第 49 卷第 2 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 2
2021 年 2 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　February，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200369

轻质超高性能混凝土的制备及性能形成机理

张高展[1,2]，葛竞成[1]，丁庆军[3]，杨　军[1,2]，向玮衡[3]，胡　俊[3]

(1. 安徽建筑大学材料与化学工程学院，合肥 230601；2. 安徽省先进建筑材料重点实验室，合肥 230022；
3. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070)

摘　要：以预湿轻集料、硅酸盐水泥、硅灰、粉煤灰微珠、钢纤维、膨胀剂等为原材料，采用轻质、超高强度与低收缩协同设计方法制备了一种轻质超高性能混凝土材料，并研究其性能的主要影响因素和形成机理。结果表明：制备的轻质超高性能混凝土可实现自流平、干表观密度低至 2 040 kg/m^3、28 d 抗压/抗折强度可达 120/18 MPa、弯曲韧性指数 I_{20} 可至 21.8、56 d 收缩率低至 2.62×10^{-4}；其性能的形成主要源于粉煤灰微珠的滚珠效应、轻集料的轻质多孔效应、预湿轻集料的内养护与拱壳效应，以及预湿轻集料内养护与膨胀剂的叠加效应。

关键词：轻集料；超高性能混凝土；力学性能；体积稳定性能；界面区
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0381–10
网络出版时间：2020–12–31



Preparation and Formation Mechanism of Lightweight Ultra-high Performance Concrete

ZHANG Gaozhan[1,2], *GE Jingcheng*[1], *DING Qingjun*[3], *YANG Jun*[1,2], *XIANG Weiheng*[3], *HU Jun*[3]
(1. School of Materials and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Advanced Building Materials, Hefei 230022, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Lightweight ultra-high performance concrete (LUHPC) was prepared with pre-wetting lightweight aggregate, Portland cement, silica fume, fly ash microsphere, steel fiber and expansion agent as raw materials. The influencing factors on the performance of LUHPC and the developing mechanism were investigated. The results show that the as-prepared LUHPC has a superior performance. The LUHPC can be self-compacting and has a low dry apparent density of 2 040 kg/m^3. The 28-d compressive strength and flexural strength are 120 MPa and 18 MPa, respectively. The bending toughness index is 21.8, and the 56-d shrinkage rate is 2.62×10^{-4}. The superior performance of the LUHPC is mainly due to the ball effect of fly ash microsphere, the lightening, internal curing, "arch-shell" structure effects of pre-wetting lightweight aggregate and the shrinkage-compensating effect of expansion agent.

Keywords: lightweight aggregate; ultra-high performance concrete; mechanical properties; volume stability; interfacial transition zone

超高性能混凝土(UHPC)除具备超高力学性能(抗压强度大于 100 MPa，弹性模量大于 38 GPa，韧性指数 I_{20} 大于 15)外，还具备优异耐久性能(28 d 快速碳化深度小于 2 mm，氯离子渗透系数小于 0.4×10^{-12} m^2/s)[1–3]，适用于现代建筑结构。用作结构材料，UHPC 不仅可有效提升建筑结构承载能力、减小构件截面尺寸、降低配筋率和构件自重，且可延长建筑结构服役寿命。然而，由于 UHPC 较高胶凝材料用量、较低水胶比及密实设计原理，导致其存在密度大(2 600~2 800 kg/m^3)和收缩大(可达 8.0×10^{-4} 以上)的问题，需要蒸养来改善构件的体积稳定性和抗裂性能，能耗和成本均增加，限制了

收稿日期：2020–05–25。　修订日期：2020–06–16。
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51878003)；安徽省高校自然科学研究项目(KJ2019ZD55)；安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyqZD2019055)；博士启动基金项目(2018QD30)。
第一作者：张高展(1981—)，男，博士，副教授。
通信作者：丁庆军(1962—)，男，博士研究生导师，教授。

Received date: 2020–05–25.　**Revised date:** 2020–06–16.
First author: ZHANG Gaozhan (1981–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: gaozhanzhang@126.com
Corresponding author: DING Qingjun (1962–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: dingqj@whut.edu.cn

UHPC 的推广应用[4]。

目前，为了解决 UHPC 收缩大的问题，学者们常在 UHPC 中掺加内养护材料或减缩剂、膨胀剂等。Suzuki 等[5]复合使用粒径为 5~15 mm 的预湿废弃陶瓦集料、膨胀剂和减缩剂改善 UHPC 的收缩，既减少了收缩又提高了强度；Justs[6]、黄政宇等[7]分别采用高吸水树脂带入额外水分进行内养护，有效降低了 UHPC 的自收缩；史才军等[8]采用掺加高吸水树脂、膨胀剂的方法来减小 UHPC 的收缩率，也取得了显著的效果；Ma 等[9]采用 2~5 mm 高强玄武岩粗集料替代石英砂，也改善了 UHPC 的收缩。以上方法均能有效降低 UHPC 的收缩率，但高吸水树脂会在混凝土内部留下孔洞，降低密实性，掺加高强玄武岩则无法降低 UHPC 的自重。

基于 UHPC 轻质化和低收缩率的目的，在 UHPC 中以预湿轻集料陶砂取代石英砂，制备以细轻集料与超细钢纤维为骨架，硅酸盐水泥、硅灰、粉煤灰微珠等密实堆积的轻质 UHPC，提出其低密度与超高强度及超高强度与低收缩的协同设计方法，并分析其性能形成机理。

1 实验

1.1 原材料

水泥为 P·O 52.5，化学组成见表 1。硅灰比表面积 19 500 m^2/kg，化学成分见表 1。粉煤灰微珠比表面积不小于 1 200 m^2/kg，化学成分见表 1。钢纤维为微细镀铜钢纤维，长度 13 mm，直径 0.22 mm，100%无断裂；轻集料为 800 级页岩碎石形陶砂，筒压强度 6.1 MPa，粒径范围为 0.15~4.75 mm，表观密度 1 310 kg/m^3，饱和吸水率 9.2%，对其进行筛分，获得粒径范围为 0.15~2.36 mm 碎石形陶砂；并对上述 0.15~4.75 mm 粒径范围页岩陶砂进行整形，筛分得粒径范围为 0.15~2.36 mm 球形陶砂；石英砂粒径范围为 0.15~2.36 mm，表观密度 2 650 kg/m^3；膨胀剂为 HCSA 型膨胀剂；减水剂为聚羧酸高效减水剂，减水率 30%。

表 1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials *w*/%

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Loss
Cement	20.87	4.87	3.59	64.47	2.13	2.52	0.65	0.11	0.77
Silica fume	96.00	1.03	0.72	0.51	0.735	0.15	0.21	0.08	2.38
Fly ash	52.50	32.40	4.01	1.50	0.53	0.33	1.32	0.42	1.22

w is mass fraction.

1.2 轻质 UHPC 制备与养护工艺

基于 UHPC 同时具备轻质、超高强度和低收缩的目的，以低密度与超高强度、超高强度与低收缩协同设计的理念为指导，选取硅酸盐水泥、粉煤灰微珠和硅灰作为主要胶凝材料，并掺加膨胀剂进行减缩，选用粒径范围为 0.15~2.36 mm 石英砂、碎石形陶砂和球形陶砂作为细集料，具体配合比见表 2，其中水胶比 0.18，钢纤维体积掺量 2.8%，减水剂掺量 2.0%。在进行配合比设计时，由于石英砂和陶砂表观密度存在较大差别，在保证胶凝材料不变的情况下，石英砂和陶砂的绝对体积一致。

表 2 UHPC 的配合比

Table 2 Mixture ratio of UHPC

Sample No.	Material dosage/(kg·m^{-3})							Water absorption of ceramsite/%
	Cement	Fly ash	Silica fume	Quartz sand	Clastic ceramsite	Spherical ceramsite	Expanding agent	
UHPC-0	781	198	187	972	0	0	0	
UHPC-1	737	187	176	972	0	0	66	
LUHPC-S0	781	198	187	0	480	0	0	9.2
LUHPC-S1	737	187	176	0	480	0	66	9.2
LUHPC-Q0	781	198	187	0	0	480	0	9.2
LUHPC-Q1	737	187	176	0	0	480	66	9.2
LUHPC-Q2	737	187	176	0	0	480	66	5.0
LUHPC-Q3	737	187	176	0	0	480	66	0.0
LUHPC-Q4	781	198	187	0	0	480	0	0.0

拌和过程中，为了消除钢纤维团聚现象，使轻质 UHPC 具备良好工作性能，采用以下布料顺序和工艺：1) 试验前根据需要对陶砂进行不同程度预湿；2) 将预湿陶砂与粉料干拌 2 min，混合至均匀；3) 加入 75%的水和减水剂再拌和 4 min，浆体具有一定流动度；4) 均匀撒入钢纤维，并加入剩余水和

减水剂，再拌和 6~7 min 得 UHPC 拌合物(如图 1)；5) 装模，并在其表面覆盖一层塑料保鲜膜后移至 20 ℃养护室养护至需要龄期。

1.3 方法

宏观性能：利用坍落度和扩展度表征 UHPC 拌合物的工作性能，依据 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行测定；利用抗压强度、抗弯强度、弹性模量等指标表征 UHPC 的力学性能，依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行测定；利用弯曲韧性指数 I_{20} 表征 UHPC 的韧性，依据 CECS13—2009《纤维混凝土试验方法标准》进行测定；利用自收缩率表征 UHPC 的体积稳定性能，依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的非接触式法进行测试；利用混凝土内部相对湿度测定仪测定混凝土内部湿度；利用扫描电子显微镜(SEM)表征粉煤灰微珠和界面区形态；利用 SEM-EDS 面扫描表征试样中元素分布，以明确陶砂和水泥石的界面。



(a) UHPC-1　　(b) LUHPC-S1　　(c) LUHPC-Q1

图 1　UHPC 拌合物

Fig. 1　Fresh mixture of UHPC

2　结果与讨论

2.1 轻质 UHPC 的性能

依据表 2 配合比，对比研究了掺加石英砂、饱水碎石形陶砂、饱水球形陶砂 UHPC 的性能，并探讨了集料种类和陶砂预湿程度对 UHPC 性能的影响，结果见表 3。

由表 3 可知，以石英砂、饱和预湿陶砂为细集料制备的 UHPC 均具有优异工作和力学性能。其中，坍落度超过 270 mm、扩展度大于 600 mm，可以实现自流平(见图 1)；28 d 抗压强度超过 110 MPa、28 d 抗弯强度超过 16.5 MPa、弹性模量大于 40 GPa、韧性指数 I_{20} 大于 21。而以饱和预湿陶砂为细集料制备的 UHPC 干表观密度低至 2 040 kg/m^3，56 d 收缩率低至 2.62×10^{-4}，均远低于以石英砂为细集料制备的 UHPC，实现了 UHPC 轻质和低收缩的目的。

表 3　UHPC 性能参数

Table 3　Performance parameters of UHPC

Sample No.	Slump/ mm	Slump extension /mm	Compressive strength/MPa		Flexure strength /MPa		Elasticity modulus/GPa	I_{20}	Dry apparent density/(kg·m^{-3})	Shrinkage rate of 56 d×10^4
			7 d	28 d	7 d	28 d				
UHPC-0	270	610	108.3	126.5	18.9	22.6	45.2	23.8	2 580	7.07
UHPC-1	275	615	109.5	125.1	18.6	22.0	44.8	22.9	2 570	4.87
LUHPC-S0	275	600	86.7	113.5	12.3	16.9	41.0	21.8	2 060	5.10
LUHPC-S1	270	600	85.5	110.1	12.2	16.5	40.3	21.5	2 050	3.02
LUHPC-Q0	280	610	92.8	120.9	14.0	18.3	41.9	21.8	2 050	4.93
LUHPC-Q1	280	620	91.1	118.2	13.7	17.8	41.6	21.8	2 040	2.62
LUHPC-Q2	220	475	82.3	109.8	11.8	15.8	40.8	21.3	2 040	3.80
LUHPC-Q3	170	390	72.5	103.5	10.6	14.7	40.1	20.8	2 030	5.14
LUHPC-Q4	170	380	74.2	105.6	10.8	15.1	40.2	20.9	2 040	6.72

2.1.1　集料种类对 UHPC 性能的影响　研究了石英砂、预湿碎石形陶砂和预湿球形陶砂 3 种集料对 UHPC 工作性能、力学性能、干表观密度和体积稳定性能的影响，结果分别见图 2、图 3 和图 4，其中 UHPC-0、LUHPC-S0 和 LUHPC-Q0 为未掺加膨胀剂的石英砂、预湿碎石形陶砂和预湿球形陶砂

UHPC，UHPC-1、LUHPC-S1 和 LUHPC-Q1 为掺加膨胀剂的石英砂、预湿碎石形陶砂和预湿球形陶砂 UHPC。

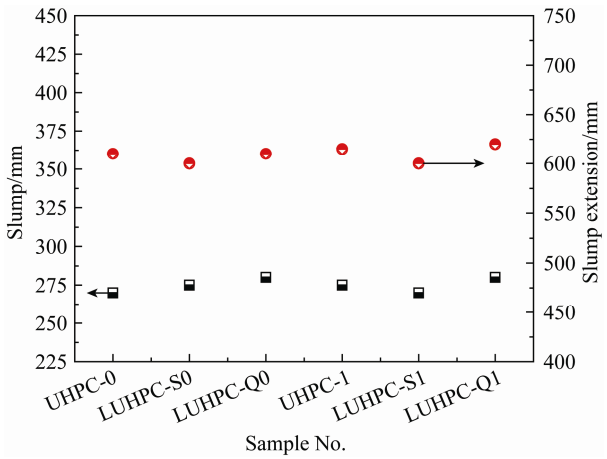
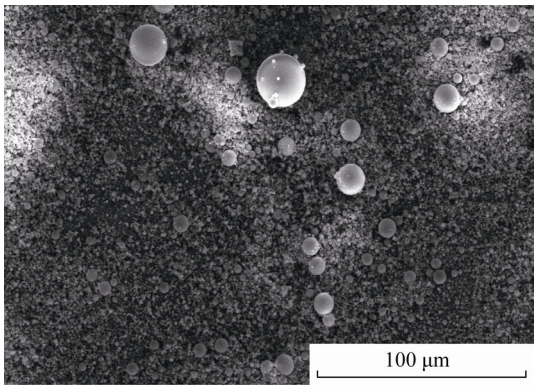


图 2 集料种类对 UHPC 工作性能的影响

Fig. 2 Effect of aggregate types on the workability of UHPC



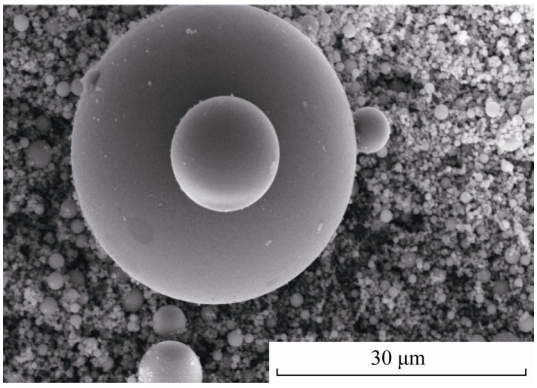
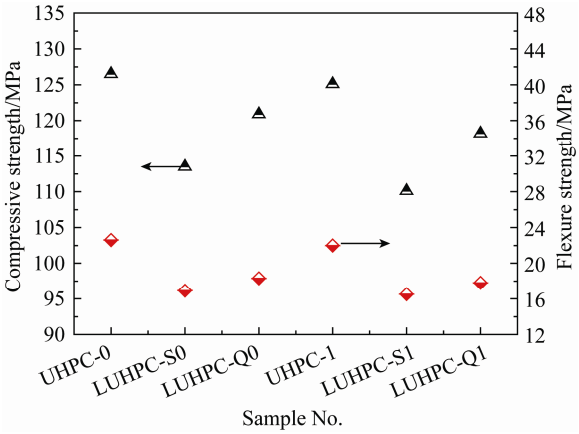


图 3 具备“滚珠”效应的粉煤灰微珠形态

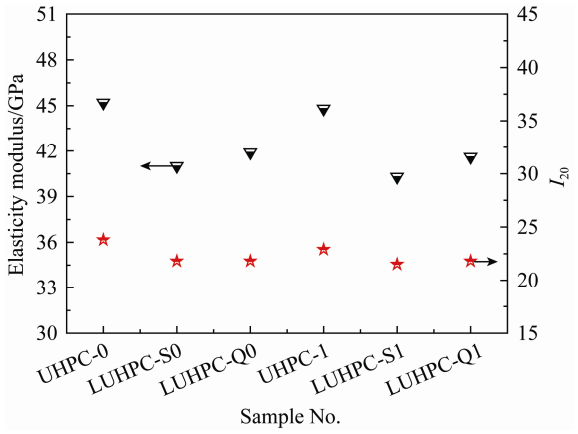
Fig. 3 Shape of fly ash beads with ball effect

图 2 为石英砂、预湿碎石形陶砂和预湿球形陶砂对 UHPC 工作性能的影响规律。由图 1 和图 2 可知，3 种集料制备的 UHPC 工作性能差别不大，均可实现自流平，这主要是通过掺入粉煤灰微珠及调控高效减水剂的技术手段实现的。粉煤灰微珠内部中空而表面光滑致密(颗粒形貌见图 3)，在拌合物中极具“滚珠”效应，且其早龄期活性低，需水量较小，可提升胶凝体系的有效水胶比，改善拌合物流动性。胡俊等[10]讨论了粉煤灰微珠掺量对 UHPC 工作性能的影响，发现随粉煤灰微珠掺量增加，UHPC 工作性能明显改善。此外，粉煤灰微珠具有较小的表观密度，可降低浆体的整体密度，进而缩小预湿轻集料陶砂与拌合物浆体的密度差，避免轻集料陶砂上浮，使得 UHPC 拌合物更均匀。

图 4 为石英砂、预湿碎石形陶砂和预湿球形陶砂对 UHPC 力学性能的影响规律。由图 4a 可知，预湿陶砂替代等体积石英砂制备的 UHPC 抗压强度和抗弯强度均降低，这是因为陶砂强度远低于石英砂导致的，但其抗压强度和抗弯强度仍分别超过了 110 MPa 和 16.5 MPa，满足 UHPC 的要求。由图 4a



(a) Compressive strength and flexure strength



(b) Elasticity modulus and I_{20}

图 4 集料种类对 UHPC 力学性能的影响

Fig. 4 Effect of aggregate type on the mechanical properties of UHPC

还可发现，球形陶砂 UHPC 的抗压强度和抗弯强度均明显高于碎石形陶砂 UHPC，这主要是由于不同粒形陶砂形成的界面区形态不同导致的。由图 4b 可知，预湿陶砂替代等体积石英砂制备的 UHPC 弹性模量和韧性指数 I_{20} 也出现了降低，其原因是陶砂自身弹性模量明显低于石英砂。然而，碎石形陶砂和球形陶砂对 UHPC 弹性模量和韧性指数 I_{20} 的影响不大。二者虽然形态不同，但材质均为页岩，弹性模量一致。而影响韧性指数 I_{20} 的主要因素为钢纤维掺量，二者掺量一致。

图 5 为石英砂、预湿碎石形陶砂和预湿球形陶砂对 UHPC 干表观密度和体积稳定性的影响规律。由图 5 可知，预湿陶砂替代等体积石英砂制备的 UHPC 干表观密度和 56 d 收缩率均显著降低。其中，预湿碎石形陶砂 UHPC 相对石英砂 UHPC 干表观密度和 56 d 收缩率分别由 2 570 kg/m^3 和 4.87×10^{-4} 降至 2 050 kg/m^3 和 3.02×10^{-4}，分别降低约 20.2%和 38.0%；而预湿球形陶砂 UHPC 相对石英砂 UHPC 干表观密度和 56 d 收缩率分别由 2 570 kg/m^3 和 4.87×10^{-4} 降至 2 040 kg/m^3 和 2.62×10^{-4}，分别降低约 20.6%和 46.2%。UHPC 表观密度的显著降低主要是由陶砂的轻质多孔本质决定的，而收缩率的显著降低主要源于轻集料的“内养护”效应[11–12]。

2.1.2　轻集料预湿程度对 UHPC 性能的影响　　分别利用干燥、吸水率 5%和吸水率 9.2%的球形陶砂制备 UHPC，研究轻集料预湿程度对 UHPC 工作性能、力学性能、干表观密度和体积稳定性能的影响，其变化规律分别见图 6 和图 7。

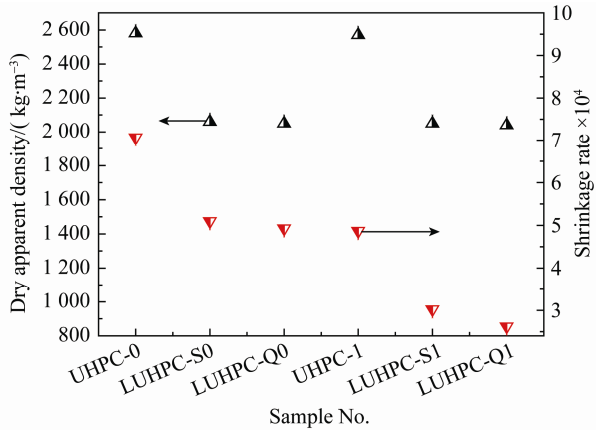
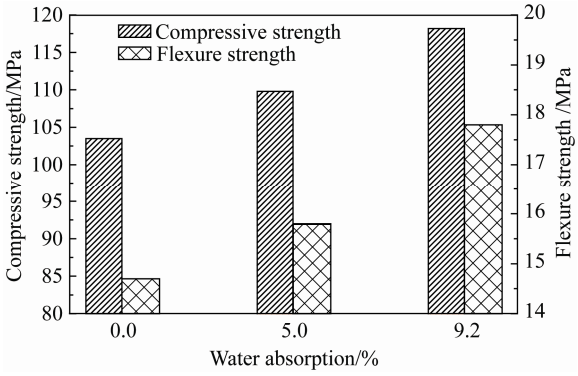
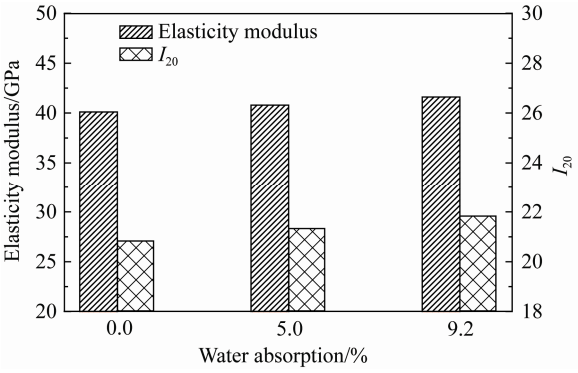


图 5　集料种类对 UHPC 干表观密度和体积稳定性能的影响

Fig. 5　Effect of aggregate type on the dry apparent density and volume stability of UHPC



(a) Compressive strength and flexure strength



(b) Elasticity modulus and I_{20}

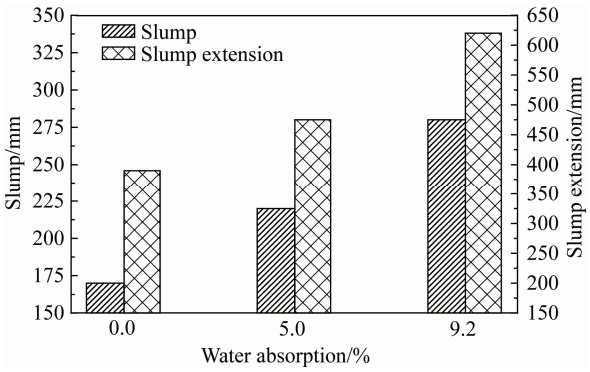
图 6　轻集料预湿程度对 UHPC 力学性能的影响

Fig. 6　Effect of pre-wetting degree of light aggregate on the mechanical properties of UHPC

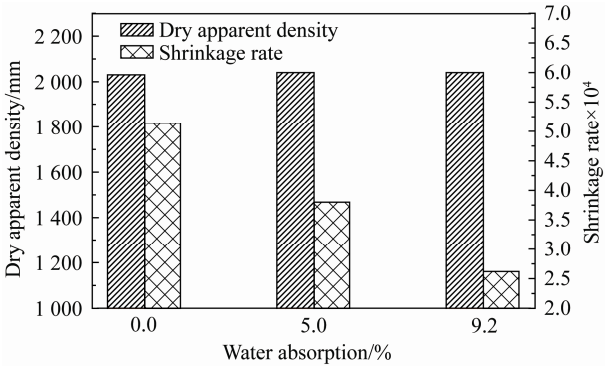
由表 3、图 6 和图 7 可以看出，轻集料预湿程度对 UHPC 的弹性模量、韧性指数 I_{20} 和干表观密度影响不大，这是因为轻集料不是影响弹性模量和韧性指数的关键参数，而干表观密度的测定方式也决定了其基本不受轻集料预湿程度的影响。然而，轻集料预湿程度对 UHPC 的工作性能、强度和体积稳定性能影响较为显著，随着轻集料预湿程度增大，UHPC 拌合物的坍落度和扩展度显著增大，抗压和抗弯强度也明显提升，56 d 收缩率显著降低。陶砂轻质多孔，如若未预湿或预湿程度不够，将吸收胶凝浆体中的水分，从而降低胶凝浆体的有效水胶比，导致 UHPC 拌合物工作性能变差。而饱和预湿陶砂在 UHPC 水化后期仍能在湿度梯度的作用下释水，使胶凝体系内部湿度得以保持，减少收缩，并可使得胶凝体系持续水化，增加 UHPC 的力学强度[13–14]。

2.2　轻质 UHPC 性能形成机理

基于以上研究可知，利用预湿轻集料替代石英砂可制备出性能优异的轻质 UHPC，实现 UHPC 同时兼具轻质、超高和易性、超高强、低收缩和高弹模的目的。利用轻集料自身的“轻质多孔”效应和粉



(a) Workability



(b) Dry apparent density and volume stability

图 7 轻集料预湿程度对 UHPC 工作性能、干表观密度和体积稳定性能的影响

Fig. 7 Effect of pre-wetting degree of lightweight aggregate on the workability, dry apparent density and volume stability of UHPC

煤灰微珠的“滚珠”效应分别实现了 UHPC 的轻质化和超高和易性。现就轻质 UHPC 具备其他优异性能的机理分析如下：

2.2.1 预湿轻集料的释水内养护作用 混凝土的内养护效应一般是指：在混凝土凝结硬化过程中，预湿内养护介质(轻集料、SAP 等)自内至外向胶凝浆体释水，起到维持材料内部湿度，保持未水化胶凝浆体继续水化，进而减小自收缩的作用，其机理如图 8 所示[15]。

验证预湿轻集料在混凝土内部的释水内养护作用，可从轻集料-水泥石的界面区特性和混凝土的自收缩率两方面进行。预湿轻集料-水泥石的界面区特性作者已在文献[16–17]中进行了研究，发现轻集料预湿程度越高，轻集料–水泥石界面区的水化程度、C-S-H 凝胶聚合度和显微硬度越高，界面区结构与性能越优异，预湿轻集料的内养护作用越明显。为了进一步从自收缩的角度探明预湿轻集料的内养护作用，研究了球形陶砂预湿程度(0%、5%和 9.2%)、UHPC 内部相对湿度和 UHPC 体积稳定性之间的相互关系，结果见图 9。

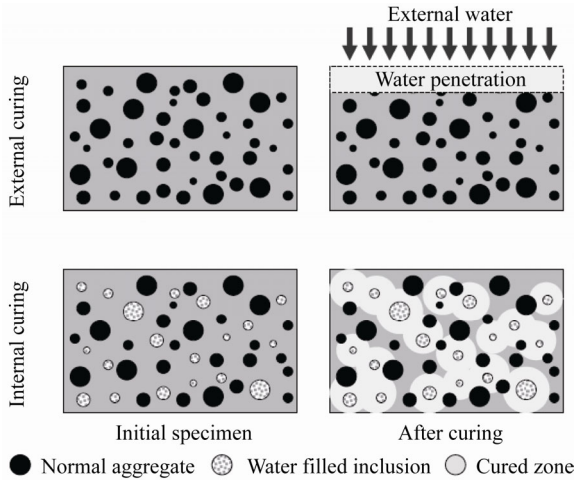


图 8 混凝土材料外养护和内养护作用机理示意图[15]

Fig. 8 Schematic diagram of the external curing and internal curing mechanisms of concrete[15]

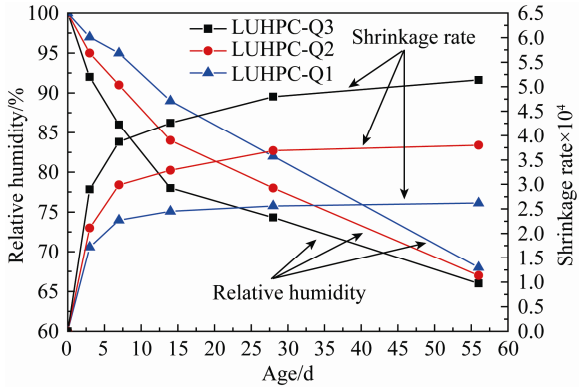


图 9 不同预湿程度球形陶砂 UHPC 内部相对湿度和体积稳定性能

Fig. 9 Relative humidity and volume stability of UHPC with spherical ceramsite of different pre-wetting degrees

由图 9 可知，随龄期增加，利用 3 种预湿程度陶砂制备的 UHPC 内部相对湿度均下降，自收缩率均增大。0 至 14 d 龄期内，陶砂预湿程度越高，UHPC 内部相对湿度下降越慢，自收缩率增速也越慢；14 d 至 56 d 龄期内，陶砂预湿程度越高，UHPC 内部相对湿度下降越快。但自收缩率增速放缓，说明 UHPC 的收缩主要发生在早龄期；至 56 d 龄期时，三者内部相对湿度基本差别不大，但自收缩率出现较大差异，陶砂预湿程度越高，UHPC 自收缩率越小，饱和预湿陶砂 UHPC 的 56 d 自收缩率仅为干燥陶砂 UHPC 的 51.0%。这也说明陶砂预湿程度越高，早

期释水效应越强，UHPC 自收缩率越小，陶砂的内养护作用越强。由图 9 还可以发现，28 d 龄期时，预湿陶砂制备的 UHPC 内部相对湿度均高于 75%，而干燥陶砂制备的 UHPC 内部相对湿度已低于 75%。有研究表明，胶凝浆体的水化在混凝土内部相对湿度低于 75%时会受到明显抑制[18–19]。以上均表明，预湿陶砂的释水内养护作用有利于保持 UHPC 材料的内部相对湿度，进而改善 UHPC 的体积稳定性能。

2.2.2　预湿球形轻集料的拱壳状界面区作用　　已有研究表明[16–17, 20–22]，预湿轻集料在混凝土内部释水使界面区水化相对基体更为充分，形成性能优于水泥石基体的界面区，使得界面区不再是轻集料混凝土中最薄弱的区域，进而改善轻集料混凝土的性能。此外，也有研究认为界面区的形态也会对混凝土的性能产生较大影响[23–24]。作者[16–17, 25]前期研究发现采用球形预湿轻集料制备混凝土，轻集料在浆体硬化后释水内养护，不仅可降低混凝土收缩，还可在集料周围形成一层水化程度较高、较密实的界面过渡区，称之为“拱壳”，高强的球形“拱壳”可分散应力，避免混凝土受压时集料处应力集中导致的破坏，缓解低强度的多孔集料对混凝土力学性能的不利影响。为了探明界面区形态对 UHPC 性能的影响作用，试验中对比分析了碎石形和球形页岩轻集料分别对 UHPC 材料力学性能和体积稳定性能的影响，结果见图 10。

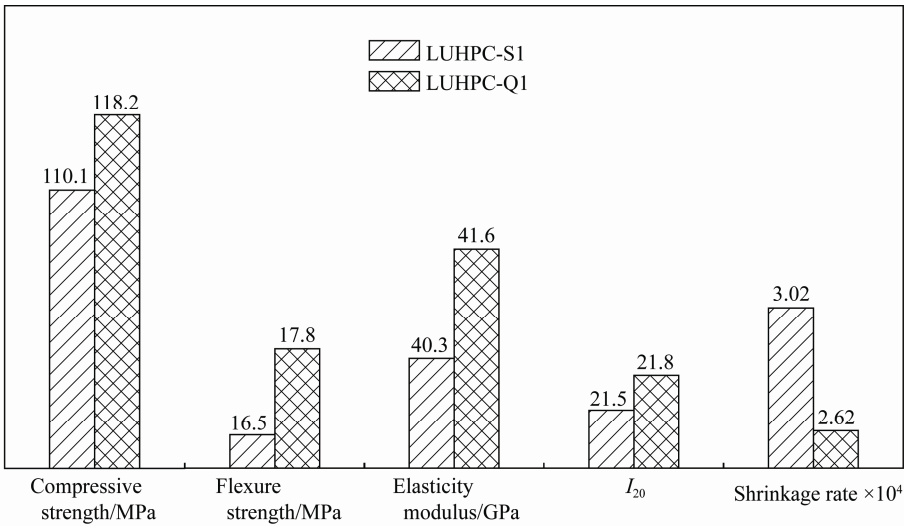
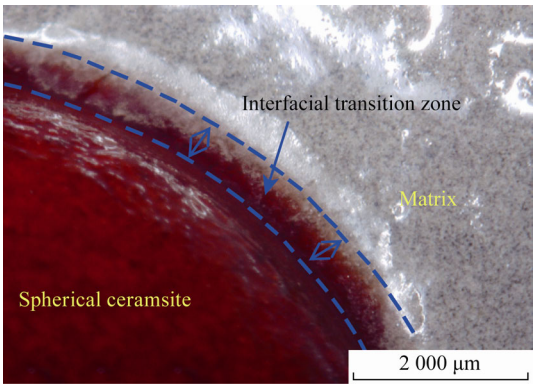


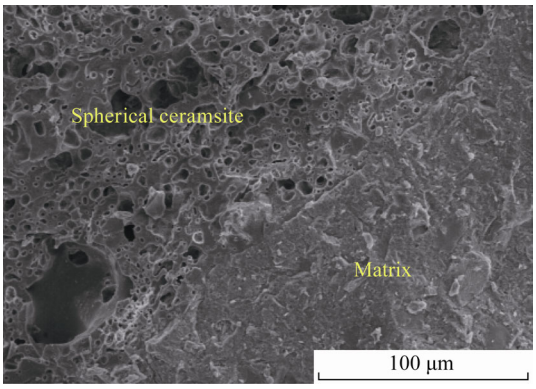
图 10　预湿碎石形陶砂和球形陶砂对 UHPC 力性能和体积稳定性能的影响

Fig. 10　Effect of pre-wet clastic ceramsite and spherical ceramsite on the mechanical properties and volume stability of UHPC

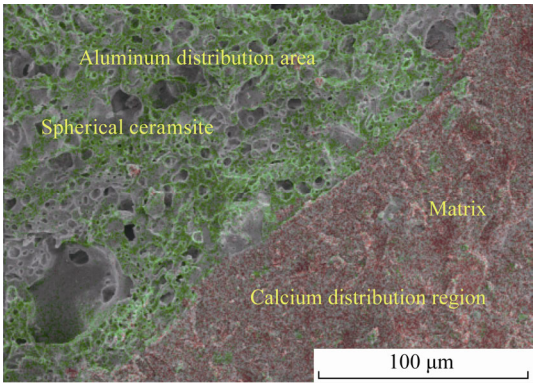
由图 10 和表 3 可以看出，预湿球形陶砂 UHPC 的力学性能和体积稳定性能均明显优于碎石形陶砂 UHPC。由表 2 试验配合比分析可知，LUHPC-S1 和 LUHPC-Q1 二者除陶砂粒形不同外，其他配合比参数完全一致，这也说明球形陶砂在 UHPC 内部所形成的“拱壳状”界面区相比于碎石形陶砂形成的“不规则状”界面区，更有益于提升 UHPC 的力学性能和体积稳定性能。杨进[23]、李洋[24]、刘荣进等[26]在研究中也发现“拱壳状”界面区特殊的形态能够均匀分散应力，进而提升混凝土的力学性能和体积稳定性能。图 11 为球形陶砂在 UHPC 中所形成“拱壳状”界面区形态和断面照片。为了明显表征出“拱壳状”界面区的形态，特在预湿水中添加了红色指示剂，如图 11a 可以看出陶砂周围形成了“拱壳状”界面区。此外，球形轻集料自身弹性模量较低，其周围“拱壳状”界面区本质上也属于水泥石，与水泥基体弹性模量接近，且从“拱壳状”界面区到基体为逐渐过渡，无明显界面，消除了 UHPC 中轻集料与基体界面的弹性模量差异，可避免荷载作用下集料和水泥不一致变形产生的微裂纹。如图 11b 中，多孔陶砂与水泥石粘结致密，无明显界面。为了表征出二者的界面，采用 SEM-EDS 面扫描表征了试样中 Al 和 Ca 的分布，如图 11c 所示，绿色代表 Al 分布，红色代表 Ca 分布，Al 和 Ca 分布的交接叠加处即为陶砂和水泥石的界面位置。



(a) Morphology of the “arch-shell” under stereomicroscope: red is the indicator in pre-wet water



(b) Morphology of the “arch-shell” under SEM



(c) SEM-EDS scanning: the green represents the distribution of Al and the red represents the distribution of Ca

图 11 球形陶砂 UHPC 中“拱壳状”界面区形态和断面图

Fig. 11 Morphologies and cross sections of the “arch-shell” in UHPC with spherical ceramsite

2.2.3 轻集料内养护与膨胀剂膨胀效应叠加作用

分别利用干燥陶砂不掺加膨胀剂(LUHPC-Q4)、干燥陶砂掺加膨胀剂(LUHPC-Q3)、饱和预湿陶砂掺加膨胀剂(LUHPC-Q1)和饱和预湿陶砂不掺加膨胀剂(LUHPC-Q0)制备 UHPC，并对比各组收缩率变化，结果见图 12。

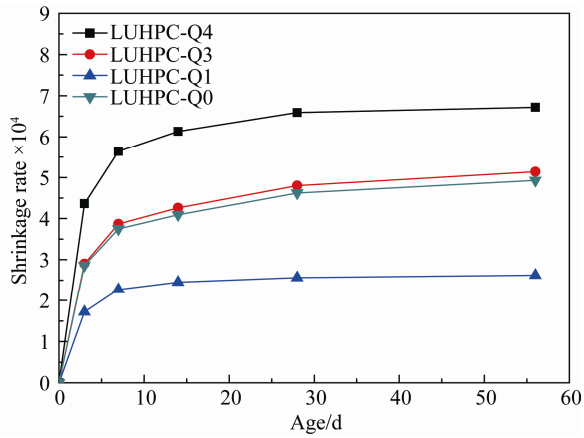


图 12 不同预湿程度球形陶砂和膨胀剂掺量 UHPC 的收缩率

Fig. 12 Shrinkage rate of UHPC with spherical ceramsite of different pre-wetting degrees and different content of expansion agent

由图 12 可明显看出，利用干燥球形陶砂不掺加膨胀剂制备的 UHPC (LUHPC-Q4 组)收缩率最大，56 d 龄期为 6.72×10^{-4}。利用干燥球形陶砂掺加膨胀剂和采用饱和预湿球形陶砂不掺加膨胀剂制备的 UHPC (LUHPC-Q3 和 LUHPC-Q0 组) 56 d 龄期收缩率分别为 5.14×10^{-4} 和 4.93×10^{-4}，相对于 LUHPC-Q4 组分别降低了 23.5%和 26.6%，这说明陶砂内养护效应和膨胀剂膨胀效应均可有效降低 UHPC 的收缩。而利用饱和预湿球形陶砂并掺加膨胀剂制备的 UHPC (LUHPC-Q1 组) 收缩率最小，56 d 龄期仅为 2.62×10^{-4}，相对于 LUHPC-Q4 组降低了 61.0%，减缩效率分别远高于 LUHPC-Q3 和 LUHPC-Q0 组，且相对于二者之和提升了 10.9%，这也说明了预湿陶砂内养护效应与膨胀剂膨胀效应的叠加更有利于提升 UHPC 的减缩效率。HCSA 膨胀剂中主要含有氧化钙和硫铝酸钙，水化时氧化钙转变为氢氧化钙产生体积膨胀，氢氧化钙继续与硫铝酸钙反应生成钙矾石，填充毛细孔隙，减小收缩。文献[27–28]研究表明，硫铝酸钙类膨胀剂具有较强的时效性，主要在早龄期发挥膨胀效应，且生成钙矾石耗水量较大。然而，预湿陶砂在 UHPC 硬化过程中具备持续释水的内养护效应，能较好保持 UHPC 内部相对湿度，促进 HCSA 膨胀剂膨胀效应的充分展现。黄正宇等[29]对比研究了 UEA 和 HCSA 型膨胀剂对 UHPC 工作、力学和体积稳定性能的影响，认为 HCSA 型膨胀剂是一种较理想的用于 UHPC 补偿收缩的外加剂，当掺入 10%HCSA 时，UHPC 的 56 d 收缩率为 2.80×10^{-4}。相比于该文献，LUHPC-Q1 中 HCSA 掺量约为 6%，56 d 收缩率仅为 2.62×10^{-4}，这也间接

说明了预湿轻集料的内养护效应促进了 HCSA 的膨胀效应。

3　结论

1) 基于 UHPC 低密度与超高强度、超高强度与低收缩的协同设计理念和方法，通过引入预湿轻集料可实现 UHPC 轻质和低收缩的目的，制备出可实现自流平、28 d 抗压强度超过 110 MPa、弹性模量大于 40 GPa、韧性指数大于 21、干表观密度低至 2 040 kg/m^3，56 d 收缩率低至 2.62×10^{-4} 的轻质 UHPC。

2) 集料的种类对 UHPC 性能有着显著影响，预湿轻集料的加入会导致 UHPC 的力学性能略微降低，但可显著提升 UHPC 的比强度和体积稳定性能；轻集料的预湿程度对 UHPC 的弹性模量、韧性指数 I_{20} 和干表观密度影响不大，但可明显改变拌合物的工作性能和 UHPC 的体积稳定性能。

3) 轻质 UHPC 的优异性能主要源于粉煤灰微珠的滚珠效应、轻集料的轻质多孔效应、预湿轻集料的内养护与拱壳效应，以及预湿轻集料内养护与膨胀剂的叠加效应。

参考文献:

[1] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741–751.

[2] WANG D, SHI C, WU Z, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Constr Build Mater, 2015, 96: 368–377.

[3] NARALD S M, JENNIFER C S. Durability and sustainable development of ultra–high performance concrete[J]. Beton Chin Ed–Ready–mixed Conc, 2012(1): 66–71.

[4] YAZICI H, YARDIMCI M Y, AYDIN S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(3): 1223–1231.

[5] SUZUKI M, MEDDAH M S, SATO R, et al. Long-Term Shrinkage and Stress in Ultra High strength Concrete Using Porous Ceramic Waste for Internal Curing[C]//International RILEM Conference, 2010: 5–7.

[6] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra–high performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2015, 76: 82–90.

[7] 黄政宇, 王嘉. 高吸水性树脂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(3): 539–544.
HUANG Zhengyu, WANG Jia. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2012, 31(3): 539–544.

[8] LIU J, SHI C, MA X, et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2017, 146: 702–712.

[9] MA J, ORGASS M, DEHN F, et al. Comparative Investigations on UltraHigh Performance Concrete with and without Coarse Aggregates[C]. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 2004.

[10] 胡俊. 轻质超高性能混凝土研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
HU Jun. Research on lightweight ultra high performance concrete (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[11] ARNON B, SHIN–ICHI I, KONSTANTIN K. Prevention of autogenous shrinkage in high–strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(11): 1587–1591.

[12] DANIEL C, TED H. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(6): 757–765.

[13] 胡曙光, 王发洲, 丁庆军. 轻集料与水泥石的界面结构[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(6): 713–717.
HU Shuguang, WANG Fazhou, DING Qingjun. J Chin Ceram Soc (in Chinese), 2005, 33(6): 713–717.

[14] 孔丽娟, 高礼雄, 葛勇. 轻骨料预湿程度对混合骨料混凝土抗冻性能影响[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 35–40.
Kong Lijuan, Gao Lixiong, Ge Yong. J Chin Ceram Soc (in Chinese), 2011, 39(1): 35–40.

[15] 曹承伟, 赵铁军, 刘洪珠, 等. 混凝土内养护技术的研究综述[J]. 混凝土, 2016(7): 153–156.
Cao Chengwei, ZHAO Tiejun, LIU Hongzhu, et al. Concrete (in Chinese), 2016(7): 153–156.

[16] 张高展, 魏琦, 丁庆军, 等. 轻集料吸水率对轻集料-水泥石界面区特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 24–28.
ZHANG Gaozhan, WEI Qi, DING Qingjun, et al. J Build Mater (in Chinese), 2018, 21(5): 24–28.

[17] DING Qingjun, XIANG Weiheng, ZHANG Gaozhan, et al. Effect of Pre–wetting Lightweight Aggregates on the Mechanical Performances and Microstructure of Cement Pastes[J]. J Wuhan Univ Technol–Mater, 2020, 35(1): 140–146.

[18] PERSSON B. Self–desiccation and its importance in concrete technology[J]. Mater Struct, 1997, 30(5): 293–305.

[19] JENSEN O M. Thermodynamic limitation of self-desiccation[J]. Cem Concr Res, 1995, 25(1): 157–164.

[20] PIETRO L, MATEUSZ W, CLARENCE T, et al. Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste[J]. Cem Concr Res, 2014, 59: 24–33.

[21] BURCU A, MEHMET A T. Optimisation of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(1): 353–363.

[22] 韩宇栋, 张君, 王振波. 预吸水轻骨料对高强混凝土早期收缩的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1070–1078.
HAN Yudong, ZHANG Jun, WANG Zhenbo. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(8): 1070–1078.

[23] 杨进. 高吸水树脂内养护混凝土的微观结构与性能[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
YANG Jin. Microstructure and performance of cementitious materials

internally cured by superabsorbent polymers (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

[24] 李洋. 轻集料高强混凝土界面区形成与作用机制研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.
LI Yang. Researches on the Formation and Action Mechanism of Interfacial Transition Zone in Light Aggregate High Strength Concrete (in Chinese, dissertation). Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016.

[25] 张高展, 丁庆军, 向玮衡, 等. 一种基于拱壳状界面区的轻集料高强混凝土及其制备方法[P]. CN Patent, 201711324773.5, 2017–12–13.
ZHANG Gaozhan, DING Qingjun, XIANG Weiheng, et al. A Lightweight Aggregate High Performance Concrete Based on Arch Shell and Its Preparation Method (in Chinese). CN Patent, 201711324773.5, 2017–12–13.

[26] 刘荣进. 有机–无机复合混凝土内养护材料设计、合成与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
LIU Rongjin. Research on Design, preparation, and properties of organic–inorganic multiple concrete internal curing materials (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

[27] 陈建奎. 混凝土外加剂原理与应用(第 2 版)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
CHEN Jiankui. Principle and Application of Concrete Admixture (2nd Ed) (in Chinese), Beijing: China Planning Press, 2004.

[28] LI C, JIA F. Preparation of Shrinkage Compensating Concrete with HCSA Expansive Agent[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 250: 012037.

[29] 黄政宇, 刘永强, 李操旺. 掺 HCSA 膨胀剂超高性能混凝土性能的研究[J]. 材料导报, 2015, 29(4): 116–121.
HUANG Zhengyu, LIU Yongqiang, LI Caowang. Mater Rep (in Chinese), 2015, 29(4): 116–121.