

Study on the Compressive Strength and Microscopic Properties of Foamed Ceramics on Concrete

Yue Zhao*, Honggang Lei#, Tieying Li

College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: 973965758@qq.com, #lhgang168@126.com

Received: Apr. 4th, 2020; accepted: Apr. 29th, 2020; published: May 6th, 2020

Abstract

In order to explore the effect of foamed ceramic lightweight aggregate on the compressive strength and microscopic properties of concrete, this paper replaces ordinary crushed stone aggregate with equal volume of 0%, 10%, 20%, 30% foamed ceramic lightweight aggregate. The apparent density, failure morphology, compressive strength and SEM of concrete at 3 d, 7 d, 14 d, and 28 d were examined, and the effects of the substitution rate and age of foamed ceramic light aggregate on the compressive strength and microstructure of concrete were investigated. The results show that: the apparent density decreases linearly with the increase of the substitution rate of foamed ceramics; as the substitution rate increases, the amount of foamed ceramic lightweight aggregate at the interface of concrete failure increases; the compressive strength of concrete increases with age; with the substitution rate increases, the compressive strength increases first and then decreases. According to SEM observation, the foamed ceramic lightweight aggregate enhances the adhesion between the interfaces and increases the hydration of the cement.

Keywords

Foamed Ceramic Lightweight Aggregate Concrete, Apparent Density, Compressive Strength, Damage Morphology

泡沫陶瓷对混凝土抗压强度及微观性能研究

赵越*, 雷宏刚#, 李铁英

太原理工大学土木工程学院, 山西 太原
Email: 973965758@qq.com, #lhgang168@126.com

*第一作者。

#通讯作者。

收稿日期：2020年4月4日；录用日期：2020年4月29日；发布日期：2020年5月6日

摘要

为了探究泡沫陶瓷轻骨料对混凝土抗压强度及微观性能的影响，本文通过0%、10%、20%、30%的泡沫陶瓷轻骨料等体积取代普通碎石骨料的方式，对3、7、14、28 d混凝土的表观密度、破坏形貌及抗压强度、SEM进行检测，探究泡沫陶瓷轻骨料取代率及龄期对混凝土抗压强度及微观结构的影响。结果表明：表观密度随泡沫陶瓷取代率的增加呈线性减小关系；随取代率增加，混凝土破坏界面泡沫陶瓷轻骨料数量增多；混凝土抗压强度随龄期呈增加的趋势；随取代率增加，抗压强度呈先增大后减小的趋势；根据SEM观察，泡沫陶瓷轻骨料增强了界面之间的粘结力，同时提高了水泥的水化程度。

关键词

泡沫陶瓷轻骨料混凝土，表观密度，抗压强度，破坏形貌

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着社会进步和生产方式的快速发展，可持续发展已经成为全人类共同关注的话题。我国高度重视，并将可持续发展确定为国家的重大发展战略。面对资源、能源短缺等问题，固体废弃物的资源化是实现环境减负型混凝土的主要途径，可以消除对生态环境的不利影响，同时节省了大量的原生资源[1] [2]。目前，发达国家和香港地区已将建筑垃圾开发再利用作为共同研究课题，国内外学者也取得了可喜成果[3]。泡沫陶瓷是一种新型的由众多气孔在空间通过各种方式排列而成的一类绿色陶瓷材料，由于其特殊的结构和性能，具有密度小、气孔率高、比表面积大以及导热系数低等特点，在多个领域得到了广泛的应用[4] [5]。本次主要为工厂对废弃泡沫陶瓷再生利用进行实验和探讨，同时提高企业的经济效益，防止废弃泡沫陶瓷填埋对生态环境的污染，减少天然砂石的开采，对我国资源和环境可持续发展具有重大意义。

本文以 C50 级普通混凝土为基准，通过适量泡沫陶瓷轻骨料等体积取代普通碎石骨料制作混凝土，试验中泡沫陶瓷轻骨料取代率分别为 0%、10%、20%以及 30%，测试不同取代率下混凝土的表观密度及抗压强度在 3、7、14、28 d 随龄期的变化规律，以探求一种保证泡沫陶瓷轻骨料混凝土性能的前提下，提高废弃泡沫陶瓷利用率的途径[6] [7] [8]。

2. 材性试验

本试验选用山西安晟科技有限公司生产的泡沫陶瓷，将泡沫陶瓷经专用破碎机破碎后过筛，选择 5~20 mm 连续级配的颗粒作为原料(如图 1)。废弃泡沫陶瓷经破碎后，表面有较多开口孔洞(如图 2)，同时比表面积增加，增大了水分向内部毛细吸附扩散的强度[9] [10] [11]，其颗粒具有轻质、隔热、隔音、保温性能好等特点。根据 GB/T 17431.2-2010《轻集料及其试验方法第 2 部分：轻集料试验方法》，选取一定量的泡沫陶瓷轻骨料，对其重要性能进行测定。经检测，所选泡沫陶瓷轻骨料的堆积密度为 151 kg/m³；表

观密度为 400 kg/m^3 ；筒压强度为 0.18 MPa ；1 h 吸水率为 35.4% 。



Figure 1. Foam ceramic light aggregate
图 1. 泡沫陶瓷轻骨料

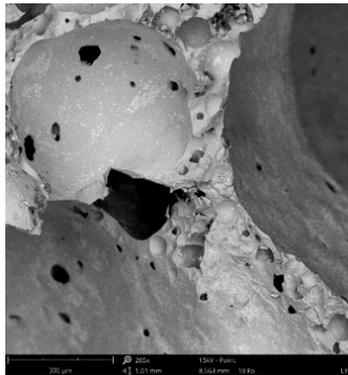


Figure 2. Foam ceramic light aggregate surface holes
图 2. 泡沫陶瓷轻骨料表面孔

3. 原材料及配合比

3.1. 原材料

- (1) 水泥：强度等级为 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥，其 28 d 的抗压强度为 48.7 MPa 。
- (2) 细集料：细度模数为 2.65 的优质机制砂，表观密度为 2620 kg/m^3 ，紧密堆积密度为 1630 kg/m^3 。
- (3) 粗骨料：粒径为 $5\sim 20 \text{ mm}$ 连续级配的碎石；泡沫陶瓷经破碎后筛分选取粒径为 $5\sim 20 \text{ mm}$ 连续集。
- (4) 轻骨料：堆积密度为 151 kg/m^3 ，表观密度为 400 kg/m^3 ，筒压强度为 0.18 MPa ，1 h 吸水率为 35.4% 。
- (5) 拌合水：采用自来水，符合 JGJ 63-2006《混凝土用水标准》的要求。
- (6) 外加剂：采用聚羧酸高效减水剂。

3.2. 配合比设计

选用泡沫陶瓷轻骨料配制混凝土，其配合比设计很大程度上要通过经验的积累和多次试验进行试配。本试验使用安晟科技有限公司的泡沫陶瓷轻骨料为轻粗骨料，采用“绝对体积法”设计了三种泡沫陶瓷轻骨料混凝土的配合比。一共设计 4 组混凝土，其中 S 组为无泡沫陶瓷轻骨料组，即基准混凝土；A、B、C 三组分别是泡沫陶瓷轻骨料等体积取代碎石(轻骨料占粗骨料的总体积的百分率)为 10% 、 20% 和 30% ，设计为单因素试验，具体配合比见表 1。

Table 1. Proportion of foamed ceramic lightweight aggregate concrete
表 1. 泡沫陶瓷轻骨料混凝土配合比

变量	组号	水泥/kg·m ⁻³	砂/kg·m ⁻³	石子/kg·m ⁻³	水/kg·m ⁻³	轻骨料/kg·m ⁻³	外加剂/kg·m ⁻³	水胶比(W/C)	砂/%
0%	S	400	724	1086	133	0	13.6	0.36	40
10%	A	400	657	977	133	10.86	10.0	0.36	40
20%	B	400	580	869	133	21.72	9.58	0.36	40
30%	C	400	507	760	133	32.58	10.0	0.36	40

3.3. 试件制作

试块选取尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块, 采用强制式搅拌机进行拌和。为防止泡沫陶瓷轻骨料上浮, 先将泡沫陶瓷轻骨料与粗细骨料均倒入搅拌机中搅拌 40 s, 使骨料之间的孔隙率尽量减小, 随后倒入水泥再搅拌 1 min, 使其在骨料中分布较均匀, 最后将减水剂加入水中拌和, 先加入一半的量进行搅拌, 然后把剩余水量均匀逐步加入拌合物中拌和 2 min 左右。在振动台振动 0.5 min 密实后用刮刀插实周边、抹平表面, 塌落度控制在(110~150 mm)范围内, 混凝土拌合物表面无泡沫陶瓷轻骨料单独外露, 全部被砂浆包裹。静置 24 h 后脱模, 拆模后立即放入温度为(20 ± 2)℃不流动的水中, 分别养护 3, 7, 14 和 28 d 时进行试验。

3.4. 试验方法

立方体试验参照 GB/T 50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》。分别养护 3, 7, 14 和 28 d 之后, 取出试件, 测试每个类别混凝土试件的质量和体积, 并计算其自然状态下的表观密度。混凝土抗压强度试验在 WAW-1000 kN 微机控制电液伺服万能试验机上进行, 试验应连续而均匀地加荷, 加荷速度为 0.5 MPa/s。当试件接近破坏而开始迅速变形时, 停止调整试验机油门, 直到试件破坏, 并记录破坏荷载。每个类别的试样, 均进行 3 组有效试验, 取 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值。根据规定, 当混凝土强度等级小于 C60 时, 对尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的非标准立方体试块测得的立方体抗压强度值乘以相应的尺寸换算系数 0.95。试验所得数据见表 2。

Table 2. Compressive strength and apparent density of foamed ceramic lightweight aggregate concrete cubes
表 2. 泡沫陶瓷轻骨料混凝土立方体抗压强度及表观密度

组号	W/B	f_{ck}/MPa				表观密度/kg/m ³
		3 d	7 d	14 d	28 d	
S	0.36	45.3	52.2	56.2	59.5	2412
A	0.36	46.9	54.2	58.5	63.5	2389
B	0.36	39.2	46.3	51.8	53.9	2348
C	0.36	34.7	40.2	44.6	48.8	2222

4. 试验分析

4.1. 表观密度

表观密度是指材料的质量与表观体积(实体积加闭口孔隙体积加开口孔体积)之比。根据表 2 的数据可知, S 组(不掺泡沫陶瓷轻骨料)混凝土的表观密度为 2412 kg/m³。相较于 S 组, A 组混凝土的表观密度为

2389 kg/m³, 降低了 0.9%; B 组混凝土的表观密度为 2348 kg/m³, 降低了 2.7%, C 组混凝土的表观密度为 2222 kg/m³, 降低了 7.9%。总的来说, 由于泡沫陶瓷轻骨料质量较轻, 随着其取代率的增加, 泡沫陶瓷轻骨料混凝土表观密度呈减小的趋势, 并且当取代率较大时表观密度降低较为明显。这表明, 掺入泡沫陶瓷轻骨料可以有效改善普通混凝土自重大的特点。

4.2. 破坏形态

由抗压破坏形貌图 3 可知, 当混凝土不掺泡沫陶瓷轻骨料(S 组)时, 如图 3(a)中立方体试件发生界面破坏, 断裂面凹凸不平, 大部分为粗骨料碎石与水泥砂浆拉脱形成, 其余为骨料之间的水泥砂浆被拉断而形成, 没有粗骨料被拉断现象; 当泡沫陶瓷轻骨料取代率为 10% (A 组)时, 图 3(b)的断裂面相对规整并与普通混凝土断裂破坏形式基本相同, 未发现碎石粗骨料被拉断现象, 断裂面出现少量泡沫陶瓷轻骨料; 当泡沫陶瓷轻骨料取代率为 20% (B 组)、30% (C 组)时, 图 3(c)、图 3(d)的破坏面不仅仅是骨料与水泥浆体之间界面的黏结破坏, 还有泡沫陶瓷轻骨料本身的断裂破坏, 且随取代率的增加, 断裂面内单位面积泡沫陶瓷轻骨料的断裂数量增多。

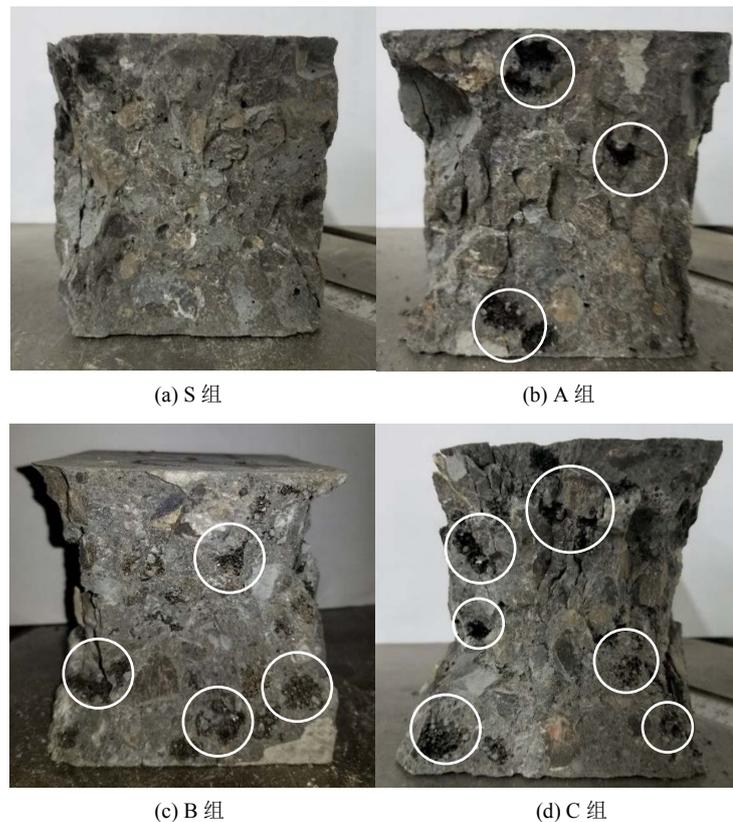


Figure 3. Compressive failure morphology of concrete
图 3. 混凝土抗压破坏形貌

对比 S 组可以看出, 通过观察混凝土立方体破坏界面, 当泡沫陶瓷轻骨料取代率提高时, 由于泡沫陶瓷轻骨料的筒压强度较低, 泡沫陶瓷轻骨料自身的破坏降低了泡沫陶瓷轻骨料混凝土的抗压强度。

4.3. 抗压强度

抗压强度是混凝土基本力学性能之一, 是建立合理的混凝土强度理论的基础。对于含有孔洞的泡沫

陶瓷轻骨料，它取代率的多少会影响其试块抗压强度的大小。

图 4 为相同取代率的泡沫陶瓷轻骨料混凝土在不同龄期的抗压强度。可以看出，随着水泥水化反应的进行，泡沫陶瓷轻骨料混凝土的抗压强度随着龄期呈增加的趋势。对于 S 组，随着养护龄期 3, 7, 14, 28 d 的增长，该组混凝土抗压强度分别增加 15%, 8%, 6%，其增长速率逐渐降低。相较于 S 组，A 组混凝土的抗压强度随着养护龄期 3, 7, 14, 28 d 的增长，该组混凝土抗压强度分别增加 16%, 8%, 8%，其增长速率与 S 组较为一致。B 组混凝土的抗压强度随着养护龄期 3, 7, 14, 28 d 的增长，该组试块抗压强度分别增加 18%, 12%, 4%，表现为在养护前期抗压强度增长较快，后期增长速率逐渐放缓。C 组试块的抗压强度随着养护龄期 3, 7, 14, 28 d 的增长，该组混凝土抗压强度分别增加 16%, 11%, 9%，其增长速率与 B 组一致。综上所述，4 组混凝土基本表现为在养护初期 3~7 d 时，其抗压强度增幅最为迅速，随着养护时间延长试块抗压强度增长速度逐渐降低，但总体抗压强度呈上升趋势。这说明，掺入泡沫陶瓷轻骨料的吸水返水作用可以为水泥水化过程持续提供养护用水，能够有效的提高混凝土内部水化程度，加速水泥的水化反应。

图 5 为相同龄期时不同取代率的泡沫陶瓷轻骨料混凝土的抗压强度。可以看出，随着泡沫陶瓷轻骨料取代粗骨料比例的增加，混凝土抗压强度出现了一个增幅以后逐渐降低。对比各组泡沫陶瓷轻骨料混凝土抗压强度可知，当试块养护 3 d 时，相较于 S 组，A 组混凝土抗压强度提高 3%，B 组降低 13%，C 组降低 23%。当试块养护 7 d 时，相较于 S 组，A 组混凝土抗压强度提高 4%，B 组降低 11%，C 组降低 23%。当试块养护 14 d 时，相较于 S 组，A 组混凝土抗压强度提高 4%，B 组降低 8%，C 组降低 21%。当试块养护 28 d 时，相较于 S 组，A 组混凝土抗压强度提高 7%，B 组降低 9%，C 组降低 18%。综上所述，当泡沫陶瓷轻骨料 10% 等体积取代碎石粗骨料时，混凝土抗压强度最优；取代率大于 10% 后，抗压

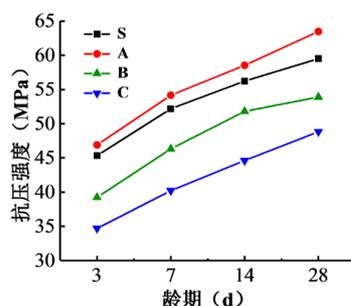


Figure 4. Compressive strength of concrete at different ages

图 4. 不同龄期混凝土抗压强度

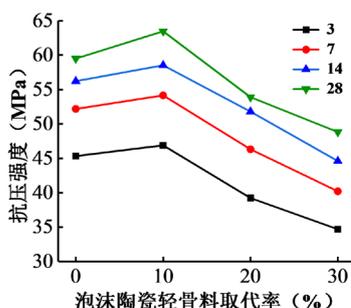


Figure 5. Compressive strength of concrete with different substitution rates

图 5. 不同取代率混凝土抗压强度

强度随其取代率的增加而降低。这说明, 泡沫陶瓷轻骨料在较小取代率范围内可以一定程度提高混凝土材料的抗压强度, 但随着取代率的提高, 会使混凝土抗压强度迅速降低。

4.4. 界面区形貌分析(SEM)

采用 SEM 对 28 d 普通骨料混凝土和泡沫陶瓷轻骨料混凝土中的骨料 - 水泥石界面微观形貌进行观察[12][13][14], 并将典型微区进一步放大至 3000 倍, 以便于观察界面区孔洞处水化产物, 结果见图 6、图 7。

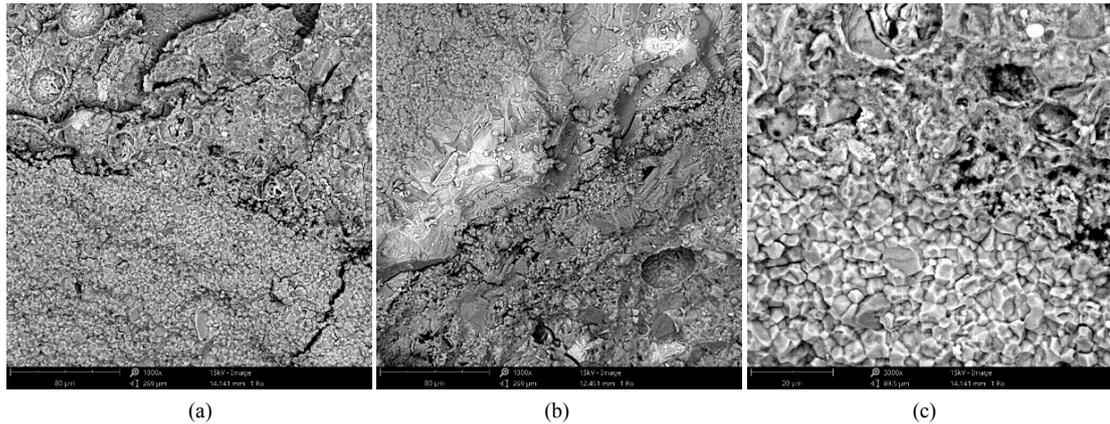


Figure 6. Morphology of interface area between ordinary aggregate and cement stone. (a) Interface area-1; (b) Interface area-2; (c) Hydration products

图 6. 普通骨料 - 水泥石界面区形貌。(a) 界面区-1; (b) 界面区-2; (c) 水化产物

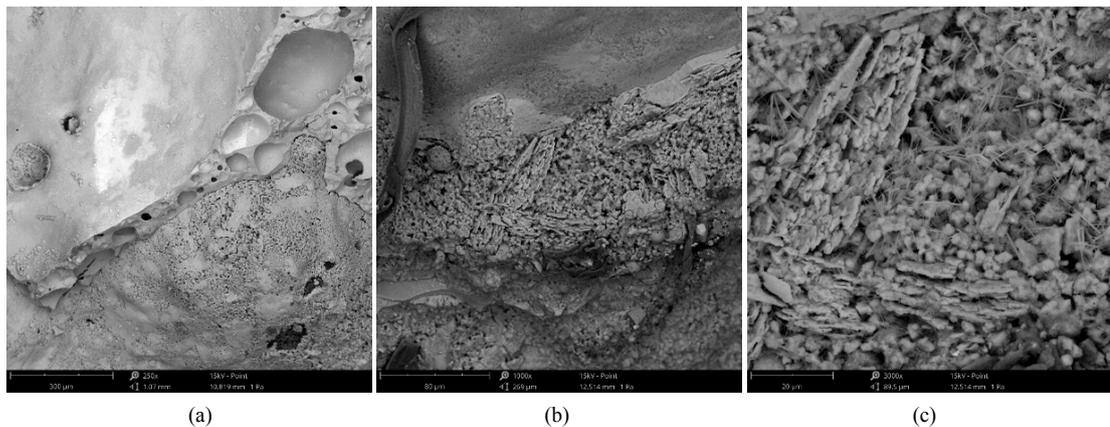


Figure 7. Morphology of foam ceramic light aggregate-cement stone interface area. (a) Interface area-1; (b) Interface area-2; (c) Hydration products

图 7. 泡沫陶瓷轻骨料 - 水泥石界面区形貌。(a) 界面区-1; (b) 界面区-2; (c) 水化产物

通过 SEM 观察, 如图 6(a)可知, 在骨料与水泥石的界面过渡区, 当受到荷载作用时, 将出现细小裂纹; 图 6(b)可知, 普通骨料 - 水泥石界面区结构比较疏松, 孔径较大, 这说明界面区是普通骨料混凝土中最为薄弱的区域。如图 6(c)可知, 界面区有粗大晶体富集, 且呈定向排列, 导致了界面区裂纹和孔洞较多。

通过 SEM 观察, 泡沫陶瓷轻骨料 - 水泥石界面结构特征明显有别于普通骨料 - 水泥石界面。如图 7(a)可知, 由于泡沫陶瓷轻骨料表面开孔较多, 泡沫陶瓷轻骨料的表面存在大量的开口孔洞, 导致水泥浆

能渗透到轻骨料的孔隙中,形成相互嵌套的界面结构,使二者的结合更为紧密,弥补了一部分轻骨料表面孔的初始缺陷,提高了泡沫陶瓷轻骨料外壳的密实度。如图 7(b)可知,骨料与水泥水化产物机械啮合在一起,界面区的结构致密,水泥浆与骨料界面区无裂纹。如图 7(c)可知,泡沫陶瓷轻骨料混凝土水化产物为纤维状,这只有在水泥水化反应程度较高的情况下才会生成,表明了泡沫陶瓷轻骨料中的水分具有内养护作用,使得水泥水化反应比较充分。这说明泡沫陶瓷轻骨料的供水吸水作用,使得界面的粘结性增强,提高了泡沫陶瓷轻骨料混凝土的耐久性。

5. 结论

通过对泡沫陶瓷轻骨料混凝土自然表观密度、破坏形态、抗压强度、SEM 等试验数据分析得如下结果:

(1) 随着泡沫陶瓷轻骨料取代率增加,相较于不掺泡沫陶瓷轻骨料的标准混凝土,泡沫陶瓷轻骨料混凝土的表观密度逐渐降低,表明基于泡沫陶瓷轻骨料轻质的特点,提高其取代率可以有效降低混凝土的表观密度。

(2) 随着泡沫陶瓷轻骨料取代率增加,相较于不掺泡沫陶瓷轻骨料的标准混凝土,泡沫陶瓷轻骨料混凝土的抗压破坏界面出现轻骨料断裂的现象逐渐显著,表明由于泡沫陶瓷轻骨料自身强度弱于天然骨料,使混凝土的抗压强度随之降低。

(3) 随着泡沫陶瓷轻骨料取代率增加,相较于不掺泡沫陶瓷轻骨料的标准混凝土,泡沫陶瓷轻骨料混凝土的抗压强度先增加后减小,当其取代率在 10%作用时,混凝土抗压强度达到最大。

(4) 根据 SEM 试验观察,相较于不掺泡沫陶瓷轻骨料的标准混凝土,泡沫陶瓷轻骨料的孔隙结构使其与水泥之间界面的粘结力增强,并且提高了水泥的水化程度。

参考文献

- [1] 彭团儿,王玉文,郭珍旭,刘广学,刘艳华,刘磊. 可用于制备发泡陶瓷的固废综合利用现状及研究进展[J]. 佛山陶瓷, 2020, 30(2): 1-9.
- [2] 周耀旭,梁丽敏. 绿色混凝土的发展与创新[J]. 建材发展导向, 2019, 17(4): 77-84.
- [3] 赵威,王竹,戴永刚,南宁. 陶瓷废料制备轻质保温泡沫陶瓷的研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2288-2294.
- [4] 刘阳,宋学君,孙挺. 泡沫陶瓷的绿色环保功能[J]. 中国陶瓷工业, 2008(4): 28-30.
- [5] 宋维东. 泡沫陶瓷的制备工艺及研究进展[J]. 中国粉体工业, 2019(5): 15-18.
- [6] 刘喜,吕贝贝,刘全威,吴涛. 高强轻骨料陶粒混凝土配合比及强度影响因素试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4): 847-852.
- [7] 贺东青,付晓宇,于蒙蒙. 麦秸纤维多孔陶粒混凝土基本物理性能的试验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 228-235.
- [8] 杨健辉,张哲,袁慧童,陈建中. 少量陶粒对普通混凝土物理力学性能的改善效果[J]. 混凝土, 2018(11): 122-126.
- [9] 李方贤,贺大东. 陶瓷废料对轻质多孔混凝土性能与孔结构影响研究[J]. 南方建筑, 2014(5): 117-119.
- [10] 王帅,杨明,朱涵,王东,刘飞. 破碎陶粒混凝土的试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(4): 111-114+101.
- [11] 陈伟,钱觉时,范英儒. 破碎陶粒表面处理与其对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2009(2): 17-20+26.
- [12] 曾峥. 改性陶粒混凝土力学性能及收缩性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [13] 董淑慧,张宝生,葛勇,郑秀华. 轻骨料-水泥石界面区微观结构特征[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 737-741.
- [14] 刘喜,吴涛,杨雪,魏慧,李鹏志. 纤维增韧高强轻骨料混凝土力学性能与微观结构[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 700-706+713.