**文章编号:**1007-9629(2024)07-0637-08

# 轻质高强黄土陶粒的制备及性能研究

### 熊鑫,吴智\*,姜鹏程,王健,阳鑫

(湖南工学院 材料科学与工程学院,湖南 衡阳 421002)

摘要:提出了一种以黄土为原材料,粉煤灰漂珠(简称漂珠)为成孔模板的陶粒制备新工艺.研究了漂 珠粒径和掺量对多孔陶粒结构和性能的影响.结果表明:在陶粒生料制备阶段,通过调整漂珠的粒径 和掺量即可达到对陶粒中孔隙结构进行构筑和调控的目的;本工艺制备的烧结黄土陶粒实现了低密 度、高强度及低吸水率三者兼顾,各项性能指标远优于GB/T 17431.1—2010《轻集料及其试验方 法 第1部分:轻集料》中的相关规定.

关键词:高强陶粒;孔结构设计;粉煤灰漂珠;黄土;筒压强度 中图分类号:TQ178 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.009

## Preparation and Properties of Lightweight and High-Strength Loess Ceramisite

XIONG Xin, WU Zhi<sup>\*</sup>, JIANG Pengcheng, WANG Jian, YANG Xin

(School of Materials Science and Technology, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China)

**Abstract:** A novel approach for preparing ceramisite using loess as the raw material and fly ash floating beads as the pore-forming template was put forward. The effects of particle size and quantity of fly ash floating beads on the structure and properties of ceramisite were investigated. The results show that the pore structure of ceramisite can be constructed and regulated by adjusting the size and amount of the beads during the preparation stage of ceramisite green bodies. The obtained sintered loess ceramisite achieves a balance between low density, high strength, and low water absorption rate, surpassing all performance standards outlined in GB/T 17431.1—2010 *Lightweight Aggregates and Its Test Methods* Part 1: Lightweight Aggregates.

**Key words:** high-strength ceramisite; pore structure design; fly ash floating bead; loess; cylinder compressive strength

轻质陶粒是一种人工制备的轻质原料,具有密度小、热导率低、强度高、耐酸耐腐蚀和抗冻抗震等特点,在石油压裂支撑剂、混凝土用轻质粗骨料和污水处理等领域有着广阔的应用前景.以陶粒为骨料制备的轻质高强混凝土具有质量轻和隔热保温性能好的优点,对于提高能源利用效率,降低建筑运行阶段碳排放具有重要意义.同时,轻质高强混凝土较高的比强度和优异的耐久性能,使其在高层建筑和大型桥梁等构筑物上也具有广阔的应用前景<sup>[14]</sup>.

"高温烧胀"法是制备陶粒的主流工艺.在高温 烧成阶段,陶粒中液相的形成和气体的产生是实现 陶粒"烧胀"的关键所在.高质量陶粒的制备往往需 要复杂的组成设计和精准的热处理制度控制,以保 证陶粒在高温烧成阶段的液相生成量、液相黏度、表 面张力与体系产气速率相匹配<sup>[58]</sup>.采用"高温烧胀" 工艺制备的陶粒普遍存在结构缺陷多、气孔结构参 数(如气孔形状、尺寸及分布)调控难度高等问题.陶 粒"轻"与"强"的矛盾突出,严重制约了轻质高强混

收稿日期:2023-08-24;修订日期:2023-11-29

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40165);湖南省应用特色学科材料科学与工程学科资助项目(湘教通[2022]351号)

第一作者:熊 鑫(1988—),男,湖北黄冈人,湖南工学院实验师,博士.E-mail:xwustx@163.com

通讯作者:吴 智(1986—),男,江西抚州人,湖南工学院副教授,硕士生导师,博士.E-mail:wuzhi0549@163.com

凝土的应用.

针对这一现状,国内外学者主要从原材料组成 设计和热处理制度调控方面进行高质量陶粒的制备. Tang等<sup>[5]</sup>以铜尾矿、赤泥和粉煤灰等为原材料,制备 了吸水率低于1%的高质量陶粒.Nguyen等<sup>[6]</sup>和Li 等<sup>[7]</sup>以各类固体废弃物为原材料,通过调控热处理温 度和保温时间实现了高质量陶粒的制备.Cheng等<sup>[8]</sup> 以铜尾矿和黏土为原料,通过添加适量SiC,高温制 备了高强度超轻陶粒.尽管有学者在实验室条件下 成功制备出高质量陶粒,但这些均离不开复杂的组 成设计和严格的温度控制,导致工业化生产难度 较大<sup>[9+12]</sup>.

粉煤灰漂珠(简称漂珠)是一种煤炭燃烧的副产物,具有高熔点和类球形空腔结构<sup>[13-15]</sup>.本研究提出 了一种利用漂珠作为成孔模板,以黄土为原材料的 新型陶粒制备工艺.研究漂珠粒径和掺量对多孔陶 粒物相组成(质量分数,文中涉及的组成、固含量等 均为质量分数)、微观结构和物理性能的影响规律, 探讨利用高熔点中空球作为成孔模板制备多孔陶粒 的可行性,为高质量多孔陶粒的大规模工业化生产 提供新思路.

### 1 试验

### 1.1 原材料

黄土取自衡阳市珠晖区某地,经干燥(110 °C、 24 h)、球磨及筛分处理,取粒径小于74  $\mu$ m(200 目) 的粉体备用;漂珠来自河北省灵寿县金矿加工厂,粒 径分别为2.54、0.85、0.63、0.17 mm;糖蜜产自山东鲁 营化工有限公司,固含量为48%.黄土和漂珠的化学 组成及X射线衍射(XRD)图谱见表1和图1.由表1 可知,黄土与粉煤灰漂珠的物相组成相近,主要由 SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>组成,黄土中Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O及TiO<sub>2</sub>的含量 较高.由图1可见,黄土的主要物相为石英、白云母和 蒙脱石,漂珠的主要物相为石英和莫来石.

表1 黄土和漂珠的化学组成

Table 1 Chemical compositions(by mass) of loess and floating be	ead
---	-----

										Unit:%
Material	$\mathrm{SiO}_2$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	CaO	$K_2O$	${\rm TiO}_2$	MgO	$Na_2O$	$\mathrm{P_2O_5}$	IL
Loess	60.62	24.07	9.11	0.09	3.13	1.38	1.09	0.14	0.10	0.27
Floating bead	59.02	26.43	5.55	1.53	2.83	0.98	1.30	1.73	0.20	0.43



Fig. 1 XRD patterns of loess and floating bead

### 1.2 试样制备

将漂珠作为成孔模板,以黄土为成陶粉体,先采 用盘式造粒机制备陶粒生料,再将其干燥和高温烧 结即可得到试验用烧结黄土陶粒.图2为新型轻质高 强陶粒制备工艺流程图.

固定漂珠粒径为0.85 mm,调整漂珠与黄土粉体 的配比,以研究漂珠掺量对烧结黄土陶粒性能的影 响.固定黄土粉体与漂珠的质量比为90:10,选取4种 粒径的漂珠,以研究漂珠粒径对烧结黄土陶粒性能 的影响.表3为试验配合比.

按照表3称取各原材料,启动盘式造粒机,向混 合盘中加入适量漂珠,并均匀喷洒糖蜜水溶液,其在 漂珠表面形成均匀液膜;接着缓慢加入相应比例的 黄土粉体,根据粉体在漂珠表面的包覆情况适时补 喷糖蜜溶液;重复上述操作,通过分批次交替加入漂 珠和黄土粉体,制备得到陶粒生料.在整个陶粒生料 制备过程中,糖蜜水溶液掺量为8%~10%.陶粒生 料在110℃下保温24.0 h充分干燥后,首先在电炉中 以10℃/min的升温速率升温至550℃,并保温1.0 h; 然后以5℃/min的升温速率继续加热至1180℃,并 保温1.5 h;最后随炉冷却.

### 1.3 陶粒性能检测与表征

按照GB/17431.2—2010《轻集料及其试验方法 第2部分:轻集料试验方法》,对烧结黄土陶粒的筒 压强度、吸水率、表观密度和堆积密度进行检测;采 用自动密度分析仪(AccuPyc 1340型)对烧结黄土陶 粒的真密度进行检测;采用XRD(Bruker D8 Advance型)对原材料及烧结黄土陶粒的物相组成进 行分析;利用扫描电子显微镜(SEM, TESCAN MIRA LMS型)和能谱仪(EDS, Xplore型)分析烧结



Solid waste powders

图2 新型轻质高强陶粒制备工艺流程图

Fig. 2 New preparation process of lightweight and high-strength ceramsite<sup>[16]</sup>

	表 3	试验配合比
Table 3	Mix pi	oportion of experiment

S 1.		w	(floating			
No.	$w(\text{loess})/\frac{9}{0}$	2.54 mm	0. 85 mm	0. 63 mm	0. 17 mm	$w(molasses)/\sqrt[p]{0}$
L5	95		5			8-10
L10-10	90	10				8-10
L10-20	90		10			8-10
L10-40	90			10		8-10
L10-80	90				10	8-10
L15	85		15			8-10
L20	80		20			8-10

黄土陶粒的显微结构;采用工业CT(GE Vtomex型) 对烧结黄土陶粒的孔隙结构特征进行检测.

#### 结果与讨论 2

### 2.1 气孔结构分析

图 3(a)为烧结黄土陶粒试样 L10-20 的 3D-micro CT重构图,图3(b)~(d)分别为图3(a)陶粒中任意一 点与X轴、Y轴和Z轴相垂直的二维切面图.图中灰色 部分对应陶粒的固相结构区域,灰色部分内部的黑色 区域为陶粒中的气孔.由图3可见,烧结黄土陶粒内部 的气孔多呈类球形、相互孤立且分布较为均匀.

3.0 mm



(a) 3D-micro CT reconstruction picture

to the Y-axis



(b) A two-dimensional plane perpendicular to the X-axis



(c) A two-dimensional plane perpendicular (d) A two-dimensional plane perpendicular to the Z-axis

图 3 烧结黄土陶粒试样 L10-20的 3D-micro CT 重构及二维切面图

Fig. 3 3D-micro CT reconstruction and two-dimensional section pictures of sintered loess ceramsite sample L10-20

图 4 为漂珠的 SEM 照片,其中图 4(b)为图 4(a) 的局部放大图.由图 4 可见:漂珠呈类球形结构,且在 其表面及凹陷处分布着大量粒径小于 10 μm 的小粒 度球形漂珠.

图 5 为采用不同粒径漂珠制备的烧结黄土陶粒的 SEM 照片.由图 5 可见:(1)烧结黄土陶粒中的气孔多呈类球形结构特征,且气孔间相互孤立.(2)陶粒中的气孔呈现2种孔径区间——一种孔径较大(图 5



(a) Floating bead

(a)中标示区域),尺寸与初始漂珠相近,这部分气孔 主要源于初始漂珠的空腔结构;另一种孔径较小(图5 (b)中标示区域),普遍呈孔径小于10μm的球形微孔, 主要分布在大气孔间的界面处.对比图4可知,这些球 形微孔与漂珠表面附着的球形空心微珠在尺度和形 状上均接近.由此可以推测,在陶粒生料制备阶段,初 始漂珠表面附着的球形空心微珠在摩擦力的作用下, 从漂珠上脱落下来,并均匀分散到陶粒生料之中.



g bead (b) Enlarged view of marked area in Fig.4(a) 图 4 漂珠的 SEM 照片 Fig. 4 SEM images of floating beads



(a) Loess ceramsite prepared by L10-20
 (b) Loess ceramsite prepared by L10-80
 图 5 采用不同粒径漂珠制备的烧结黄土陶粒的 SEM 照片
 Fig. 5 SEM images of sintered loess ceramisites prepared by floating beads with different particle sizes

### 2.2 物相分析

图 6 为采用不同掺量漂珠制备的烧结黄土陶 粒的 XRD 图谱.由图 6 可见:采用 4 种掺量漂珠制 备的烧结黄土陶粒试样物相组成基本一致,主要晶 相为莫来石、石英,还有少量方石英和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.与图 1 对比后发现:烧结黄土陶粒中石英相的衍射峰峰强 显著降低,而莫来石衍射峰峰强显著增加;且烧结 黄土陶粒中白云母和蒙脱石这些黄土原料中的初 始物相衍射峰消失.这表明,在高温热处理阶段,陶 粒生料中的白云母和蒙脱石均转变为莫来石,且其 中的 K<sub>2</sub>O 与 SiO<sub>2</sub>反应形成了硅氧玻璃相.

### 2.3 物理性能分析

图 7 为漂珠粒径及掺量对烧结黄土陶粒筒压 强度的影响.由图 7(a)可见,烧结黄土陶粒的筒压 强度随着漂珠粒径的减小呈先增后减趋势,当漂珠



floating beads

200 µm

图 6 采用不同掺量漂珠制备的烧结黄土陶粒的 XRD 图谱 Fig. 6 XRD patterns of sintered loess ceramisites prepared with floating beads with different contents

粒径为 0.85 mm 时陶粒的筒压强度达到最大值 12.5 MPa.原因如下:漂珠粒度越小,表观密度就越 大,漂珠粒度的减小意味着在陶粒中引入的孔隙总 量越少,即陶粒的总孔隙率随之减小;漂珠粒度直 接影响烧结黄土陶粒中孔隙的尺寸,在孔隙率相当 的情况下,材料中的孔隙越小,分布越均匀,材料的 承受载荷能力就越强;但当漂珠粒度太小时,陶粒



生料中漂珠发生团聚的可能性就会增大,从而导致 烧结黄土陶粒中出现结构薄弱部分,这显然会降低 陶粒承受荷载的能力.

由图 7(b)可见,随着漂珠掺量的增加,烧结黄 土陶粒的筒压强度呈下降趋势.值得注意的是,当 漂珠掺量为 20% 时,陶粒筒压强度仍然高达 8.3 MPa.





Fig. 7 Effect of particle size and content of floating bead on cylinder compressive strength of sintered loess ceramisites

图 8 为漂珠掺量对烧结黄土陶粒堆积密度、表观 密度和真密度的影响.由图 8 可见,漂珠掺量与烧结 黄土陶粒的松散堆积密度、紧密堆积密度及表观密 度近似呈反比例关系,而真密度变化不显著.这验证 了通过调节漂珠掺量来调控烧结黄土陶粒的密度等 级是可行的.



Fig. 8 Effect of floating bead content on packing density, apparent density and true density of sintered loess ceramisites

图 9 为漂珠粒径对烧结黄土陶粒堆积密度、表观 密度和真密度的影响.由图 9 可见:随着漂珠粒径的 减小,烧结黄土陶粒的松散堆积密度、紧密堆积密度 和表观密度均呈增大趋势;漂珠粒径对烧结黄土陶 粒的真密度影响不大.

图 10为漂珠掺量及粒径对烧结黄土陶粒1h吸 水率的影响.由图10可见:随着漂珠掺量的增加,烧 结黄土陶粒的1h吸水率呈轻微增大趋势,当漂珠掺 量为20%时,1h吸水率仍不超过3.5%;随着漂珠粒径的减小,烧结黄土陶粒的1h吸水率整体呈略微减 小趋势.不难发现,本研究制备的烧结黄土陶粒整体 表现出很低的吸水率.

### 2.4 讨论

表4列出了烧结黄土陶粒的物理性能及GB/T 17431.1-2010《轻集料及其试验方法第1部分:轻 集料》中对轻质高强陶粒的要求.由表4不难看出,







Fig. 10 Effect of content and particle size of floating beads on 1 h water absorption of sintered loess ceramisites

表 4 烧结黄土陶粒的物理性能 Table 4 Physical properties of sintered loess ceramisites

		This paper		GB/T 17431.1—2010				
Sample No.	Packing density/ (kg•m <sup>-3</sup> )	Cylinder compressive strength/MPa	1 h water absorbtion (by mass)/%	Packing density/ (kg•m <sup>-3</sup> )	Cylinder compressive strength/MPa	1 h water absorbtion (by mass)/%		
L5	819.0	14.1	2.85	500-600	4.0	≤10.00		
L10-10	699.7	6.6	4.11	600-700	5.0	≪10.00		
L10-20	796.7	12.5	2.97	700-800	6.0	≤10.00		
L10-40	756.0	11.3	3.08	800-900	6.5	≤10.00		
L10-80	766.7	8.3	2.89					
L15	745.3	10.9	3.06					
L20	740.0	8.3	3.17					

以黄土为原材料,以漂珠为成孔模板,利用本研究提出的陶粒制备工艺,可以制备出性能指标远超GB/ T 17431.1—2010的轻质高强陶粒.在相同堆积密度 等级条件下,本工艺制备的烧结黄土陶粒筒压强度 显著增大,吸水率显著减小.

由于漂珠与黄土的化学组成相近(表2),且漂珠 熔点高达1450℃,因此,在高温烧结过程中,漂珠对 于陶粒中产生的溶体有较好的抵抗作用,并能够维 持漂珠自身孔隙结构的稳定性,CT扫描和SEM结 果也证实了这一点.基于此,漂珠具备在高温下作为 成孔模板使用的能力,在陶粒生料制备阶段,通过调 节漂珠的粒径和掺量即可实现对烧结黄土陶粒气孔 结构参数的调控和设计.

图 11 为烧结黄土陶粒中典型漂珠衍生气孔的微 观结构照片及能谱分析.由图 11 可见:在气孔内壁普 遍存在大量晶须状结构,并且这些晶须状结构与基 体间结合紧密.能谱分析结果显示,点A处的主要元 素组成为Al、Si、O.结合图6的物相分析结果可知,位



(a) Typical floating beads-derived pores

于气孔内壁处的晶须状物相为莫来石,显然,这些晶须状莫来石结构的存在有助于提高陶粒的力学强度.



(b) Enlarged view of marked area in Fig.11(a)





图 12 为漂珠粒径对烧结黄土陶粒总气孔率及闭 口气孔率的影响.由图 12 可见:随着漂珠粒径的减 小,烧结黄土陶粒的总气孔率和闭口气孔率均呈减 小趋势;所有陶粒试样闭口气孔率与总气孔率的比 值均大于 93%,即陶粒中的气孔主要以闭口气孔为 主.在高温热处理过程中,陶粒中大量液相的生成不 仅可以加速烧结进程,还能够在陶粒的外表面形成1 层致密的釉层,减少与外界物质交换的通道;同时陶 粒内部的气孔多呈相互孤立分布状态.在这两者共 同作用下,制备出的黄土陶粒表现出极低的吸水率.

试验结果显示,采用漂珠作为成孔模板制备的 烧结黄土陶粒能够很好地平衡陶粒"轻"与"强"的矛 盾.原因主要包括3个方面:(1)良好的气孔结构特 征.烧结黄土陶粒中的气孔主要源于粉煤灰漂珠,这 些气孔多呈类球形结构,气孔间相互孤立,可以有效 延迟荷载条件下陶粒结构应力集中的出现,即能够 提高陶粒的承载能力,从而在"轻"的同时仍具有良 好的力学强度.(2)莫来石晶须对陶粒的增强作用.高 温热处理后,黄土陶粒的主晶相以莫来石为主,并且 莫来石多发育成晶须状,对于提高陶粒的力学强度







具有重要作用.(3)高温条件下液相的生成能够促进 陶粒烧结的作用.陶粒生料中除了SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>之 外,还存在较多的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>和MgO等 组分(表2),在高温条件下必然产生大量液相,这对 于加速陶粒烧结、提高陶粒烧结程度具有积极作用, 也会对陶粒的力学强度产生积极影响.

需要注意的是,当采用黄土作为成陶粉体时,高

温烧结阶段漂珠具有维持自身孔隙结构稳定的特点,这在很大程度上归因于漂珠与成陶粉体化学组成相近.当成陶粉体与漂珠组成存在较大差异时,漂珠孔隙结构是否能够在高温烧结阶段维持稳定还有待试验验证,另外,漂珠与成陶粉体界面的反应机制也需要深入研究.

### 3 结论

(1)以黄土为原料,粉煤灰漂珠为成孔模板,采 用盘式造粒机先制备陶粒生料,再将其高温烧结制 备出轻质、高强及低吸水率三者兼顾的高质量烧结 黄土陶粒.其各项性能指标均远超GB/T 17431.2— 2010《轻集料及其试验方法 第1部分:轻集料》中轻 质高强陶粒的要求.

(2)通过调节漂珠粒径及掺量可以实现对烧结 黄土陶粒气孔结构特征进行设计和调控的目的.

(3)采用本工艺制备的烧结黄土陶粒具有相互 孤立分布的类球形气孔结构特征,同时其表面还有1 层致密壳层,为高质量陶粒的制备提供了结构依据.

### 参考文献:

- [1] 王小娟,刘路,贾昆程,等. 陶粒泡沫混凝土的力学性能及吸能特性[J]. 建筑材料学报,2021,24(1):207-215.
   WANG Xiaojuan, LIU Lu, JIA Kuncheng, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of ceramsite foam concrete[J]. Journal of Building Materials,2021,24(1):207-215. (in Chinese)
- [2] 王发洲.高性能轻集料混凝土研究与应用[D].武汉:武汉理工 大学,2003.
   WANG Fazhou. Research on high performance lightweight aggregate concrete (HPLC) and its application[D]. Wuahn: Wuhan University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [3] ZHANG Y, LI H, ABDELHADY A, et al. Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266 :121074.
- [4] TIAN Y, SUN L J, LI H, et al. Laboratory investigation on effects of solid waste filler on mechanical properties of porous asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2021, 279 :122436.
- [5] TANG P, JIANG S C, CHEN W, et al. Self-foaming high strength artificial lightweight aggregates derived from solid wastes: Expansion mechanism and environmental impact [J]. Construction and Building Materials, 2023, 370 :130698.
- [6] NGUYEN H P, MUELLER A, NGUYEN V T, et al. Development and characterization of lightweight aggregate

recycled from construction and demolition waste mixed with other industrial by-products[J]. Construction and Building Materials, 2021,313:125472.

- [7] LIXG, HECH, LÜY, et al. Effect of sintering temperature and dwelling time on the characteristics of lightweight aggregate produced from sewage sludge and waste glass powder [J]. Ceramics International, 2021, 47:33435-33443.
- [8] CHENG Y, LI J R, QIN C, et al. Template-free route to fabricate extra-lightweight ceramsite with a single large pore structure[J]. Ceramics International, 2023, 49:36446-36457.
- [9] 王建民,李鹏飞,冯楚祥,等.陶粒轻骨料与普通混凝土的黏 结剪切性能[J].建筑材料学报,2022,25(7):700-707.
   WANG Jianmin, LI Pengfei, FENG Chuxiang, et al. Interfacial shear performance of ceramsite lightweight aggregate and normal concrete cold joint[J]. Journal of Building Materials,2022,25(7): 700-707.(in Chinese)
- [10] ZOU J L, XU G R, LI G B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, and MgO[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165 (1/2/ 3):995-1001.
- [11] LIXG, HECH, LÜY, et al. Utilization of municipal sewage sludge and waste glass powder in production of lightweight aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: 119413.
- [12] GONZÁLEZ-CORROCHANO B, ALONSO-AZCÁRATE J, RODRÍGYEZ L, et al. Valorization of washing aggregate sludge and sewage sludge for lightweight aggregates production [J]. Construction and Building Materials, 2016, 116 :252-262.
- [13] 李雪晨,李辉,白云,等.微波场下微珠对碱激发粉煤灰早期 力学性能的影响[J].建筑材料学报,2020,23(4):816-822.
  LI Xuechen, LI Hui, BAI Yun, et al. Effect of fly ash micro beads on the early age mechanical property of alkali activated fly ash materials under microwave field [J]. Journal of Building Materials, 2020,23(4):816-822. (in Chinese)
- [14] 钱潘悦,龚明子,黄斌,等.基于图像分析技术的粉煤灰颗粒 形貌表征[J].建筑材料学报,2023,26(4):443-448.
  QIAN Panyue,GONG Mingzi, HUANG Bin, et al. Morphology characterization of fly ash particles based on image analysis technology [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4): 443-448. (in Chinese)
- [15] 朱绘美,张煜雯,迂晨,等.微波养护阶段碱激发粉煤灰胶凝 材料的力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(6):558-564. ZHU Huimei, ZHANG Yuwen, YU Chen, et al. Mechanical properties of alkali-activated fly ash cementitious materials under microwave curing stages[J].Journal of Building Materials,2022, 25(6):558-564. (in Chinese)
- [16] 熊鑫,曾利群,吴智,等.基于固体废弃物的轻质高强陶粒及 其制备方法:115124364A[P].2022-09-30.
  XIONG Xin, ZENG Liqun, WU Zhi, et al. Lightweight and high-strength ceramic particles based on solid waste and their preparation methods:115124364A[P].2022-09-30. (in Chinese)