

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0067

李娜,贾冬霜,彭瑜洲,等.疏浚土免烧法制备粗骨料及其性能研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):121-127,208. LI N, JIA D S, PENG Y Z, et al. Properties of coarse and lightweight aggregates from unburned dredged soil[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 121-127, 208. (in Chinese)

## 疏浚土免烧法制备粗骨料及其性能研究

李娜,贾冬霜,彭瑜洲,刘婷,吴燕

(天津科技大学 化工与材料学院,天津 300457)

**摘要:**以太湖疏浚土为原料,采用免烧法工艺制备小粒径( $<12$  mm)免烧裹壳骨料(WSLAs)。在 WSLAs 的基础上,通过黏结、裹壳工艺制备免烧粗骨料(UCLAs)。以 20~25 mm UCLAs 为研究对象,探究了 WSLAs 级配对 UCLAs 密度、粒径分布、颗粒强度的影响。依据 GB/T 14685—2011 对 UCLAs 的堆积密度、吸水率、筒压强度、压碎值、抗冻性、耐盐性等性能进行测试,并与天然粗骨料(NCAs)做性能对比。结果表明,WSLAs 的最优级配为:1~3 mm 10%、3~5 mm 25%、5~8 mm 50%、8~12 mm 15%。在该 WSLAs 级配下制备高性能 UCLAs 的密度、颗粒强度分别为 1.644 g/cm<sup>3</sup>、2.75 MPa。同时,UCLAs 内部结构稳定、壳层结构密实,使得其吸水率仅为 1.89%,从而表现出与 NCAs 相当的耐久性能,二者经 25 次抗冻融循环、25 d 盐溶液侵蚀均无质量损失。UCLAs 的压碎值为 18.6%,与 NCAs 的压碎值 9.5%相比较,但符合 GB/T 14685—2011 对 II 类粗骨料的要求,可应用于建筑混凝土中起骨架支撑作用。

**关键词:**疏浚土;免烧裹壳骨料;免烧粗骨料;级配;性能

中图分类号:X705;TU522 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Properties of coarse and lightweight aggregates from unburned dredged soil

LI Na, JIA Dongshuang, PENG Yuzhou, LIU Ting, WU Yan

(College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjing 300457, China)

**Abstract:** Taihu lake dredged sediment was selected as raw material to produce small-size ( $<12$  mm) wrap-shell lightweight aggregates (WSLAs) from unburned process. The unburned coarse and lightweight aggregates (UCLAs) was obtained by bonding and shell wrapping process from WSLAs. The effects of WSLAs gradation on UCLAs density, particle size distribution and particle strength were then investigated with 20~25 mm UCLAs in this study. The characteristics, such as size distribution, packing density, water adsorption, cylinder compressive strength, crushing value and freezing-thawing resistance of UCLAs, were examined and compared with natural coarse aggregates (NCAs) in accordance with the Chinese National Standards (GB/T 14685—2011). The results showed that the best performance UCLAs were WSLAs 1~3 mm accounting for 10%, 3~5 mm for 25%, 5~8 mm for 50%, and 8~12 mm for 15%. The density and particle strength of this best performance UCLAs obtained from this WSLAs combination were 1.644 g/cm<sup>3</sup> and 2.75 MPa, respectively. At the same time, the internal structure of UCLAs was stable and the shell structure was dense. The water absorption rate was only 1.89%, which showed a durability being comparable to that of NCAs. There was not mass loss in 25 days of salt solution erosion and 25 cycles of freeze-thaw resistance. The crushing value of UCLAs was 18.6%, which was higher than that of NCAs (9.5%), but meets the requirement of

收稿日期:2018-12-12 修回日期:2019-02-19 网络出版时间:2019-03-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms//13.1 tv.20190304.1449.004.html>

基金项目:中交天航环保工程有限公司基金支持(1700030003;1700030031)

作者简介:李娜(1992—),女,宁夏银川人,主要从事污染底泥资源化利用方面研究。E-mail:1099114706@qq.com

通信作者:吴燕(1976—),女,湖南岳阳人,教授,博士生导师,主要从事污染控制化学方面研究。E-mail:wuyan@tust.edu.cn

GB/T 14685—2011 for class II coarse aggregate. Therefore, it can be used as skeleton support in building concrete.

**Key words:** dredged soil; non-sintered wrap shell lightweight aggregates; unburned coarse and lightweight aggregates; gradation; property

为保证航道、港口的畅通,世界各国每年疏浚产生的疏浚底泥多达数亿吨<sup>[1-2]</sup>。疏浚底泥经物理脱水处理得到疏浚土,其典型的处理方法有土地利用、填方材料、建材利用<sup>[3-4]</sup>等,但其中在建材领域的资源化利用发展较为缓慢,逐步成为一个瞩目的瓶颈。

针对上述问题,国内外学者已展开相关研究,目前采用底泥、污泥为二次资源制备建筑材料的工艺还是以烧结为主。罗立群等<sup>[5]</sup>报道了在铁尾矿和煤矸石中掺加污泥制备复合烧结砖的技术工艺,在消耗污泥的同时,实现了对其内部重金属的固化。除烧结砖以外,湖泊底泥、沸石粉<sup>[6-10]</sup>等二次资源还可制备烧结陶粒,并且其强度能够符合建材的需求。但是,在制备烧结砖、烧结陶粒的过程中需要耗用大量的煤炭资源,对环境造成极大的二次污染,因此其应用逐步受到了限制。本课题组<sup>[11-15]</sup>前期针对免烧法制备的小粒径(<12 mm)裹壳骨料进行了深入研究,以疏浚土为原料制备的 WSLAs 的单颗强度达到 2.78 MPa,筒压强度为 7.90 MPa,已满足 GB/T 17431.1—2010 的要求。

随着建筑行业的飞速发展,大量的建筑物拔地而起,天然骨料的过度开采使得环境日益恶化。现阶段对粗骨料的研究大多是基于废弃建筑物粉碎后得到的再生粗骨料。再生粗骨料表面附着着一层旧砂浆,旧砂浆的存在不仅增大了粗骨料的吸水率,还增大了粗骨料与新砂浆的界面过渡区厚度,从而减弱了混凝土的抗浸蚀性能,降低了混凝土的抗压强度<sup>[16-17]</sup>。

本研究为了进一步拓展疏浚土资源化利用的应用途径,采用疏浚土为原料,以小粒径(<12 mm)免烧裹壳骨料(WSLAs)为基础,制备免烧粗骨料(UCLAs)。选择 20~25 mm UCLAs 为研究对象,探究 WSLAs 级配对其性能的影响,并与天然粗骨料(NCAs)做性能对比,证明免烧粗骨料的应用可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料来自太湖疏浚底泥(含水率 40%)经脱水、干燥处理后得到含水率小于 10%的疏浚土,根据 GB/T 6900—2016《铝硅系耐火材料化学分析

方法》和 GB/T 21114—2007《耐火材料 X 射线荧光光谱化学分析熔铸玻璃片法》对疏浚土的化学成分进行分析,分析结果见表 1。试验中制备 WSLAs、UCLAs 所用到的水泥均为工业级硅酸盐水泥(42.5 级),硅粉、纳米 SiO<sub>2</sub>、混凝土密封固化剂(主要成分:硅酸锂,固体含量 12%)均是市售建筑材料。其中硅粉、纳米 SiO<sub>2</sub> 的基本物性见表 2。

表 1 太湖疏浚土化学成分

Tab. 1 The chemical compositions of sludge of Taihu lake

化学成分	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	烧减量
含量(W%)	1.29	1.02	12.87	69.42	1.93	0.78	5.61	0.93	6.06

表 2 外加剂基本物性

Tab. 2 Physical properties of admixture

物质	SiO <sub>2</sub> 含量/ %	平均粒径/ nm	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
硅粉	91.8	180	21.5	2.22
纳米 SiO <sub>2</sub>	99.9	15	260	2.23

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 制备工艺

制备工艺见图 1,先将湿泥混合胶凝材料经陈化、破碎制得活化泥粉(含水率<10%),经造粒机制得免烧骨料,再经裹壳处理<sup>[12]</sup>,制得 WSLAs。然后对 WSLAs 进行筛分,将四种粒径(1~3、3~5、5~8、8~12 mm)的 WSLAs 按一定级配(表 3)于造粒机中,配合助剂使得 WSLAs 黏结形成 UCLAs 的内核,滚动 2~3 min 后加入由水泥、硅粉、纳米 SiO<sub>2</sub> 等胶凝材料按比例混合配制而成的 UCLAs 壳料,喷洒助剂制得具有核壳结构的 UCLAs,经 7 d 喷水养护、干化后,喷涂密封固化剂,得 UCLAs 成品。



图 1 UCLAs 制备工艺

Fig. 1 The processes of UCLAs

### 1.2.2 WSLAs 的级配设计

以 20~25 mm UCLAs 为研究对象。分别设计了 1~3、3~5、5~8、8~12 mm WSLAs 四种粒径的级配分布,研究 WSLAs 级配对 UCLAs 的粒径分布、密度、颗粒强度等性能的影响,具体的级配设计见表 3。

表 3 WSLAs 的级配分布  
Tab. 3 The distribution of WSLAs 单位: %

试验号	WSLAs 级配分布			
	1~3 mm	3~5 mm	5~8 mm	8~12 mm
1 号	10	30	45	15
2 号	10	25	50	15
3 号	10	20	55	15
4 号	10	15	60	15
5 号	10	20	50	20
6 号	10	15	50	25
7 号	10	10	50	30
8 号	15	25	50	10
9 号	20	25	50	5
10 号	25	25	50	0

### 1.2.3 性能表征

采用 BK-POL 型偏光显微镜对 UCLAs 的壳层厚度进行观察、测量,采用 LEO1530VP 型扫描电子显微镜对 UCLAs 进行微观形貌分析。依据 GB/T 14685—2011 对 UCLAs 的密度、堆积密度、吸水率、压碎值、25 次抗冻融质量损失率、25 次抗冻融强度损失率、25 d 盐溶液浸泡质量损失率、25 d 盐溶液浸泡强度损失率等性能进行测试,并与 NCAs 做性能对比。采用 GNT 200 万能压力试验机对 20~25 mm 粗骨料的颗粒强度进行测试,加载速度为 0.5 mm/s,数据计算按照如下公式<sup>[18]</sup>进行

$$\sigma = \frac{2.0 \times N}{\pi \times d^2} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为颗粒强度(MPa); $N$  为粗骨料压碎时的最大压力(N); $d$  为平行板间的距离(mm)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物理性能

#### 2.1.1 内核结构

从图 2 UCLAs 的外观和截面得,UCLAs 呈近球形,表面规整,内部结构密实。结合图 3 UCLAs 内部结构模型得到 WSLAs 以点点接触的方式黏结,WSLAs 粘结后通过反复滚动使得其紧密连接形成 UCLAs 内核,其中 WSLAs 壳层在 UCLAs 内

部形成了类网状三维结构,该结构作为 UCLAs 的骨架对其起支撑作用,疏浚土对其起填充作用。UCLAs 内核再通过裹壳形成内部结构密实、外壳质地坚硬的 UCLAs,UCLAs 壳层的厚度有 505.78  $\mu\text{m}$ ,仅占整个 UCLAs 直径的 2.02~2.53%。

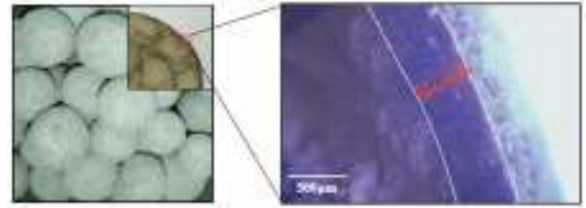


图 2 UCLAs 的外观形貌和结构图  
Fig. 2 Appearance and structure of UCLAs

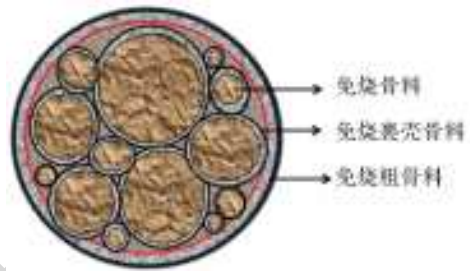


图 3 UCLAs 内部结构示意图

Fig. 3 Internal structure of UCLAs

#### 2.1.2 UCLAs 粒径分布

不同级配的 WSLAs 所形成的 UCLAs 具有粒径不一,结构稳定的特点。以 20~25 mm 的 UCLAs 为研究对象,依据表 3 中 WSLAs 的级配分布设计,将 10 组试验分为(a)(b)(c)三个部分。(a)部分(1~4 号)为了确定 20~25 mm UCLAs 中占比最大的 WSLAs 的粒径范围;(b)部分(5~7 号)探究 3~5 mm、8~12 mm WSLAs 对 20~25 mm UCLAs 占比的影响;(c)部分(8~10 号)探究 1~3 mm、8~12 mm WSLAs 对 20~25 mm UCLAs 占比的影响,最终确定制备 20~25 mm UCLAs, WSLAs 的最优级配。

如图 4,横坐标表示 UCLAs 的粒径,纵坐标表示不同粒径 UCLAs 对应的筛余量。粒径分布是不同粒径范围对应筛余量的变化值。20~25 mm UCLAs 粒径分布越大,对应筛余量的变化越大。从图 4(a)可得,当 WSLAs 1~3 mm 10%、3~5 mm 15%、5~8 mm 50%、8~12 mm 15%(2 号)时,制得 UCLAs 中 20~25 mm UCLAs 的占比达到最大 42.86%,其中 5~8 mm WSLAs 的占比最大为 50%。在 2 号 WSLAs 级配的基础上不改变 5~8 mm WSLAs 占比,同时增大、减小 8~12 mm、3~5 mm WSLAs 的比例,发现在 UCLAs 中大于

25 mm 的 UCLAs 占比增大,而 20~25 mm UCLAs 的占比最大仅为 40.82%,与 2 号 WSLAs 级配所制备的 20~25 mm UCLAs 的占比相比,并没有增大(图 4(b)),说明确定 5~8 mm WSLAs 占比为 50%时,改变 3~5 mm、8~12 mm WSLAs 的比例,不能增大制得 20~25 mm UCLAs 在 UCLAs 中的占比。同样,增大、减小 1~3 mm、8~12 mm WSLAs 的比例,发现在制得的 UCLAs 中小于

20 mm UCLAs 的占比大幅度增大,而 20~25 mm UCLAs 的占比明显减小(图 4(c))。从上述不同 WSLAs 级配制得 20~25 mm UCLAs 在 UCLAs 中的粒径占比来看,可确定 2 号 WSLAs 级配是制备 20~25 mm UCLAs 的最优级配。其中,5~8 mm 的 WSLAs 在 20~25 mm UCLAs 中占比最大,是 UCLAs 的主要组成部分,1~5 mm WSLAs 作为填充是 UCLAs 骨架的次要组成部分。

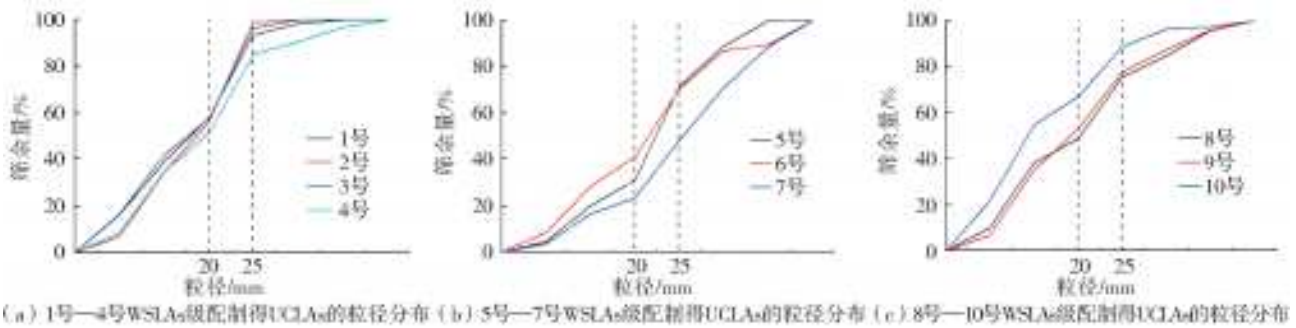


图 4 不同 WSLAs 级配制得 UCLAs 的粒径分布

Fig. 4 Size distribution of UCLAs obtained from different WSLAs

## 2.2 机械性能

### 2.2.1 UCLAs 的密度与颗粒强度

UCLAs 的密实度影响其颗粒强度,密实度越大其颗粒强度越大,其中密实度是通过密度测试来表征。图 5 是不同级配 WSLAs 制备 UCLAs(20~25 mm)的密度测试结果,从图 5(a)中得到,2 号 WSLAs 级配制得的 UCLAs 的密度最大为 1.644 g/cm<sup>3</sup>。在 2 号 WSLAs 级配的基础上,无论是增大 3~5 mm WSLAs,还是减小 5~8 mm WSLAs 在 UCLAs 中的占比,UCLAs 的密度都有减小。同理在图 5(c)中得到,随着 WSLAs 级配中 1~3 mm WSLAs 占比的增加,UCLAs 的密度呈上升趋势,但最大为 1.623 g/cm<sup>3</sup>,说明 1~3 mm WSLAs 对 UCLAs 的密实度影响不大;而图 5(b)中,各 UCLAs 的密度值明显低于图 5(a)、5(c)中各 UCLAs 的密度值,

6 号密度最大仅为 1.576 g/cm<sup>3</sup>,说明 8~12 mm WSLAs 不利于 UCLAs 密实度的提升。

强度是粗骨料机械性能最直接的数据反映,对于单颗粗骨料而言,常以颗粒强度作为其抗压强度的性能指标。如图 6 是不同级配 WSLAs 制备 UCLAs(20~25 mm)的颗粒强度测试结果,可以看出,各组 UCLAs 的颗粒强度趋势与其对应的密度值(图 5)的趋势一致,这也表明 UCLAs 密实度与强度性能密切相关,得到 2 号 WSLAs 级配所得的 UCLAs 颗粒强度最大为 2.75 MPa。

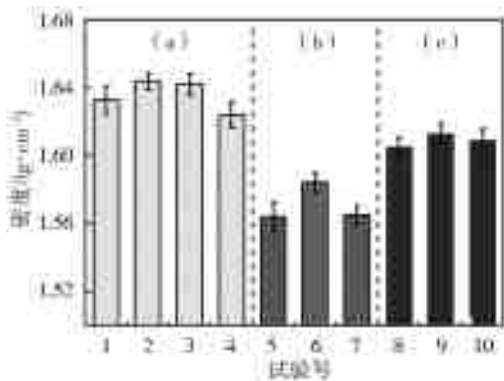


图 5 UCLAs 密度

Fig. 5 Density of UCLAs

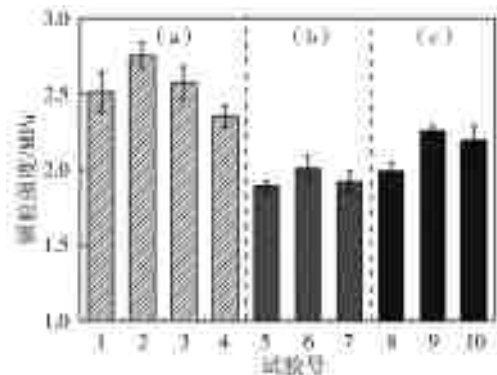


图 6 UCLAs 颗粒强度

Fig. 6 Particle strength UCLAs

### 2.2.2 UCLAs 的筒压强度与压碎值

表 4 是 UCLAs、NCAs 在同一粒径(20~25 mm)条件下的堆积密度、筒压强度、压碎值测试结果。其中 UCLAs(20~25 mm)是依据 2 号 WSLAs 级配制得,其堆积密度为 908 kg/m<sup>3</sup>,依据

GB/T 17431.1 对轻质骨料的定义,UCLAs 的堆积密度未超过  $1\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,属于轻质骨料。UCLAs 的筒压强度为  $8.5\ \text{MPa}$ ,与 NCAs 的筒压强度  $21.2\ \text{MPa}$  相比较小,但是大于 GB/T 17 431.1 对骨料等级为  $900\ \text{kg}/\text{m}^3$  高强人造轻集料不低于  $6.5\ \text{MPa}$  的要求(强度标号 40)。UCLAs、NCAs 的压碎值分别是  $18.6\%$ 、 $9.5\%$ ,其中 UCLAs 符合 GB/T 14685—2011 对建设用碎石、卵石 II 类碎石压碎指标不大于  $20\%$  的要求,NCAs 符合 I 类碎石压碎指标不大于  $10\%$  的要求。

表 4 粗骨料性能测试结果

Tab. 4 Test results of coarse aggregate

粗骨料种类	堆积密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	筒压强度/ $\text{MPa}$	压碎值/ $\%$
NCAs	1 530	21.2	9.5
UCLAs	908	8.5	18.6

从成型机理看,UCLAs 主要是通过裹壳工艺

制备成型,其成型过程主要经过 3 个部分,见图 7。第 1 部分是采用裹壳工艺制备出不同粒径的 WSLAs;第 2 部分是将不同级配的 WSLAs 进一步黏结,制备出 UCLAs 内核;第 3 部分是引入 UCLAs 的壳层物料,在已成型的 UCLAs 内核上配合助剂继续滚实,制得密实的 UCLAs。从密实性的角度分析,整个 UCLAs 的成型过程主要是作为内核的 WSLAs,随着造粒机的滚动,随机结合,不断反复跌落运动而形成的密实结构,从而提升 UCLAs 的密实度,得到稳定的 UCLAs。不同级配的 WSLAs 在滚动的过程中,粒径越小的 WSLAs 占比越多,越容易滚动填充于 UCLAs 的结构中,增加 UCLAs 的密实度,进而提升其颗粒强度;粒径越大的 WSLAs 占比越多,成型过程中,易形成较多的空隙,制得成型较为松散的 UCLAs。因此,只有最佳的 WSLAs 粒径级配才能够得到密实度最高、结构最稳定、性能最佳的 UCLAs。

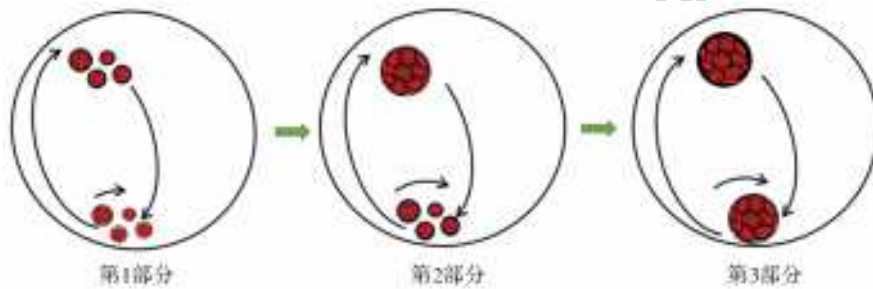


图 7 UCLAs 成型过程的运动图

Fig. 7 Motions of UCLAs forming processes

### 2.2.3 UCLAs 的吸水性与耐久性

骨料抵抗各种破坏因素,长期保持强度的性能尤为重要。表 5 是同一粒径( $20\sim 25\ \text{mm}$ )UCLAs、

NCAs 的吸水率、25 失率、25 次抗冻融循环强度损失率、25 d 盐溶液浸泡质量损失率、25 d 盐溶液浸泡强度损失率的测试结果。

表 5 粗骨料耐久性能测试结果

Tab. 5 Test results of cobblestones durability

粗骨料种类	吸水率/ $\%$	25 次冻融循环质量损/ $\%$	25 次冻融强度损失/ $\%$	25 d 盐溶液浸泡质量损失/ $\%$	25 d 盐溶液浸泡强度损失/ $\%$
NCAs	0.12	0	0	0	0
UCLAs	1.89	0	0.31	0	0.18

骨料的抗冻性、耐盐性与其吸水率有着直接的联系,UCLAs 的吸水率仅有  $1.89\%$ (表 5),与 NCAs 相比较,但不超过  $2.0\%$ ,符合 GB/T 14685—2011 对 II 类碎石吸水率的要求( $<2.0\%$ )。UCLAs 的吸水率与其壳层的微观孔隙结构直接相关,图 8 是 UCLAs、NCAs 表面的 SEM 照片,从图中可以看到 UCLAs 壳层表面不仅与 NCAs 表面一样具有致密的结构,而且还较 NCAs 表面光滑。表面密实度越好,阻碍水分进入其内核的能力越强。UCLAs 壳层表面密实度高主要是因为 UCLAs 喷水养护完成后,对其表面喷涂了渗透能力较好的锂

基型密封固化剂,固化剂渗入 UCLAs 壳层水泥石中与氢氧化钙发生反应,生成新的水化产物,从而增加了 UCLAs 壳层的致密度。

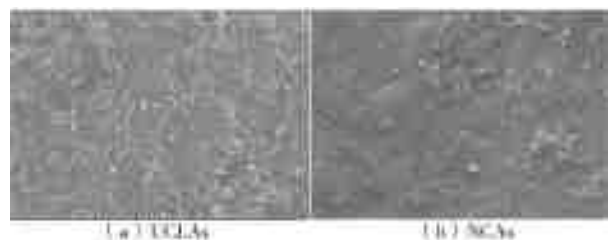


图 8 UCLAs、NCAs 表面 SEM 图

Fig. 8 SEM images of UCLAs and NCAs surfaces

从表 5 可得, UCLAs、NCLAs 经 25 次冻融循环、25 d 盐溶液浸泡均无质量损失。UCLAs 相比 NCLAs 经 25 次冻融循环、25 d 盐溶液浸泡, 强度损失略有增大, 但损失率最大仅有 0.31%。其中冻融循环是饱和状态交替作用, 使得自由水遇冷冻结冰体积发生膨胀, 表面裂缝变大, 内部孔隙贯通; 盐溶液侵蚀是氯离子随水分子渗透从表层进入内部, 通过腐蚀内部结构, 导致整体结构坍塌。UCLAs 因其内部结构稳定, 壳层结构密实、孔隙较少, 使得 UCLAs 吸水率仅有 1.89%。UCLAs 在冻融循环、盐溶液浸的过程中, 水分子较难透过水泥壳层进入 UCLAs 内部, 从而使得 UCLAs 表现出与 NCLAs 相当的耐久性。

### 2.3 微观分析

图 9 是 UCLAs 壳层反应产物的 SEM 照片, 从图中可以看出水化产物完整, 且产物紧密堆积, 形成致密的水泥石结构。这是因为 UCLAs 壳层中添加了硅粉、纳米  $\text{SiO}_2$ , 这两种外加剂均是具有火山灰活性的外加剂<sup>[19-20]</sup>, 尤其是纳米  $\text{SiO}_2$ , 其粒径小, 比表面积大, 更是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  相的成核剂, 可消耗并细化浆体早期水化产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 产生大量的 C-S-H 凝胶。结合 UCLAs 壳层 XRD 图谱(图 10), 在  $2\theta$  为  $25^\circ \sim 35^\circ$  出现的衍射峰尖且窄, 经分析是形成了结晶度较高、钙硅比较低的 C-S-H(I) 和钙

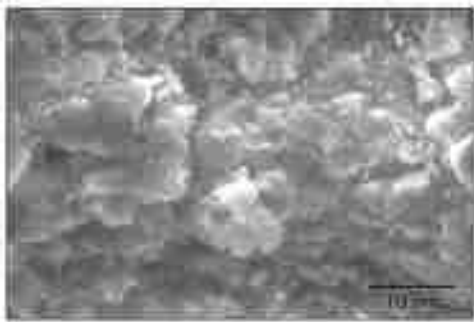


图 9 UCLAs 壳层反应产物 SEM 照片

Fig. 9 SEM image of UCLAs shell reaction product

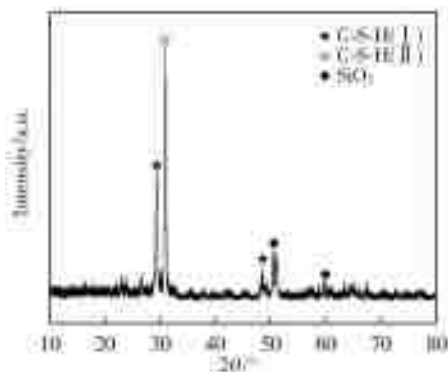


图 10 UCLAs 壳层 XRD 图谱

Fig. 10 XRD patterns of UCLAs shell

硅比较高的 C-S-H(II), 且 C-S-H(II) 含量较大。XRD 图谱中没有出现  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的衍射峰, 说明水化反应完全, 形成 C-S-H 凝胶, 使得 UCLAs 的性能较高。

### 3 结论

(1) UCLAs 具有独特的核壳结构。WSLAs 作为 UCLAs 的内核, 是构成 UCLAs 的基础。WSLAs 壳层在 UCLAs 内部形成三维网状结构, 作为骨架对 UCLAs 起支撑作用, 疏浚土对 UCLAs 起填充作用。

(2) WSLAs 的级配对 UCLAs 的粒径分布、密度、颗粒强度都有影响。同时, UCLAs 的密度与强度性能又紧密相关, 密度越大, 内部结构越紧实, 强度就越大。当 UCLAs 中 WSLAs 的级配为: 1~3 mm 10%、3~5 mm 25%、5~8 mm 50%、8~12 mm 15% 时, 不仅制得 20~25 mm UCLAs 在 UCLAs 中的占比达到最大 42.86%, 而且 UCLAs (20~25 mm) 的密度、颗粒强度也达到最大, 分别为  $1.644 \text{ g/cm}^3$ 、2.75 MPa。

(3) 以最优的 WSLAs 级配制备得到的 UCLAs (20~25 mm) 具有良好的耐久性能, 经 25 次抗冻融循环、25 d 盐溶液浸蚀均无质量损失, 且相应的强度损失率最大仅有 0.31%。同时, UCLAs 的吸水率和压碎值分别为 1.89%、18.6%, 虽与 NCLAs 相比较, 但是均符合 GB/T 14685—2011 对 II 类粗骨料的要求。

(4) 以疏浚土为原料制备高性能的 UCLAs, 应用于混凝土中。UCLAs 的堆积密度为  $908 \text{ kg/m}^3$ 、筒压强度为 8.5 MPa, 属于高强人造轻集料。张颖、吕开清等<sup>[21-22]</sup>以筒压强度为 10 MPa 以上的页岩陶粒制备得到的混凝土砌块抗压强度可达 40 MPa 以上。徐长春等<sup>[23]</sup>以堆积密度  $325 \text{ kg/m}^3$ 、筒压强度 2.7 MPa 陶粒制备得到的混凝土砌块强度等级均在 MU5.0 以上。从轻质骨料的筒压强度方面对比, UCLAs 的筒压强度介于其中, 说明 UCLAs 可作为骨架应用于混凝土中。

#### 参考文献(References):

- [1] DERMATAS D, DUTKO P, BALORDA-BARONE J, et al. Geotechnical properties of cement treated dredged sediment to be used as transportation fill[C]// Specialty Conference on Dredging and Dredged Material Disposal. 2014, 1-14.
- [2] ERFTEMEIJER P L A, RIEGL B, HOEKSEMA B W,

- et al. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals; A review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(9): 1737.
- [3] 李泽颖. 城市污水厂污泥的处理处置与综合利用[J]. 工程技术: 文摘版, 2016(8): 00075-00075. (LI Z Y. Treatment, disposal and comprehensive utilization of sludge in municipal wastewater treatment plant[J]. Engineering Technology: abstract Edition, 2016(8): 00075-00075. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-6630. 2015. 36. 675.
- [4] 陈萌, 杨国录, 徐峰, 等. 淤泥固化处理研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 128-138. (CHEN M, YANG G L, XU F, et al. Progress in sludge curing treatment[J]. South-to-North Water Transfers and Water Technology, 2018, 16(5): 128-138. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0134.
- [5] 罗立群, 王召, 魏金明, 等. 铁尾矿-煤矸石-污泥复合烧结砖的制备与特性[J]. 中国矿业, 2018, 27(3): 127-131. (LUO L Q, WANG Z, WEI J M, et al. Preparation and characteristics of iron tailings-gangue-sludge composite sintered brick[J]. China Mining Industry, 2018(3): 127-131. (in Chinese))
- [6] 吴世明, 雷翹, 张鹏, 等. 烧结制度和氧化铁含量对轻质多孔陶粒相关性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(4): 9-12, 123. (WU S M, LEI C, ZHANG P, et al. Effects of sintering process and iron oxide content on the properties of lightweight porous ceramsite[J]. New Building Materials, 2018, 45(4): 9-12, 123. (in Chinese))
- [7] QI Y F, YUE D T, YUE Q Y, et al. Preparation and mechanism of ultra-lightweight ceramics produced from sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1-3): 76-84.
- [8] 姚雪燕. 城市生活垃圾陶粒化试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (YAO X Y. Experimental study on ceramization of municipal solid waste[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [9] 付丽文, 黄丽华. 轻骨料陶粒混凝土的应用现状[J]. 建材技术与应用, 2015(2): 12-14. (FU L W, HUANG L H. Application of lightweight aggregate ceramsite concrete[J]. Technology and Application of Building Materials, 2015(2): 12-14. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-9441. 2015. 02. 005.
- [10] 蹇守卫, 余后梁, 马保国, 等. 烧结对陶粒的性能及其重金属固化的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1): 103-109. (JIAN S W, YU H L, MA B G, et al. Effects of sintering on properties of ceramsite and solidification of heavy metals[J]. Silicate Bulletin, 2018, 37(1): 103-109. (in Chinese))
- [11] PENG X, ZHOU Y, JIA R, et al. Preparation of non-sintered lightweight aggregates from dredged sediments and modification of their properties[J]. Construction & Building Materials, 2017, 132: 9-20.
- [12] 彭瑜洲, 杨鹏乾, 田涛, 等. 外加剂对疏浚底泥免烧裹壳骨料性能的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(3): 966-974. (PENG Y Z, YANG P Q, TIAN T, et al. Effect of admixture on properties of dredged sediment without burning shell aggregate[J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(3): 966-974. (in Chinese)). DOI: 10. 12030/j. cjee. 201709132.
- [13] 王丹丹, 李娜, 彭瑜洲, 等. 裹壳工艺对疏浚底泥免烧骨料性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(5): 1543-1549. (WANG D D, LI N, PENG Y Z, et al. Study on the effect of shell wrapping process on the properties of dredged sediment without burning[J]. Silicate Bulletin, 2018, 37(5): 1543-1549. (in Chinese))
- [14] 吴燕, 周颜, 贾瑞, 等. 一种疏浚底泥免烧陶粒的裹壳方法[P]. 天津: CN105130235A, 2015-12-09. (WU Y, ZHOU Y, JIA R, et al. A shell wrapping method for dredging sediment without firing ceramsite[P]. Tianjin: CN105130235A, 2015-12-09. (in Chinese))
- [15] 吴燕, 周颜, 贾瑞, 于浩. 一种掺加疏浚底泥制备免烧陶粒的方法[P]. 天津: CN105036691A, 2015-11-11. (WU Y, ZHOU Y, JIA R, et al. A method for preparing unburned ceramsite by mixing dredged sediment[P]. Tianjin: CN105036691A, 2015-11-11. (in Chinese))
- [16] 王元战, 吕彦伟, 龙俞辰, 等. 粗骨料对混凝土界面过渡区氯离子扩散性能影响[J]. 海洋工程, 2018, 36(2): 73-82. (WANG Y Z, LU Y W, LONG Y C, et al. Effect of coarse aggregate on chloride diffusion in concrete interface[J]. Ocean Engineering, 2018, 36(2): 73-82. (in Chinese)). DOI: 10. 16483/j. issn. 1005-9865. 2018. 02. 009.
- [17] 张海燕, 胡忠豪, 吴波. 粗骨料的分类及对再生混凝土抗压强度的影响[J]. 工业建筑, 2018(1): 138-144. (ZHANG H Y, HU Z H, WU B. Classification of coarse aggregate and its influence on compressive strength of recycled concrete[J]. Industrial buildings, 2018(1): 138-144. (in Chinese)). DOI: 10. 13204/j. gyjz201801000.
- [18] 谢洪勇, 刘志军. 粉体力学与工程[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 199. (XIE H Y, LIU Z J. Second Edition of Powder Mechanics and Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 199. (in Chinese))

(下转第 208 页)

- per ten thousand Yuan GDP in China based on a complete decomposition model [J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1870-1876. (in Chinese))
- [11] ANG B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation [J]. Energy Policy, 2015, 86: 233-238. DOI: 10. 1016/j. enpol. 2015. 07. 007.
- [12] 刘翀, 柏明国. 安徽省工业行业用水消耗变化分析——基于 LMDI 分解法 [J]. 资源科学, 2012, 34(12): 2299-2305. (LIU C, BO M G. Change in industrial water use in Anhui Province based on LMDI [J]. Resources Science, 2012, 34(12): 2299-2305. (in Chinese))
- [13] 刘云枫, 孔伟. 基于因素分解模型的北京市工业用水变化分析 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 26-29. (LIU Y F, KONG W. Analysis of industry water utilization change in Beijing based on factor decomposition model [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 26-9. (in Chinese))
- [14] 张礼兵, 徐勇俊, 金菊良, 等. 安徽省工业用水量变化影响因素分析 [J]. 水利学报, 2014, 45(7): 837-43. (ZHANG L B, XU Y J, JIN J L, et al. Analysis of influence factors of regional industry water use in Anhui Province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 837-43. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2014. 07. 010.
- [15] ZHANG C J, ZHANG H Q. Can regional economy influence China's water use intensity: based on refined LMDI method [J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2014, 12(3): 247-254. <http://dx.doi.org/10.1080/10042857.2014.934949>
- [15] 贾绍凤, 张士锋. 北京市水价上升的工业用水效应分析 [J]. 水利学报, 2003, 34(4): 108-113. (JIA S F, ZHANG S F. Response of industrial water use to water price rising in Beijing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(4): 108-113. (in Chinese))
- [16] 姜蓓蕾, 耿雷华, 卞锦宇, 等. 中国工业用水效率水平驱动因素分析及区划研究 [J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2231-2239. (JIANG B L, GEN L H, BIAN J Y, et al. Driving factor analysis and the spatial regionalization on the industrial water use efficiency in China [J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2231-2239. (in Chinese))
- [17] 雷玉桃, 黄丽萍. 中国工业用水效率及其影响因素的区域差异研究——基于 SFA 的省际面板数据 [J]. 中国软科学, 2015(4): 155-164. (LEI Y T, HUANG L P. Regional differences in industrial water consumption efficiency and its influencing factors for China's major industrial provinces: A study of provincial panel data based on SFA [J]. China Soft Science, 2015(4): 155-164. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-9753. 2015. 04. 016.
- [18] DENG G Y, LI L, SONG Y N. Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: Based on SBM-DEA model [J]. Ecological Indicators, 2016(69): 12-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.052>.

.....

(上接第 127 页)

- [19] RONG Z, SUN W, XIAO H, et al. Effects of nano-SiO<sub>2</sub> particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-highperformance cementitious composites [J]. Cement & Concrete Composites, 2015, 56: 25-31.
- [20] ARDALAN R B, JAMSHIDI N, ARABAMERI H, et al. Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO<sub>2</sub> oxide and spraying nanosilicon practices [J]. Construction & Building Materials, 2017, 146: 128-135.
- [21] 吕开清, 夏多田, 杨士珏, 等. 新型陶粒混凝土材料配合比试验研究 [J]. 混凝土, 2017(4): 147-150. (LYU K Q, XIA D T, YANG S J, et al. Experimental study on mixture ratio of new ceramsite concrete material [J]. Concrete, 2017(4): 147-150. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2017. 04. 037.
- [22] 张颖. 高强钢纤维轻骨料混凝土力学性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45(2): 29-31. (ZHANG Y, Study on mechanical properties of high strength steel fiber lightweight aggregate concrete [J]. New Building Materials, 2018 45(2): 29-31. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2018. 02. 009
- [23] 徐长春, 孔德辅, 陈北全, 等. 陶粒钢渣轻质混凝土空心砌块性能试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45(2): 129-132. (XU C C, KONG D F, CHEN B Q, et al. Experimental study on performance of lightweight concrete hollow block with ceramic steel slag [J]. New Building Materials, 2018, 45(2): 129-132. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2018. 02. 034.