

文章编号:1007-9629(2022)11-1160-08

# 贻贝粗骨料混凝土的宏微观性能

钟 何, 赵羽习\*, 孟 涛

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 为了提高贝壳废弃物的消纳量, 实现资源循环利用, 以贻贝粗骨料替代天然粗骨料, 制备了贻贝粗骨料取代率为 15%、30%、45%、60%、100% 的贻贝粗骨料混凝土, 并研究了其宏微观性能. 结果表明: 贻贝粗骨料中具有较高含量的无机钙, 但作为天然粗骨料的替代材料, 由于吸水率为 2.4%、表观密度为 2 402 kg/m<sup>3</sup>、压碎指标为 68.2%, 均超出规范要求, 贻贝粗骨料物理性能弱于天然粗骨料; 随着贻贝粗骨料取代率的提高, 贻贝粗骨料混凝土的力学性能降低; 贻贝粗骨料与砂浆界面过渡区的缺陷区域是混凝土性能劣化的主要原因; 配合比设计得出, 当贻贝粗骨料取代率为 30% 时, 可以制备强度等级为 C30 的贻贝粗骨料混凝土.

**关键词:** 贻贝; 混凝土; 力学性能; 微观形貌; 显微硬度

中图分类号: TU528.09

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.008

## Macroscopic and Microscopic Properties of Mussel Coarse Aggregate Concrete

ZHONG He, ZHAO Yuxi\*, MENG Tao

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** In order to increase the consumption of shellfish waste and realize the recycling of resources, the mussel coarse aggregate was used to replace the natural coarse aggregate. The mussel coarse aggregate concrete with the substitution rate of 15%, 30%, 45%, 60% and 100% was prepared, and its macro and micro properties were studied. The results show that the mussel coarse aggregate has a high content of inorganic calcium, but as a substitute for natural coarse aggregate, the physical properties of mussel coarse aggregate are weaker than that of natural coarse aggregate because the water absorption is 2.4%, the apparent density is 2 402 kg/m<sup>3</sup>, and the crushing index is 68.2%, which exceeds the requirements of the specification. With the increase of the replacement rate of mussel coarse aggregate, the mechanical properties of mussel coarse aggregate concrete decrease. The main reason for the deterioration of concrete performance is the defect area in the interface transition zone between mussel coarse aggregate and mortar. The mix design shows that when the replacement rate of mussel coarse aggregate is 30%, the mussel coarse aggregate concrete with C30 strength can be prepared.

**Key words:** mussel; concrete; mechanical property; microscopic morphology; microhardness

贝类是人们生活中重要的水产品. 据世界粮农组织统计, 全球每年贝类产品产量从 1950 年的 100 万 t 增加至 2019 年的 1 700 余万 t, 占水产养殖总量的 22%<sup>[1-2]</sup>. 中国每年消费的贝类产品居世界第一, 占世

界总量的 80.1%<sup>[3]</sup>. 贻贝作为主要的贝类产品之一, 在中国已形成规模性养殖, 2019 年中国贻贝养殖产量为 87 万 t, 占世界贻贝产量的 42%.

据统计, 每加工 1 kg 贝类, 将会产生 370~700 g

收稿日期: 2022-04-27; 修订日期: 2022-07-21

基金项目: 浙江省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才项目(2021R52035)

第一作者: 钟 何(1990—), 男, 安徽凤阳人, 浙江大学硕士生. E-mail: 18055997978@163.com

通讯作者: 赵羽习(1973—), 女, 浙江杭州人, 浙江大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: yxzhao@zju.edu.cn

废弃贝壳<sup>[4]</sup>.通常情况下,废弃贝壳被随意堆放或者作为固体垃圾焚烧掩埋,既占用了大量土地,浪费自然资源;又可能随着附着在贝壳上的残留腐肉或微生物盐解生成氨气、硫化氢等有害气体<sup>[5]</sup>,造成环境污染;还增加了政府和社会对固体废弃物的处置负担.

关于废弃贝壳的利用,国内外学术界已做了初步探索和尝试.在农业、化学等领域,利用贝壳的高吸附性,将其作为土壤调节剂、水域净化剂等原材料<sup>[6]</sup>,实践效果较好.但这些应用处理的贝壳量较少,且处理工艺较为复杂,难以大量消纳废弃贝壳.在土木工程领域,一些学者开始探索将废弃贝壳作为天然粗、细骨料的替代材料用于制备混凝土.研究表明<sup>[3,5,7-13]</sup>,随着贝壳骨料取代率的增加,混凝土坍落度、抗压强度及抗渗透性降低.但多数研究并未从微观的角度解释贝壳骨料混凝土性能劣化的原因,且所配混凝土等级均在C20以下.

本文以浙江舟山废弃贻贝壳为研究对象,将其破碎形成贻贝粗骨料,测试贻贝粗骨料的性能指标,制备贻贝粗骨料混凝土,并从宏观、微观2个角度探索贻贝粗骨料混凝土性能变化规律,为大量废弃贻贝壳的消纳处置提供基础试验参考.

## 1 试验

### 1.1 试验材料

天然粗骨料(NA)取自杭州周边地区,骨料粒径4.75~26.5 mm,连续粒级且级配良好;天然细骨料采用河砂,细度模数2.75,属于中砂;水泥选用山东鲁城水泥有限公司的42.5级基准水泥,表观密度约为3 150 kg/m<sup>3</sup>;减水剂为聚羧酸减水剂,淡黄色液体,减水率<sup>1)</sup>约为25%~35%,固含量约为40%,密度为1 080 kg/m<sup>3</sup>;拌和用水采用实验室自来水.

所用的贻贝壳取自浙江舟山,贻贝壳长边尺寸

为80~100 mm.由于原始贻贝壳尺寸较大且含有较多的贻贝腐肉等有机质及有害细菌,对试验人员安全、混凝土拌和及混凝土性能发展非常不利,故对原始贻贝壳进行清洗、杀菌(100℃下烘12 h)并人工破碎成粒径为5~20 mm的粗骨料,经晒干作为试验用贻贝粗骨料(MU).参照GB/T 14685—2011《建筑用卵石、碎石》,对贻贝粗骨料进行性能检测,得出:贻贝粗骨料中针片状颗粒含量高达95.2%,有机杂质含量为0.42%;其饱和面干吸水率为2.4%,略高于国家规范,且吸水过程主要集中在前10 min完成;其表观密度为2 402 kg/m<sup>3</sup>、压碎指标为68.2%,均超出GB/T 14685—2011规范,表明贻贝粗骨料自身物理力学性能较差.

### 1.2 贻贝壳微观性能测试

将破碎的贻贝壳修剪成边长不超过5 mm的薄片,然后粘在导电胶带上,经Cresstington 108Auto离子溅射仪喷金后,置于Quanta650FEG型场发射扫描电子显微镜(SEM)下观测其微观形貌,并利用配套的能谱仪(EDS),分析贻贝壳化学组成.

### 1.3 贻贝粗骨料混凝土配合比设计

参考JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》,对贻贝粗骨料混凝土进行配合比设计.采取降低水灰比及提高单方用水量2种措施,弥补混凝土流变特性及力学性能随贻贝粗骨料取代率增加而劣化的问题<sup>[3,14-15]</sup>.在前期试配基础上,经综合考虑,水灰比定为0.32;且在保持水灰比不变的前提下,贻贝粗骨料取代率每增加15%,单方用水量提高5 kg/m<sup>3</sup>;经试拌确定减水剂的合理掺量为0.8%.具体配合比见表1.

### 1.4 贻贝粗骨料混凝土宏观性能检测

参照GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》和GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,测量经二次搅拌法拌和

表1 贻贝粗骨料混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of mussel coarse aggregate concrete

Group	Replacement rate of mussel coarse aggregate/%	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )					
		Natural coarse aggregate	Mussel coarse aggregate	Natural fine aggregate	Cement	Water	Water reducing agent
MU-0	0	808.0	0	689.0	484.0	155.0	3.9
MU-15	15	675.0	119.0	678.0	500.0	160.0	4.0
MU-30	30	549.0	235.0	668.0	516.0	165.0	4.1
MU-45	45	425.0	348.0	658.0	531.0	170.0	4.3
MU-60	60	304.0	457.0	648.0	547.0	175.0	4.4
MU-100	100	0	726.0	619.0	594.0	190.0	4.8

1) 文中涉及的减水率、掺量及水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

的贻贝粗骨料混凝土坍落度;使用万能试验机,测试表1中6组混凝土3、7、28 d立方体抗压强度,所用试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ;选取配合比较好的试验组,分别测试该试验组及对照组MU-0的28 d劈裂抗拉强度(所用试块尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ )、轴心抗压强度及弹性模量(所用试块尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ )。贻贝粗骨料混凝土宏观性能测试结果选取3个试件的平均值。

### 1.5 混凝土细观结构观测

将混凝土养护至28 d龄期后,每组选取1个尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的试件,使用自动切割机以 $3\text{ mm/min}$ 的速度将试件切割成尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的薄片,并利用金相预磨抛光机对混凝土薄片进行打磨抛光,确保表面的平整和光洁。然后将薄片置于HVS-1000Z显微硬度计的显微镜下,观测混凝土的细观切面情况,并利用显微硬度计自带测量系统来测试贻贝粗骨料与砂浆界面过渡区的长度数据,每组数据取5个薄片的平均值。

将28 d劈裂抗拉强度试验后的MU-30组试件置于XTH320型计算机断层扫描仪样品架上,调节加速电压至 $80\text{ kV}$ ,扫描电流至 $80\text{ }\mu\text{A}$ ,对其进行X射线透射三维扫描,并依托CT PRO 3D软件对扫描数据进行三维重构,然后将数据导入VG Studio MAX 3.1配套软件中进行处理,得到混凝土切面裂缝发展情况。

### 1.6 贻贝粗骨料-砂浆界面力学性能测试

使用精密切割机,选取 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 薄片的中间区域,将其切割成尺寸为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的小试块,切割过程中应不间断地用水冲刷切面,以达到冷却和润滑作用。将切割后的混凝土小试块浸泡于无水乙醇溶液中,用以置换混凝土中的自由水,浸泡24 h后,将混凝土小试块从无水乙醇溶液中取出,置于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干,通过上述步骤,

停止混凝土小试块中的水泥水化。使用金相预磨抛光机对烘干后的小试块进行打磨抛光,确保试块表面平整、光洁。

将处理后的小试块置于HVS-1000Z显微硬度仪中,为了能够完整地描述界面过渡区显微硬度信息,测试试验力设置为 $0.1\text{ kg}$ ,设计压痕区尺寸为 $400\text{ }\mu\text{m}\times 300\text{ }\mu\text{m}$ ,在垂直骨料界面方向间隔 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、平行骨料界面方向间隔 $50\text{ }\mu\text{m}$ ,进行打点测试,如图1所示。每组试件分别选取15个位置进行测试,结果取平均值。

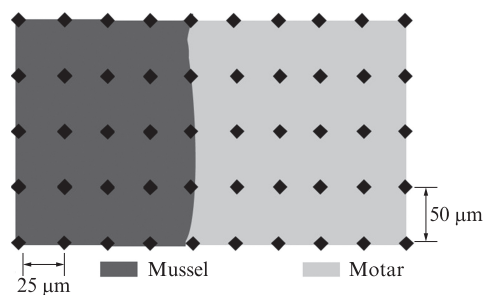


图1 显微硬度测试压痕点阵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of indentation dot matrix for microhardness test

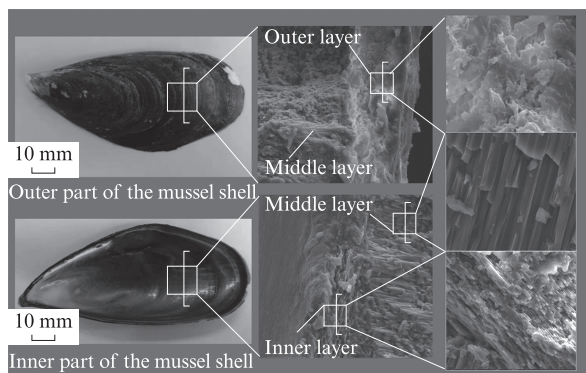
### 1.7 贻贝粗骨料-砂浆界面形貌观测

选取MU-30组的 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 薄片,使用精密切割机,将薄片切割成尺寸为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的小试块,而后按照1.6的方法终止水化并打磨抛光。将处理好的混凝土小试块经抽真空及离子溅射仪喷金处理后,放置于Quanta650FEG型场发射扫描电子显微镜下,观测贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区的微观形貌。

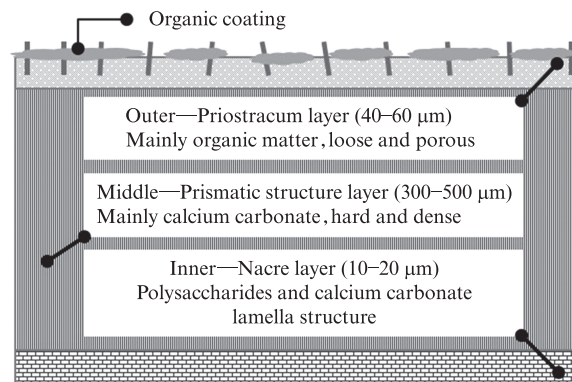
## 2 结果与分析

### 2.1 贻贝壳微观性能

图2为贻贝壳微观结构。



(a) Micromorphology



(b) Schematic diagram

图2 贻贝壳微观结构

Fig. 2 Microstructure of mussel shell

由图2可见,与其他贝类<sup>[4]</sup>相似,贻贝壳的结构可以分为3个部分:外层角质层,厚度约40~60  $\mu\text{m}$ ,中间层棱柱层,厚度约300~500  $\mu\text{m}$ ,内层珍珠层,厚度约10~20  $\mu\text{m}$ .

贻贝壳EDS分析见图3.由图3可见:贻贝壳外层碳元素含量较高,主要以有机质为主<sup>[4]</sup>;中间层钙

元素含量高达85.7%,主要以碳酸钙为主;内层钙、碳元素均有较高比例,主要是多糖、蛋白质与无机碳酸钙的混合物.由于贻贝壳外层角质层有机质含量较多、疏松多孔,内层珍珠层含有甲壳素等多糖物质,因此会阻碍贻贝粗骨料与砂浆的黏结<sup>[3]</sup>,可能会对混凝土性能造成较大的影响,将在后文阐述.

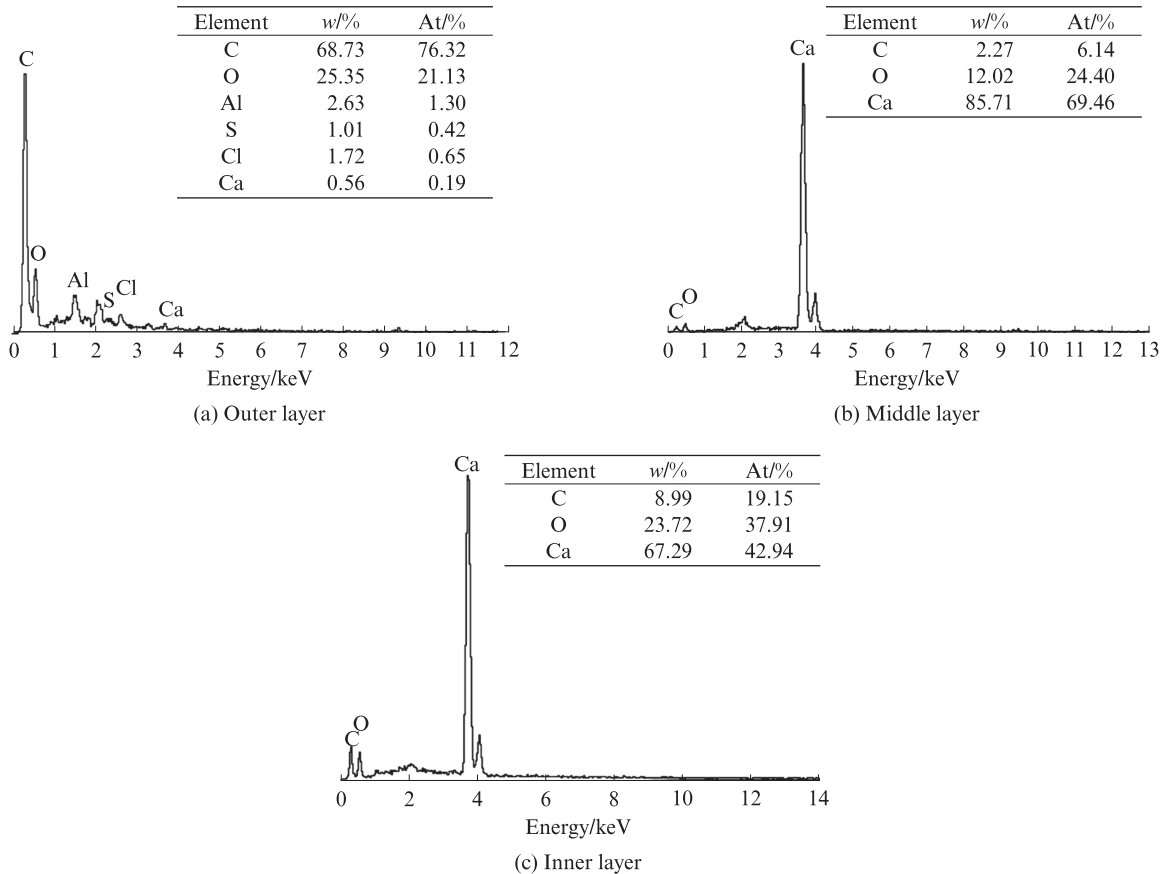


图3 贻贝壳EDS分析

Fig. 3 EDS analysis of mussel shell

## 2.2 贻贝粗骨料混凝土性能分析

### 2.2.1 流动性

经测试,随贻贝粗骨料取代率增加,贻贝粗骨料混凝土坍落度并未出现明显下降,均在160~185 mm范围内,且在拌和过程中贻贝粗骨料混凝土并未出现明显的泌水现象,流动性较好.这主要是因为,虽然贻贝粗骨料针片状的外形及较高吸水率(饱和面干吸水率为2.4%)会影响混凝土拌和物的流动性,但在进行混凝土配合比设计时,已经按照贻贝粗骨料取代率每提高15%,相应用水量提高 $5 \text{ kg/m}^3$ (水灰比保持不变)的标准考虑了坍落度损失问题.因此贻贝粗骨料混凝土坍落度并未随着骨料取代率的提高而大幅下降,也说明贻贝粗骨料混凝土的工作性能是可以合理的配合比设计,进行很好的控制.

### 2.2.2 宏观力学性能

贻贝粗骨料混凝土的立方体抗压强度如图4所示.由图4可见:贻贝粗骨料混凝土立方体抗压强度随着贻贝粗骨料取代率的提高而降低,对照组(MU-0组)28 d立方体抗压强度为65.4 MPa(对应强度等级C55);贻贝粗骨料取代率为30%的MU-30组28 d立方体抗压强度为38.8 MPa(对应强度等级C30),相比MU-0组下降40.7%;而贻贝粗骨料取代率为100%的MU-100组28 d立方体抗压强度为16.4 MPa,相比MU-0组下降74.9%.其主要原因为:贻贝粗骨料内表面珍珠层较光滑且含有甲壳素,与砂浆之间等黏结性能较差<sup>[3]</sup>;外表面角质层主要是有机物,与砂浆界面过渡区孔隙增多;加之贻贝粗骨料扁平且片状的颗粒形态成为水的渗透屏

障,增加了骨料下表面的水灰比,造成贻贝粗骨料与砂浆黏结部位性能劣化,从而导致混凝土强度降低.

由图4还可以看出,随着贻贝粗骨料取代率的增

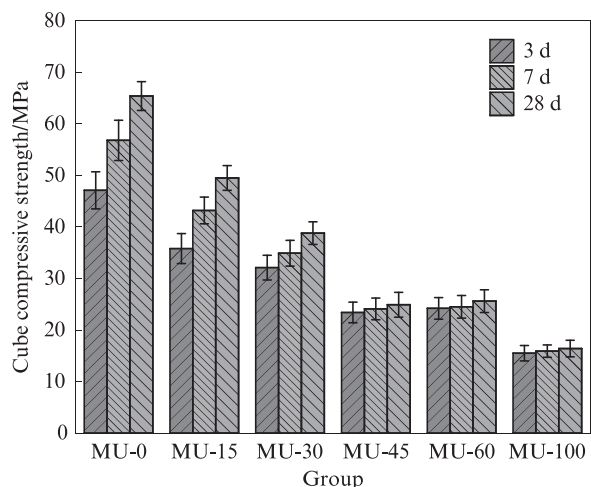


图4 贻贝粗骨料混凝土立方体抗压强度

Fig. 4 Cube compressive strength of mussel coarse aggregate concrete

表2 贻贝粗骨料混凝土的其他力学性能

Table 2 Other mechanical properties of mussel coarse aggregate concrete

Group	28 d cube compressive strength/MPa	28 d axial compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa	28 d splitting tensile strength/MPa
MU-0	65.4	44.3	347	5.8
MU-30	38.8	31.2	249	3.0

由表2可知:MU-30组28 d轴心抗压强度与28 d立方体抗压强度的比值为0.80,大于对照组(0.68);MU-30组28 d劈裂抗拉强度为3.0 MPa,相比于对照组28 d劈裂抗拉强度(5.8 MPa)下降了48.3%;与对照组相比,MU-30组28 d弹性模量降低了28.2%.主要原因是,贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区黏结性能较差,使得测试时骨料易发生错动,导致压板与试件之间摩擦力的影响高度减小,环箍效应不及天然粗骨料混凝土显著<sup>[16-17]</sup>;加之贻贝壳本身扁平而细长的颗粒形态缺陷,致使贻贝粗骨料混凝土孔隙含量较高,密实度较低,整体刚度较低.

### 2.2.3 微观性能

图5是MU-30组在显微硬度仪中的界面形貌.由图5可见,贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区既存在密实部分,也存在缺陷部分.对于5个试验组,每组选取5个尺寸为100 mm×100 mm×10 mm的薄片,利用显微硬度仪自带的测量系统,测试各薄片贻贝粗骨料-砂浆界面总长度 $L_i$ 及缺陷部分长度 $L_v$ ,每组数据取5个薄片的平均值,结果如图6所示.由图6可见,随着贻贝粗骨料取代率的提升,贻贝粗骨料混凝土 $L_i$ 及 $L_v$ 均提高,且 $L_v/L_i$ 基本保持不变,数值为0.65~

加,贻贝粗骨料混凝土立方体抗压强度随龄期增加而增长的趋势逐渐变缓,与3 d立方体抗压强度相比,对照组MU-0的7、28 d立方体抗压强度分别提高了20.6%、38.9%,而MU-30组7、28 d立方体抗压强度分别提高了8%、20%,MU-100组7、28 d立方体抗压强度分别提高了2.6%、5.8%.主要原因是,贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区有较多的缺陷区域(详细内容在2.2.3讨论),缺陷区域力学性能较弱,在混凝土受力时裂缝易贯穿此处;随着贻贝粗骨料取代率的增加,混凝土中单位体积内的缺陷区域也随之增加,而该区域力学性能随混凝土龄期增加并未提升,致使贻贝粗骨料混凝土立方体抗压强度增长趋势随着贻贝粗骨料取代率的提高而变缓.

根据立方体抗压强度实测数据,当贻贝粗骨料取代率为30%时(MU-30组),贻贝粗骨料混凝土强度等级可达C30,能够较好地满足试验预定目标及实际工程需求.下面将以MU-30组为试验组,研究贻贝粗骨料混凝土的其他力学性能,结果见表2.

0.75;贻贝粗骨料混凝土缺陷部分长度 $L_v$ 与28 d立方体抗压强度具有很好的线性关系,见图6(b),拟合曲线的相关系数 $R^2=0.904$ ,即随着 $L_v$ 的增加,28 d立方体抗压强度线性降低.这主要是因为,随着贻贝粗骨料取代率的提高,单位体积混凝土内贻贝粗骨料比例增加,贻贝粗骨料-砂浆界面 $L_i$ 及 $L_v$ 增大,而该区域的力学性能较弱,导致立方体抗压强度降低.

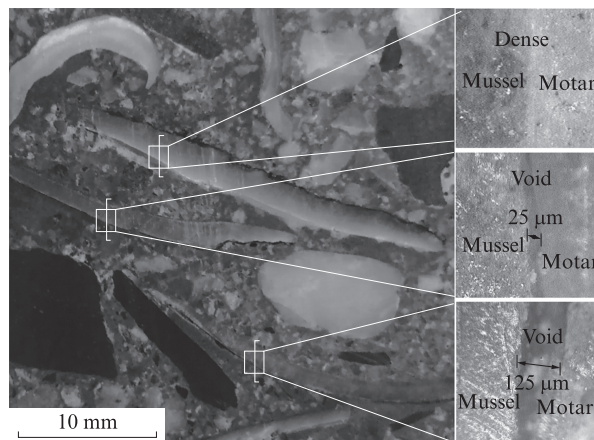
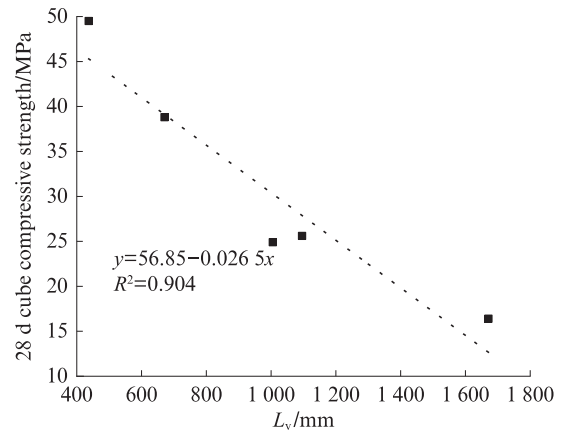
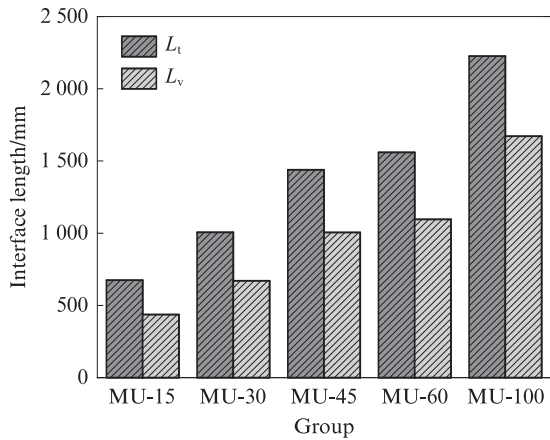


图5 MU-30组在显微硬度仪中的界面形貌

Fig. 5 Interface morphology of MU-30 group in microhardness tester



(a) Relationship between interface length and mussel coarse aggregate replacement rate

(b) Relationship between void length and 28 d cube compressive strength

图 6 贻贝粗骨料混凝土界面长度与骨料取代率、28 d 立方体抗压强度的关系

Fig. 6 Relationship between interface length and mussel coarse aggregate substitution rate, 28 d cube compressive strength

图 7 是 XCT 断层扫描下 MU-30 组 28 d 贻贝粗骨料混凝土劈裂受拉裂缝的发展情况. 图 7 中, 放大部分为贻贝粗骨料-砂浆界面 2 类典型的 SEM 微观形貌, 即贻贝粗骨料与砂浆黏结密实、缺陷的状态; 虚线部分为裂缝贯穿贻贝粗骨料-砂浆交界面, 方框位置为裂缝贯穿贻贝粗骨料. 由图 7 可以发现, 当贻贝粗骨料混凝土受力而产生裂缝时, 裂缝易在贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区及贻贝粗骨料处发展, 未发现裂缝直接贯穿天然粗骨料的情况. 这一现象说明在贻贝粗骨料混凝土中贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区及贻贝粗骨料是薄弱环节. 这是因为, 贻贝粗骨料压碎指标较高, 且其扁平而细长的颗粒

形态不利于力的传递, 加之贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区存在较多的缺陷区域, 致使这 2 处的力学性能较差<sup>[18-19]</sup>.

图 8 为 MU-30 组显微硬度测试结果. 其中图 8 (a) 为某一压痕点阵区域的显微硬度值热点图, 不同灰度代表不同显微硬度值. 由图 8(a) 可以发现, 贻贝粗骨料与砂浆之间存在明显的界面过渡区, 其长度为 75~100  $\mu\text{m}$ , 且该区域砂浆显微硬度值明显小于贻贝粗骨料区域和砂浆区域. 图 8(b) 给出了天然粗骨料-砂浆界面过渡区 (NA-M) 和贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区 (MA-M) 的显微硬度测试曲线, 图中 MA-M1、MA-M2、MA-M3 分别表示贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区缺陷宽度为 0  $\mu\text{m}$ 、0~100  $\mu\text{m}$  及大于 100  $\mu\text{m}$  这 3 种情况, 定义缺陷部分砂浆显微硬度值为 0. 由图 8(b) 可见, 贻贝粗骨料-砂浆界面缺陷区域显微硬度值曲线存在明显的阶梯陡降, 表明该区域的性能很差, 对其进行显微硬度测量已无实际意义, 故本节后续的贻贝粗骨料-砂浆界面显微硬度测试仅为密实区域的数据.

图 9 为贻贝粗骨料混凝土界面过渡区显微硬度统计图. 由图 9 可见, 不同贻贝粗骨料取代率下, 贻贝粗骨料混凝土中天然粗骨料-砂浆、贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区的显微硬度无显著差别, 但贻贝粗骨料混凝土中贻贝粗骨料-砂浆界面过渡区的显微硬度小于天然粗骨料-砂浆界面过渡区. 主要原因是, 贻贝粗骨料扁平且片状的颗粒形态成为水的渗透屏障, 增加了骨料下表面的水灰比, 致使界面过渡区的砂浆性能降低. 这表明贻贝粗骨料混凝土中贻贝粗骨料-砂浆的界面过渡区是其薄弱环节, 补充解释了贻贝粗骨料混凝土力学性能降低的原因.

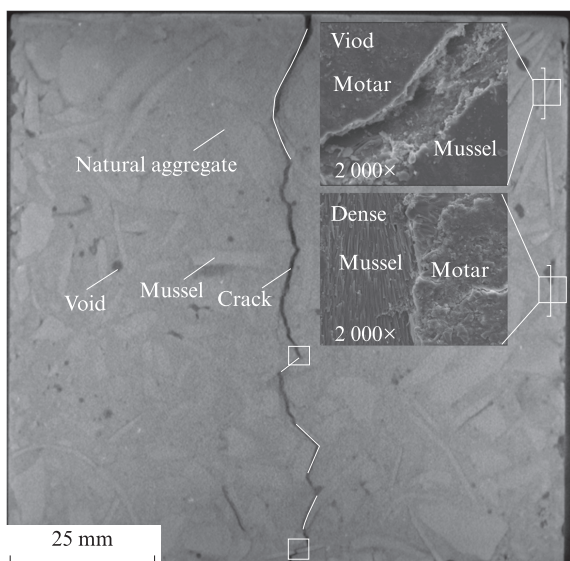


图 7 XCT 断层扫描下 MU-30 组 28 d 贻贝粗骨料混凝土劈裂受拉裂缝的发展情况

Fig. 7 Development of splitting tensile cracks in 28 d mussel coarse aggregate concrete of MU-30 group under XCT scanning

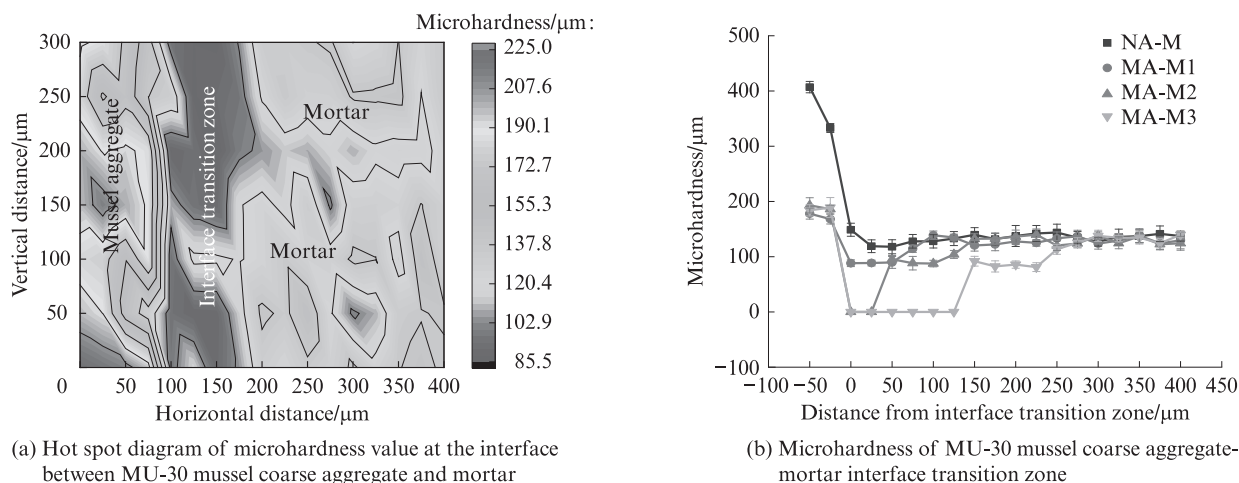


图8 MU-30组显微硬度测试结果

Fig. 8 Microhardness test results of MU-30 group

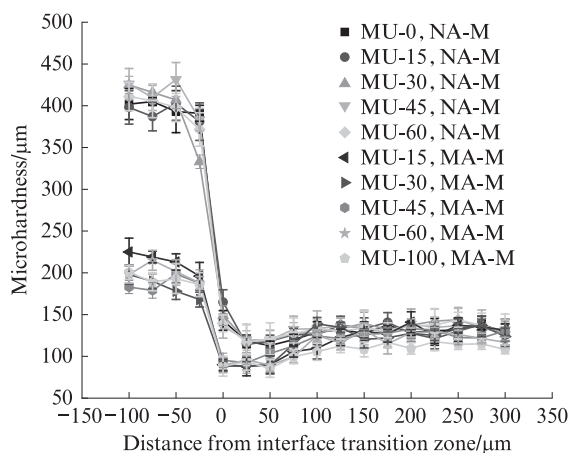


图9 贻贝粗骨料混凝土界面过渡区显微硬度

Fig. 9 Microhardness of mussel coarse aggregate concrete interface transition zone

### 3 结论

(1) 贻贝粗骨料含有较高比例的无机钙, 具备替代天然粗骨料的条件; 但由于其吸水率为 2.4%、表观密度为  $2402 \text{ kg/m}^3$ 、压碎指标为 68.2%, 均超出 GB/T 14685—2011 规范限值, 骨料性能较弱, 加之贻贝粗骨料细长且片状的颗粒形态, 不利于骨料受力, 因此采用贻贝粗骨料替代天然粗骨料, 会对混凝土性能造成较大的影响。

(2) 贻贝粗骨料混凝土立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量均随着贻贝粗骨料取代率的提高而降低。原因在于贻贝粗骨料与砂浆的黏结性能较差, 加之贻贝粗骨料扁平且片状的颗粒形态使其成为水的渗透屏障, 增加了骨料下表面的水灰比, 致使贻贝粗骨料混凝土性能降低。经配合比设计得出, 当贻贝粗骨料取代率为 30% 时, 可以制备出强度等级为 C30 的贻贝粗骨料混凝土。

(3) 贻贝粗骨料与砂浆界面存在缺陷区域, 缺陷部分长度随着贻贝粗骨料取代率的提高而增加, 且与混凝土 28 d 立方体抗压强度线性相关; 贻贝粗骨料与砂浆界面过渡区的非缺陷区域显微硬度亦小于天然粗骨料与砂浆的界面过渡区。

(4) 贻贝粗骨料混凝土中贻贝粗骨料-砂浆的界面过渡区及贻贝粗骨料是混凝土的薄弱环节, 这是由于贻贝粗骨料与砂浆界面过渡区缺陷情况严重, 且贻贝粗骨料自身的物理性能较弱、颗粒形态较差, 致使贻贝粗骨料混凝土在这 2 处力学性能较弱。

### 参考文献:

- [1] MO K H, ALENGARAM U J, JUMAAT M Z, et al. Recycling of seashell waste in concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162:751-764.
- [2] EZIEFULA U G, EZEH J C, EZIEFULA B I. Properties of seashell aggregate concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 192:287-300.
- [3] MARTÍNEZ-GARCÍA C, GONZÁLEZ-FONTEBOA B, MARTÍNEZ-ABELLA F, et al. Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139:570-583.
- [4] YAO Z, XIA M, LI H, et al. Bivalve shell: Not an abundant useless waste but a functional and versatile biomaterial[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014, 44(22):2502-2530.
- [5] FELIPE-SESÉ M, ELICHE-QUESADA D, CORPAS-IGLESIAS F A. The use of solid residues derived from different industrial activities to obtain calcium silicates for use as insulating construction materials[J]. Ceramics International, 2011, 37(8):3019-3028.
- [6] 孙会玲, 陈庆国, 刘梅, 等. 天然材料贻贝壳的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(13):4069-4071.

- SUN Huiling, CHEN Qingguo, LIU Mei, et al. Advances in application studies of natural mussel shells[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(13):4069-4071. (in Chinese)
- [7] CUADRADO-RICA H, SEBAIBI N, BOUTOUIL M, et al. Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells[J]. Materials and Structures, 2016, 49(5):1805-1816.
- [8] NGUYEN D H, BOUTOUIL M, SEBAIBI N, et al. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49:151-160.
- [9] KUO W T, WANG H Y, SHU C Y, et al. Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells[J]. Construction and Building Materials, 2013, 46:128-133.
- [10] WANG H Y, KUO W T, LIN C C, et al. Study of the material properties of fly ash added to oyster cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41:532-537.
- [11] YANG E I, KIM M Y, PARK H G, et al. Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5):758-765.
- [12] BALLESTER P, MÁRMOL I, MORALES J, et al. Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(4):559-564.
- [13] YOON H, PARK S, LEE K, et al. Oyster shell as substitute for aggregate in mortar[J]. Waste Management and Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 2004, 22(3):158-170.
- [14] MURUGAN S, NATARAJAN M, KARTHIK V, et al. Evaluation of durability properties of eco concrete made with cockle shell aggregates[J]. Materials Today:Proceedings, 2020, 8(17):509-518.
- [15] BAMIGBOYE G O, OKARA O, BASSEY D E, et al. The use of *Senilia senilis* seashells as a substitute for coarse aggregate in eco-friendly concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32:101811.
- [16] 陈宗平,徐金俊,郑华海,等.再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J].建筑材料学报,2013,16(1):24-32.  
CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):24-32. (in Chinese)
- [17] 李旭平.再生混凝土基本力学性能研究(I)——单轴受压性能[J].建筑材料学报,2007,10(5):598-603.  
LI Xuping. Study on mechanical properties of recycled concrete (I)-Behaviour under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5):598-603. (in Chinese)
- [18] 彭立港,赵羽习,曾维来,等.再生粗骨料混凝土界面参数研究[J].建筑材料学报,2022,25(7):737-743.  
PENG Ligang, ZHAO Yuxi, ZENG Weilai, et al. Interface parameter of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):737-743. (in Chinese)
- [19] 李晓光,王攀奇,张郁,等.再生骨料混凝土毛细管负压和界面过渡区研究[J].建筑材料学报,2022,25(6):572-576.  
LI Xiaoguang, WANG Panqi, ZHANG Yu, et al. Study on capillary negative pressure and interface transition zone of regenerated aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6):572-576. (in Chinese)