减少,微观结构不够密实,早期强度较低;水化后期,随着焚烧灰的火山灰效应逐渐显现,水化产物持续增加,硬化浆体中的孔隙得以填充,强度逐渐提高^[20]。

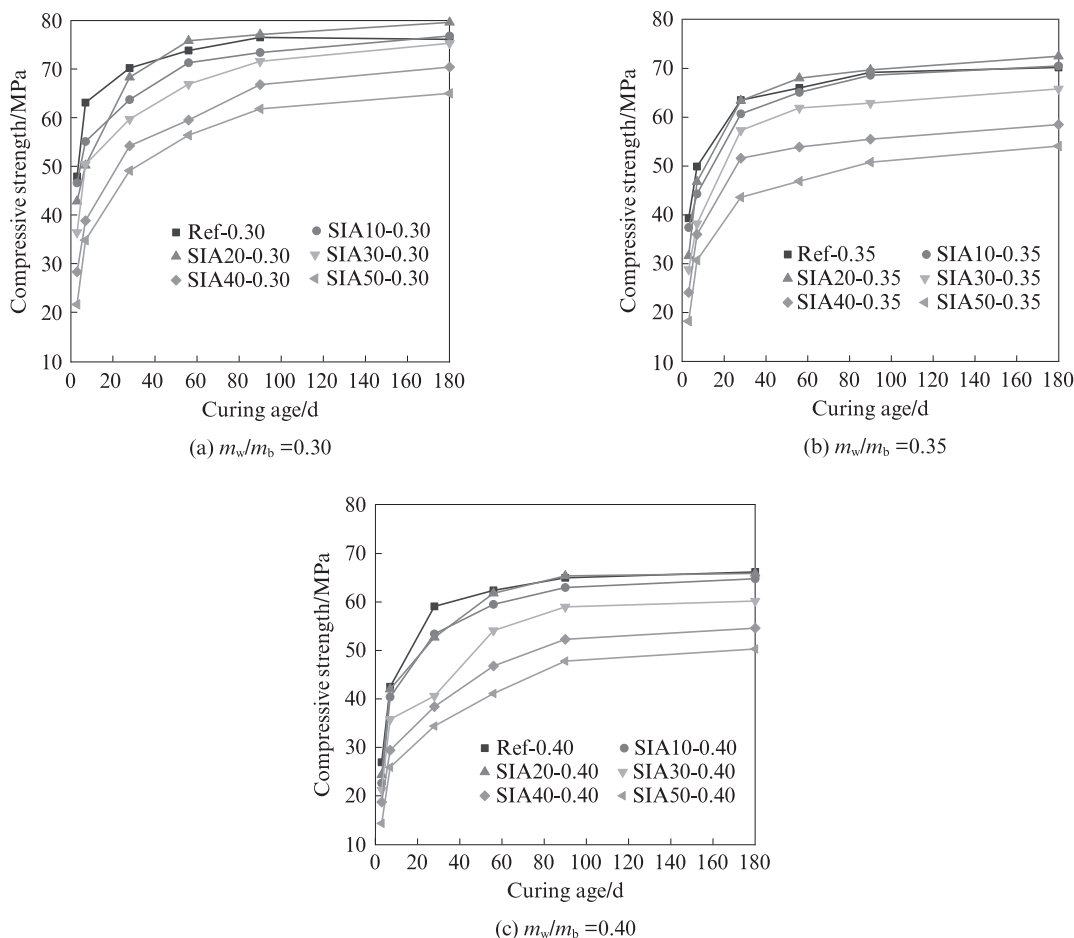


图4 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度的经时发展

Fig. 4 Compressive strength development with time of hardened cement-SIA composite cementitious materials paste

2.2 焚烧灰掺量的影响

焚烧灰部分替代水泥后,复合胶凝体系中的水泥浓度被稀释,尽管水胶比固定,但复合胶凝体系的有效水灰比随着焚烧灰掺量的增加而增大,从而导致孔溶液中的 Ca^{2+} 浓度降低,颗粒间的连接变弱,早期抗压强度相应降低。焚烧灰掺量越高,复合胶凝材料硬化浆体抗压强度下降越明显^[21]。

图5为水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度随焚烧灰掺量的变化。由图5可见:(1)随着焚烧灰掺量的增加,3种水胶比的硬化浆体抗压强度曲线总体呈下降趋势。(2)当焚烧灰掺量较低时,硬化浆体中后期的抗压强度可以接近甚至超过纯水泥浆体,如SIA20-0.30的28 d抗压强度为Ref-0.30的97%,

180 d抗压强度为Ref-0.30的105%;当焚烧灰掺量较高时,硬化浆体各龄期抗压强度均有明显下降,尤其是早期抗压强度与纯水泥硬化浆体相差较大,随着后期抗压强度的提升,其与纯水泥硬化浆体抗压强度之间的差距缩小,但仍低于纯水泥硬化浆体的抗压强度,如SIA50-0.30的28 d抗压强度为Ref-0.30的70%,180 d抗压强度为Ref-0.30的85%。这是因为低掺量焚烧灰的水泥-焚烧灰硬化浆体中水泥用量较多,微观结构较为密实,而掺入少量焚烧灰后焚烧灰的微集料效应和火山灰效应会使浆体的结构更加密实,抗压强度也随之增长。然而,随着焚烧灰掺量的继续增加,尽管水胶比未变,但有效水灰比不断增大,复合胶凝体系中的水泥浓度不断减少,且焚烧灰较低的

活性使得复合胶凝材料体系中的水化产物量减少,硬化浆体孔隙较多,抗压强度因此降低^[22].随着焚烧灰掺

量的增加,硬化浆体的抗压强度均呈先升后降规律,当焚烧灰掺量为20%时,抗压强度达到最大值.

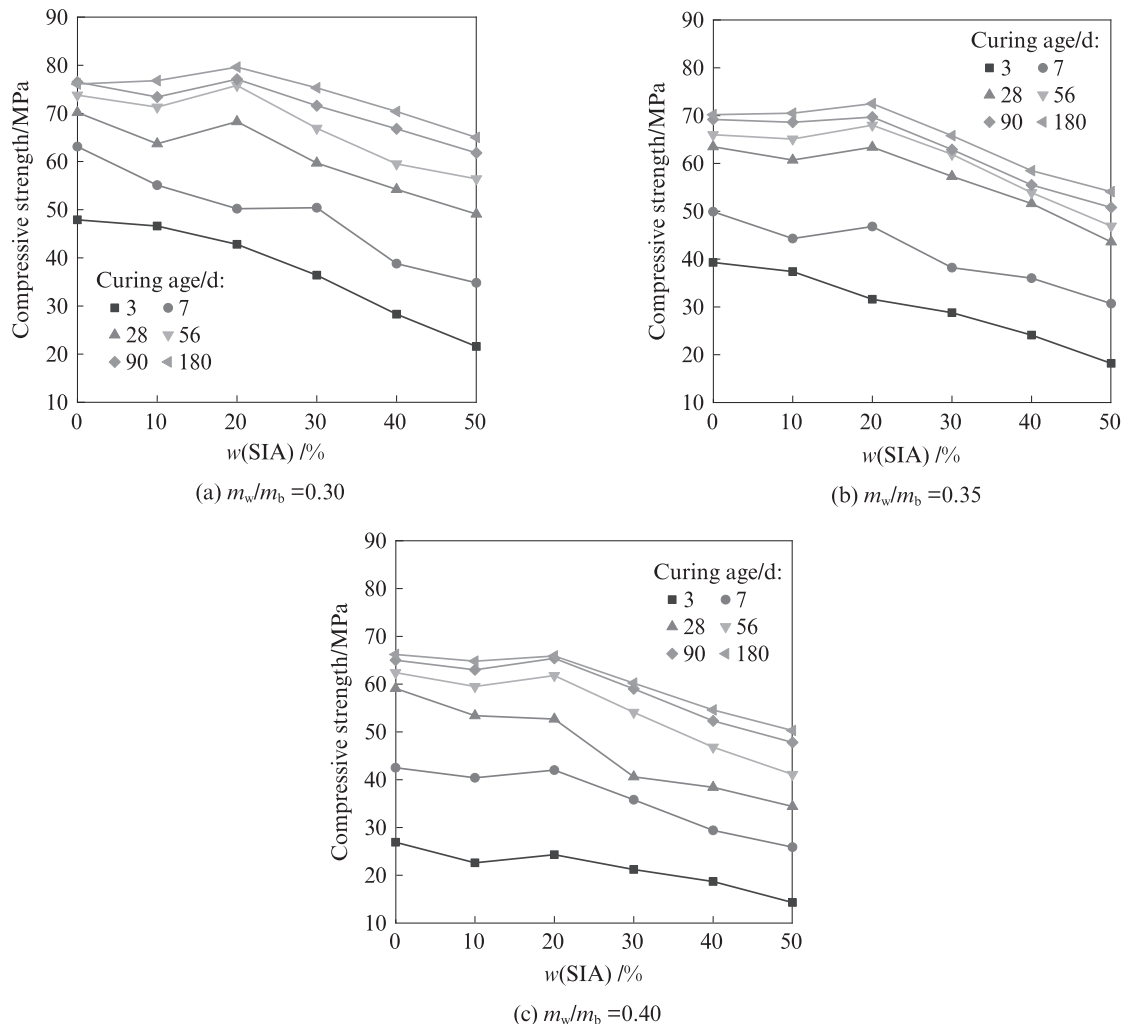


图5 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度随焚烧灰掺量的变化

Fig. 5 Compressive strength development with SIA content of hardened cement-SIA composite cementitious materials paste

2.3 水胶比的影响

图6为水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度与水胶比的关系.由图6可见:(1)随着水胶比的增大,各SIA掺量的水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度显著下降,这种现象在早期尤为明显,后期下降幅度有所减缓.(2)当水胶比由0.30增大到0.40时,纯水泥硬化浆体(Ref)、SIA30、SIA50的3d抗压强度分别降低了44%、42%、34%;Ref、SIA30、SIA50的180d抗压强度降低了13%、20%、23%.表明焚烧灰对硬化浆体抗压强度的影响随水胶比的增大而减小.这是因为焚烧灰具有微集料效应,其平均粒径小于水泥颗粒,水化早期填充在水泥颗粒间隙中时可以密实硬化浆体结构,从而提升抗压强度.当水胶比较小时,焚

烧灰的这种微集料效应更加显著,此时硬化浆体内孔隙较少,焚烧灰可以较好地填充在这些孔隙中;水胶比较大时,硬化浆体孔隙增多,焚烧灰的微集料效应有限,对硬化浆体孔结构的改善不明显^[22-24].

3 水泥-焚烧灰复合胶凝材料的流动性

3.1 焚烧灰和粉煤灰对新拌砂浆流动度的影响

新拌砂浆流动性是胶凝材料工作性的重要指标之一,可用流动度表示.图7为Ref-RI、FA-RI和SIA-RI砂浆流动性的测试结果.由图7可见:相对于Ref-RI组,FA-RI的流动度下降了6%,SIA-RI的流动度下降了13%,后者下降值是前者的2倍多,表明焚烧灰对浆体流动度的影响较粉煤灰显著.这一方面是因为焚烧灰比粉煤灰的粒径小,比

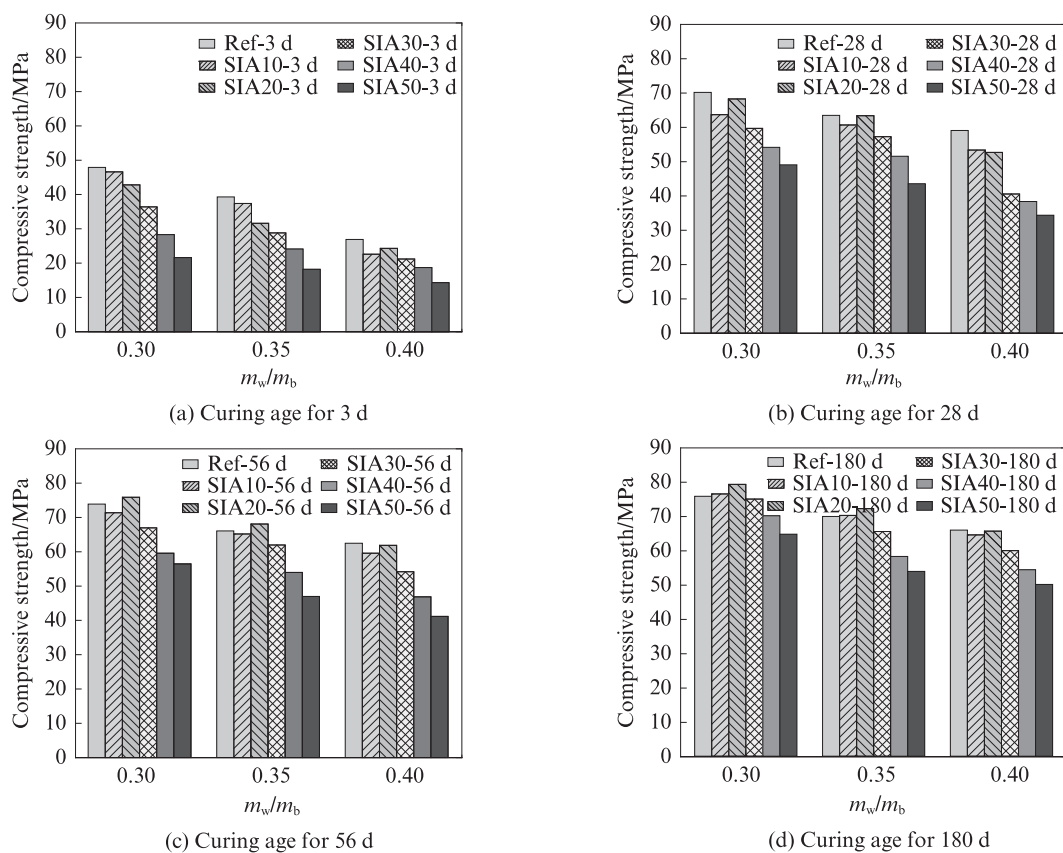


图6 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度与水胶比的关系

Fig. 6 Relationship between compressive strength and water-binder ratio of hardened cement-SIA composite cementitious materials paste

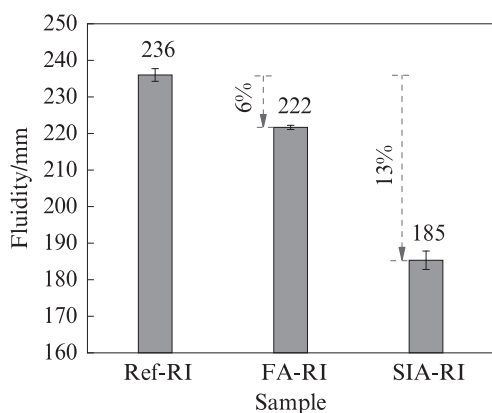


图7 焚烧灰和粉煤灰对新拌砂浆流动度的影响

Fig. 7 Influence of SIA and FA on the fluidity of fresh mortar

表面积大,需水量更高;另一方面,焚烧灰中除了球状微珠,还有部分未充分燃烧的物质,其表面疏松多孔,吸水性强,使得部分拌和水并没有发挥作用,砂浆拌和过程中的有效水胶比小于理论水胶比,从而导致砂浆流动度下降。

3.2 焚烧灰掺量对新拌砂浆流动度的影响

图8为焚烧灰掺量对新拌砂浆流动度的影响。由图8可见:随着焚烧灰掺量的增大,新拌砂浆流动度

显著下降——与纯水泥砂浆相比,当焚烧灰掺量为10%时,砂浆流动度下降9%;当焚烧灰掺量增大到50%时,砂浆流动度下降37%。焚烧灰中含有许多球状微珠(图3),理论上,这些微珠在新拌砂浆中能够起到滚珠作用,减小浆体内摩阻力,从而增大砂浆的流动性^[24],但图8显示新拌砂浆的流动度随着焚烧灰的掺入而下降,主要原因是焚烧灰中含有较多未充分燃烧的有机质,其表面多孔、易吸水,减少了新拌

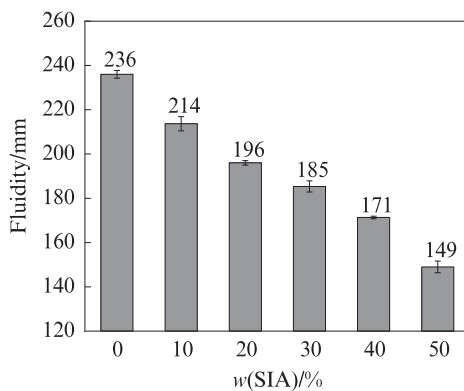


图8 焚烧灰掺量对新拌砂浆流动度的影响

Fig. 8 Influence of SIA content on the fluidity of fresh mortar

砂浆中的自由水含量,导致其流动性下降,该现象随着焚烧灰掺量的增大而愈发显著。

3.3 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体的微观结构

3.3.1 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体水化产物物相分析

以水胶比 0.35,焚烧灰掺量分别为 0%、10%、20%、30%、40% 和 50% 制备水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体。养护龄期为 3、28 d 时硬化浆体水化产物的 XRD 图谱见图 9。图 9 显示,硬化浆体 28 d 的三硫型水化硫铝酸钙(AFt)峰强比 3 d 时低,28 d 的单硫型水化硫铝酸钙(AFm)峰强比 3 d 时高。这是因为在水化早期,水化硫铝酸钙主要以高硫型为主;在水化反应后期,水化硫铝酸钙主要以单硫型为主。由图 9(a)可见:养护 3 d 时,硬化浆体的晶体物相主要包括未反应的水泥熟料矿物硅酸三钙(Ca_3SiO_5)、焚烧灰中的惰性矿物石英(SiO_2)、水泥水化反应生成的氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$),以及少量 AFt、AFm;随着焚烧灰掺量的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 Ca_3SiO_5 的衍射峰强度逐渐降低, SiO_2 的衍射峰逐渐增强。这是因为一方面,随着焚烧灰掺量的增加,其主要惰性成分石英会随

之增加,复合体系中的水泥含量减少,水泥的主要熟料矿物 Ca_3SiO_5 和水泥的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也随之减少;另一方面,由于焚烧灰具有一定的火山灰活性,随着焚烧灰掺量的增加,其火山灰反应会消耗更多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,从而导致 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少。由图 9(b)可见:与养护 3 d 相比,养护龄期为 28 d 时,相同配比硬化浆体的 Ca_3SiO_5 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度降低,说明此时有更多的水泥熟料水化,而焚烧灰火山灰活性的发挥主要在水化后期,其活性成分与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,使得 28 d 龄期硬化浆体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少;随着焚烧灰掺量的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 Ca_3SiO_5 的衍射峰强度亦逐渐降低,石英的衍射峰逐渐增强,与 3 d 龄期时的规律一致。由此可知,焚烧灰的稀释作用降低了复合胶凝材料中水泥熟料的含量,从而延缓了复合胶凝材料的早期水化进程,但其火山灰活性可以促进复合胶凝材料的后期水化,因此选择适宜的焚烧灰掺量,复合胶凝材料硬化浆体强度仍然可以达到较高值,这与图 5 中水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体抗压强度随焚烧灰掺量的变化规律一致。

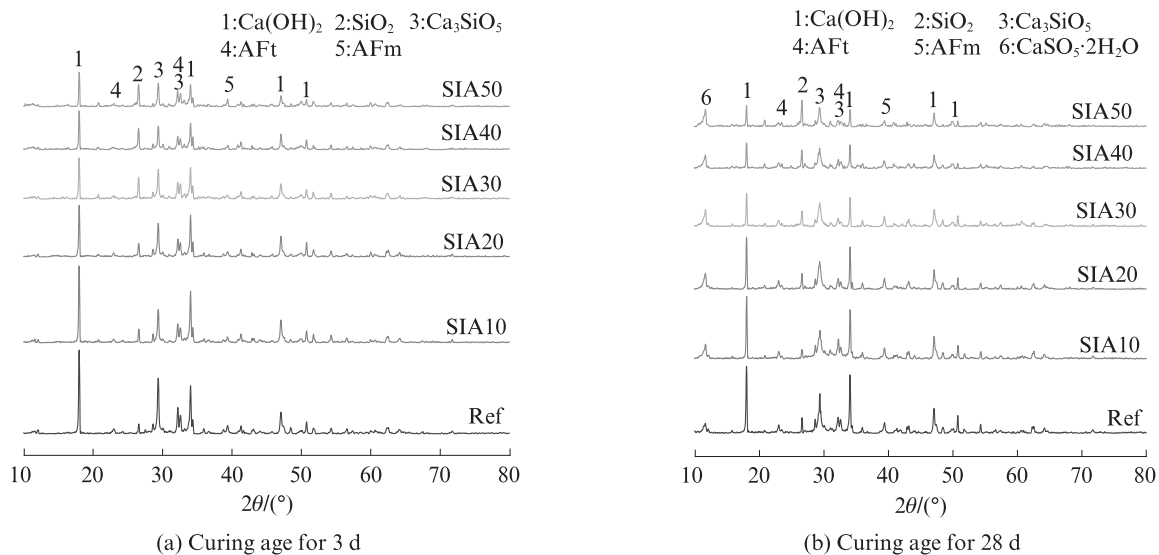


图9 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体的XRD图谱

Fig. 9 XRD patterns of hardened cement-SIA composite cementitious materials pastes

3.3.2 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体水化产物形貌分析

图 10 为焚烧灰掺量 10%、30% 和 50% 的复合胶凝材料水化 3、28 d 时硬化浆体中水化产物的 SEM 照片。由图 10 可见:(1)水化 3 d 时,因焚烧灰部分替代水泥,体系中水泥浓度减小, Ca^{2+} 浓度降低,水化产物随之减少,浆体结构比较疏松,水化产物主要以

C-S-H 凝胶和针棒状的 AFt 为主;水化 28 d 时,焚烧灰发生火山灰反应,生成了二次水化产物,浆体结构较为致密,水化产物主要以 C-S-H 和箔片状的 AFm 为主。对于焚烧灰掺量较大的复合体系(SIA50),由于其水化速度缓慢,在 3 d 龄期时,水化产物主要以 C-S-H 凝胶为主,在 28 d 龄期时,水化产物主要以 C-S-H 凝胶和 AFt 为主,均未见箔片状的 AFm。

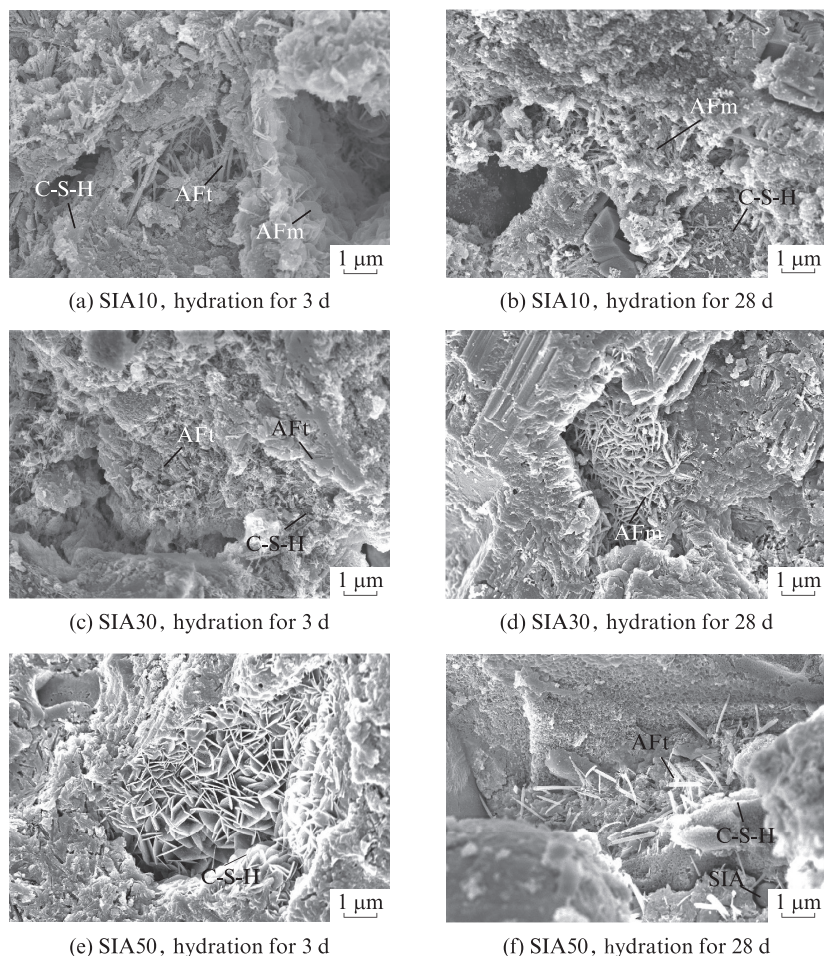


图10 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体的SEM照片

Fig. 10 SEM images of hardened cement-SIA composite cementitious materials pastes

4 结论

(1) 焚烧灰的28 d抗压强度活性指数为83%, 可以作为胶凝材料部分替代水泥用于混凝土中。

(2) 当水胶比相同时, 随着焚烧灰掺量的增加, 水泥-焚烧灰复合胶凝材料硬化浆体的早期抗压强度下降较多, 但后期抗压强度仍有增长; 当水胶比较小时, 焚烧灰的微集料效应可显著提高硬化浆体的抗压强度。

(3) 由于焚烧灰含有较多未充分燃烧的有机质, 其表面多孔、易吸水, 导致新拌焚烧灰砂浆的流动度随着焚烧灰的掺入而下降, 且焚烧灰掺量越大, 影响愈显著。

(4) 焚烧灰的掺入会降低水泥熟料的含量, 但其火山灰活性可以促进硬化浆体后期的水化反应。

参考文献:

[1] 王亚阁. 城市中小河道清淤工程施工方案探讨[J]. 工程设计与设计, 2017(8): 118-120.

WANG Yage. Discussion on the construction plan of city medium and small river dredging engineering[J]. Construction & Design for Project, 2017(8): 118-120. (in Chinese)

[2] 包建平, 朱伟, 闵佳华. 中小河道治理中的清淤及淤泥处理技术[J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 56-62, 68.

BAO Jianping, ZHU Wei, MIN Jiahua. Technology of dredging and sludge treatment in small and medium-sized river regulation [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(1): 56-62, 68. (in Chinese)

[3] 贾鲁涛, 崔强, 梅浩, 等. 湖泊淤泥与生活污泥复合烧结砖的制备、性能及环境安全性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 1301-1307.

JIA Lutao, CUI Qiang, MEI Hao, et al. Preparation, properties and environmental safety of fired bricks made from lake silt and sewage sludge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(6): 1301-1307. (in Chinese)

[4] THOMSEN L B S, CARVALHO P N, DOS PASSOS J S, et al. Hydrothermal liquefaction of sewage sludge; energy considerations and fate of micropollutants during pilot scale processing[J]. Water Research, 2020, 183: 116101.

[5] 张娟. 污水处理厂污泥处置及利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(12): 41-43.

ZHANG Juan. Study on sludge disposal and utilization of sewage

- treatment plant[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(12):41-43. (in Chinese)
- [6] 朱明璇, 李梅, 刘承芳, 等. 污泥处理处置技术研究综述[J]. 山东建筑大学学报, 2018, 33(6): 63-68.
- ZHU Mingxuan, LI Mei, LIU Chengfang, et al. Research review of sludge treatment and disposal technology [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2018, 33(6): 63-68. (in Chinese)
- [7] ZHAO Y Z, REN Q Q, NA Y J. Promotion of cotton stalk on bioavailability of phosphorus in municipal sewage sludge incineration ash[J]. Fuel, 2018, 214: 351-355.
- [8] BERRY E E. Fly ash in concrete [M]. Hamilton: Canmet, 1986:85.
- [9] SUN G W, TANG Q Q, ZHANG J J, et al. Early activation of high volume fly ash by ternary activator and its activation mechanism[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 267:110638.
- [10] 陈登, 高世明, 张钰晖, 等. III级粉煤灰与水泥浆体的微界面改性[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):447-453.
- CHEN Deng, GAO Shiming, ZHANG Yuhui, et al. Modification of micro-interface between grade III fly ash and cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 447-453. (in Chinese)
- [11] 杨杨, 王亦聪, 高凡, 等. 基于温度-应力试验的粉煤灰混凝土抗裂性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1101-1108.
- YANG Yang, WANG Yicong, GAO Fan, et al. Cracking resistance of fly ash concrete studied with temperature-stress tests [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(8): 1101-1108. (in Chinese)
- [12] JIANG C H, WANG A Y, BAO X F, et al. A review on geopolymers in potential coating application: Materials, preparation and basic properties [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32:101734.
- [13] JIANG C H, WANG A Y, BAO X F, et al. Protective geopolymer coatings containing multi-componential precursors: Preparation and basic properties characterization [J]. Materials, 2020, 13(16):3448.
- [14] 金宇, 冯伟鹏, 董志君, 等. 辅助胶凝材料玻璃体结构与胶凝活性的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3):3016-3020.
- JIN Yu, FENG Weipeng, DONG Zhijun, et al. Research progress on the glass structure of supplementary cementitious materials with relation to their hydraulic reactivity[J]. Materials Reports, 2021, 35(3):3016-3020. (in Chinese)
- [15] 于素素, 崔素萍, 王剑锋, 等. 调质污泥煅烧制备辅助胶凝材料研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(6):4-8,12.
- YU Susu, CUI Suping, WANG Jianfeng, et al. Study on preparation of auxiliary cementitious material by calcined and conditioned sludge[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2018 (6): 4-8,12. (in Chinese)
- [16] 王强, 陈志城, 阎培渝. 等强度条件下水胶比和粉煤灰掺量对混凝土自收缩的影响[J]. 混凝土, 2006 (12): 1-3.
- WANG Qiang, CHEN Zhicheng, YAN Peiyu. The influence of w/b ratio and fly ash addition on the autogenous shrinkage of concrete with same strength[J]. Concrete, 2006 (12): 1-3. (in Chinese)
- [17] 蒋林华, 林宝玉, 蔡跃波. 高掺量粉煤灰水泥胶凝材料的水化性能研究[J]. 硅酸盐学报, 1998, 26(6):695-701.
- JIANG Linhua, LIN Baoyu, CAI Yuebo. Study on hydration properties of cement binders with a large amount of fly ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1998, 26(6):695-701. (in Chinese)
- [18] 杨静, 覃维祖. 粉煤灰对高性能混凝土强度的影响[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3):218-222.
- YANG Jing, QIN Weizu. Influence of fly ash on compressive strength of HPC[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(3): 218-222. (in Chinese)
- [19] 鲁丽华, 潘桂生, 陈四利, 等. 不同掺量粉煤灰混凝土的强度试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(1):107-111.
- LU Lihua, PAN Guisheng, CHEN Sili, et al. Strength of concrete with different contents of fly ash[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(1):107-111. (in Chinese)
- [20] 李会艳, 谢友均, 龙广成, 等. 大掺量粉煤灰对砂浆强度的影响[J]. 混凝土, 2006 (6): 36-37,41.
- LI Huiyan, XIE Youjun, LONG Guangcheng, et al. Effect of high fly ash on strength of mortar[J]. Concrete, 2006 (6): 36-37, 41. (in Chinese)
- [21] XU A, SARKAR S L, NILSSON L O. Effect of fly-ash on the microstructure of cement mortar[J]. Materials and Structures, 1993, 26:414-424.
- [22] 石明霞, 谢友均, 刘宝举. 水泥-粉煤灰复合胶凝材料的水化性能研究[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(2): 114-119.
- SHI Mingxia, XIE Youjun, LIU Baoju. Study of hydration characteristics of cement pastes containing fly ash[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(2): 114-119. (in Chinese)
- [23] 元强, 邓德华, 张文恩, 等. 粉煤灰掺量、水胶比对砂浆流动度和强度的影响[J]. 粉煤灰, 2005, 17(1):7-9.
- YUAN Qiang, DENG Dehua, ZHANG Wen'en, et al. Effect of fly ash mixture, water/cementitious materials ratio on flowability and strength of mortar[J]. Coal Ash China, 2005, 17(1):7-9. (in Chinese)
- [24] 周梅, 周钢, 朱涵, 等. 基于均匀试验设计的自密实混凝土性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(2):285-291.
- ZHOU Mei, ZHOU Gang, ZHU Han, et al. The property research of self compaction concrete on uniform design experiment [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2008, 27(2): 285-291. (in Chinese)