



人工冷粘结轻骨料高强混凝土制备及性能

商效瑀 黄文逸 方泽宇 陈钰琦 张斌

Preparation and properties of artificial cold-bonded lightweight aggregate high-strength concrete

SHANG Xiaoyu, HUANG Wenyi, FANG Zeyu, CHEN Yuqi, ZHANG Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240511.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米SiO₂改性轻骨料混凝土性能

Properties of nano-SiO₂ modified lightweight aggregate concrete

复合材料学报. 2019, 36(2): 498–505 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180330.001>

PVA-钢纤维对高强再生骨料混凝土梁抗弯性能的影响

Effect of PVA–steel fiber on the flexural performance of high–strength recycled aggregate concrete beams

复合材料学报. 2022, 39(11): 5499–5511 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211110.003>

自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能

Mechanical property of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear stress

复合材料学报. 2019, 36(8): 1984–1994 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181030.002>

三轴受压粉煤灰陶粒轻骨料混凝土力学性能试验

Experiment study on mechanical properties of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under triaxial compression

复合材料学报. 2022, 39(10): 4801–4812 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211028.005>

FRP筋与全珊瑚骨料海水混凝土界面粘结-滑移本构关系

Bond-slip constitutive relation between FRP bars and coral aggregate seawater concrete

复合材料学报. 2022, 39(8): 3950–3964 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210927.004>

CFRP筋-高强钢筋/高强混凝土柱的抗震性能

Seismic behavior of high–strength concrete columns reinforced with CFRP tendons and high–strength steels

复合材料学报. 2021, 38(10): 3463–3473 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201222.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240511.003

人工冷粘结轻骨料高强混凝土制备及性能



分享本文

商效瑀^{*1}, 黄文逸¹, 方泽宇¹, 陈钰琦¹, 张斌^{2,3}

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 132012; 2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049;

(3. 中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司, 太原 030001)

摘要: 以搅拌站混凝土废浆 (Concrete slurry waste, CSW) 为原料, 采用冷粘结造粒技术结合碳化增强工艺, 制备了一种性能优异的人工骨料 (Artificial aggregate, AA), 并发展了轻骨料高强混凝土 (Lightweight aggregate high-strength concrete, LAHC), 重点研究了 AA 的物理性能、力学性能和微观结构及 LAHC 的工作性能、力学性能和收缩性能。研究结果表明: 以 CSW 为原料, 采用冷粘结技术结合碳化增强工艺生产的 AA, 具备可行性; 球形 AA 粒度分布主要在 4.75~14 mm 之间, 松散堆积密度介于 950~1 100 kg/m³ 之间, 1 h 吸水率为 9.96%~12.89%。单颗颗粒强度变化范围为 13.68~15.64 MPa, 筒压强度介于 8.18~9.17 MPa; 加压碳化 3 d 对于 AA 单颗颗粒强度和筒压强度提高约 14% 和 12%, 湿法碳化 10 min 提高约 9% 和 8%, 吸水率分别下降约 23% 和 14%, 湿法碳化表现出更高的效率优势; 制备的人工 LAHC 28 d 抗压强度可达 45.2 MPa, 抗折强度 4.7 MPa, 密度 1 807.6 kg/m³, 满足 LAHC 的要求; 球形 AA 借助滚珠效应自身具备一定减水功能, 预湿处理有助于缓解轻骨料混凝土收缩问题, 对 AA 进行 24 h 的预湿处理, 可以将其 90 d 的收缩率减少 10.0%。研究成果为新一代的混凝土材料低碳化、可持续化提供参考。

关键词: 轻骨料高强混凝土; 人工骨料; 冷粘结; 碳化; 混凝土废浆

中图分类号: TU528.2; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2025)02-1005-11

Preparation and properties of artificial cold-bonded lightweight aggregate high-strength concrete

SHANG Xiaoyu^{*1}, HUANG Wenyi¹, FANG Zeyu¹, CHEN Yuqi¹, ZHANG Bin^{2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

Abstract: In this study, an artificial aggregate (AA) with excellent performance was prepared from concrete slurry waste (CSW) as raw material using cold-bonding granulation technology combined with a carbonation reinforcement process, and lightweight aggregate high-strength concrete (LAHC) was developed, focusing on the physical properties, mechanical properties, and microstructure of the aggregate, as well as the workability, mechanical properties, and shrinkage properties of the LAHC. The study results demonstrate that using cold bonding technology combined with a carbonation enhancement process to produce AA from CSW as a raw material is feasible. The particle size distribution of the spherical artificial aggregate mainly ranges between 4.75 mm and 14 mm. The aggregates have loose bulk densities of 950~1 100 kg/m³, water absorption rates of 9.96%~12.89% at 1 h, individual pellet strengths of 13.68~15.64 MPa, and cylinder compressive strengths of 8.18~9.17 MPa. Pressurized carbonization 3 d for AA individual pellet strength and cylinder compressive strength increase by approximately 14% and

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-04-17; 录用日期: 2024-04-28; 网络首发时间: 2024-05-13 11:57:21

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240511.003>

基金项目: 吉林省发改委产业技术研究与开发专项项目 (2021C038-6); 吉林省教育厅重大科技项目 (JJKH20240155KJ)

Development and Reform Commission Funding of Jilin Province (2021C038-6); Major Program of Science and Technology Project of the Educational Commission of Jilin Province (JJKH20240155KJ)

通信作者: 商效瑀, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为低碳混凝土技术与固废科学、电力基础设施绿色建造技术 E-mail: shangxiaoyu@neepu.edu.cn

引用格式: 商效瑀, 黄文逸, 方泽宇, 等. 人工冷粘结轻骨料高强混凝土制备及性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 1005-1015.

SHANG Xiaoyu, HUANG Wenyi, FANG Zeyu, et al. Preparation and properties of artificial cold-bonded lightweight aggregate high-strength concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 1005-1015(in Chinese).

12%, wet carbonization 10 min increases by approximately 9% and 8%, the water absorption rate decreases by approximately 23% and 14%, respectively, wet carbonization shows higher efficiency advantages. The 28 d compressive strength of the prepared artificial LAHC can reach 45.2 MPa, flexural strength 4.7 MPa, density 1 807.6 kg/m³, which meets the standard requirements of LAHC. The spherical AA itself has a certain water-reducing function, and pre-wetting treatment can help to alleviate the problem of shrinkage of the LAHC, and the pre-wetted AA in 24 h can reduce the shrinkage rate of the concrete in 90 d by 10.0%. The research results provide a reference for the new generation of sustainable concrete materials.

Keywords: lightweight aggregate high-strength concrete; artificial aggregate; cold bonding; carbonization; concrete waste slurry

骨料占据混凝土总体积的 60%~80%^[1], 天然骨料受到自然资源及环境问题的限制, 在部分国家或地区已成为短缺资源, 市场价格逐年攀升。再生混凝土骨料是目前建筑业中最可行的可持续材料, 已在建筑业中获得了广泛的工程应用^[2]。作为国民经济的支柱产业, 建筑业年产值占全国总 GDP 的 20%。随着我国城市建设大规模旧城改造, 建筑业进入高速发展阶段, 所产生的建筑垃圾越来越多^[3]。再生混凝土技术是利用旧建筑物拆下来的废弃的混凝土, 经过破碎、清洗、筛分后再按一定的比例互相配合, 得到的骨料称为“人工骨料 (Artificial aggregate, AA)”。然而大部分固体废弃物或工业副产品不能直接用于混凝土制造, 将固废资源转化为 AA 的思路不仅可以保护环境免于填埋处置, 还可以解决骨料资源紧张的问题^[4]。

造粒是一个颗粒尺寸扩大的过程, 通过细小的颗粒相互挤压、粘结、包裹、成型为更大的颗粒^[5], 该技术已在制药、食品等领域得以研究应用。考虑到许多固体废弃物以细颗粒的形式存在, 造粒是将这里粉末废物转化为增值建筑材料的理想方法^[6]。造粒成型后通过烧结或冷粘结的方式^[7-8], 使新鲜颗粒凝固获得一定的力学强度。黏土、粉煤灰是制备烧结 AA 的常用材料^[9], 但由于烧制过程需要热能消耗、并产生一定的碳排放, 因此冷粘结工艺被发展, 利用水泥/火山灰反应以硬化增强骨料体系, 该方案在制备过程中能耗低、环保经济, 被认为是一种绿色可持续性方法^[10]。粉煤灰、污水污泥、纸灰先后被作为冷粘结工艺的原料被生产为 AA^[11-12]。

轻骨料混凝土具备更高的比强度, 近年来在装配式建筑、大跨建筑、高层建筑的发展下, 得到广泛关注。当 28 d 抗压强度达到 LC40 以上即可称为轻骨料高强混凝土 (Lightweight aggregate high-strength concrete, LAHC)^[13], 其不仅可降低

结构自重, 且可作为结构构件的角色有效抵抗外力作用。目前常用的轻质骨料分为两类: 天然和人造^[14]。由火山岩制成的天然轻质骨料, 经过破碎和筛分后即可使用, 其密度在 500~900 kg/m³ 之间^[15], 例如浮石、硅藻土、矿渣和火山灰; 人工轻质骨料包括膨胀珍珠岩、泡沫矿渣、膨胀页岩和板岩^[16], 它们的容重范围为 425~900 kg/m³^[17], 与天然轻质骨料相当。结合造粒技术将固废资源转化为新型人工骨料混凝土^[16], 既满足市场需求, 又可解决资源可持续问题。

因此, 本文以混凝土废浆为原料, 利用冷粘结造粒技术结合碳化增强工艺, 制备了一种性能优异的 AA, 并发展了 LAHC, 重点研究了骨料物理性能、力学性能和微观结构及人工 LAHC 的工作性能、力学性能和收缩性能。再生混凝土技术实现了建筑材料、尤其是建筑垃圾的回收利用, 能够解决一定程度的环境问题, 同时具有较好的社会与经济效益, 使建筑与生态环境得到了可持续协调发展, 被认为是发展绿色生态混凝土的主要措施之一^[18], 研究成果以固废资源化为根本, 发展了高赋值的 LAHC 材料, 为新一代的混凝土材料可持续化提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 原材料

细骨料 (Sand, S) 采用吉林松花江河砂, 为标准天然中砂, 细度模数为 2.9, 含泥量为 1.9%, 堆积密度为 1 600 kg/m³, 颗粒级配良好。天然粗骨料 (Natural coarse aggregate, NCA) 采用吉林本地安山岩, 堆积密度 1 479 kg/m³, 5~16 mm 连续级配。水泥采用冀东水泥吉林有限责任公司生产的盾 P·O 42.5 水泥, 比表面积为 335 m²/kg, 烧失量为 3.24%, 初凝时间为 60 min, 终凝时间为 300 min, 3 d 抗压强度、抗折强度分别为 25.0 MPa、5.5 MPa, 28 d 抗压强度、抗折强度分

别为 46.0 MPa、7.5 MPa。粉煤灰 (Fly ash, FA) 采用吉林源源热电厂产 I 级粉煤灰，外观呈现灰黑色粉末，颗粒分布均匀，细度 (45 μm 方孔筛筛余) 为 4.88%，需水量比为 90%，比表面积为 637 m²/kg。硅灰 (Silica fume, SF) 采用上海天恺 920 硅灰，外观呈现灰白色球状粉末，SiO₂ 含量大于 92%，比表面积 23 000 m²/kg。减水剂 (Superplasticizer, SP) 采用江苏苏博特 PCA-V 聚羧酸高性能减水剂，减水 30%。试验水采用吉林

市普通自来水。新鲜混凝土浆废弃物 (Concrete slurry waste, CSW) 采自吉林省当地预拌混凝土厂。混凝土废料经沉淀池沉淀，过滤骨料部分，得到湿浆体，再经压滤机排除多余的水分，得到含水量约为 20% 的新鲜混凝土废浆压饼，即为本文使用的 CSW。回收废水可作为后续制粒过程中的局部喷淋水进行再利用。原材料经 X 射线荧光光谱 (Zetium, Malvern Panalytical) 检测，化学成分如表 1 所示。

表 1 水泥、粉煤灰 (FA)、硅灰 (SF) 和混凝土废浆料 (CSW) 化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of cement, fly ash (FA), silica fume (SF) and concrete slurry waste (CSW) (wt%)

| Material | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | TiO ₂ | K ₂ O | Na ₂ O | LOI |
|----------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-------|
| Cement | 20.25 | 62.30 | 6.04 | 3.41 | 2.01 | 3.65 | 0.39 | 0.84 | 0.17 | 3.24 |
| FA | 76.24 | 2.84 | 14.24 | 2.34 | 0.81 | 0.91 | 0.48 | 1.72 | - | 4.76 |
| SF | 92.40 | 0.55 | 1.32 | 0.16 | 0.42 | 3.09 | - | 0.90 | 0.13 | 0.35 |
| CSW | 32.65 | 35.27 | 8.31 | 6.64 | 1.39 | 2.98 | 0.53 | 1.72 | - | 10.35 |

Note: LOI—Loss on ignition.

1.2 人工骨料制备

采用冷粘结造粒技术结合碳化增强工艺，制备 AA。将 CSW 置入强制搅拌机 (中仪 JS100) 中高速搅拌 2 min，使其完全松散至细小颗粒，随后将 CSW 粉体移入圆盘造粒机 (中机 S500) 中，圆盘直径 300 mm，深度 100 mm，以 35 r/min 的速度和 45° 的角度造粒 5 min。在造粒前 2 min，可喷洒适量的水以促进骨料的形成，含水率控制在 30% 左右，以免过高的含水率使颗粒之间发生过度粘连导致颗粒过大，而过低的含水率则不发生凝聚效果 (不成粒)，进而影响颗粒性能，并且将总的制粒时间控制在 10 min 以内。制粒过程见图 1。将得到的新鲜人工冷粘结轻骨料在自然条件下预干燥 24 h，以获得初始强度，然后再将其转移进行二次养护以备后期混凝土制备使用，分别采用标准养护、加压碳化养护及湿法碳化养护 3 种手段对 AA 进行增强处理，AA 制备流程如图 1 所示。养护增强工艺具体实施方法如下：

标准养护：AA 在室温 (20±5)℃ 潮湿环境下养护 7 d，同时每天给骨料喷洒适量的水，确保骨料表面时刻保持潮湿状态，以促进骨料的水化反应。

加压碳化养护：AA 放入密封的钢容器中，将其内部抽真空至 -50 kPa，然后注入纯的 CO₂ 气体，通过使用饱和 Mg(NO₃)₂ 溶液将碳化钢容器中的相对湿度保持在 (50±5)%，并使用气体调节器将碳化钢容器中 CO₂ 的流速控制在 2.5 L/min，压力控

制在 10 kPa，碳化 3 d 后取出。

湿法碳化养护：AA 放置在多孔的金属篮子里，以便于碳化后骨料的收集，将其完全浸泡在水中，水固比 (水与骨料的质量比) 为 10 : 1，以 0.2 L/min 的气体流速在水下通入浓度为 99% 的工业级 CO₂ 气体，同时用磁力搅拌器在 15℃ 下，以 200 r/min 的速度搅拌自来水，加速 CO₂ 气体在水中的溶解速度，以便于 CO₂ 与水反应生成更多的 CO₃²⁻ 离子，持续时间为 10 min^[19]，将碳化后的骨料放入风干室 (温度 T=25℃，相对湿度 RH=50%) 中风干 24 h。

1.3 轻骨料混凝土制备

参照《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T 12—2019)^[13]，轻骨料混凝土 (LAC) 的拌和采用二次投料搅拌的方式，先将预湿后的粗骨料与细骨料、粉煤灰、硅灰、水泥一起拌和约 0.5 min 后，再加入净用水，继续拌和 2.5 min 即可，如图 2 所示。为探讨人工冷粘结轻骨料对混凝土性能影响规律，本文以上述 LC40 轻骨料混凝土配合比为基础，经过实验室试配后，增加对比实验，制备不同预湿时间、不同水胶比、不同骨料取代率的配合比，如表 2 所示。

1.4 试验方法

根据《轻集料及其试验方法第 2 部分：轻集料试验方法》(GB/T 17431.2—2010)^[20] 对人工冷粘结轻骨料的颗粒级配、松散堆积密度、1 h 吸水率和筒压强度进行测试。国内外暂时并没有具体规

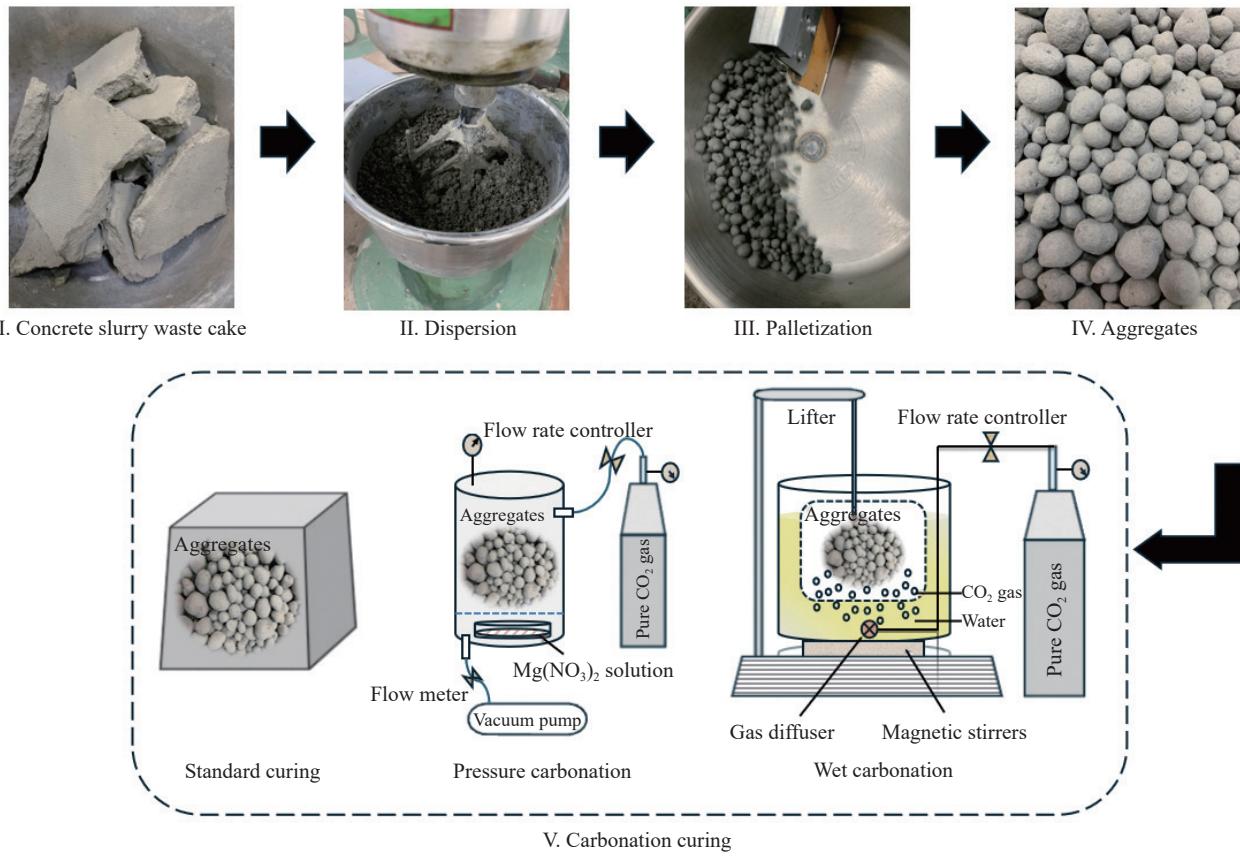


图1 人工骨料(AA)制备流程

Fig. 1 Artificial aggregate (AA) preparation process

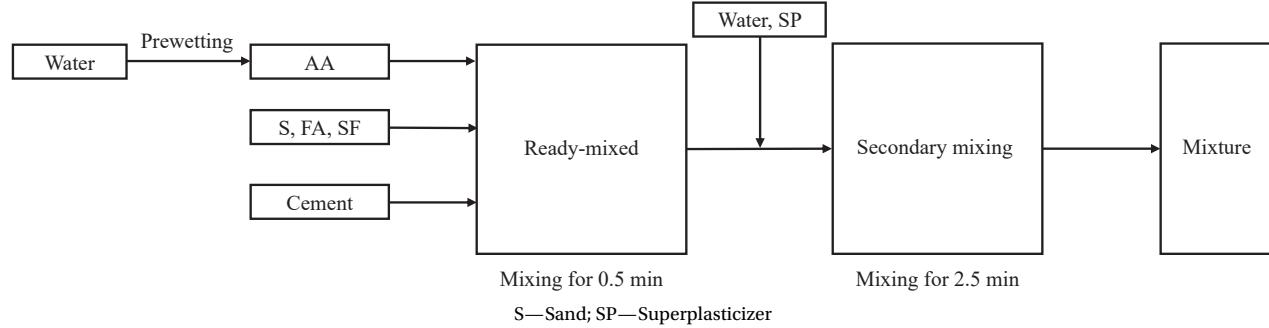


图2 二次投料搅拌法

Fig. 2 Secondary batch mixing method

表2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

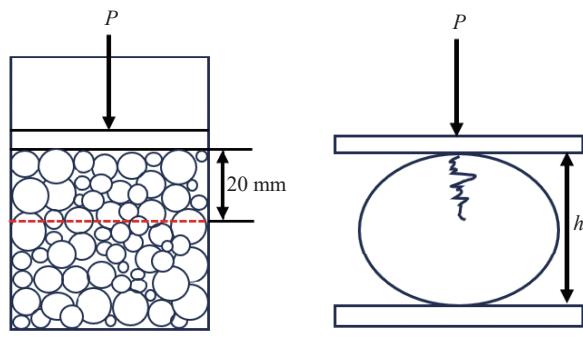
| No. | W/C/ (kg·m ⁻³) | Cement/ (kg·m ⁻³) | FA/ (kg·m ⁻³) | SF/ (kg·m ⁻³) | NCA/ (kg·m ⁻³) | AA/ (kg·m ⁻³) | S/ (kg·m ⁻³) | Water/ (kg·m ⁻³) | SP/ (kg·m ⁻³) | Pre-wetting time/h |
|-------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| LAC1 | 0.29 | 350 | 100 | 50 | 0 | 828.52 | 470.25 | 145 | 5.75 | 0 |
| LAC2 | 0.29 | 350 | 100 | 50 | 0 | 828.52 | 470.25 | 145 | 5.75 | 1 |
| LAC3 | 0.29 | 350 | 100 | 50 | 0 | 828.52 | 470.25 | 145 | 5.75 | 24 |
| LAC4 | 0.31 | 350 | 100 | 50 | 0 | 828.52 | 470.25 | 155 | 5.75 | 24 |
| LAC5 | 0.33 | 350 | 100 | 50 | 0 | 828.52 | 470.25 | 165 | 5.75 | 24 |
| L-NAC | 0.33 | 350 | 100 | 50 | 569.42 | 414.26 | 470.25 | 165 | 5.75 | 24 |
| NAC | 0.33 | 350 | 100 | 50 | 1 138.83 | 0 | 470.25 | 165 | 5.75 | 24 |

Notes: LAC—Lightweight aggregate concrete; LAC1, LAC2, LAC3—Lightweight aggregate concrete with pre-wetting time of 0 h, 1 h and 24 h, respectively; LAC3, LAC4 and LAC5—Lightweight aggregate concrete with water-cement ratio of 0.29, 0.31 and 0.33, respectively; LAC5, L-NAC and NAC—Lightweight aggregate concrete with the replacement ratio of 100%, 50% and 0%, respectively; W/C—Water-cement ratio; NCA—Natural coarse aggregate.

范用于测试骨料的单颗颗粒强度，本文参考文献[21-22]中提出的方法进行骨料单颗骨料强度的测试。使用美特斯工业系统(中国)有限公司生产的E45.105型MTS Exceed E45电子万能试验机以0.6 mm/min的加载速度对单颗骨料施加一个力，并记录下峰值力，根据下式计算出骨料单颗颗粒强度。在每批次骨料中选取具有代表性的50颗进行测试(粒径在6~14 mm之间，颗粒形状近乎标准圆形)，如图3所示。

$$\sigma = \frac{2.8P}{\pi h^2} \quad (1)$$

式中： σ 为单颗颗粒破碎强度(MPa)； P 为颗粒所受的峰值力(N)； h 为加载点之间的距离(mm)。



(a) Cylinder compressive strength (b) Individual pellet strength
 P —Peak force on the particle; h —Distance between loading points

图3 筒压强度和单颗颗粒强度测试示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cylinder compressive strength and individual pellet strength

参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)^[23]对人工冷粘结轻骨料混凝土拌合物进行坍落度和扩展度测定，以确定其流

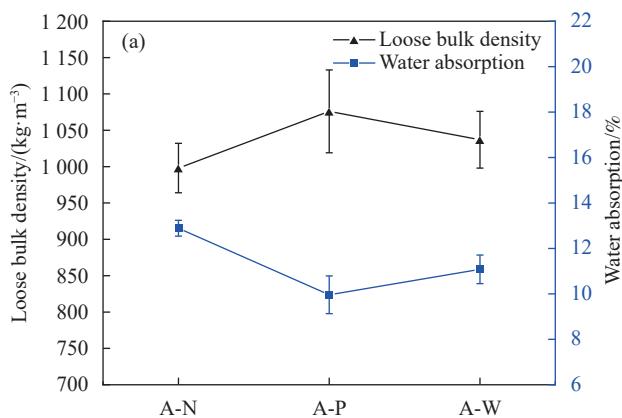
动性，数值精确至1 mm；采用济南试金集团有限公司济南试验机厂制造的YAW-5000F微机控制电液伺服压力试验机，参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[24]进行抗压强度及抗折强度测定。分别采用100 mm×100 mm×100 mm立方体试件和100 mm×100 mm×400 mm棱柱体试件；采用天津首科试验仪器厂生产的HSP-540型混凝土收缩变形仪进行收缩试验，参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[25]使用直接接触法，试件尺寸为100 mm×100 mm×515 mm，将拆模后的试件标准养护两天后立即转移至室温(20±2)℃、相对湿度(60±5)%的环境内测量初始长度，然后放置在收缩变形仪上测量收缩变形值，按照1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、56 d、90 d龄期从百分表上读取变形值，取3次实验结果的算术平均值作为测定值。

2 试验结果与分析

2.1 人工骨料物理及力学性能

从试验结果来看，以CSW为原料，采用冷粘结技术结合碳化增强工艺生产的AA，具备可行性。

所生产的球形AA粒度分布主要在4.75~14 mm之间，颗粒级配良好。图4描述了人工冷粘结轻骨料分别在室温潮湿环境养护7 d、高湿度封闭环境加压碳化3 d和湿法碳化10 min 3种条件下养护后的物理性能(A-N、A-P、A-W)。由图4(a)可以看出，相对于标准养护，经过加压碳化和湿法碳化处理的人工冷粘结轻骨料的松散堆积密度分别上升约8%和4%，同时吸水率分别下降约23%和



A-N—AA was cured at room temperature (20±5)℃ under 95% relative humidity for 7 d; A-P—AA was carbonized under a pressure of 10 kPa in a sealed chamber with (50±5)% relative humidity for 3 d; A-W—AA carbonized by wet carbonization for 10 min

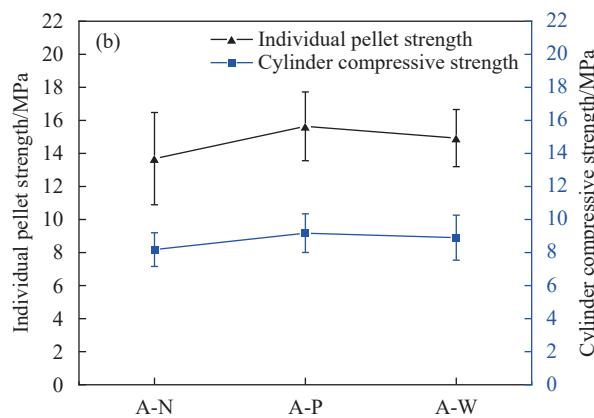


图4 不同养护方式的人工冷粘结轻骨料的性能

Fig. 4 Properties of artificial aggregates with different curing methods

14%。在不同条件下养护得到的人工冷粘结轻骨料的松散堆积密度在950~1 100 kg/m³之间，均低于1 200 kg/m³。1 h吸水率变化范围为9.96%~12.89%。

由图4(b)可以看出，不同养护条件下人工冷粘结轻骨料的单颗颗粒强度为13.68~15.64 MPa，筒压强度为8.18~9.17 MPa。各项性能指标符合《轻集料及其试验方法第1部分：轻集料》(GB/T17431.1—2010)^[26]标准要求。 CO_2 加压碳化对于人工冷粘结轻骨料单颗颗粒强度和筒压强度均有较大的提升，分别提高约14%和12%。这是因为CSW中包含水泥水化物和未水化物，在 CO_2 加压碳化条件下，部分产物会生成 CaCO_3 沉淀，这会导致人工冷粘结轻骨料更加致密化，所以骨料密度会增加，吸水率下降，强度也有所提升^[27]。湿法碳化对于人工冷粘结轻骨料单颗颗粒强度和筒压强度也有不错的提升，分别提高约9%和8%。湿法碳化的原理是将 CO_2 溶解在水中，通过水携带 CO_2 流动至骨料内部快速反应生成致密的 CaCO_3 沉淀填充孔隙，降低吸水率，提高骨料强度^[28]。

对比加压碳化和湿法碳化可以发现：(1)加压碳化对于人工冷粘结轻骨料吸水率的降低和强度的提升优于湿法碳化，效果更加显著；(2)湿法碳化较加压碳化效率高，所需时间短，能在短时间内快速碳化，提升骨料性能；(3)湿法碳化中的

CO_2 能够随着水的流动抵达骨料内部孔隙，因此形成的 CaCO_3 沉淀分布较均匀。

2.2 人工骨料微观结构

图5(a)中观察到大量纤维状水化硅酸钙(C-S-H)和针状钙矾石(Aft)等典型水化产物，CSW里含有大量未水化的水泥颗粒，二次水化过程产生了更多的水化产物，EDS结果可以观测到较高的Si峰值。图5(b)和图5(c)显示出大量的水化产物在 CO_2 养护下生成方解石沉淀，并通过EDS鉴定出方解石晶体，方解石晶体堆积并形成聚集体的致密表面，这解释了与正常养护方法相比，加速碳化养护的骨料吸水率较低的原因，加速碳化养护可以有效改善人工冷粘结轻骨料微观结构。从两种碳化方式对比来看，加压碳化养护由于微观结构更致密而显示出更加完全的碳化结果，生成颗粒较大较多的方解石晶体填充骨料，表现出优异的物理性能，但方解石主要集中在骨料表面，形成致密的碳酸化外层，阻挡 CO_2 的渗透，因此内部碳化速度会越来越慢^[29]；而湿法碳化生成的方解石颗粒较小，聚集在一起形成较致密的微结构，并且显示出更高的碳化效率，仅10 min就可以达到一定的碳化效果，增强了骨料的物理性能，延长一定的碳化时间可以得到更优异的碳化效果，但相关研究仍发现并非时间越长效果越好。

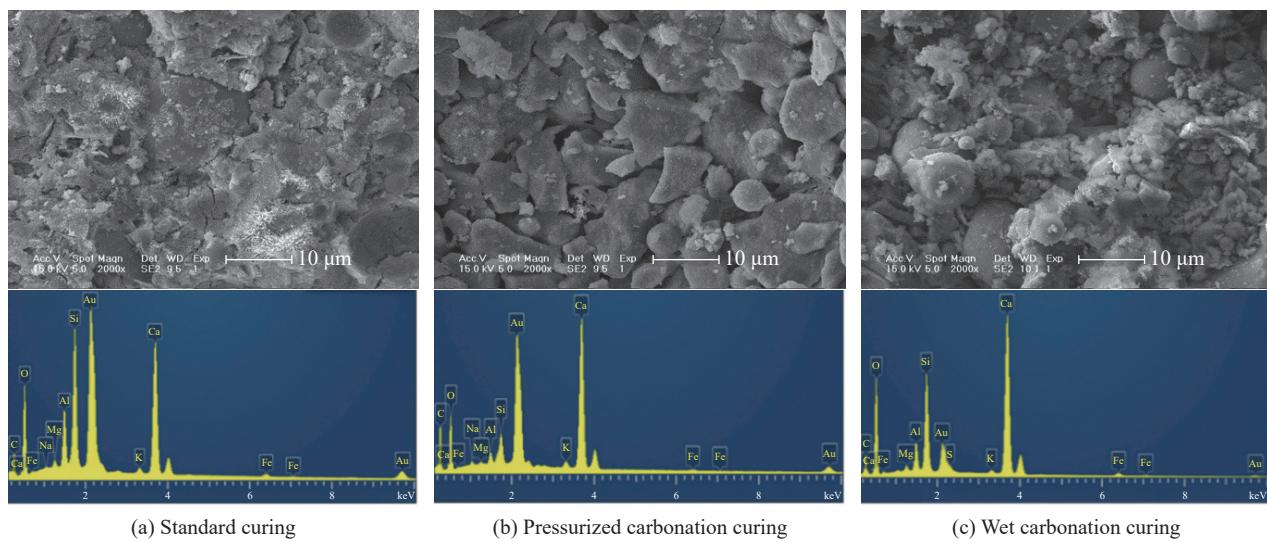


Fig. 5 SEM-EDS of artificial aggregate with different curing methods

2.3 人工骨料混凝土工作性能

图6为人工骨料混凝土拌合物流动性试验，图7描述了人工骨料混凝土拌合物的坍落度、扩

展度及K值(坍落度和扩展度的比值)。如图7(a)所示，随着AA预湿时间的增加，轻质混凝土拌合物的坍落度和扩展度逐渐增大。当骨料预湿时

间为 24 h 时，坍落度和扩展度分别为 226 mm 和 514 mm，比未预湿试样增加了 11% 和 24%，但仅比预湿 1 h 试样增加了 2.3% 和 4.9%。由此可以看出预湿 24 h 拌合物试样的流动性最好，但预湿 1 h 拌合物试样的流动性同样可以达到较不错的水平，AA 1 h 吸水率可达到 24 h 吸水率的 80% 以上，AA 预湿 1 h 具备更多的时间成本优势。由图 7(b) 可以看出，同样预湿 24 h 的情况下，水灰比的增大同样带来坍落度和扩展度的增加。图 7(c) 显示天然骨料混凝土坍落度和扩展度分别为 233 mm 和 541 mm，同样配合比下，50% 的 AA 取代率的样品分别为 246 mm 和 570 mm；LAC5 轻骨料混凝土坍落度和扩展度分别为 251 mm 和 595 mm。AA 的等体积取代率越高，混凝土的坍落度和扩展度值越大，虽然天然骨料吸水率远不及 AA，但是天然骨料形状不规则有明显棱角，表面更加粗糙，骨料相互之间摩擦力大，有明显嵌挤效果，这会降低混凝土的流动性，而球形 AA 形状规则，表面光滑，有利于混凝土流动度的提高，因此 AA 取代率、预湿时间均会对混凝土工作性能产生影响，由于上述原因，人工骨料混凝土的保水性会弱于天然骨料混凝土^[30]。

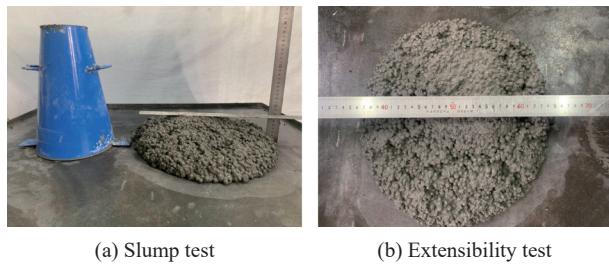
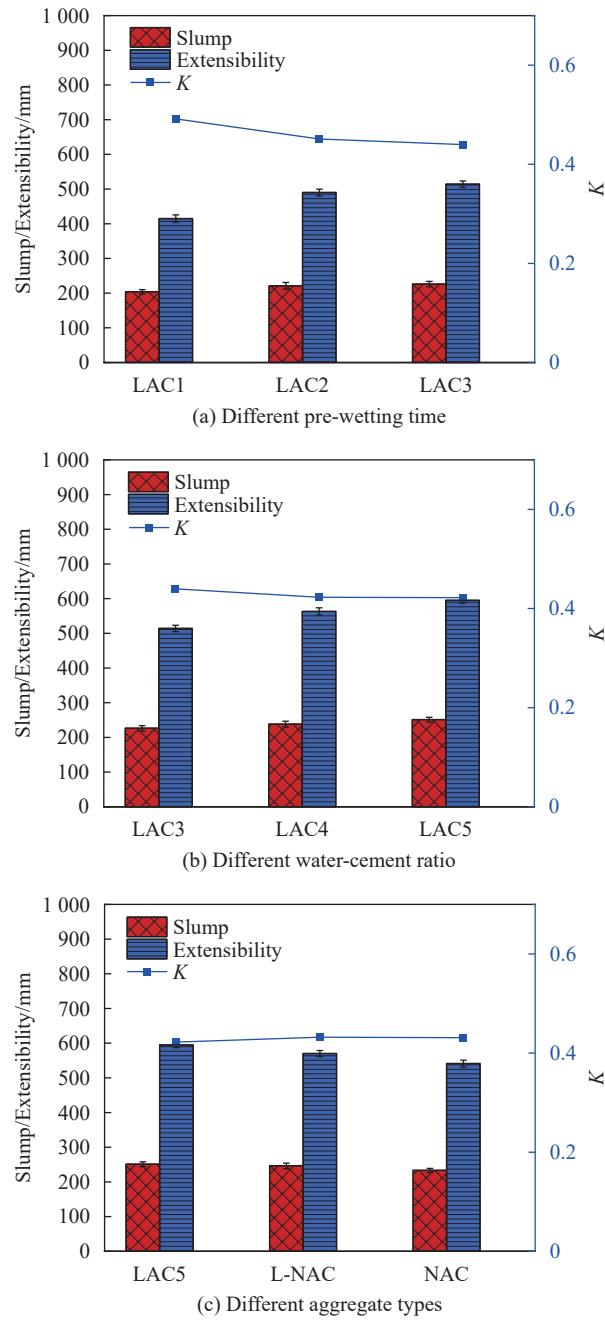


Fig. 6 Workability test for concrete mixture

2.4 人工骨料混凝土力学性能

抗压强度是衡量混凝土最基本的性能指标之一。人工骨料混凝土的干表观密度和 3 d、7 d、28 d 立方体抗压强度如图 8 所示。LAC1~LAC5 试样的 28 d 抗压强度均达到 40 MPa 以上，满足 LC40 等级轻骨料混凝土。由图 8(a) 可知，随着 AA 预湿时间的增加，混凝土的干表观密度呈现上升趋势，同样的人工骨料混凝土抗压强度也呈现上升趋势。预湿 24 h 的人工骨料混凝土 LAC3 显示出最大的 28 d 抗压强度，为 48.9 MPa，而预湿 0 h 的人工骨料混凝土 LAC1 显示出最小的 28 d 抗压强度，为 43.2 MPa。由图 8(b) 可以看出，同样



K—The ratio of slump to extensibility

图 7 混凝土拌合物的工作性能

Fig. 7 Workability of concrete mixture

预湿 24 h 的情况下，水灰比的增大会引起混凝土干表观密度和抗压强度的减小，水灰比由 0.29 增大到 0.33 时，3 d、7 d、28 d 抗压强度分别降低 8.6%、8.7%、7.6%。图 8(c) 显示出同样配合比下，AA 完全取代天然骨料时，干表观密度降低 23.8%，3 d、7 d、28 d 抗压强度分别降低 41.5%、41.9%、40.8%。抗折强度也是衡量混凝土重要性能指标之一，上述配合比下混凝土 3 d、7 d、28 d 抗折强

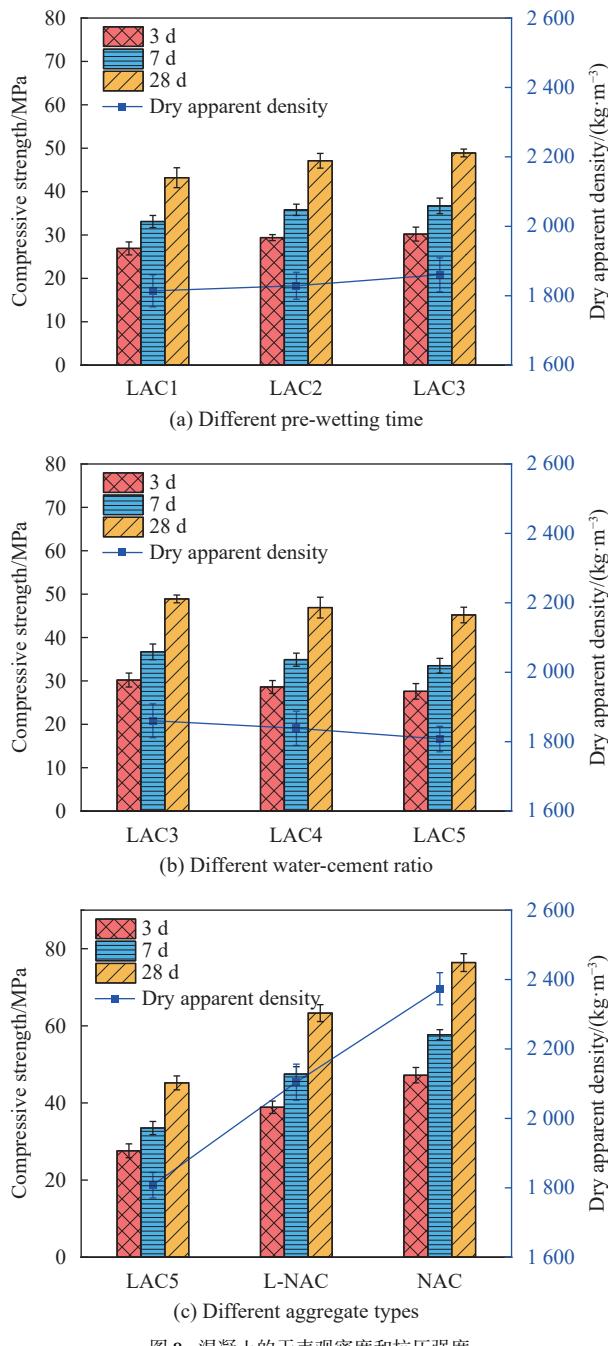


图 8 混凝土的干表观密度和抗压强度

Fig. 8 Dry apparent density and compressive strength of concrete

度和 28 d 折压比如图 9 所示, 人工骨料混凝土 3 d 抗折强度均能达到 3.2 MPa 以上, 且人工骨料混凝土的抗折强度随着龄期的增长而增大, 其 28 d 抗折强度可以达到 4.5 MPa 以上, 相比 3 d 抗折强度大约增长了 40% 至 50%。由图 9(a) 和图 9(b) 可以看出其抗折强度随预湿时间的增加而增大(增大约 9% 至 14%), 随水灰比的增加而减小(减小约 6% 至 10%), 这与抗压强度的变化规律相一致, 但变化幅度不同, 其变化原理也大致相似, 并且

其 28 d 折压比变化不大。其中, AA 预湿 24 h 且水灰比为 0.29 的混凝土 LAC3 显示出最大的 28 d 抗折强度, 为 5.0 MPa。由图 9(c) 可知同样配合比下, 轻骨料完全取代天然骨料时, 3 d、7 d、28 d 抗折强度分别降低 47.5%、46.5%、45.3%, 28 d 折压比也从 0.1126 降低至 0.1040, 这表示人工骨料混凝土的韧性弱于天然骨料混凝土, 适量的纤维可弥补轻骨料混凝土的韧性^[31]。

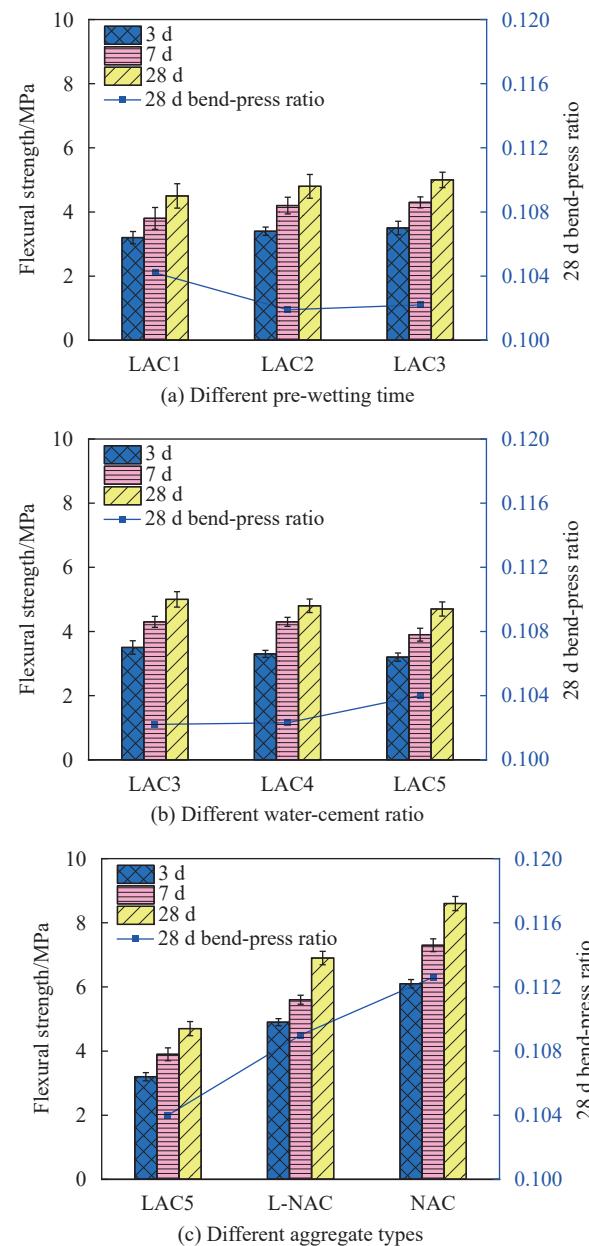


Fig. 9 Flexural strength and bend-press ratio of concrete

2.5 人工骨料混凝土收缩性能

人工骨料混凝土 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、

56 d 和 90 d 的干燥收缩率变化如图 10 所示，可以看出，各组试样的干燥收缩率随龄期变化趋势相似，皆为早期曲线斜率大，干燥收缩率变化较大；后期曲线逐渐趋于平缓，干燥收缩率变化较小。这是由于在混凝土养护龄期前期其内部水分散失速度较快，导致干燥收缩率变化较快，而到了龄期的中后期，水分散失速率变得缓慢，混凝土干燥收缩率也会呈现缓慢增加的趋势^[32]。图 10(a) 显示了不同预湿时间下人工骨料混凝土的干燥收缩率变化，随着 AA 预湿时间的增加，同龄期下人工骨料混凝土干燥收缩率逐渐降低。未经预湿的人工骨料混凝土的干燥收缩率最大，90 d 收缩率达到了 503×10^{-6} ，而预湿 1 h 和 24 h 的人工骨料混凝土显示出较相似的 90 d 收缩率，分别为 467×10^{-6} 和 451×10^{-6} ，可见 AA 预湿处理对轻骨料混凝土收缩有较大的抑制作用。图 10(b) 表现出，在骨料预湿 24 h 的前提下，随着水灰比的增加，同龄期下轻骨料混凝土干燥收缩率逐渐增大，水灰比从 0.29 增加到 0.33，90 d 收缩率由 451×10^{-6} 增加到 486×10^{-6} ，增加了约 7.8%。这是由于在保持其他条件不变的条件下，水灰比的增加在实质上是增加了混凝土内部早期的自由水，蒸发失水效应也随之显著增大^[30]。同时，水灰比越大，水分越多，导致胶凝材料颗粒之间的距离越大，硬化后凝胶体中孔隙率越大，因此干燥收缩率越大。图 10(c) 显示出天然骨料混凝土在干燥收缩的表现上明显优于人工骨料混凝土，90 d 干燥收缩率分别为 377×10^{-6} 和 486×10^{-6} ，随着 AA 掺量的减少，混凝土的干燥收缩率明显减小。这主要是因为天然骨料本身强度大，干燥收缩率较低，而且其强度高于砂浆，所以当水泥浆体发生收缩时，天然骨料会对水泥浆体的收缩起到一定的抑制作用^[33]。相比于天然骨料混凝土而言，人工骨料混凝土在干燥收缩上的表现较差，分析其原因，其一是因为 AA 强度明显低于天然骨料，且其吸水率较大，在混凝土养护过程中，会从周围砂浆中吸收水分，所以加大了混凝土的干燥收缩率；其二是因为 AA 本身的材料就以废弃的水泥砂浆为主，所以骨料本身在养护过程中会发生一定的收缩，进而再次增加了混凝土的干燥收缩率^[34]。

3 结论

以混凝土废浆 (Concrete slurry waste, CSW) 为原料，采用冷粘结造粒技术结合碳化增强工艺，

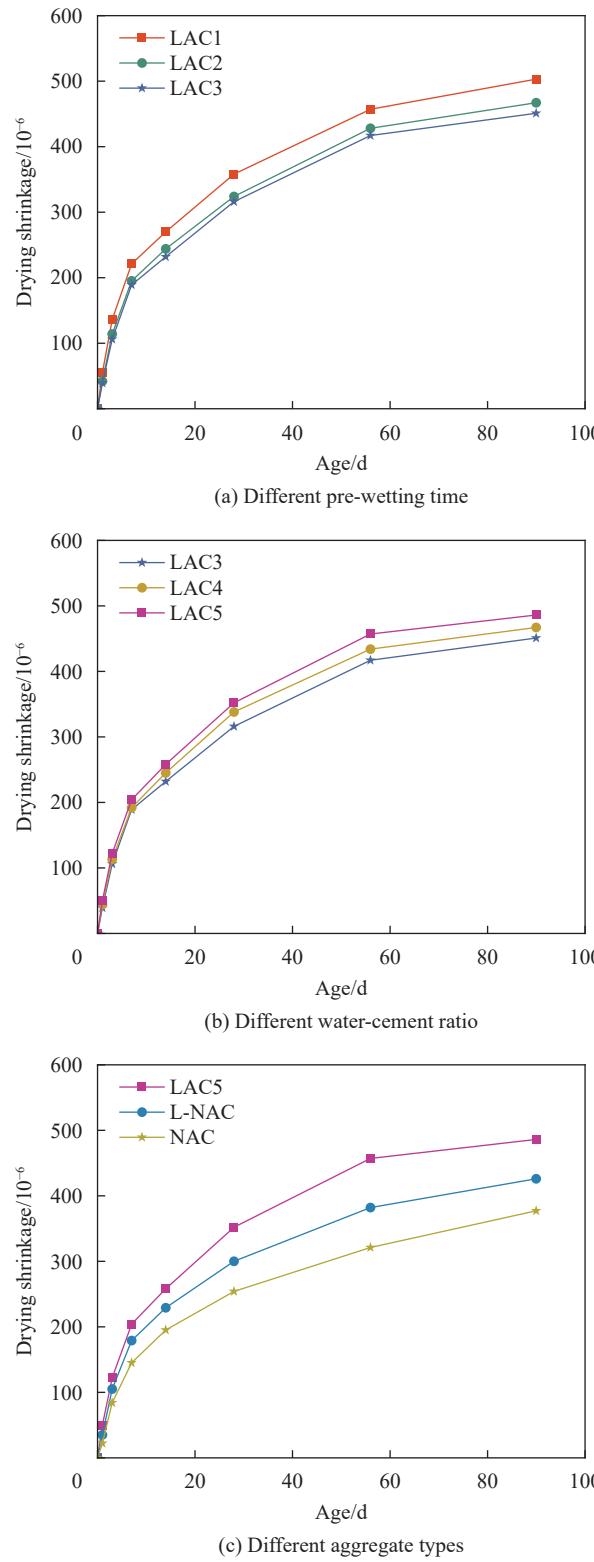


Fig. 10 Drying shrinkage of concrete

制备了一种性能优异的人工骨料 (Artificial aggregate, AA) 并发展了轻骨料高强混凝土 (Light-weight aggregate high-strength concrete, LAHC)，

研究了骨料及混凝土的性能，得出的主要结论如下：

(1) 以 CSW 为原料，采用冷粘结技术结合碳化增强工艺生产的 AA，具备可行性。球形 AA 粒度分布主要在 4.75~14 mm 之间，松散堆积密度介于 950~1 100 kg/m³ 之间，1 h 吸水率为 9.96%~12.89%。单颗颗粒强度变化范围为 13.68~15.64 MPa，筒压强度介于 8.18~9.17 MPa；

(2) 加压碳化 3 d 对于人工冷粘结轻骨料单颗粒强度和筒压强度提高约 14% 和 12%。湿法碳化 10 min 提高约 9% 和 8%，吸水率分别下降约 23% 和 14%。湿法碳化表现出更高的效率优势；

(3) AA 预湿时间为 24 h 时，混凝土的坍落度和扩展度分别增加了 11% 和 24%；AA 全取代率下，相同配比下混凝土的坍落度和扩展度分别提升了 7.7% 和 10.0%，AA 有助于提高混凝土工作性能，具有一定的减水特性；

(4) 混凝土的力学性能随着 AA 预湿时间增加、水灰比减小、AA 取代率的减小而增强，24 h 预湿 AA 全取代率的情况下，混凝土密度为 1 807.6 kg/m³，28 d 抗压强度 45.2 MPa，抗折强度 4.7 MPa，利用 AA 可制备 LAHC；

(5) AA 的引入，混凝土 90 d 收缩率提高了 33.4%，骨料的预湿处理可有效缓解收缩，随着 AA 预湿时间的增加，混凝土干燥收缩率逐渐降低，AA 预湿 1 h 和 24 h，混凝土 90 d 收缩率分别降低了 7.7%、10.0%。

参考文献：

- [1] BEHERA M, BHATTACHARYYA S K, MINOCHA A K, et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 501-516.
- [2] XIAO J, LI W, FAN Y, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 364-383.
- [3] 王瑞敏, 王林秀. 中国建筑垃圾现状分析及发展前景 [J]. 中国城市经济, 2011, 2011(5): 178-179.
WANG Ruimin, WANG Linxiu. Current situation analysis and development prospect of construction waste in China[J]. China Urban Economy, 2011, 2011(5): 178-179(in Chinese).
- [4] TANG P, BROUWERS H J H. Integral recycling of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash fines (0-2 mm) and industrial powder wastes by cold-bonding pelletization[J]. *Waste Management*, 2017, 62: 125-138.
- [5] TARDOS G I, KHAN M I, MORT P R. Critical parameters and limiting conditions in binder granulation of fine powders[J]. *Powder Technology*, 1997, 94(3): 245-258.
- [6] REN P, LI B, YU J G, et al. Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122115.
- [7] TAJRA F, ELRAHMAN M A, STEPHAN D. The production and properties of cold-bonded aggregate and its applications in concrete: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 29-43.
- [8] SHANG X, CHANG J, YANG J, et al. Life cycle sustainable assessment of natural vs artificial lightweight aggregates[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 367: 133064.
- [9] BOARDER R F W, OWENS P L, KHATIB J M. 10 - The sustainability of lightweight aggregates manufactured from clay wastes for reducing the carbon footprint of structural and foundation concrete [M]//KHATIB J M. Sustainability of Construction Materials (Second Edition). Duxford, UK: Woodhead Publishing, 2016: 209-244.
- [10] GESOĞLU M, GÜNEYİSİ E, ÖZ H Ö. Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag[J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(10): 1535-1546.
- [11] TAJRA F, ELRAHMAN M A, CHUNG S Y, et al. Performance assessment of core-shell structured lightweight aggregate produced by cold bonding pelletization process[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 220-231.
- [12] TANG P, XUAN D, CHENG H W, et al. Use of CO₂ curing to enhance the properties of cold bonded lightweight aggregates (CBLAs) produced with concrete slurry waste (CSW) and fine incineration bottom ash (IBA)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 381: 120951.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 轻骨料混凝土应用技术标准: JGJ/T 12—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical standard for application of lightweight aggregate concrete: JGJ/T 12—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [14] HADDADIAN A, JOHNSON ALENGARAM U, AYOUGH P, et al. Inherent characteristics of agro and industrial by-products based lightweight concrete - A comprehensive review[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397: 132298.
- [15] KUMAR J D C, ARUNAKANTHI E. The use of light weight aggregates for precast concrete structural members[J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018, 13(10): 7779-7787.
- [16] HAMAD A J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: Review[J]. *International Journal of Materials Science and Engineering*, 2014, 2(2): 152-157.
- [17] TAJRA F, ABD ELRAHMAN M, LEHMANN C, et al. Properties of lightweight concrete made with core-shell struc-

- tured lightweight aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 205: 39-51.
- [18] 张忠苗. 软土地基超长嵌岩桩的受力性状 [J]. *岩土工程学报*, 2001(5): 552-556.
ZHANG Zhongmiao. The endurance of super-long piles in soft, soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001(5): 552-556(in Chinese).
- [19] LIU S, SHEN P, XUAN D, et al. A comparison of liquid-solid and gas-solid accelerated carbonation for enhancement of recycled concrete aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 118: 103988.
- [20] 中国标准化管理委员会. 轻集料及其试验方法, 第2部分: 轻集料试验方法: GB/T 17431.2—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Lightweight aggregates and its test methods-Part 2: Test methods for lightweight aggregates: GB/T 17431.2—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010(in Chinese).
- [21] LI Y, WU D, ZHANG J, et al. Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts [J]. *Powder Technology*, 2000, 113(1-2): 176-184.
- [22] GESOĞLU M, GÜNEYİSİ E, MAHMOOD S F, et al. Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235-236: 352-358.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for performance test methods of ordinary concrete mixtures: GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016(in Chinese).
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard test method for longterm performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009(in Chinese).
- [26] 中国标准化管理委员会. 轻集料及其试验方法, 第1部分: 轻集料试验方法: GB/T 17431.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Lightweight aggregates and its test methods-Part 1: Test methods for lightweight aggregates: GB/T 17431.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010(in Chinese).
- [27] 吴琼, 胡忠君, 王健伟, 等. 再生粗骨料碳化处理及其对再生混凝土性能的影响研究进展 [J]. *建筑结构*, 2023, 53(S2): 1347-1351.
WU Qiong, HU Zhongjun, WANG Jianwu, et al. Research progress of carbonization treatment of recycled coarse aggregate and its effect on properties of recycled concrete [J]. *Building Structure*, 2023, 53(S2): 1347-1351(in Chinese).
- [28] 姜义, 马梓涵, 申培亮, 等. 废弃混凝土碳化资源化技术研究进展 [J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(9): 2433-2445.
JIANG Yi, MA Zihan, SHEN Peiliang, et al. Research progress on carbonation technologies for valorizing waste concrete: A review [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(9): 2433-2445(in Chinese).
- [29] SHI C, WU Y. Studies on some factors affecting CO₂ curing of lightweight concrete products [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(8-9): 1087-1092.
- [30] 孙道胜, 李泽英, 刘开伟, 等. 再生粗骨料的形态及缺陷对再生混凝土干燥收缩和力学性能的影响 [J]. *材料导报*, 2021, 35(11): 11027-11033, 11056.
SUN Daosheng, LI Zeying, LIU Kaiwei, et al. Influence of shapes and defects in recycled aggregate on drying shrinkage and mechanical properties of recycled aggregate concrete [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(11): 11027-11033, 11056(in Chinese).
- [31] XIONG G, WANG C, ZHOU S, et al. Study on dispersion uniformity and performance improvement of steel fibre reinforced lightweight aggregate concrete by vibrational mixing [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e01093.
- [32] 魏亚, 郑小波, 郭为强. 干燥环境下内养护混凝土收缩、强度及开裂性能 [J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(5): 902-908.
WEI Ya, ZHENG Xiaobo, GUO Weiqiang. Shrinkage, strength development and cracking of internally cured concrete exposed to dry conditions [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(5): 902-908(in Chinese).
- [33] 张登祥, 韦莹, 周佳. 自密实轻骨料混凝土约束收缩试验及抗裂性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(5): 1462-1467, 1476.
ZHANG Dengxiang, WEI Ying, ZHOU Jia. Experimental study on restrained shrinkage and crack resistance of self-compacting lightweight aggregate concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(5): 1462-1467, 1476(in Chinese).
- [34] 黄嘉钰, 刘元珍, 王朝旭, 等. 再生保温混凝土内部湿度与干燥收缩预测模型 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(10): 4788-4800.
HUANG Jiayu, LIU Yuanzhen, WANG Zhaoxu, et al. Prediction model of internal humidity and drying shrinkage of recycled aggregate thermal insulation concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(10): 4788-4800(in Chinese).