

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.04.008

GLP 对混凝土微观结构及抗碳化性能影响机理

贾福萍¹, 吕恒林¹, 储宛珍¹, 席新雅¹, 李勇², 王茜¹

(1. 中国矿业大学 力学与建筑学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏中联铸本混凝土有限公司, 江苏 徐州 221008)

摘要: 本文研究磨细石灰石粉(Ground Limestone Powder, GLP)等量替代水泥对混凝土微观结构及抗碳化性能的影响机理。通过 pH 值试验测试了不同 GLP 用量的混凝土浆体内部孔隙溶液碱储备量, 采用压汞试验(MIP)分析了 GLP 混凝土内浆体水化产物孔结构分布特征, 并对 GLP 混凝土进行碳化试验。结果表明: GLP 等量替代水泥, 会影响混凝土浆体内部孔隙溶液的 pH 值, GLP 用量越多, 孔隙溶液 pH 值越低, 单位体积混凝土碱储备量的减小削弱了混凝土的抗碳化能力。GLP 等量替代水泥改变了混凝土浆体内部孔径配分布特征, 50~200 nm 级有害孔孔隙率及其分孔百分率显著增大, 浆体的总孔隙率明显增大, 进一步弱化了混凝土的抗碳化能力。可通过增大 GLP 比表面积或降低混凝土水胶比提高混凝土抗碳化能力。

关键词: GLP; 混凝土; pH 值; MIP; 微观结构; 碳化

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)04-0421-07

Influence of GLP on microstructure and its action mechanism of carbonation resistance of concrete

JIA Fuping¹, LÜ Henglin¹, CHU Wanzhen¹, XI Xinya¹, LI Yong², WANG Qian¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Zhong Lian Zhu Ben Concrete Construction Co., Ltd, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The influence of ground limestone powder (GLP) which replaces cement by mass on microstructure and its action mechanism of carbonation resistance of concrete are analyzed. The alkaline matter reserved in pore solution of paste in concrete with different replacements of cement by GLP by mass is observed through the pH value test. The influence of GLP on pore structure characteristics of hydration products of concrete is investigated by method of mercury intrusion porosimeter (MIP) and the carbonation resistance of GLP concrete is tested. Results indicate that the replacements of cement by GLP will affect the pH value of pore solution inside the concrete. The pH value decreases with the increase of the replacements of cement by GLP. The reduction of the alkaline matter reserved in per unit volume concrete weakens the carbonation resistance of concrete. The replacements of cement by GLP change the distribution feature of classification porosity of paste in concrete. The porosity and the classification porosity percent of harmful pore with pore diameter in range of 50~200 nm increase significantly with the total porosity of paste in concrete with GLP obviously increasing, weakening further the carbonation resistance of concrete. The carbonation resistance of concrete could be improved appropriately by increasing the specific surface area of GLP and decreasing the water-binder ratio of concrete.

Key words: GLP; concrete; pH value; MIP; microstructure; carbonation

粉煤灰、矿渣等矿物掺合料在混凝土中的用量不断增大。由于受到地域、运输成本和供应季节的影响和限制, 很多地区出现粉煤灰或矿渣短缺的现

象。因此, 需开发可替代粉煤灰、矿渣等的新型矿物掺合料^[1-3]。作为一种廉价易得的矿物掺合料, 石灰石粉已经被一些国家应用于混凝土中, 并取得了较

收稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51408597); 江苏省重点实验室开放基金资助项目(JSKL2011YB05); 中国高校基本科研业务费专项基金资助项目(2011QNB20); 中国矿业大学科研创新训练计划资助项目(XZD1029014183); 国家级大学生创新训练计划资助项目(201610290014)

作者简介: 贾福萍, 女, 副教授, 博士, 研究方向为混凝土结构及新型建筑材料。E-mail: kdfxlove@126.com

好的效果^[4-6]。

我国于2012年2月开始实施的国家标准《建设用砂》(GB/T 14684—2011)规定将机制砂的石灰石粉含量限值放宽至10%,但机制砂生产中仍然会有一些量的石灰石粉被废弃,这会对周边土壤、空气等环境造成影响。因此,国内高校、研究机构及企业对石灰石粉作为矿物掺合料的性能开展了相关研究^[7-15]。另外,石灰石粉混凝土的耐久性问题也引起了国内外研究者的关注。S. Tsivilis^[4]等人研究发现,石灰石粉含量在一定范围内时,混凝土抗碳化能力和钢筋锈蚀情况与普通混凝土相当。但国内缺乏石灰石粉对混凝土微观结构影响而导致的抗碳化性能变化的相关研究^[9,11-12]。

本文选取磨细石灰石粉(Ground Limestone Powder, GLP)等质量替代水泥方法,通过pH值试验研究GLP对混凝土浆体内部孔隙溶液碱储备量的影响,采用压汞试验(MIP)测试GLP对混凝土内浆体水化产物孔结构分布特征的影响,通过碳化试验研究GLP比表面积、用量及混凝土水胶比等因素

对混凝土抗碳化能力的影响,以剖析GLP对混凝土微观结构及抗碳化性能的影响机理。

1 试验方案

1.1 原材料

水泥:采用徐州淮海水泥厂生产的P.O. 52.5普通硅酸盐水泥,其矿物组成为: $C_3S = 51.82\%$ 、 $C_2S = 17.99\%$ 、 $C_3A = 7.29\%$ 、 $C_4AF = 9.17\%$ 。GLP:采用清洗干净的石灰石岩加工机制砂产生的废弃石灰石粉作为原料,采用固定投料法经过粉磨、过筛(200目)后,利用勃氏比表面积测定仪测定石灰石粉比表面积;考虑到过分追求高比表面积会造成环境负荷和增加企业生产成本,本研究石灰石粉比表面积分别为 $350\text{ m}^2/\text{kg}$ 、 $600\text{ m}^2/\text{kg}$ 和 $1000\text{ m}^2/\text{kg}$ 。砂:河砂,细度模数2.70。石子:采用碎石,颗粒级配为5~16 mm。外加剂:选用聚羧酸JM-PCA,用量为胶凝材料总质量的1%。表1为水泥和GLP原材料化学组成,图1为水泥及不同比表面积GLP的颗粒粒径分布情况。

表1 水泥和GLP的化学组成

Tab. 1 Chemical composition of cement and GLP

名称	化学组成/%									
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
水泥	59.10	20.50	5.33	3.09	1.11	0.18	2.66	0	3.00	2.50
GLP	49.20	4.45	0.87	0.47	0.16	0.04	3.74	0.02	0.01	40.95

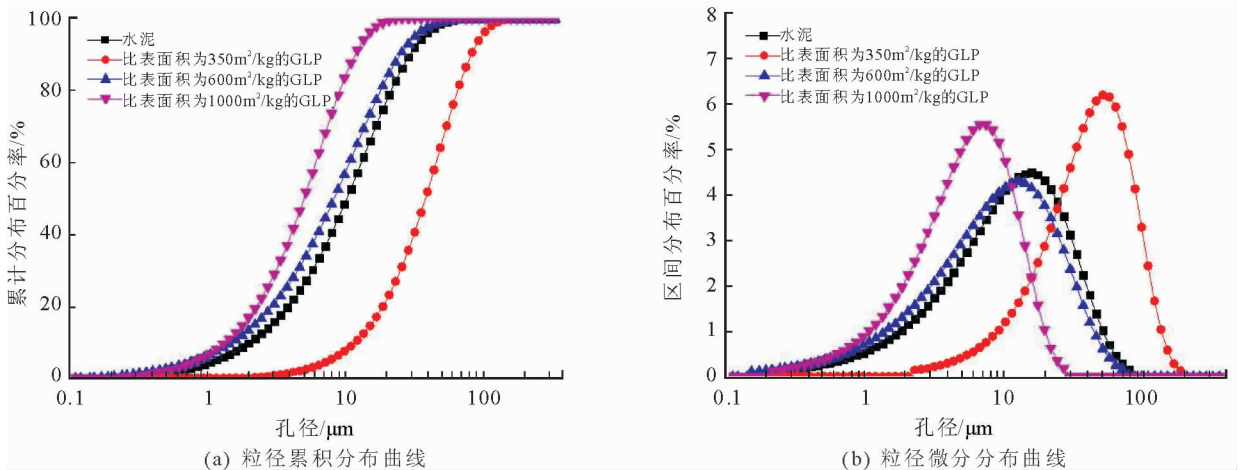


图1 水泥及GLP颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Particle distribution curve of cement and GLP

1.2 试验安排

pH值试验和MIP试验:为更好地研究GLP对混凝土内部浆体碱储备量和孔结构分布的影响,避免其他材料含量过高影响测试结果,pH值试验和MIP试验专门制作净浆试样,GLP比表面积为 $350\text{ m}^2/\text{kg}$,净浆水胶比为0.5,标准养护至28d以备测试。pH试验中,GLP等质量替代水泥0%、10%、

20%、30%和40%,采用取出固液萃取法来提取孔隙溶液^[13],选用PHSJ-5型数显pH计(E-201-C型复合电极,具有0.001级测量精度)进行标定与测试。MIP试验中,GLP等质量替代水泥0%和30%,采用Mercury Porosimetry-AutoPore IV 9510型全自动压汞仪测试试样孔结构分布特征。

碳化试验:采用等质量替代水泥方法,研究

GLP用量、比表面积和混凝土水胶比对混凝土抗碳化性能的影响。基准混凝土配合比如表2所示。混凝土碳化试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。所有试件一批浇筑完成,静置 24 h 拆模后放入标准养护室养护 28 d 后进行碳化试验。混凝土试件碳化至 3 d 、 7 d 、 14 d 、 28 d 进行碳化深度测试。

表2 基准混凝土的配合比

Tab. 2 Mixture proportions of reference concrete

编号	水胶比	水的用量/ (kg/m^3)	水泥用量/ (kg/m^3)	砂用量/ (kg/m^3)	石用量/ (kg/m^3)
1	0.312	156	500	567	1 177
2	0.350	156	446	621	1 177
3	0.400	156	390	677	1 177

2 结果与分析

2.1 GLP对混凝土浆体内孔隙溶液pH值的影响

混凝土中孔隙溶液 OH^- 浓度的高低可反应胶凝材料水化反应的水化程度,同时还与混凝土的耐久性关系密切。首先,混凝土中 OH^- 浓度的大小反映了混凝土中碱(主要指 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,简称CH)储备量的大小,该量可直接反映胶凝材料水化反应的水化程度,也可直接影响混凝土碳化过程中吸收 CO_2 的能力(碱储备量越高,混凝土吸收 CO_2 的能力越强,其抗碳化能力越强)。其次,在 OH^- 浓度较高情况下,混凝土中的钢筋处于高碱性环境中,表面存在钝化膜可保护钢筋不发生锈蚀;当混凝土孔隙液中 OH^- 浓度降低到某一限值时,钢筋钝化膜可能遭到破坏,从而诱发钢筋产生锈蚀。第三,在硫酸盐侵蚀环境中, OH^- 浓度对混凝土硫酸盐侵蚀产物的形成和侵蚀机理有重要影响,对石膏、钙矾石、碳硫硅钙石等产物的生成量有明显影响。

根据文献[16]中关于普通混凝土孔隙溶液pH值的计算可知,普通混凝土孔隙溶液均为CH饱和溶液,而当混凝土中胶凝材料种类和用量不同时,水化反应生成的碱储备量也会有所不同。因此,为了研究GLP对孔隙溶液中 OH^- 浓度的影响,同时考虑到CH在常温($20\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$)的饱和溶解度,pH测试时溶质与溶液的比例选取1:400。

图2为试样浆体内孔隙溶液pH值的测试结果。由图2可明显看出,GLP等量替代水泥时,试件的pH值明显下降。当GLP用量增大,试样浆体内孔隙溶液的pH值变小,碱储备量降低。因此GLP等质量替代水泥后,单位体积混凝土碳化可消耗的碱储备量减小,致使单位时间内 CO_2 气体在石灰石粉混凝土中的扩散速率加快,混凝土碳化深度加大;GLP用量越大,混凝土抗碳化能力越差。

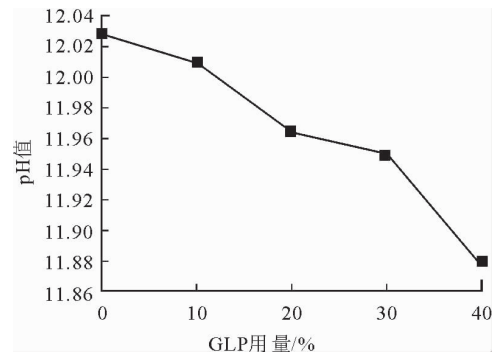


图2 GLP用量对混凝土浆体内孔隙溶液pH值的影响

Fig. 2 Influence of GLP on pH value of pore solution of paste in concrete

2.2 GLP对混凝土浆体内水化产物孔径配特征的影响

按照文献[17]对混凝土的孔径划分方法,将孔划分成不同影响的孔径:孔径小于 20 nm (无害孔径)、 $20\sim 50\text{ nm}$ (少害孔径)、 $50\sim 200\text{ nm}$ (有害孔径)、大于 200 nm (多害孔径)。纯水泥净浆试样和GLP等质量替代水泥 30% 形成的GLP-水泥净浆试样的各级孔径孔径分布规律如图3所示。

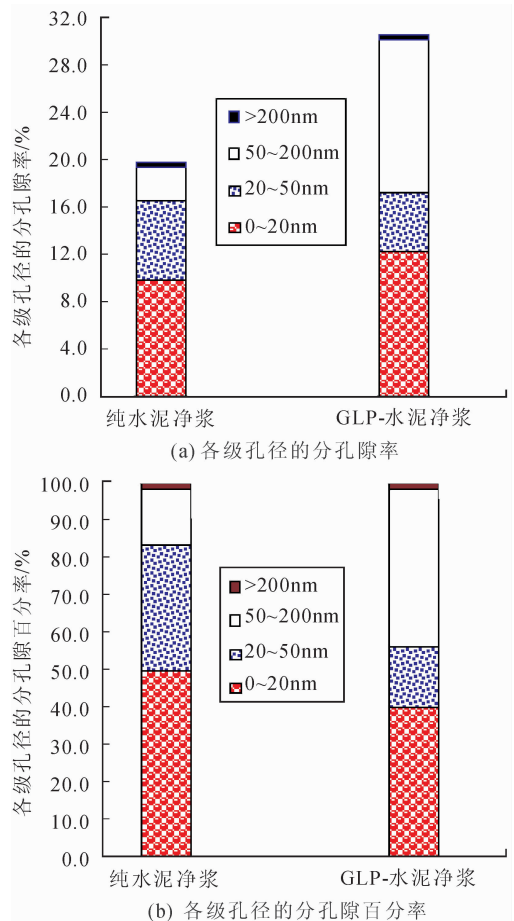


图3 试件各级孔径分布特征

Fig. 3 Distribution feature of classification porosity of specimen

由图3可知:

1) 与纯水泥净浆相比, GLP 等量替代水泥 30% 时, 浆体总孔隙率增大了 10.81%;

2) 对于纯水泥净浆和 GLP-水泥净浆, 二者孔径小于 50 nm 的分孔隙率基本相近(约为 16%~17%); 对于 GLP-水泥净浆, 其在 0~20 nm 级的孔隙数量增加, 浆体孔隙得到细化;

3) 对于 GLP-水泥净浆, 其孔径在 50~200 nm 级的分孔隙率明显高于纯水泥净浆相应的数值(前者为 12.93%, 后者为 2.88%); 当孔径大于 200 nm 时, 分孔隙率基本不变(见图 3(a));

4) 对于纯水泥净浆试样, 其孔径小于 50 nm 的分孔隙百分率高达 83%, 而 GLP-水泥净浆试样相应的数值仅为 55.91%; 二者孔径在 50~200 nm 孔级的分孔隙百分率差别也较大, 前者为 14.62%, 后者为 42.3%(见图 3(b))。

因此, GLP 等质量替代水泥后, 显著影响了浆体内部各级孔径的孔级配分布。较明显的是: 20~50 nm 的少害孔绝对数量减少, 而 50~200 nm 的有害孔绝对数量显著增多, 且 50~200 nm 孔级的分孔隙百分率明显增大, 直接导致浆体内部总孔隙率明显增大。

2.3 GLP 用量对混凝土抗碳化性能的影响

由 2.1、2.2 节的研究结果可推测, GLP 等量替代水泥后, 降低了混凝土浆体内孔隙溶液的 pH 值, 增大了混凝土内部浆体的总孔隙率, 且显著影响了混凝土浆体内部各级孔径的孔级配分布, 这将直接影响混凝土的抗碳化能力。对不同 GLP(比表面积为 600 m²/kg) 用量下的混凝土(水胶比为 0.35) 碳化深度进行测试, 测试结果如图 4 所示。

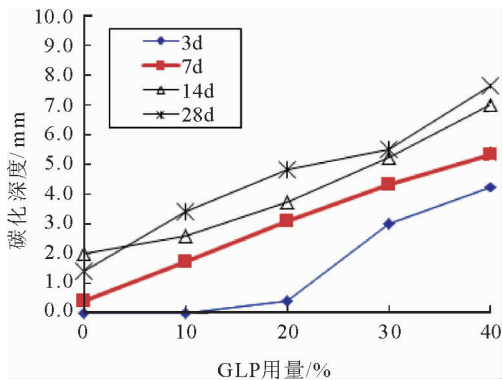


图4 GLP 用量与混凝土碳化深度关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between the dosage of GLP and carbonation depth of concrete

由图4可知, 同一碳化时间下, 随着 GLP 用量的增加, 混凝土的碳化深度呈增大趋势。在碳化初

期(3 d), GLP 用量较少时, 混凝土碳化深度与基准混凝土相同或相近; 当 GLP 用量超过 20% 时, 碳化深度明显增大。碳化至 7 d 时, 混凝土碳化深度随 GLP 用量增加而增长。当碳化至 28 d 时, GLP 用量较大时, 混凝土碳化深度数值明显较大。

由此可知, GLP 等量取代水泥会直接削弱混凝土的抗碳化能力。GLP 等量取代水泥后, 混凝土浆体内孔隙溶液中 pH 值降低, 表明混凝土浆体内碱储备量降低, 导致单位体积内混凝土中的可碳化物质质量减少; 而单位体积混凝土可吸收或消耗 CO₂ 物质质量的减少, 促使 CO₂ 的扩散速率增大, 加速碳化, 导致混凝土抗碳化能力下降, 且随着 GLP 用量的增加, 此现象愈加明显。同时, GLP 直接导致混凝土浆体水化产物总孔隙率明显增大, 尤其是 50~200 nm 孔级的绝对数量显著增多, 进一步降低了混凝土的抗碳化能力。

因此, 为保证石灰石粉混凝土具有一定的抗碳化性能, 应对 GLP 的用量有所控制。此结论与伊朗工业研究协会所提出的“应对石灰石粉的用量进行限定”的观点相吻合^[18]。

2.4 GLP 比表面积对混凝土抗碳化性能的影响

图5为不同 GLP 用量下, GLP 比表面积对混凝土(水胶比为 0.35) 抗碳化性能影响的试验结果。由图5可知, GLP 比表面积大小对混凝土抗碳化能力有影响, 但其对混凝土抗碳化能力的影响与混凝土中 GLP 用量有关。GLP 用量为 10% 和 20% 的混凝土, GLP 比表面积对混凝土抗碳化能力影响显著; 在碳化 3 d 至 28 d 期间, GLP 比表面积为 350 m²/kg 的混凝土的碳化深度数值最大; 当比表面积增至 600 m²/kg 和 1 000 m²/kg 后, 混凝土碳化深度明显降低, 尤其在碳化初期, 此现象更为明显(见图 5(a)、(b))。

随着 GLP 用量增多, GLP 比表面积对混凝土抗碳化能力的影响减弱。对于 GLP 用量为 30% 和 40% 的混凝土, GLP 比表面积为 350 m²/kg 的混凝土碳化深度总体仍较比表面积 600 m²/kg 和 1 000 m²/kg 的混凝土碳化深度偏大, 比表面积为 1 000 m²/kg 的混凝土碳化深度整体较小, 但 GLP 比表面积对混凝土碳化深度影响的差值较 GLP 用量 10% 和 20% 的混凝土明显减小(见图 5(c)、(d))。因此, 当 GLP 用量不超过 20% 时, 增大 GLP 比表面积能提高石灰石粉混凝土的抗碳化能力; 当 GLP 用量超过 20% 后, 比表面积对石灰石粉混凝土抗碳化能力的有利影响减弱。

2.5 水胶比对石灰石粉混凝土抗碳化性能的影响

图 6 为水胶比对石灰石粉混凝土抗碳化性能影响的(GLP 比表面积为 $350 \text{ m}^2/\text{kg}$)试验结果。

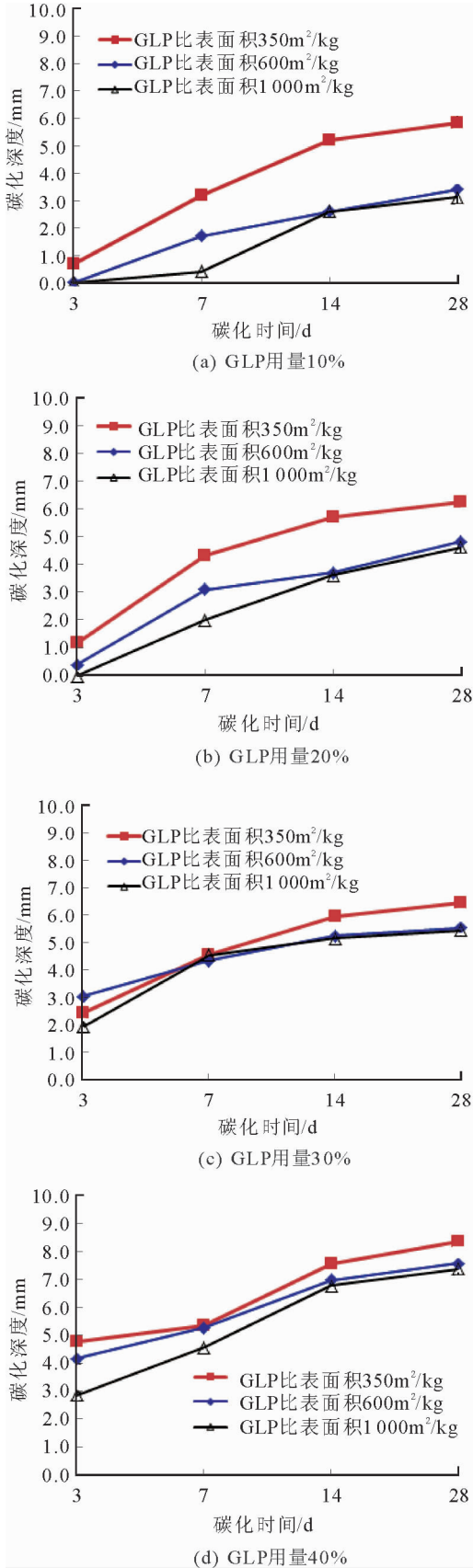


图 5 GLP 比表面积对石灰石粉混凝土抗碳化性能的影响
Fig. 5 Influence of specific surface area of GLP on the carbonation resistance of limestone concrete

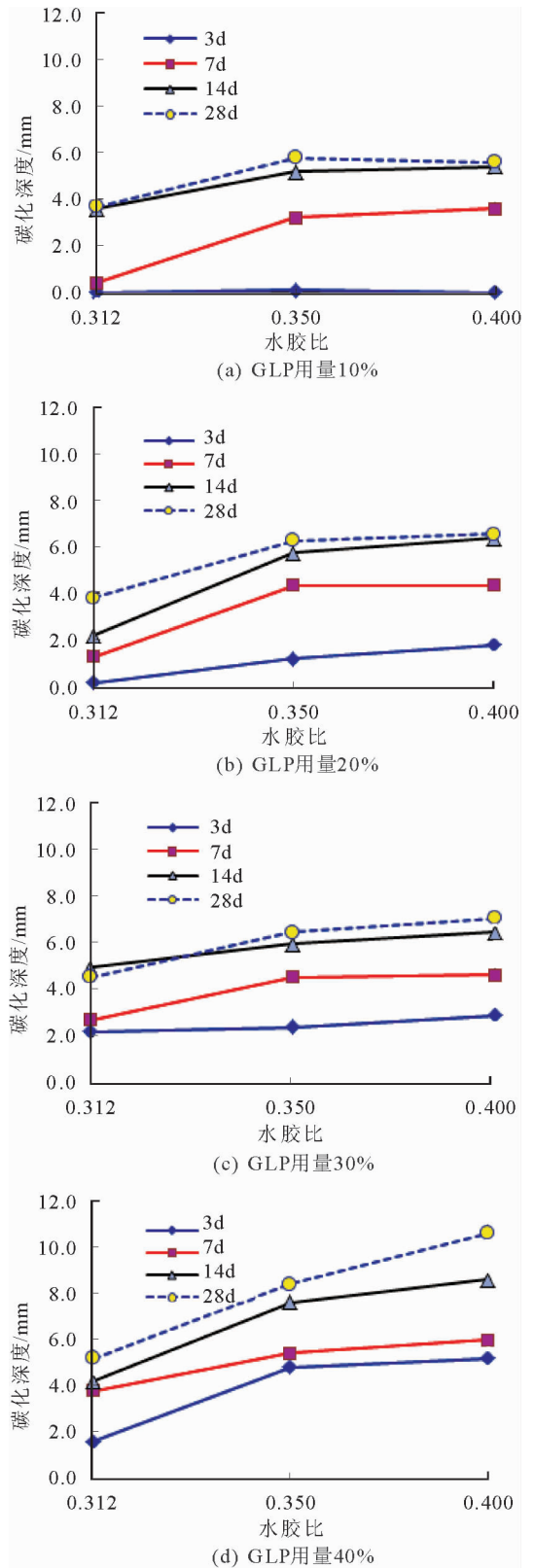


图 6 水胶比对石灰石粉混凝土抗碳化性能的影响
Fig. 6 Influence of water-binder ratio on the carbonation resistance of limestone concrete

由图6可知, GLP用量一定时, 随着水胶比增大, 石灰石粉混凝土的碳化深度总体呈增大趋势, 混凝土的抗碳化能力降低。随着水胶比的增大, 石灰石粉混凝土内部的总孔隙率亦增大, 单位时间内 CO_2 向混凝土内部扩散的速率增大, 碳化速率加快。水胶比对石灰石粉混凝土抗碳化性能的影响规律与普通混凝土类似^[19-20]。

水胶比对石灰石粉混凝土抗碳化能力的影响还与GLP用量相关。水胶比由0.312增至0.350时, 各GLP用量的混凝土碳化深度均增大; 而当混凝土水胶比由0.350增大至0.400时, GLP用量为10%~30%的混凝土其碳化深度增加较为平缓, 而GLP用量为40%的混凝土其碳化深度增加较为明显。

因此, 水胶比和GLP用量对石灰石粉混凝土抗碳化性能均有影响; 水胶比越大, 石灰石粉混凝土内部的总孔隙率越大, 石灰石粉混凝土抗碳化性能越弱; 而GLP用量越多, 混凝土内部水化产物pH值越小, 混凝土的碳化速率越快, 石灰石粉混凝土抗碳化性能越弱。

结合2.1至2.5节的研究结果可知, 混凝土内部浆体孔隙溶液的pH值^[21]和水化产物孔级配特征的变化会直接影响混凝土碳化进程。在单位用水量不变的情况下, GLP等量替代水泥后, 混凝土浆体内孔隙溶液中pH值明显下降; GLP用量越大, pH值越小, 碱储备量越低, 致使单位体积混凝土碳化可消耗的碱储备量减小, 单位时间内 CO_2 气体在石灰石粉混凝土中的扩散速率加快, 导致混凝土抗碳化能力下降; GLP用量越大, 混凝土抗碳化能力越差。

同时, GLP等质量替代水泥后, 混凝土浆体内各级孔径的分孔隙率及分孔隙百分率等孔级配特征变化明显。孔径20~50 nm的少害孔分孔隙率降低, 而50~200 nm级的有害孔分孔隙率明显增大, 且50~200 nm孔径的分孔隙百分率也明显增大, 直接造成混凝土内部浆体总孔隙率明显增大, 进一步削弱了混凝土的抗碳化能力。而通过增大GLP比表面积、减小混凝土水胶比及控制GLP用量, 可从一定程度上提高石灰石粉内部孔隙溶液的pH值和改善孔级配分布特征, 进而提高石灰石粉混凝土的抗碳化能力。

3 结论

1) GLP等量替代水泥后, 混凝土浆体内孔隙溶液pH值降低, 碱储备量减小; GLP用量越大, 混凝土浆体内孔隙溶液pH值越低。

2) 用GLP等量替代水泥会直接影响浆体内水化产物各级孔径的分布特征; 浆体总孔隙率增大, 孔径在50~200 nm的分孔隙率明显高于纯水泥浆体, 且其分孔隙百分率也明显增大。

3) 混凝土内部浆体孔隙溶液pH值和水化产物孔级配特征的变化会直接影响混凝土碳化进程。GLP等量替代水泥后, 明显削弱了混凝土抗碳化能力; GLP用量、比表面积和混凝土水胶比均对石灰石粉混凝土抗碳化能力有影响; 增大GLP比表面积、减小混凝土水胶比可提高混凝土抗碳化能力。

参考文献:

- [1] 徐巍. 新型石灰石矿渣水泥水化机理及性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
XU Wei. Research on the mechanism and properties of a new kind of limestone slag cement [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [2] 熊远柱. 高掺量石灰石粉对混凝土耐久性的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
XIONG Yuanzhu. Study on the durability of concrete mixed large limestone powder [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [3] 程勇. 石灰石粉胶砂、混凝土受硫酸钠侵蚀后性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
CHENG Yong. Properties research on mortar and concrete with limestone cementitious materials attacked by sulfate [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012.
- [4] TSIVILIS S, BATIS G, CHANIOTAKIS E, et al. Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(2): 1679-1683.
- [5] GUEMMADI Z, RESHEIDAT M, HOUARI H, et al. Optimal criteria of Algerian blended cement using limestone fines [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2008, 14(4): 269-275.
- [6] RAMEZANIANPOUR A A, GHIASVAND E, NICKSERESHT I, et al. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10): 715-720.
- [7] 刘数华, 阎培渝. 石灰石粉对水泥浆体填充效应和砂浆孔结构的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(1): 69-72.
LIU Shuhua, YAN Peiyu. Influence of limestone powder on filling effect of cement paste and pore structure of sandgrout [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(1): 67-72.
- [8] 刘数华, 王军. 石灰石粉对砂浆孔结构的影响 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4): 532-535, 575.

- LIU Shuhua, Wang Jun. Influence of limestone powder on pore structure of mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(4): 532-535, 575.
- [9] 贾福萍, 杨柯红, 尚永浩, 等. 石灰石粉混凝土抗碳化性能因素分析 [J]. *混凝土*, 2015, 309(7): 61-62, 70. JIA Fuping, YANG Kehong, SHANG Yonghao, et al. Analysis of the factors affecting the carbonation resistance of limestone concrete [J]. *Concrete*, 2015, 309(7): 61-62, 70.
- [10] 肖佳. 水泥-石灰石粉胶凝体系特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008. XIAO Jia. Study on characteristics of cement-ground limestone gelation system [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [11] 文俊强. 石灰石粉作混凝土掺合料的性能研究及机理分析 [D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2010. WEN Junqiang. Properties and mechanism of ground limestone as concrete mineral additive [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2010.
- [12] 徐国强, 刘娟红, 乔兰, 等. 双掺石灰石粉和粉煤灰绿色高性能混凝土研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2010, 32(21): 22-26. XU Guoqiang, LIU Juanhong, QIAO Lan, et al. Research on green high performance concrete mixed with limestone powder and fly ash [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(21): 22-26.
- [13] 贾福萍. 一般大气和硫酸盐侵蚀环境石灰石粉-粉煤灰掺合料混凝土基本性能研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012. JIA Fuping. Study on the fundamental properties of concrete with limestone-fly ash cementitious materials at atmospheric and sulfate attack environment [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 石灰石粉混凝土: GB/T 30190—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石灰石粉在混凝土中的应用技术规程: JGJ/T 318—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [16] 鲁彩凤. 自然气候环境下粉煤灰混凝土耐久性预计方法 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012. LU Caifeng. Durability prediction method for fly ash concrete in natural climate environment [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012.
- [17] 廉慧珍, 童良, 陈恩义. 建筑材料物相研究基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [18] ISIRI 4220. Lime-Portland cement-specification [S]. Tehran: Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 2005.
- [19] HOUST Y F, WITTMANN F H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6): 1165-1176.
- [20] 巴明芳, 钱春香, 柳俊哲, 等. 微细观尺度上考虑化学反应影响的混凝土碳化速度 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(7): 2412-2418. BA Mingfang, QIAN Chunxiang, LIU Junzhe, et al. Concrete carbonation progress on meso-microscopic scale considering effects of chemical reaction [J]. *Journal of Central South University(Natural Science Edition)*, 2015, 46(7): 2412-2418.
- [21] 何娟, 何俊红, 王宇斌. 碱矿渣水泥基胶凝材料的碳化特征研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(4): 927-936. HE Juan, HE Junhong, WANG Yubin. Carbonation characteristics of alkali-activated slag cementitious materials [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(4): 927-936.

(责任编辑 周 蓓)