

文章编号:1007-9629(2021)03-0473-10

50 ℃ 养护下超细粉煤灰-水泥复合 胶凝材料的性能研究

韩 笑^{1,2}, 冯竟竟¹, 孙传珍¹, 王珊珊¹

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用化学结合水量测试、压汞测孔法、扫描电镜观测以及力学性能测试等方法, 系统研究了 50 ℃ 养护条件下超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料的水化程度、微观结构以及力学性能。结果表明: 与普通粉煤灰相比, 超细粉煤灰在机械研磨和 50 ℃ 高温养护的共同作用下活性大大提高, 复合胶凝材料的水化速度更快, 孔径分布更细化, 抗压、抗折强度更高; 超细粉煤灰掺量为 25% 时, 复合胶凝材料在整个龄期的化学结合水量和孔结构密实度均高于纯水泥净浆, 3 d 时的抗压强度和抗折强度已高于纯水泥砂浆近 1 倍, 并且龄期越长, 对强度的提高作用越明显; 超细粉煤灰掺量为 50% 时, 体系中细集料较多, 造成颗粒级配分布不合理, 并且缺少充足 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碱性激发, 对于水泥水化程度、孔结构密实度和强度的改善作用与掺量为 25% 时相比有所降低, 但 7 d 时的抗折强度仍达到了纯水泥砂浆的 1.67 倍。

关键词: 高温养护; 超细粉煤灰; 微观结构; 力学性能

中图分类号: TU525

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.005

Research on Properties of Ultrafine Fly Ash and Cement Cementitious Materials under Curing at 50 ℃

HAN Xiao^{1,2}, FENG Jingjing¹, SUN Chuazhen¹, WANG Shanshan¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Non-evaporable water test, mercury intrusion porosimetry(MIP), scanning electron microscopy (SEM) observation and mechanical properties test were used to study the hydration degree, microstructure and mechanical properties of ultrafine fly ash and cement cementitious materials under curing at 50 ℃ to compare the property of ultrafine fly ash with that of ordinary fly ash. Research results show that, compared with the ordinary fly ash, under the mechanical grinding and high temperature curing at 50 ℃, the ultrafine fly ash and cement cementitious materials has faster hydration rate, finer pore size distribution and higher compressive strength and flexural strength. When the content of ultrafine fly ash is 25%, the hydration degree and pore structure compactness of the composite cementitious material are higher than that of pure cement paste, and the compressive strength and flexural strength of composite cementitious material at 3 d are nearly twice higher than that of pure cement mortar, the longer the age, the more obvious the effect of improving the strength. However, when the content of ultrafine fly ash is 50%, the concentration of cement in the system is greatly reduced, because of the large amount of fine aggregate, the

收稿日期:2019-12-11; 修订日期:2020-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878400, 51678344)

第一作者:韩 笑(1993—),女,山东济宁人,大连理工大学博士生. E-mail:17861500110@163.com

通讯作者:冯竟竟(1981—),女,山东淄博人,山东农业大学教授,硕士生导师,博士. E-mail:fengjingjing@sdau.edu.cn

particle distribution is unreasonable, and the activity of ultrafine fly ash is reduced due to the lack of sufficient $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Therefore, the degree of hydration, the compactness of the pore structure, the compressive strength and flexural strength of the composite cementitious materials containing 50% ultrafine fly ash is lower than that of containing 25%, and the flexural strength at 7 d still reaches 1.67 times that of pure cement mortar.

Key words: high temperature curing; ultrafine fly ash; microstructure; mechanical property

降低大体积混凝土内部温升、控制其温度裂缝,较为经济、高效的常用方法之一是在混凝土中大量掺加粉煤灰^[1-2].然而,由于粉煤灰早期活性较低,会减缓粉煤灰-水泥复合胶凝材料的早期水化程度^[3-4],且粉煤灰掺量越大,粉煤灰-水泥复合胶凝材料的早期水化程度越低^[5],进而导致相应浆体内部的毛细孔隙增多,硬化浆体的早期强度降低^[6-7].采用机械激发方式磨细粉煤灰,是激发粉煤灰活性的有效手段之一. Shaikh 等^[8]认为,平均颗粒尺寸在 34 nm 左右的粉煤灰颗粒可以显著增强其自身的火山灰活性,改善砂浆和混凝土的早期强度.另有研究表明^[9-11],颗粒较细的超细粉煤灰的成核作用可以加速水泥的水化,改善混凝土的孔隙结构,提高混凝土的抗渗性.超细粉煤灰一般采用机械研磨方法获取,因其不再具有“球形滚珠”效应,因此可以增加浆体的黏聚性和保水性^[12].同时,粉煤灰的磨细能大大改善粉煤灰的品质,减小粉煤灰质量的波动^[13].

目前已有许多学者探究了超细粉煤灰的掺加对砂浆和混凝土微观结构及其力学性能的影响^[14-17],但是有关大掺量超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料的研究尚不明确.因此,本文以大体积混凝土内部温度环境为研究背景,养护温度设置为 50℃,采用化学结合水量测试、压汞测孔法、扫描电镜观测和力学性能测试等方法,研究了 50℃高温养护条件下大掺量超细粉煤灰对超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料水化程度、硬化浆体微观结构以及力学性能的影响.

1 试验

1.1 原材料

强度等级为 42.5 级的基准水泥,其性能符合 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》;普通 I 级粉煤灰(FA);由 I 级粉煤灰研磨(球磨机转速设置为 250 r/min,球灰比¹⁾为 1:0.25,球磨时间为 5 h)所得的超细粉煤灰(UFA);ISO 标准砂.水泥和粉煤灰的化学组成见表 1;水泥、普通粉煤灰和超细粉煤灰的物理性能见表 2、3.

1.2 配合比

表 4 为净浆配合比;砂浆配合比与净浆相同,水胶比均为 0.4,砂胶比为 3.0.

按照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》,成型尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的砂浆试件,用于抗压、抗折强度试验,测试龄期分别为 3、7、28、90 d;养护条件为:试件成型后,在(20±2)℃,相对湿度 RH≥90%的标准养护箱内养护 24 h,拆模后放入 50℃、相对湿度 100%的高温养护箱内养护 6 d,之后进行室温水养(达到 3 d 龄期的试件直接取出测试).

净浆试件在 10 mL 离心管中成型,养护条件与砂浆试件相同.达到测试龄期后,取出净浆试件,将试件中间部分浸泡于无水乙醇中至少 24 h,使其脱水并终止水化后开展化学结合水量测试、压汞试验和扫描电镜观测.

表 1 水泥和粉煤灰的化学组成
Table 1 Chemical compositions of cement and FA/UFA w/%

Raw material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	SO ₃	MgO	P ₂ O ₅
Cement	63.83	21.56	4.44	2.78	2.57	3.14	2.32	2.68
FA/UFA	3.45	53.60	28.12	11.45		0.43	0.87	

表 2 水泥的物理性能
Table 2 Physical properties of cement

Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Sieve residue (by mass)/%	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa		Stability
		Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d	
346	1.2	159	214	26.2	53.9	5.7	8.7	Qualified

1) 本文涉及的比值、掺量等均为质量比或质量分数.

表3 FA和UFA的物理性能
Table 3 Physical properties of FA and UFA

Raw material	Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Activity index/%	IL(by mass)/%	Particle size/μm
FA	384	68	4.6	3~50
UFA	651	86	4.2	<7

表4 净浆配合比
Table 4 Mix proportions of cement paste

Sample code	Cement	FA	UFA	Water
C-100%	100	0	0	40
FA-50%	50	50	0	40
UFA-25%	75	0	25	40
UFA-50%	50	0	50	40

1.3 净浆试件性能测试方法

化学结合水量采用灼烧失重法测试。将净浆试件磨细,放入60℃真空干燥箱中烘24h至恒重,称量样品质量;再将样品放入1050℃的高温瓦斯炉内灼烧至恒重后取出;冷却8h之后将样品放入干燥皿中,再次称量样品质量。

压汞测试选用型号为Autopore II 9220的压汞仪。压汞仪的可测压力范围为 $4.00 \times 10^{-3} \sim 4.13 \times 10^2$ MPa,可测孔径范围为3 nm~314 μm,试验时选取接触角 θ 为130°。

扫描电镜观测采用型号为KYKY-1000B的环境扫描电子显微镜。截取净浆试件新鲜自然断面进行观测,无需抛光以免破坏其表面物质形貌,样品厚度不应超过3 mm。

在进行以上试验之前,将净浆试件取出放置在105℃真空干燥箱中烘4h,以使净浆试件中的自由水和酒精蒸发。未及时测试的净浆试件置于干燥皿中保存备用。

2 结果与讨论

2.1 化学结合水量

图1为4组净浆试件的化学结合水量(非蒸发水量)测试结果。由图1可见:试件C-100%的化学结合水量一直处于4组试件的最高值,这是因为粉煤灰和超细粉煤灰的掺入降低了体系中的水泥含量,减少了体系中水化产物的生成,且超细粉煤灰掺量越多,体系中的化学结合水量越低;同等掺量下,超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料净浆试件中生成的水化产物仍高于普通粉煤灰-水泥复合胶凝材料净浆试件。在试件UFA-25%、UFA-50%、FA-50%中,由水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会因粉煤灰火山灰反应而

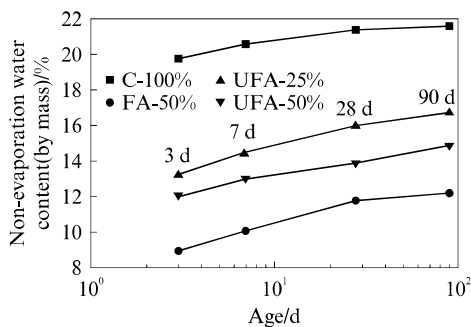


图1 4组净浆试件的化学结合水量

Fig. 1 Non-evaporation water content of 4 kinds of cement paste sample

被消耗掉。将测得的复合胶凝材料总化学结合水量转换为单位质量水泥所对应的化学结合水量,能够更清楚地表示浆体中水泥的水化反应程度^[18-19],转换公式为:

$$W_{\text{nec}} = \frac{W_{\text{ne}}}{1-R} \quad (1)$$

式中: W_{nec} 为单位质量水泥所对应的化学结合水量,%; W_{ne} 为单位质量胶凝材料所对应的化学结合水量,%; R 为粉煤灰在胶凝材料中的质量分数。

将4组净浆试件的总化学结合水量分别换算成单位质量水泥所对应的化学结合水量,结果见图2。由图2可见:试件FA-50%中,水泥的水化程度在10 d龄期之后就超越了试件C-100%,可能原因是水化早期时粉煤灰对溶液中的 Ca^{2+} 有吸附作用,使其浓度降低并延缓了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和C-S-H的成核,随着水化反应的进行(10 d龄期之后),这种吸附作用不再明显,开始对水泥的水化有了促进作用;在整个龄期中,试件UFA-25%和UFA-50%的水泥水化程度均高于试件C-100%,这是因为经过机械研磨后,粉煤灰原有的壳壁结构被破坏,将内部包裹的更细小微珠释放出来,这些细颗粒既增加了水泥水化

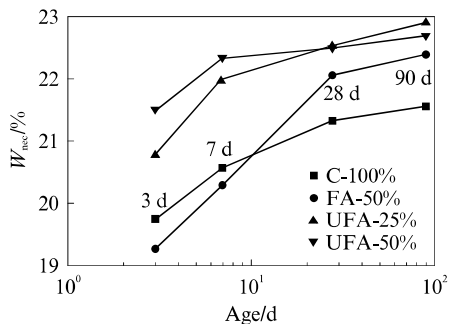


图2 4组净浆试件中单位质量水泥的化学结合水量

Fig. 2 Non-evaporation water content of per unit mass cement in 4 kinds of cement paste sample

的可利用空间,又因其易于吸附 Ca^{2+} ,为水泥水化产物钙矾石 AFt 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 提供了更多的结晶成核点,从而加速了 C_3S 和 C_3A 的水化^[20-21];当超细粉煤灰掺量过多(50%)时,试件 UFA-50%在 28 d 龄期之后的水化反应有所减缓,这可能是由于其中一半的水泥被超细粉煤灰替代,导致其体内 OH^- 大量减少,同时超细粉煤灰的火山灰反应程度相对较低,而此时水泥水化也基本达到稳定所致。

2.2 微观孔结构测试结果

2.2.1 孔径分布积分曲线和微分曲线

根据压汞测孔法测定出 4 组净浆试件的微观孔结构,分别绘制其孔径分布积分曲线和微分曲线,如图 3 所示。由图 3 可以看出,4 组试件的阈值孔径(汞体积明显增加时所对应的孔径)和最可几孔径(浆体中数量最多的孔隙所对应的孔径,即曲线上峰值对应的孔径)分布规律为:在整个龄期中,试件 UFA-25%的阈值孔径和最可几孔径均为 4 组试件的最小值,3 d 龄期时其阈值孔径和最可几孔径仅为试件 C-100%的 60%左右和 72%;3 d 龄期时试件 UFA-50%的阈值孔径和最可几孔径与 UFA-25%相差不大,28 d 龄期之后两者差距增大,但仍低于试件 C-100%和 FA-50%;3 d 龄期时试件 FA-50%的阈值孔径和最可几孔径分别为试件 C-100%的 1.52 倍和 2.21 倍,28 d 龄期之后的阈值孔径和最可几孔径才明显小于试件 C-100%。

2.2.2 孔级配分布

按照吴中伟等^[20]对孔隙孔径 d 的分类,将其分为 4 级:无害孔($d < 20 \text{ nm}$)、少害孔($d = 20 \sim 50 \text{ nm}$)、有害孔($d = 50 \sim 200 \text{ nm}$)、多害孔($d > 200 \text{ nm}$)。据此对压汞数据进行处理,得到 4 组净浆试件在不同龄期的孔级配直方图,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,随着龄期的延长,4 组净浆试件孔隙体积之间的差值逐渐减小。整个龄期中,试件 UFA-25%和 UFA-50%的总孔隙体积、多害孔和有害孔体积均小于试件 C-100%和 FA-50%;3 d 龄期时,试件 C-100%的总孔隙体积分别为试件 UFA-50%和 UFA-25%的 2.44 倍和 2.21 倍,有害孔体积分别为试件 UFA-50%和 UFA-25%的 2.67 倍和 2.59 倍;试件 UFA-50%的总孔隙体积虽高于试件 UFA-25%,但两者之间的差值不大;试件 FA-50%在 28 d 龄期之后的孔隙体积、多害孔和有害孔的体积才明显小于试件 C-100%。结合 4 组净浆试件的孔径分布积分曲线和微分曲线分析结果可知:粉煤灰的加入可以使复合胶凝材料 28 d 龄期之后的孔结构逐步得到改善,而超细粉煤灰在水化前期(3 d

龄期时)就可以使复合胶凝材料达到良好的密实度,尤其在掺量为 25%时,效果更显著。

2.3 微观形貌观测结果

图 5~8 为 4 组净浆试件在 3、7、28、90 d 龄期的微观形貌。

由图 5 可见:3 d 龄期时,试件 C-100%整体以孔隙、裂缝以及其中的针状钙矾石为主,有少量片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 存在;在试件 FA-50%中,虽然粉煤灰表面有些许水化产物的沉淀,但反应痕迹并不明显,体系内仍存在大量光滑的粉煤灰颗粒,并出现少量凝胶,孔结构明显比试件 C-100%疏松,此时,粉煤灰主要起物理填充作用;试件 UFA-25%和 UFA-50%中有较多层状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 存在,针状钙矾石含量明显比另 2 组试件少,说明超细粉煤灰的加入加速了浆体的水化反应。由图 6 可见:7 d 龄期时,试件 FA-50%中有部分粉煤灰参与反应,出现少量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;试件 UFA-50%和 UFA-25%中的颗粒表面有“蚀刻”现象出现,说明已有大部分超细粉煤灰颗粒内的铝硅玻璃体进行了水化反应。由图 7 可见:28 d 龄期时,试件 C-100%中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量明显增多,孔结构已经达到比较致密的程度;试件 FA-50%中大部分普通粉煤灰颗粒出现了“蚀刻”现象,粉煤灰颗粒表面被大量水化产物所覆盖,孔结构比试件 C-100%更致密,但硬化浆体内仍有大量片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 存在;试件 UFA-50%和 UFA-25%中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量明显减少,而且晶体尺寸明显较小,说明超细粉煤灰的火山灰反应消耗掉 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 并生成了 C-S-H 凝胶,因此其孔结构更致密,强度也更高。由图 8 可见:90 d 龄期时,试件 C-100%的孔结构形貌与 28 d 龄期时相差不大,其中含有大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;试件 FA-50%中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量有所减少,体系中存在的 C-S-H 凝胶增多;试件 UFA-50%和 UFA-25%中存在大量 C-S-H 凝胶,孔结构密实度仍优于试件 C-100%和 FA-50%。

2.4 抗压、抗折强度测试结果

图 9、10 为 4 组砂浆试件在标准养护条件下的抗压强度和抗折强度经时变化规律。由图 9、10 可以看出:试件 UFA-25%在整个龄期中的抗压、抗折强度一直高于试件 C-100%和 FA-50%;试件 UFA-25%在 3 d 龄期时的抗压、抗折强度已经高出试件 C-100%近 1 倍;试件 UFA-50%在 7 d 龄期时达到试件 C-100%的 1.52 倍,并且在整个龄期中的抗压、抗折强度均高于试件 FA-50%;试件 FA-50%在 10 d 龄期之后的抗压强度和 5 d 龄期之后的抗折强度才明显超过试件 C-100%。

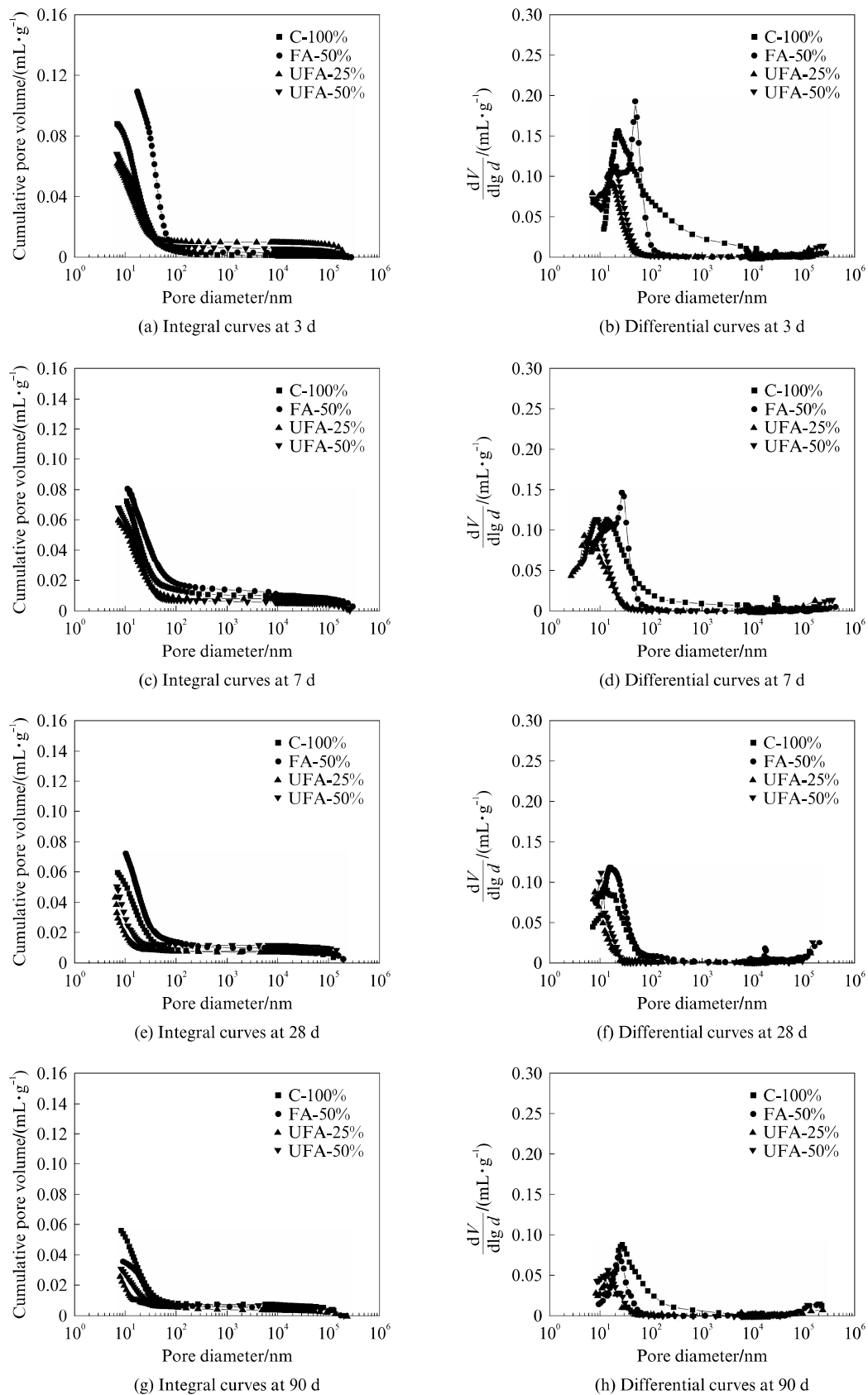


图3 不同龄期时4组净浆试件的孔径分布积分曲线和微分曲线

Fig. 3 Integral curves and differential curves of pore diameter distribution of 4 kinds of cement paste sample at different ages

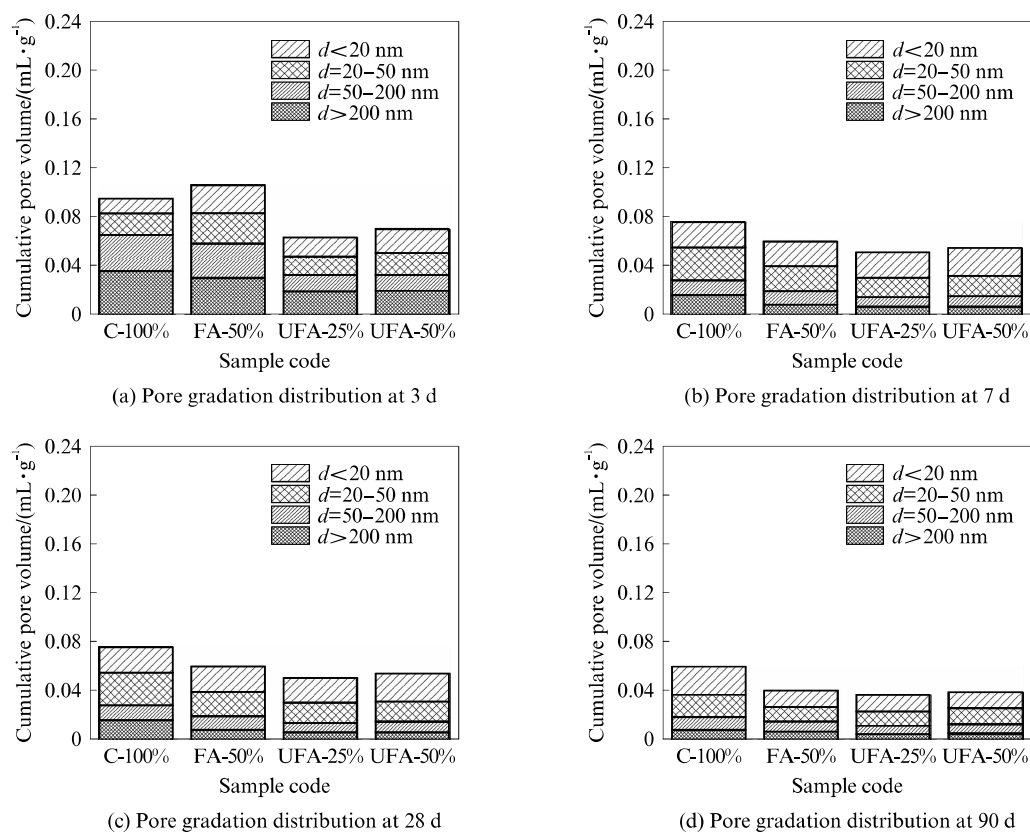


图4 不同龄期时4组净浆试件的孔级配

Fig. 4 Pore gradation distribution of 4 kinds of cement paste sample at different ages

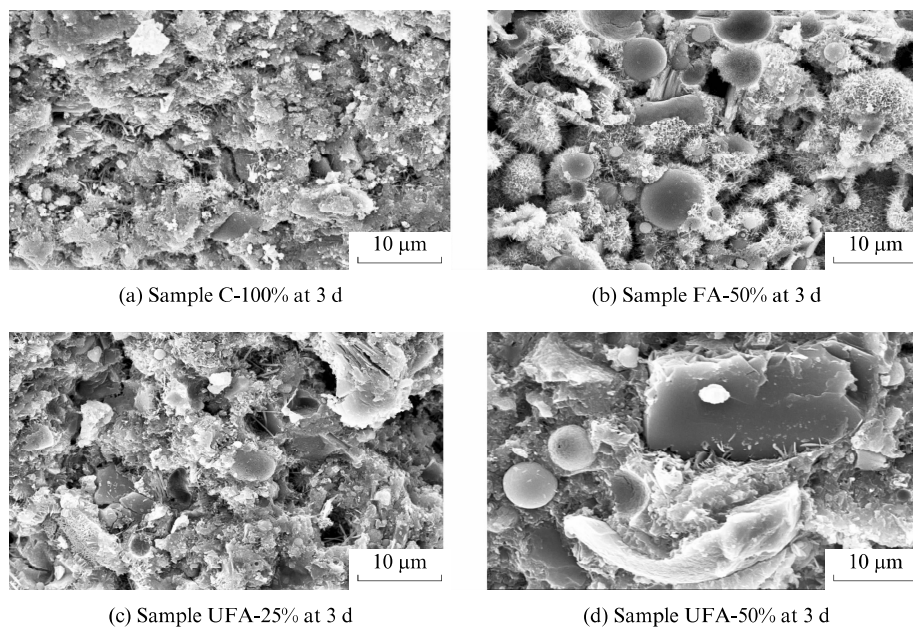


图5 3 d龄期时4组净浆试件的微观形貌

Fig. 5 Microstructure of 4 kinds of cement paste sample at 3 d

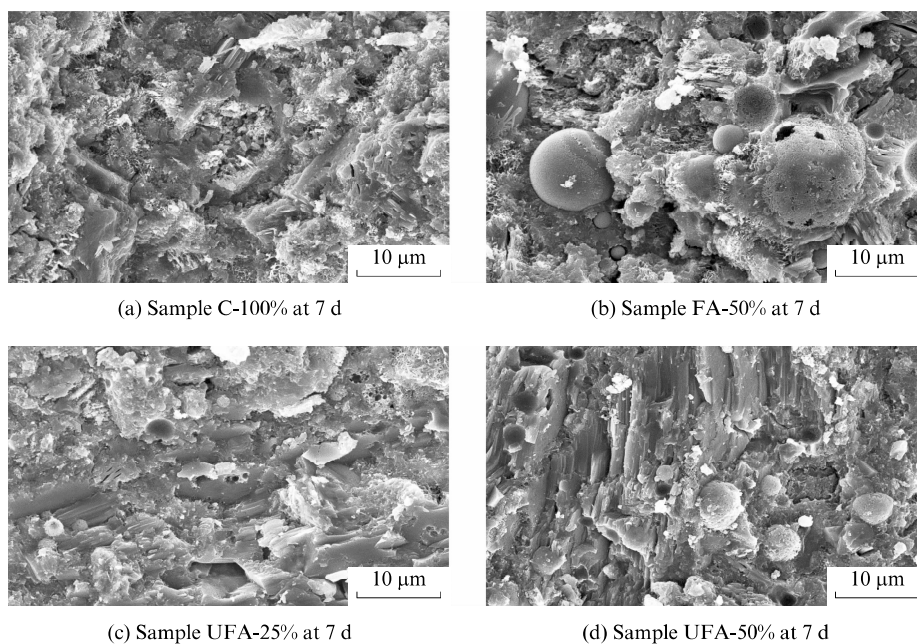


图6 7 d龄期时4组净浆试件的微观形貌
Fig. 6 Microstructure of 4 kinds of cement paste sample at 7 d

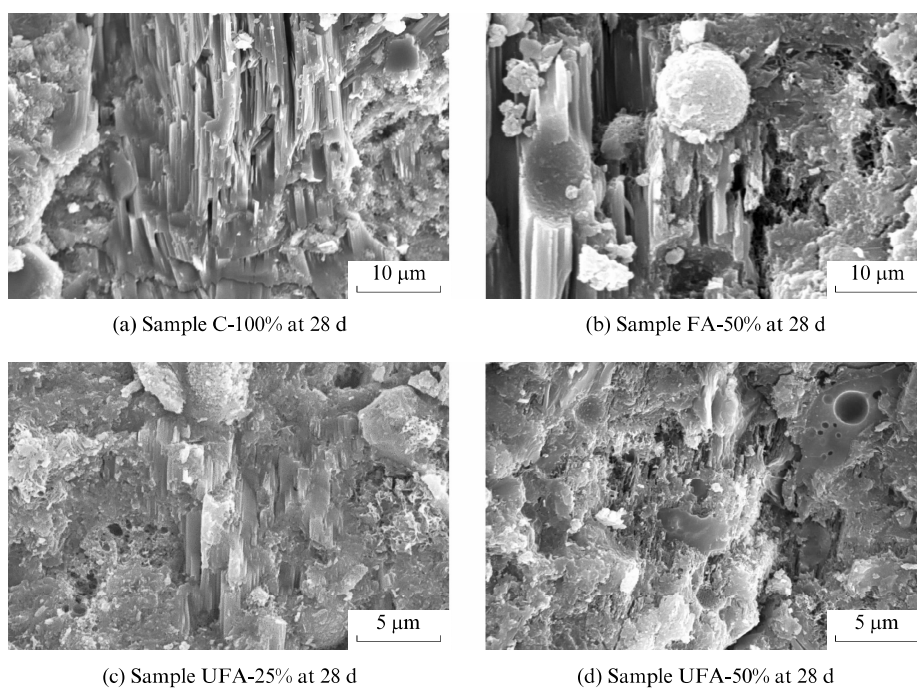


图7 28 d龄期时4组净浆试件的微观形貌
Fig. 7 Microstructure of 4 kinds of cement paste sample at 28 d

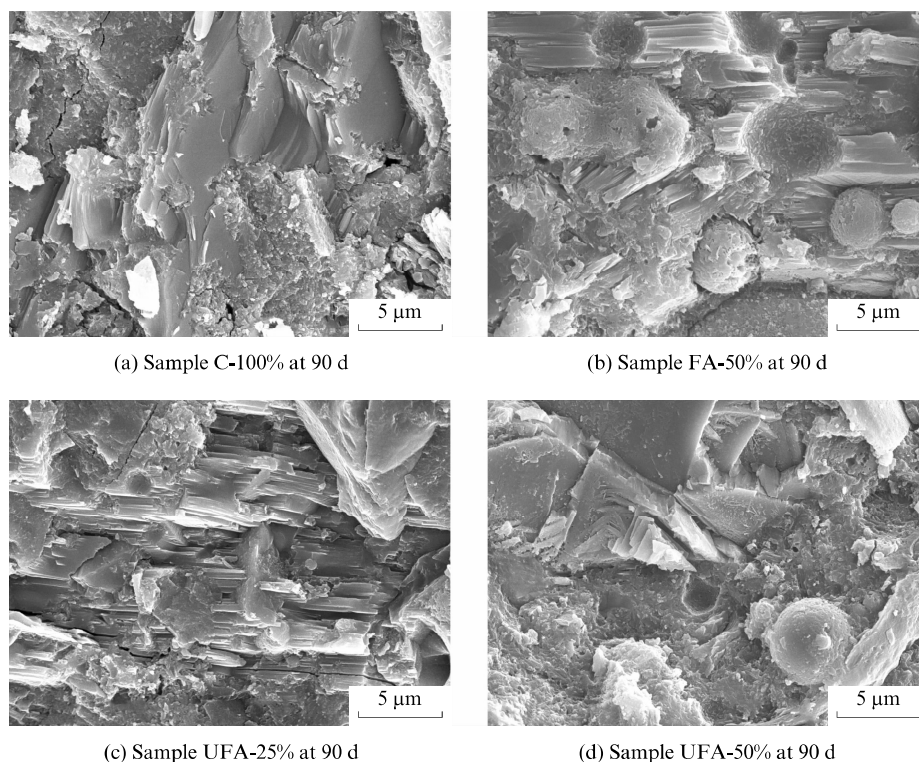


图8 90 d龄期时4组净浆试件的微观形貌
Fig. 8 Microstructure of 4 kinds of cement paste sample at 90 d

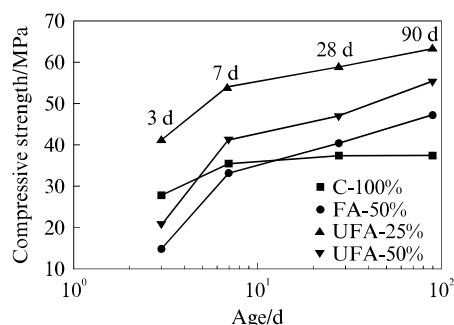


图9 不同龄期时4组砂浆试件的抗压强度
Fig. 9 Compressive strength of 4 kinds of cement mortar sample at different ages

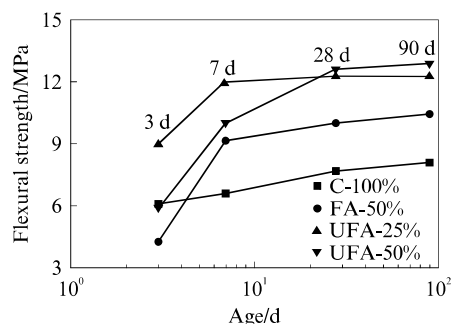


图10 不同龄期时4组砂浆试件的抗折强度
Fig. 10 Flexural strength of 4 kinds of cement mortar sample at different ages

结合4组试件的强度、化学结合水量、孔结构分析结果可以发现:在水化早期(28 d龄期之前),粉煤灰的水化反应比较迟缓,大多数的网络形成体($[\text{SiO}_4]^{4-}$ 和 $[\text{AlO}_4]^{5-}$)尚未解聚,该阶段粉煤灰主要起到密集填充和微集料的作用^[19,21];随着水化反应的进行,28 d龄期之后粉煤灰因其自身特性而消耗前期水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,进行第二次火山灰反应并生成大量的C-S-H凝胶,有利于改善水泥净浆孔结构,提高浆体密实性,从而在宏观上表现出28 d龄期之后试件FA-50%的抗压强度和抗折强度均超过试件C-100%的特征。

经过机械研磨的超细粉煤灰粒径变小,在复合胶凝材料中均匀分布并且与其他颗粒形成合理级配,增大了粉煤灰发生火山灰反应的接触面积;同时,高温养护和机械研磨激发了超细粉煤灰的早期活性,加速了超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料的水化进程,使其在水化早期(3 d龄期)就有较多的水化产物用于填充孔结构。随着水化反应程度的提高,粉煤灰会消耗越来越多的片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,颗粒与凝胶之间的结合以及骨料与硬化浆体之间的过渡区均得以改善,进而使试件UFA-25%的抗压强度和抗折强度在整个龄期中均高于试件C-100%和FA-50%。然而当超细粉煤灰掺量过多(50%)时,会导致

超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料中细集料较多,颗粒级配不合理;并且超细粉煤灰活性的发挥需要 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碱激发,而此时水泥含量大幅降低,导致其后期对于水泥水化程度、硬化浆体内部孔结构密实度和强度的改善均低于试件UFA-25%,但仍高于纯水泥砂浆试件和同掺量下的普通粉煤灰-水泥复合胶凝材料试件。

3 结论

(1)超细粉煤灰在机械研磨和50℃高温养护的共同作用下活性大大提高,与普通粉煤灰-水泥复合胶凝材料相比,超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料的水化速度更快,孔径分布更细化,抗压、抗折强度更高,可以弥补普通粉煤灰-水泥复合胶凝材料早期强度低的弱点。

(2)超细粉煤灰的添加可以提高复合胶凝材料中水泥的水化程度、孔结构密实度和抗压、抗折强度,并且龄期越长,该提高作用越明显,但使用时要注意掺量。超细粉煤灰掺量为25%时,复合胶凝材料在整个龄期的水化程度和孔结构密实度均高于纯水泥净浆;3d龄期时的抗压强度和抗折强度已高于纯水泥砂浆近1倍。但超细粉煤灰掺量为50%时,因细集料较多而造成其颗粒级配分布不合理,并且缺少充足 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碱性激发,与掺量为25%时相比,超细粉煤灰对于水泥水化程度、孔结构密实度和强度的改善程度有所降低,但7d龄期时的抗折强度仍达到了纯水泥砂浆的1.67倍。

(3)实际工程中,可以通过控制超细粉煤灰在大体积高强混凝土中的掺量来调节其内部的温升和水化速率。

参考文献:

- [1] HSU S W, CHI M C, RAN H. Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 250-258.
- [2] LIU S H, LI Q L, RAO M J, et al. Properties and microstructure of roller compacted concrete with high volume low quality fly ash[J]. Materials Science, 2017, 23(3): 273-279.
- [3] MTARFI N H, RAIS Z, TALED M, et al. Effect of fly ash and grading agent on the properties of mortar using response surface methodology[J]. Journal of Building Engineering, 2017(9): 109-116.
- [4] AKCAÖZÖĞLU S, ATIS C D. Effect of granulated blast furnace slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 4052-4058.
- [5] 李响,阿茹罕,阎培渝. 水泥-粉煤灰复合胶凝材料水化程度的研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(5): 584-588.
LI Xiang, A Ruhan, YAN Peiyu. Research on hydration degree of cement-fly ash composite cementitious material[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(5): 584-588. (in Chinese)
- [6] 李响,阎培渝. 粉煤灰掺量对水泥孔溶液碱度与微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 787-791, 835.
LI Xiang, YAN Peiyu. Effect of fly ash content on alkalinity and microstructure of cement pore solution[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 787-791, 835. (in Chinese)
- [7] LIU S H, KONG Y N, LU W. Hydration mechanism of low quality fly ash in cement-based materials[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(11): 4360-4367.
- [8] SHAIKH F U A, SUPIT S W M. Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA)[J]. Construction and Building Materials, 2015, 82: 192-205.
- [9] MARTIN L H J, WINNEFELD F, TSCHOPP E, et al. Influence of fly ash on the hydration of calcium sulfoaluminate cement[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95: 152-163.
- [10] CHINDAPRASIRT P, JATURAPITAKKUL C, SINSIRI T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(4): 425-428.
- [11] FENG J J, LIU S H, WANG Z G. Effects of ultrafine fly ash on the properties of high-strength concrete[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 121(3): 1213-1223.
- [12] WANG Q, WANG D Q, CHEN H H. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 83: 125-137.
- [13] 阎培渝. 粉煤灰在复合胶凝材料水化过程中的作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2007(增刊1): 167-171.
YAN Peiyu. Action mechanism of fly ash in the hydration process of composite cementitious materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007 (Suppl 1): 167-171. (in Chinese)
- [14] STEVE W M, FAIZ U A, SHAIKH P K, et al. Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 278-286.
- [15] ZHAO J H, WANG D M, WANG X G, et al. Ultrafine grinding of fly ash with grinding aids: Impact on particle characteristics of ultrafine fly ash and properties of blended cement containing ultrafine fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 250-259.
- [16] FENG J J, SUN J W, YAN P Y. The influence of ground fly ash on cement hydration and mechanical property of mortar[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-7.
- [17] LIU S H, KONG Y N, LU W. Hydration mechanism of low quality fly ash in cement-based materials[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(11): 4360-4367.

- [18] 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. Research on hydration performance of cement-fly ash composite cementitious material[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(2): 114-119. (in Chinese)
- [19] 李响, 阎培渝, 阿茹罕. 基于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量的复合胶凝材料中水泥水化程度的评定方法[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(10): 1597-1601.
LI Xiang, YAN Peiyu, A Ruhan. Evaluation method of cement hydration degree in composite cementitious materials based on $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(10): 1597-1601. (in Chinese)
- [20] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
WU Zhongwei, LIAN Huizhen. High performance concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [21] 李辉, 曹敏丽, 张伟, 等. 大掺量超细粉煤灰高强混凝土研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(5): 1028-1034.
LI Hui, CAO Minli, ZHANG Wei, et al. Study on high-strength concrete with large charge ultra-fine fly ash[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(5): 1028-1034. (in Chinese)

(上接第 465 页)

- [19] 余安明, 姚武. 基于低场核磁共振技术的水泥浆体孔结构与比表面积的原位表征[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(10): 11-15.
SHE Anming, YAO Wu. Characterization of microstructure and specific surface area of pores in cement paste by low field nuclear magnetic resonance technique[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(10): 11-15. (in Chinese)
- [20] BERGER S, COUMES C C D, LE BESCOP P, et al. Influence of a thermal cycle at early age on the hydration of calcium sulphoaluminate cements with variable gypsum contents[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(2): 149-160.