

# 超轻质高延性水泥基材料力学性能研究

黄振宇<sup>1,2</sup>, 隋莉莉<sup>1,2</sup>, 王芳<sup>1</sup>

(1. 深圳大学 土木工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要:** 采用三种不同类型的空心微珠开发了一种新型多功能超轻质高延性水泥基材料 (Ultra-lightweight high ductility cement composite; ULHDCC). 采用空心微珠作为填料使混凝土密度降低, 基于强度和能量准则, 采用聚乙烯纤维 (PE) 改性增强了 ULHDCC 的延性. 通过实验研究了其基本力学性能如抗压强度、直接拉伸强度、导热性能和微观结构等性能. 实验结果显示开发的 ULHDCC 的表现密度为  $850 \sim 920 \text{ kg/m}^3$ , 但抗压强度高达  $20 \sim 33 \text{ MPa}$ , 1% 体积掺量 PE 纤维下其直接拉伸应变能力仍可达 8%. 导热系数低至  $0.152 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . ULHDCC 材料可应用于浮体结构、轻型楼板、装配式建筑内外墙板、屋面和加固修复材料等.

**关键词:** 轻质混凝土; 应变强化; 超轻质; 高延性

中图分类号: TU501

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0223-07

## Mechanical properties of ultra-lightweight high ductility cement composites

HUANG Zhengyu<sup>1,2</sup>, SUI Lili<sup>1,2</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shenzhen University, Guangdong Shenzhen 518000, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Guangdong Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** This paper developed a new type of multi-functional ultra-lightweight high ductility cement composites (ULHDCC) incorporating three types of glass microspheres which led to the reduction of the composite density. Based on the strength energy principals, this paper utilized the polyethylene fibers (PE) to improve the ductility of composites. The mechanical properties such as compressive strength, direct tensile strength, thermal properties and microstructures have been explored through experimental tests. Results showed that the dry density of ULHDCC was  $850 \sim 920 \text{ kg/m}^3$  while the compressive strength was up to  $20 \sim 33 \text{ MPa}$ . The strain in direct tensile test could still reach to 8% even with low fiber content of 1% PE fibers by volume. The thermal conductivity of ULHDCC is only  $0.152 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Such ULHDCC could be potentially applied to the lightweight floors, prefabricated external and internal walls of the constructions and repairing materials.

**Key words:** lightweight concrete; strain hardening; ultra-lightweight; high ductility

轻质混凝土是指密度在  $800 \sim 1950 \text{ kg/m}^3$  或是密度在  $1120 \sim 1920 \text{ kg/m}^3$  同时抗压强度不小于  $21 \text{ MPa}$  的混凝土<sup>[1]</sup>. 轻质混凝土密度小的原因之一是使其材料内部孔隙增多, 根据孔隙所在的位置和形成机制, 轻质混凝土一般可以分为三类: (1) 轻骨料混凝土, 孔隙主要集中在骨料中<sup>[2]</sup>; (2) 蜂窝混凝土和泡沫混凝土, 孔隙主要在水泥浆中<sup>[3]</sup>; (3) 无细骨料混凝土, 由于没有细骨料的填充作用, 粗骨料之间会形成孔隙<sup>[4]</sup>. 由于轻骨料混凝土自重小, 保温隔热性能好等优点, 可用于高层建筑, 大跨度桥梁以及海洋平台等对自重敏感

的工程结构<sup>[1,5]</sup>. 但由于大部分轻质混凝土的抗压强度偏低, 整体性能偏脆的缺点限制了轻质混凝土在建筑工程中的广泛应用.

传统的轻骨料有膨胀页岩<sup>[6]</sup>, 膨胀珍珠岩<sup>[7]</sup>, 聚苯乙烯珠<sup>[8]</sup>等材料, 虽然可以达到减小混凝土密度的目的, 但抗压强度往往不满足结构应用的标准. 另外, 生产这类轻骨料通常采用烧结成型方法, 能耗大不环保. 近几年, 粉煤灰空心微珠、玻璃微珠以其压碎强度高、功能性能优越得到了众多学者的关注和研究. Brooks 等人<sup>[9]</sup>使用不同类型及掺量的粉煤灰空心微珠制备了轻质混凝土,

收稿日期: 2018-10-01

修改稿日期: 2019-03-18

基金项目: 国家基金青年项目 (51708360, 51778371); 深圳市科技计划项目 (JCYJ20180305124106675); 广东省普通高校特色创新项目 (2017KTSCX164)

第一作者: 黄振宇 (1984—), 博士, 男, 副研究员, 从事轻型钢-混凝土-钢夹芯组合结构, 超轻质高强混凝土, 海洋工程纤维增强复合结构等研究. E-mail: huangzhenyu@szu.edu.cn.

干密度在 1 400~2 020 kg/m<sup>3</sup>, 强度在 35.4~53.5 MPa. Hanif 等人<sup>[10]</sup>用玻璃微珠作为轻质填料, 对体积掺量为 1.5%的聚乙烯醇纤维(PVA)的轻质混凝土进行试验发现, 随着玻璃微珠掺量由 0%增加到 50%(水泥质量占比), 其密度从 2 068 kg/m<sup>3</sup>降至 880 kg/m<sup>3</sup>, 抗压强度由 94.3 MPa 降至 14.3 MPa. Chen 等人<sup>[11]</sup>利用粉煤灰漂珠微珠作为填料, 添加 2%的 PVA 纤维进行试验制备的混凝土密度均在 1 300 kg/m<sup>3</sup>以下, 28 d 抗压强度可达到 50 MPa, 但其单轴拉伸应变率仅略高于 1%, 延性无法达到高延性混凝土特征. Soe 等人<sup>[12]</sup>开发了一种新型掺加混杂纤维的高延性水泥基材料(ECC), 抗压强度可达 70 MPa, 但拉伸应变仅为 0.5%左右. 俞可权等人<sup>[13]</sup>使用石英砂、水泥、高炉矿渣、硅灰和粉煤灰制备的 ECC, 在掺加 2% PE 纤维后, 直接拉伸应变可达到 3.90%~9.63%, 相应混凝土密度在 1 900~2 400 kg/m<sup>3</sup>. Huang 等人<sup>[14]</sup>使用玻璃微珠制备的一种漂浮水泥基材料, 加入 1%聚乙烯纤维后拉伸应变即可达到 6%, 拉伸段存在明显应变硬化行为. 上述文献表明, 大多数传统高延性混凝土虽然拉伸应变能力较强, 但自重仍然较大; 而采用粉煤灰漂珠或玻璃微珠制备的混凝土虽然密度降低显著, 但普遍抗压强度较低, 而且拉伸应变能力无法达到高延性混凝土的轴拉应变的标准, 限制了其在工程中的应用. 因此, 开发同时具备质量轻、强度高和延性高的轻质水泥基材料, 并应用于实际工程具有重要意义. 本文采用优选的玻璃微珠作为填料, 并使用经过亲水处理的 PE 纤维, 基于强度和能量

准则制备一种超轻质高延性的水泥基材料 ULHD-CC, 并通过系统实验研究了其力学性能和微观结构.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料与设计

制备 ULHDCC 采用普通硅酸盐水泥 PO52.5R、SiO<sub>2</sub> 含量超过 94%的加密型硅灰、采用三种不同类型(D38、D42、D46)的空心微珠, 其中微珠的粒径分布如图 1 所示. PE 纤维经过亲水改性处理, 其基本性能指标见表 1. 减水剂采用聚羧酸型的高效减水剂, 水即为普通自来水. ULHDCC 试验的配合比设计如表 2 所示. 制备时, 将干料投入锅中进行充分干拌, 接着将 80%减水剂与水混合后投入干料进行高速搅拌, 最后配合低速搅拌和流动度测试指标确定最终减水剂用量, 完成 ULHDCC 的制备. 浇筑 24 h 后拆模, 放入温度为 20±2℃, 相对湿度为 95%以上的标准养护室中进行养护至龄期后测试<sup>[15]</sup>.

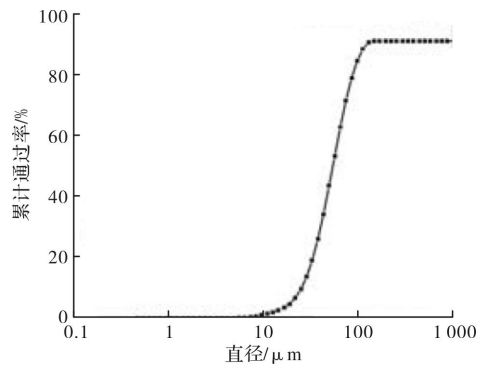


图 1 微珠粒径分布

Fig. 1 The particle size distribution of Microspheres

表 1 改性 PE 纤维基本性能

Tab. 1 The properties of modified PE fibers

单丝直径/ $\mu\text{m}$	长度/mm	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂延伸率/%
24	12	0.97	3 000	120	2~3

表 2 配合比设计

Tab. 2 Mixture proportion

编号	水泥	硅灰	空心微珠	水	减水剂	纤维
D38-PE1%	1	0.12	0.50	0.70	0.03	1%
D42-PE1%	1	0.20	0.60	0.70	0.03	1%
D46-PE0	1	0.17	0.70	0.70	0.03	0
D46-PE1%	1	0.17	0.70	0.70	0.03	1%

注: 纤维为体积占比, D38-PE1%即为密度为 D38 的微珠添加体积占比为 1%的 PE 纤维; 其余为质量占比.

表 3 ULHDCC 基本性能  
Tab. 3 Properties of ULHDCC

编号	表现密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	导热系数 W/mk
D38-PE1%	900	27.5	2.5	/
D42-PE1%	909	28.1	2.9	/
D46-PE0	917	32.9	/	0.152
D46-PE1%	842	20.8	2.7	/

1.2 实验设备与试验方法

抗压强度实验采用 50 mm×50 mm×50 mm 立方体试块<sup>[16]</sup>, 加载装置使用恒加载水泥抗折抗压试验机, 加载速度取 1 kN/s. 单轴静力拉伸试验按照 JSCE 推荐的标准试件尺寸进行试验<sup>[17]</sup>, 使用 MTS 通用试验机进行静力拉伸试验, 加载速度为 0.5 mm/min, 试验装置及试件尺寸见图 2. 导热系数测定采用热流量计法对 300 mm×300 mm×50 mm 的板进行实验<sup>[18]</sup>. 具体试件信息与测试规范如表 3 所示. 对 ULHDCC 材料微观尺度, 本文采用扫描电子显微镜(SEM)进行观察和分析.

2 试验结果与分析

2.1 表观密度与抗压强度

表观密度于浇筑 24 h 后脱模测得, 掺加三种类型微珠的混凝土密度在 850~920 kg/m<sup>3</sup> 之间, 在体积掺量相同的条件下, 微珠密度越大, 成型的混凝土的表观密度也越大. 由图 3 可以看出, 抗压强度与表观密度成正比关系, 平均抗压强度从 27.2 MPa 增至 32.9 MPa. 原因是密度大的微珠壁厚较大, 因此一般破碎强度也高, 制备的轻质混凝土密度和强度都随着提高. 同时, 本文发现掺加纤维可以使得抗压强度强度明显提高, 以 D46 微珠为例, 掺加 1% 纤维, 抗压强度由 20.8 MPa 提高到 32.9 MPa, 提高约 59%. 原因可能是由于纤维经过了亲水处理使得纤维与水泥浆的粘结更好, 减少了浆体内部气泡生成, 浆体更加密实, 从而使得抗压强度有明显提高, 但这一结论还需后续试验验证. 此外, 是否掺加纤维对试件的破坏形态也有显著影响. 如图 4、图 5 所示, 未掺加纤维的试件, 压力荷载下混凝土外层劈裂剥落, 与高强混凝土、普通轻骨料混凝土破坏模式相似; 而掺加纤维的试件, 压力荷载下有裂缝产生, 但纤维由于桥接作用阻止裂缝进一步开展, 试块整体仍保持完整状态, 直到试块呈现出压扁状.

2.2 直接拉伸强度及拉伸应变

未掺加纤维的试件抗拉强度大约在 1 MPa 左

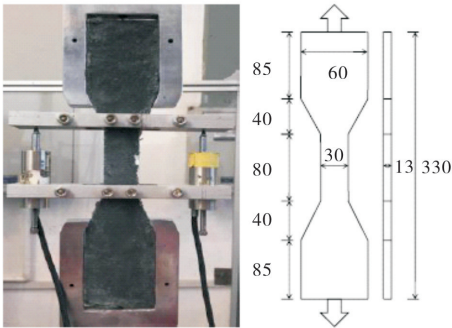


图 2 静力拉伸装置与试件尺寸  
Fig. 2 Static tensile setup & dog-bone specimen

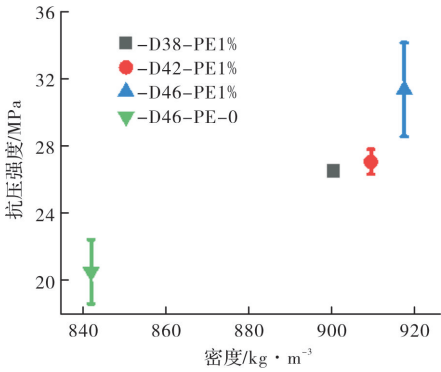


图 3 抗压强度与表观密度关系  
Fig. 3 Relationship between compressive strength and density



图 4 D46-PE0 试块破坏模式—脆性劈裂  
Fig. 4 Failure mode of D46-PE0—splitting failure

右, 在 24 h 后拆模时早期强度较低, 容易出现裂缝, 导致试件发生断裂而无法测试. 加入 1% 纤维

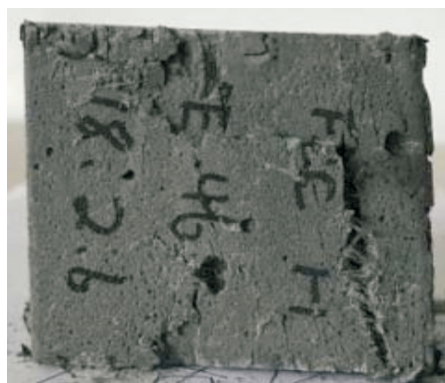


图5 D46-PE1%试块破坏模式-压扁

Fig. 5 Failure mode of D46-PE1%-squashed

后, 极限抗拉强度可以达到 2.9 MPa, 极限拉伸应变均可达到 6%, 测试结果如图 6 所示. 其中, D38-PE1% 的极限拉伸应变达到了 8%, 是普通混凝土极限拉应变(0.000 1~0.000 17)<sup>[19]</sup> 的几百倍, 显著提高了材料的延性, 甚至高于普通高延性混凝土 ECC<sup>[20]</sup>. 图 7 显示的是超轻质高延性混凝土受拉后呈现出多裂缝开展的典型特征.

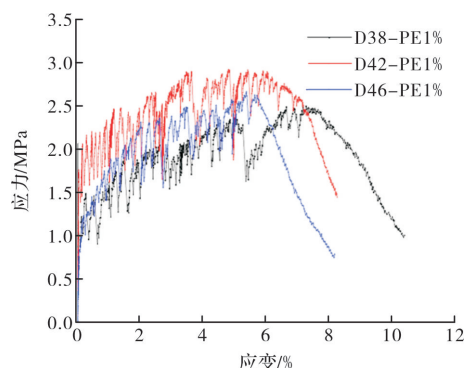


图6 直接拉伸应力-应变曲线

Fig. 6 The stress-strain curve of direct tensile test

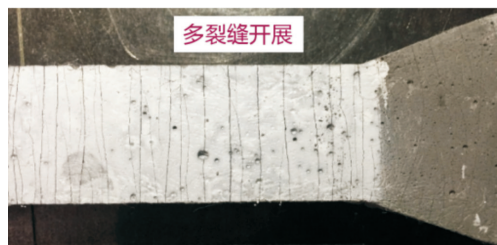


图7 多裂缝破坏模式

Fig. 7 Multi-cracks failure mode

### 2.3 导热系数

混凝土的导热系数受材料的含水率和孔隙率影响显著, 为了更准确表征材料的导热系数, 在进行测试之前对试件进行干燥处理, 直到试件烘干至质量恒定. 本次试验测试了不含纤维的 D46-PE0 组别混凝土的导热系数, 经过与文献资料对比, 本文制备的超轻质高延性水泥基材料导热系数较低, 仅为 0.152 W/mK. 图 8 可以看出, 导热

系数与材料密度基本成正比关系, 这是由于在轻质混凝土孔隙率较高, 孔隙率高的混凝土比密实的混凝土含气量更高, 与固体相比, 气体的导热系数更小, 故轻质混凝土拥有较低的导热系数. 本文采用的玻璃微珠为中空球形骨料, 不仅降低了材料密度, 也使得密闭孔含量增多, 有效降低了材料的导热系数.

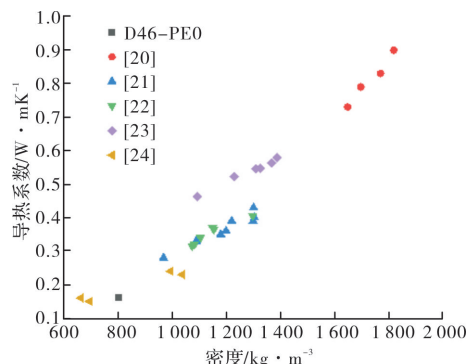


图8 不同混凝土的导热系数与密度关系

Fig. 8 Relation between thermal conductivity and density for different lightweight concrete

### 2.4 微观结构和微观力学分析

图 9 给出了不同尺度下超轻质高延性水泥基材料扫描电镜的微观结构形貌. 微珠为大小不一的光滑球状物, 为实现低密度, 微珠掺量较大, 由图 9(a)可见大量微珠均匀分散于水泥浆体中(放大倍数 400 倍), 进一步证明该材料基体密实, 有利于强度提高. 微珠壳体主要成分为  $\text{SiO}_2$ , 但成品经表面处理后呈惰性, 完整微珠活性较低. 从图 9(b)与图 9(c)可以看出珠体表面仍然光滑(放大倍数均 1 600 倍). 由于微珠自身的破碎强度高达 37.9 MPa<sup>[14]</sup>, 因搅拌制备过程或加载发生破损的微珠较少(微珠珠体上有裂缝, 如图 9(b)所示), 裂缝主要出现在微珠与水泥浆的粘结界面上如图 9(c)所示. 由此可见, 在本文设计配合比下的 ULHDCC 材料骨料和浆体的粘结界面是较为薄弱的部位. 在水泥基材料中添加纤维能够增强其延性, 在本次试验中掺入纤维组别中未见明显在受拉后试件得以多裂缝发展, 从而发挥高延性等纤维桥联强度  $\sigma_0$ , 即满足公式(1).

$$\sigma_{cr} < \sigma_0 \quad (1)$$

纤维断裂, 图 9(d)中纤维仍“锚固”于浆体中, 的特征. 在设计高延性材料时需满足强度和能量两个准则<sup>[20]</sup>, 强度准则是指初始裂缝强度  $\sigma_{cr}$  小于只有初始裂缝强度小于纤维桥联强度, 水泥基基体在开裂后才会不会直接发生纤维拔出等破坏, 从而纤维受力发挥其桥联作用, 将应力传递到其他未开裂



部位,周而复始,使得出现多裂缝破坏机制(图7所示).在本次试验中,从图9(b)、图9(c)、图9(d)可以看出,水泥基体强度要小于纤维的桥联强度.初始裂缝强度主要受试件的断裂韧性 $K_m$ 与内部缺陷等因素影响<sup>[20,21]</sup>,纤维桥联强度主要受纤维种类以及纤维/基体的界面性能影响.显然, $\sigma_{cr}/\sigma_0$ 比值越小对于裂缝发展更有利,但降低 $\sigma_{cr}$ 会影响材料的其他性能,故本文挑选了经过改性处理的PE纤维,使纤维粘结更牢固来提高 $\sigma_0$ .

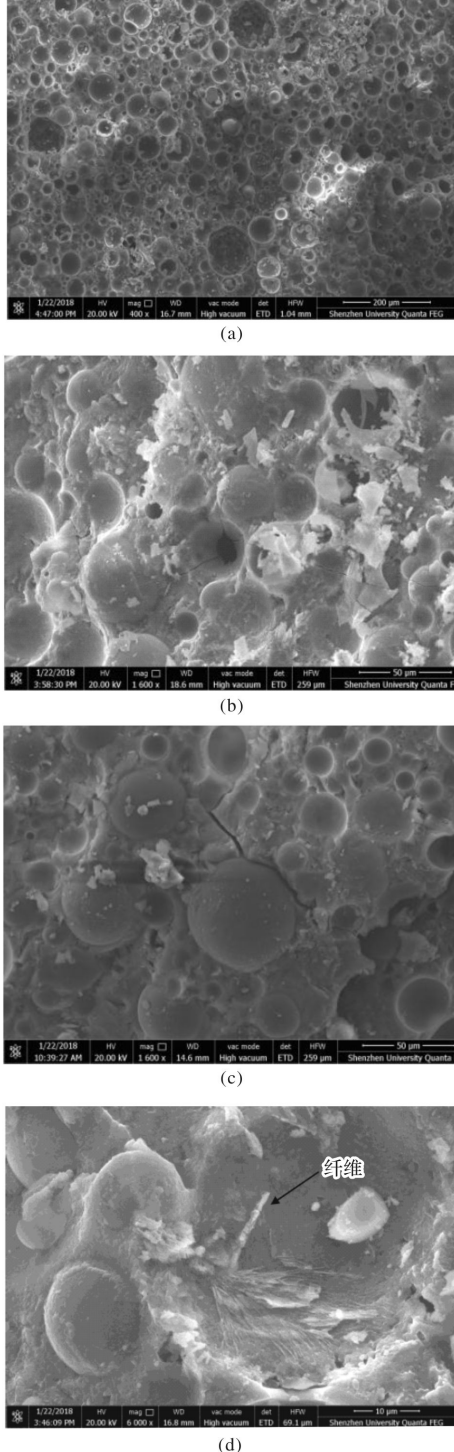


图9 微观尺度下的形貌

Fig.9 Microscopic morphology

满足能量准则可以使得裂缝稳定地发展.能量准则是指抵消裂缝尖端强度所消耗的能量 $J_{tip}$ (补足能量)与纤维桥联作用所消耗的能量之和应与拉伸应力 $\sigma_{ss}$ 产生应变 $\delta_{ss}$ 的能量相等,图10为其示意图, $J_{tip}$ 必须要小于最大补足能量,即满足公式(2)~(4):

$$J_{tip} + \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta = \sigma_{ss} \delta_{ss} \quad (2)$$

$$J'_b + \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta = \sigma_0 \delta_0 \quad (3)$$

$$J_{tip} < J'_b \quad (4)$$

其中, $J_{tip} = K_m^2/E_c$ , $E_c$ 为材料的弹性模量, $K_m$ 为断裂韧性,可由文献[22]的测试方法求得.微观力学模型和试验测试均表明 $J_{tip}/J'_b$ 越小越好<sup>[23,24]</sup>.纤维基体的粘结强度会影响补足能量的大小,粘结过小,纤维容易拔出导致 $\sigma_0$ 过小,粘结强度过大会使得纤维拉断导致 $\delta_0$ 较小<sup>[20]</sup>,故需要选择合适的纤维/基体粘结强度,不能为满足强度准则而一味提高纤维/基体粘结强度.以D46-PE1%组为例进行能量准则验证,基本参数按照文献[22]取40 mm×40 mm×160 mm带凹口的棱柱体进行三点弯曲试验.根据公式(5)与(6)求得结果如表4所示,比值满足公式(4)能量准则.

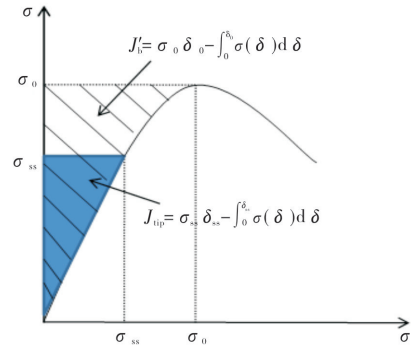


图10 能量准则示意图

Fig.10 Schematic diagram of energy criterion

$$K_m = \frac{1.5 \left( FQ + \frac{mg}{2} \times 10^{-2} \right) \times 10^{-3} S \sqrt{a_0}}{th^2} f(\alpha) \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}}, \quad \alpha = \frac{a_0}{h} \quad (6)$$

表4 参数计算结果

Tab.4 The results of the parameters

$\alpha$	$f(\alpha)$	$K_m$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	$J_{tip}$ /(J·m <sup>-2</sup> )	$J'_b$ /(J·m <sup>-2</sup> )
0.4	2.089	$9.20 \times 10^{-4}$	$2.24 \times 10^{-7}$	$3.45 \times 10^{-2}$

### 3 结论

开发了一种超轻质高延性水泥基材料 ULHD-CC, 通过基本材性试验可知表观密度低于  $850 \sim 920 \text{ kg/m}^3$ , 仍能保持较高的抗压强度达  $20 \sim 33 \text{ MPa}$ , 轴向拉升应变能力达到  $8\%$ , 而且具有较高的较低的导热系数  $0.152 \text{ W/mK}$ , 是一种结构功能一体化高性能水泥基材料. 本文主要研究结论如下:

(1) ULHDCC 抗压强度受微珠类型和纤维掺量的影响. 微珠类型会影响材料的密度, 随着骨料密度的增加, ULHDCC 的密度也随之增加, 抗压强度也有所提高.

(2) 极限抗拉强度和应变受纤维掺量和微珠类型的影响. 加入纤维可以提高材料的极限抗拉强度, 对于极限拉伸应变有显著的提高.

(3) 导热系数与干密度成正比例关系, 密度越小, 导热系数越低. 孔隙率是影响导热系数的重要因素之一, 质量轻的混凝土孔隙率相应较大, 进而导致其导热系数下降, 使用玻璃微珠能很好地增加密闭孔的含量, 从而到达保温隔热的目的.

(4) 改性后的 PE 纤维增强材料和水泥基体组合作用满足强度准则与能量准则, 实现了材料高延性特征和多裂缝发展. 后续研究将系统地堆积理论、强度准则和能量方法对 ULHDCC 进行优化设计与性能调控.

### 参考文献 References

- [1] Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete : ASTM 213R[S]. USA:ACI Committee,2014.
- [2] LIU X, CHIA K S, ZHANG M H. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride ion penetration[J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32(10):757-766.
- [3] OTHUMAN MA, WANG YC. Elevated temperature thermal properties of lightweight foamed concrete[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25 (2): 705-716.
- [4] HUANG Z, LIEW JYR, LI W. Evaluation of compressive behavior of ultralightweight cement composite after elevated temperature exposure[J]. Construction & Building Materials, 2017, 148:579-589.
- [5] HUANG Z, WANG J, LIEW JYR, et al. Lightweight steel-concrete-steel sandwich shell subject to punching shear[J]. Ocean Engineering 2015, 102: 146-161.
- [6] LOTFY A, HOSSAIN KMA, LACHEMI M. Lightweight selfconsolidating concrete with expanded shale aggregates: Modelling and optimization[J]. International Journal of Concrete Structures & Materials, 2015, 9(2):185-206.
- [7] LONG W, TAN X, XIAO B, et al. Effective use of ground waste expanded perlite as green supplementary cementitious materials in eco-friendly alkali activated slag composites[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 213:406-414.
- [8] BABU D S, BABU K G, WEE T H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash[J]. Cement & Concrete Research, 2005, 35(6):1218-1223.
- [9] BROOKS A L, ZHOU H, HANNA D. Comprative study of the mechanical and thermal properties of liht-weight cementitious composites[J]. Construction & Building Materials, 2018, 159:316-328.
- [10] HANIF A, PARTHASARATHY P, LU Z, et al. Fiber-reinforced cementitious composites incorporating Glass cenospheres mechanical properties and microstructure[J]. Construction & Building Materials, 2017, 154:529-538.
- [11] CHEN Z, LI J, YANG E. High strength lightweight strain-hardening cementitious composite incorporating cenosphere[C]//9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. USA: Berkeley, 2016.
- [12] SOE KT, ZHANG YX, ZHANG LC. Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious comosite[J]. Construction & Building Materials, 2013, 43(3):399-407.
- [13] YU K, WANG Y, YU J, et al. A straing hardening cementitious composites with the tensile capacity up to  $8\%$  [J]. Construction & Building Materials, 2017, 137:410-419.
- [14] HUANG Z, WANG F, ZHOU Y, et al. A novel, multifunctional, floatable, lightweight cement composite[J]. Development and Properties. Materials, 2018, 11: 2043.
- [15] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB-T50081-2002 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003:10-11.  
China Academy of Architectural Sciences. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB-T50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003:10-11.
- [16] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars: ASTM C109&C109M [S]. USA:ACI Committee,2002.
- [17] JSCE, Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks[C]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008:1-16.
- [18] Standard test method for steady state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus: ASTM C518 [S]. USA: ACI Committee, 2004.
- [19] 梁兴文, 史庆轩. 混凝土结构设计原理[M]. 第2版北京:科学中国建筑业出版社, 2011:14-23.  
LIANG Xingwen, SHI Qingxuan. Design theory for

- concrete structure[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011:14-23.
- [20] LI V C. Engineered cementitious composites (ECC)-material, structural, and durability performance[M]. Book Chapter in Concrete Construction Engineering Handbook, 8th ed; Nawy: CRC Press, 2007.
- [21] 曹明莉, 许玲, 张聪. 高延性纤维增强水泥基复合材料的微观力学设计、性能及发展趋势[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5):632-642.
- CAO M, XU L, ZHANG C. Review on micromechanical design, performance and development tendency of engineered cementitious composite. [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43 (5): 632-642.
- [22] XU S, REINHARDT HW. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture Part I: Experimental investigation of crack propagation [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2):111-149.
- [23] HUANG X, RANADE R, ZHANG Q, et al. Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites [J]. Constr. Build. Mater. 2013, 48:954-60.
- [24] KANDA T, LI V C. Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC [J]. ACT, 2006, 4(1):59-72.
- [25] WU Y, WANG JY, MONTEIRO PJM, et al. Development of ultralightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings[J]. Construction & Building Materials, 2015, 87:100-112.
- [26] HANIF A, DIAO S, LU Z, et al. Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres: Mechanical and thermal insulating properties [J]. Construction & Building Materials, 2016, 116:422-430.
- [27] BLANCO F, GARCA P, MATEOS P, et al. Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres [J]. Cement & Concrete Research, 2000, 30(11):1715-1722.
- [28] ORESHKIN D, SEMENOV V, ROZOVSKAYA T. Properties of light-weight extruded concrete with hollow glass microspheres [J]. Procedia Engineering, 2016, 153:638-643.

(编辑 沈 波)

(上接第 185 页)

- [12] 孙丛涛, 牛荻涛. 冻融环境混凝土氯离子扩散性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(8): 1863-1869.
- SUN Congtao, NIU Ditao. Experimental study on chloride diffusion of concrete in freeze-thaw environment [J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2014, 33(8): 1863-1869.
- [13] 付传清, 金贤玉, 田野, 等. 多场耦合作用下氯离子分布场的数值模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(s2): 119-125.
- FU Chuanqing, JIN Xianyu, TIAN Ye, et al. Numerical model of chloride distribution field under multi field coupling [J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2010, 40(s2): 119-125.
- [14] 王前, 张鑫, 傅日荣. 计算混凝土中氯离子扩散系数的实用方法 [J]. 山东建筑大学学报, 2006, 21(4): 288-290.
- WANG Qian, ZHANG Xin, FU Rirong. A practical method for calculating chloride diffusivity in concrete [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2006, 21(4): 288-290.
- [15] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I——理论模型 [J]. 硅酸盐学报. 2002, 30(6): 686-690.
- YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et al. Study on prediction method of concrete service life [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2002, 30 (6): 686-690.
- [16] 陈梦成, 袁素叶. 多重因素下混凝土氯离子扩散 CA 模型及寿命预测 [J]. 铁道建筑, 2016(9): 134-138.
- CHEN Mengcheng, YUAN Suye. CA model and life prediction of chloride diffusion in concrete under multiple factors [J]. Railway Construction, 2016 (9): 134-138.
- [17] 何世钦, 贡金鑫, 赵国藩. 冻融循环下混凝土中氯离子的扩散性 [J]. 水利水运工程学报, 2004(4): 32-36.
- HE Shiqin, GONG Jinxin, ZHAO Guofan. Chloride diffusivity in concrete under freeze-thaw cycles [J]. Journal Of Water Conservancy Engineering, 2004(4): 32-36.
- [18] 王喜彬, 张彩丽, 赵彦迪. 水压力作用对混凝土氯离子侵蚀的影响研究 [J]. 混凝土, 2016(5): 41-44.
- WANG Xibin, ZHANG Caili, ZHAO Yandi. Influence of water pressure on chloride ion erosion of concrete [J]. Concrete, 2016(5): 41-44.
- [19] 齐广政. 海洋大气环境下混凝土氯离子侵蚀性能的试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- QI Guangzheng. Experimental study on chloride ion erosion performance of concrete in marine atmosphere [D]. Xi'an: Xi'an Univ. Of Arch. & Tech., 2012.
- [20] 袁明胜. 陶瓷粉混凝土抗氯离子渗透性能试验研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- YUAN Mingsheng. Experimental study on chloride ion penetration resistance of ceramic powder concrete [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.

(编辑 沈 波)