

Design and Preparation of Ultra-Lightweight Foam Concrete Based on Orthogonal Test

Yanjiao Xu, Zanzhong Yang, Lu Wang, Chuanlong Shan

School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: yzz@sdut.edu.cn

Received: Jan. 30th, 2020; accepted: Feb. 14th, 2020; published: Feb. 21st, 2020

Abstract

Using ceramic waste powder as the main raw material, ultra-lightweight foam concrete was prepared by physical foaming and autoclaved curing. Based on the orthogonal design test, the effects of early strength agent and water reducing agent and the key factors affecting the properties and porosity of the products were discussed, and the optimum mixture ratio of the materials was determined. The results showed that the key factors influencing the product performance are the ratio of cement, water to material and quick lime successively. Adding proper amount of water reducing agent and early strength agent is beneficial to improve the foam stability and control the thickening speed of slurry to form a uniform ultra-low bulk density porous body. Under the experimental conditions, the ultra-lightweight autoclaved foamed concrete with volume density of 190 kg/m³, compressive strength of 0.60 MPa and thermal conductivity of 0.043 W/(m·k) was prepared. The optimal mass ratio of basic materials was ceramic waste powder:cement:quicklime = 74:11:15, and the ratio of water to material was 0.86. Also, water-reducing agent accounting for 1.5% of cementations material and early strength agent accounting for 2% of the total material are added, respectively.

Keywords

Ceramic Waste Powder, Ultra-Lightweight Foam Concrete, Orthogonal Test, Physical Foaming, Autoclaved Curing

基于正交试验设计制备超轻质泡沫混凝土

徐艳娇, 杨赞中, 王 路, 山传龙

山东理工大学材料科学与工程学院, 山东 淄博
Email: yzz@sdut.edu.cn

收稿日期: 2020年1月30日; 录用日期: 2020年2月14日; 发布日期: 2020年2月21日

摘要

以陶瓷废渣粉为主要原料,通过物理发泡、蒸压养护制备超轻质泡沫混凝土。基于正交设计试验,讨论了早强剂、减水剂的作用及影响制品性能和气孔结构的关键因素,确定了物料最佳配合比。结果表明,影响制品性能的关键因素依次为水泥、水料比及生石灰;添加适量的减水剂和早强剂,有利于提高泡沫稳定性和调控浆料的稠化速度,形成孔径均匀的超低容重多孔体。实验条件下,按陶瓷废渣粉:水泥:生石灰 = 74:11:15、水料比为0.86进行配料,外加占胶凝材料1.5%的减水剂和占总物料2%的早强剂,制得体积密度 190 kg/m^3 ,抗压强度 0.60 MPa ,导热系数 $0.043 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$ 的超轻质蒸压泡沫混凝土。

关键词

陶瓷废渣粉,超轻质泡沫混凝土,正交试验,物理发泡,蒸压养护

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

泡沫混凝土是一种具有轻质、保温、防火不燃及抗震等优良性能的节能型非承重墙体材料,广泛用于现代建筑领域[1]。随着建筑物向高层和超高层发展,墙体材料轻量化、高强度和功能化的要求越来越高。研究表明,泡沫混凝土的体积密度每降低 100 kg/m^3 ,其导热系数将减小 $0.04 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$ [2]。针对未来极低能耗建筑的发展需求,研究开发容重小、强度高的低导热超轻质泡沫混凝土成为新型建材发展的必然趋势[3][4][5]。

泡沫混凝土多以尾矿砂、粉煤灰及硅质固体废弃物为主要原料,辅以水泥、石灰等胶凝材料,经物理发泡、自然养护,或以化学加气、蒸压养护制备而成[6][7]。已有的研究表明,化学加气因浇注稳定性差,难以形成超低容重($\leq 200 \text{ kg/m}^3$,气孔率高达90%以上)的多孔体[8]。物理发泡则先将发泡剂制成泡沫,再与硅钙质物料拌合成均匀浆体,浇注成型后经自然养护或蒸养而成多孔混凝土,易于形成高孔隙率型体[9][10]。但是,由于自然或蒸汽养护温度低,难于发生深度水化反应,主要生成结晶差的CSH(I)水化硅酸钙凝胶、水化铝酸盐及钙矾石等[11],后期易脱水引起体积缩小,导致墙体干缩变形和产生裂纹,制品存在着强度低、耐久性较差等问题,限制了此类材料的推广应用[12]。蒸压养护温度较高(通常高于托勃莫来石的转化温度, 174.5°C),可使物料发生充分水热反应,生成结晶较稳定的托勃莫来石等水化硅酸钙系列矿物,晶胶比得到合理匹配,使材料形成良好的物理性能和力学强度[11][13][14][15]。

目前,超轻质泡沫混凝土(容重 $\leq 200 \text{ kg/m}^3$)研究多以硅酸盐水泥、特种水泥为主要原料,制备成本较高[16][17]。本文以陶瓷废渣粉为主要原料,采用物理发泡、蒸压养护制备高强度超轻质泡沫混凝土,通过单因素分析和多因素正交试验,研究减水剂、早强剂的作用机制,以及水泥、生石灰及水料比等因素对制品性能的影响。

2. 试验部分

2.1. 原料与试剂

建陶生产过程中排放的陶瓷废渣粉,取自当地的渣粉堆场;胶凝材料分别为市售PO52.5普通硅酸盐水泥和生石灰(消化温度 60°C ,消化时间20 min, A-CaO为85%,180目);发泡剂选用市售动物蛋白类

发泡剂(泌水量 14 g/L·h, 沉降距 < 8 mm); 甲酸钙($C_2H_2O_4Ca \geq 98\%$)作早强剂; 萘系高效减水剂(β -萘磺酸钠甲醛缩合 $\geq 94\%$)作减水剂; 自制 WP-1 型添加剂, 用于稳泡和气孔结构调整。

陶瓷废渣粉粒度细小, 粒径主要分布在 1.783~37 μm 之间, $D_{50} = 11.96 \mu m$; 主要化学成分为 67.3% SiO_2 和 15.8% Al_2O_3 ; 结晶相为石英和少量莫来石, 含有一定量的玻璃相; 具有潜在水硬性和火山灰性, 28d 水泥胶砂强度比达 115% [18] [19]。

2.2. 实验方法

2.2.1. 超轻质泡沫混凝土制备

将陶瓷废渣粉、水泥、生石灰、早强剂、减水剂等按一定比例计量后混匀, 加入温水(50℃~60℃)搅拌(搅拌机 JJ-5, 沈阳天宏峻实验设备公司)成均匀的料浆; 同时将发泡剂与水按 1:30 稀释, 用发泡机(KT-M12, 山东临沂罗庄科泰建工设备厂)制取泡沫, 然后快速将泡沫掺入料浆中混匀, 注入三联模具(100 mm × 100 mm × 100 mm)中、刮平, 再在 75℃恒温水浴箱(CF-B 型, 沧州首科仪器设备有限公司)中预养护 6~8 h, 达到一定强度后脱模, 置入压蒸釜(YZF-2S, 无锡麦拓建材检测仪器公司)中, 于 180℃下恒温蒸压 6 h, 自然降至室温后, 取出样品备检。制备工艺流程如图 1。

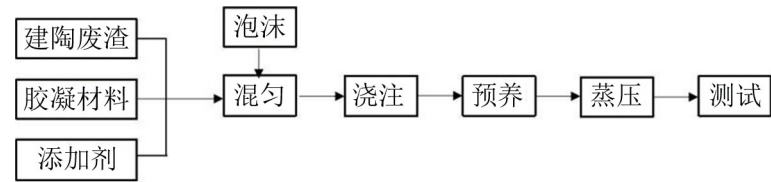


Figure 1. Preparation process of ultra-light autoclaved foam concrete
图 1. 超轻蒸压泡沫混凝土制备流程

2.2.2. 性能测试

参照 GB1196-2008《蒸压加气混凝土性能试验方法》及 JG/T266-2011《泡沫混凝土》, 对超轻蒸压泡沫混凝土的绝干体积密度、抗压强度及导热系数等进行测试。

2.2.3. 气孔结构表征

根据定量体视学原理, 应用计算机图像处理软件 Pro. Imaging 表征样品气孔结构[14]。

2.2.4. 正交试验

选择 4 水平 3 因素的 L16 正交试验, 取水泥掺量、生石灰掺量、水料比 3 因素进行实验研究(见表 1), 以制备超轻蒸压泡沫混凝土。将制品烘至绝干后, 分别测试其体积密度、抗压强度, 采用综合平衡法对各性能实验结果进行分析。

Table 1. Orthogonal test factors and levels
表 1. 正交试验因素与水平

水平	因素		
	水泥用量/(%) (A)	生石灰用量/(%) (B)	水料比(C)
1	7	15	0.84
2	9	17	0.85
3	11	19	0.86
4	13	21	0.87

3. 结果与讨论

3.1. 正交试验结果

3.1.1. 正交试验

为了考察各种材料的综合作用，在预研实验基础上进行了正交试验。以水泥、生石灰及水料比为考察因素，所得样品的体积密度和抗压强度为考察指标。所选择正交试验因素及水平列于表 2。

Table 2. Mix ratio design and orthogonal test results

表 2. 配合比设计及正交试验结果

编号	A	B	C	体积密度(kg/m ³)	抗压强度(MPa)
1#	7	15	0.84	186.7	0.19
2#	7	17	0.85	177.8	0.20
3#	7	19	0.86	194.3	0.22
4#	7	21	0.87	218.4	0.45
5#	9	15	0.85	205.6	0.37
6#	9	17	0.84	220.9	0.61
7#	9	19	0.87	190.4	0.31
8#	9	21	0.86	194.3	0.38
9#	11	15	0.85	234.4	0.80
10#	11	17	0.87	197.9	0.60
11#	11	19	0.84	201.2	0.60
12#	11	21	0.86	209.2	0.47
13#	13	15	0.87	182.4	0.37
14#	13	17	0.86	209.4	0.44
15#	13	19	0.85	200.8	0.41
16#	13	21	0.84	180.2	0.33
体积密度	K ₁	194.3	202.2	197.2	
	K ₂	202.8	201.5	198.3	
	K ₃	210.6	196.6	208.1	
	K ₄	193.2	200.5	197.2	
	极差 R	17.4	5.6	10.8	
抗压强度	K ₁	0.265	0.432	0.432	
	K ₂	0.417	0.463	0.362	
	K ₃	0.617	0.385	0.460	
	K ₄	0.388	0.408	0.432	
	极差 R	0.352	0.078	0.098	

Table 3. Bulk density analysis of variance
表 3. 体积密度方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
水泥 A	1329.680	3	36.744	9.280	*
生石灰 B	36.188	3	1.000	9.280	
水料比 C	441.188	3	12.192	9.280	*
误差	36.190	3			

Table 4. Analysis of compressive strength variance
表 4. 抗压强度方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
水泥 A	0.256	3	19.692	9.280	*
生石灰 B	0.013	3	1.000	9.280	
水料比 C	0.021	3	1.615	9.280	
误差	0.010	3			

根据各个实验所设定的物料比例配料，按照 1.2 中的工艺流程分别制样，并测定各组样品的体积密度和抗压强度。实验结果及方差分析分别列于表 2~4 中。

表 2 中列出的体积密度和抗压强度分别是 3 次重复测得的平均值。表 2 下半部分中，K1、K2、K3、K4 是各因素第 1、第 2、第 3、第 4 水平考察指标的平均值。R 是极差(即 K1、K2、K3、K4 中最大值与最小值之差)，反映出各因素对试验指标影响的主次顺序，即 R 越大，该列因素对考察指标的影响越大。表 3、表 4 表示的是体积密度、抗压强度方差分析结果，可对试验结果进行定量和定性分析判断。

3.1.2. 超轻蒸压泡沫混凝土正交试验数据及分析

由表 2 分析可知，超轻蒸压泡沫混凝土的体积密度随着水泥掺量的增加呈现先增加后降低的趋势，抗压强度变化趋势与体积密度相一致。水泥是泡沫混凝土初期强度的主要来源，当制品中掺入大量泡沫，过少的水泥用量导致坯体早期强度偏低，围绕气泡形成的孔间壁强度不足以克服坯体的重力而导致塌模；而水泥掺量过多时水泥水化消耗大量水，从泡沫中吸取水分导致气孔结构破坏，影响样品性能。超轻蒸压泡沫混凝土体积密度、抗压强度随生石灰掺量的增加在一定范围内呈波动趋势，生石灰在试验中主要有两方面作用，一方面用作调节料浆温度和 pH，起到碱激发作用；另一方面为后期蒸压过程提供有效氧化钙，与硅质原料中的 SiO₂ 作用生成水化硅酸钙，提高制品强度。超轻蒸压泡沫混凝土体积密度、抗压强度随水料比的增加呈现先增加后降低的趋势。因为水料比过低时，料浆流动性差导致阻力大，在泡沫混匀过程中易导致泡沫破裂损失，使制得的样品力学性能差；而水料比过高时，浆体流动度过高，粘度降低，使坯体凝结硬化缓慢，且严重时造成离析等现象，影响料浆稳定性。

影响超轻蒸压泡沫混凝土体积密度的主次顺序：A (水泥) > C (水料比) > B (生石灰)。根据体积密度方差分析表可知，A(水泥)和 C(水料比)对样品体积密度有显著影响。影响抗压强度的主次因素：A (水泥) > C (水料比) > B (生石灰)，根据方差分析可知水泥 A 对抗压强度的影响显著。

综合分析正交试验可知，水泥对体积密度和抗压强度的影响程度显著。在水泥掺量 11%时，体积密度均值 207 kg/m³，抗压强度最高，均值达 0.62 MPa。生石灰掺量 17%时，抗压强度最高，均值为 0.46 MPa，掺量为 15%时，抗压强度均值为 0.43 MPa，考虑成本等问题，生石灰添加量以 15%为宜。水料比为 0.86 时，抗压强度均值最高。综合以上分析，A3B1C3 为最优组合，即水泥掺量 11%，生石灰掺量 15%，水

料比为 0.86。由此制备的超轻质蒸压泡沫混凝土，可满足低容重、高强度的需求。

3.2. 单因素试验

实验以陶瓷废渣粉为基数，依据 2.1 正交试验结果，制备密度等级 B02 超轻蒸压泡沫混凝土，试验基础配比见表 5。在相同实验条件下，分别改变减水剂、早强剂掺量进行 2 次单因素对比实验，测试分析其体积密度、抗压强度及气孔结构。高效萘系减水剂添加量分别为胶凝材料的(0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%, 1.5%, 1.8%); 甲酸钙掺量分别为总物料的(0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%)。

Table 5. Proportion of ultralight autoclaved foam concrete foundation

表 5. 超轻蒸压泡沫混凝土基础配比

原材料	陶瓷废渣粉	水泥	生石灰	泡沫
掺量(g)	444	66	90	156

3.2.1. 减水剂掺量对制品性能及气孔结构的影响

实验使用减水剂为萘系高效减水剂，减水率 18%~25%，对泡沫混凝土的净浆流动性影响明显。图 2 表示超轻蒸压泡沫混凝土体积密度与抗压强度关系；图 3 表征超轻蒸压泡沫混凝土气孔结构，每组样品用两种表征方式，左侧“线条”处理过的样品可明显看出孔径大小分布及连通性，右侧“实心”处理的样品则立体感更强，图中深色部分表示气孔孔径，浅色表示孔间壁；表 6 列出制品性能数值。

在减水剂掺量低于胶凝材料 1.5%时气孔结构差，大孔、串并孔明显如图 3(b)，影响了样品抗压强度；随减水剂掺量增加，通孔、串并孔数量减少，抗压强度呈增长趋势；在减水剂掺量为胶凝材料的 1.5%时，样品抗压强度达到最大值 0.51 MPa，样品具有良好的气孔结构，气孔平均孔径为 1.1 mm。继续增加减水剂的掺量，样品抗压强度反而降低，且气孔平均孔径增大到 1.73 mm，有明显的贯穿孔、并孔等缺陷如图 3(e)。分析认为，这是因为过量的减水剂包覆在水泥颗粒表面，使水分子无法与水泥充分接触，影响水泥硬化；且料浆中仍存在部分自由水，对气泡稳定性影响显著，易使气泡串并而孔径分布不匀，严重时导致塌模。实验表明，减水剂添加量为胶凝材料 1.5%时，对制品形成良好的气孔结构和力学性能最为有利。

Table 6. Proportion of ultralight autoclaved foam concrete foundation

表 6. 超轻蒸压泡沫混凝土基础配比

减水剂掺量/%	体积密度/kg/m ³	抗压强度/MPa	平均孔径/mm	平均粒径级别数
0.6	207	0.38	1.54	-4.54
0.9	211	0.40	1.50	-4.46
1.2	219	0.41	1.10	-3.57
1.5	224	0.51	1.10	-3.57
1.8	204	0.33	1.73	-4.86

3.2.2. 早强剂掺量对制品性能及气孔结构的影响

早强剂可显著缩短泡沫混凝土凝结硬化时间，提高坯体早期强度，进而影响制品的结构和性能。根据 2.2.1 固定高效萘系减水剂掺量为胶凝材料的 1.5%，实验结果如图 4、图 5，分别表示不同甲酸钙掺量与样品体积密度、抗压强度及气孔结构的关系。图 5 表征超轻蒸压泡沫混凝土气孔结构，每组样品用两种表征方式，左侧“线条”处理过的样品可明显看出孔径大小分布及连通性，右侧“实心”处理的样品则立体感更强，图中深色部分表示气孔孔径，浅色表示孔间壁。表 7 为样品性能数据。

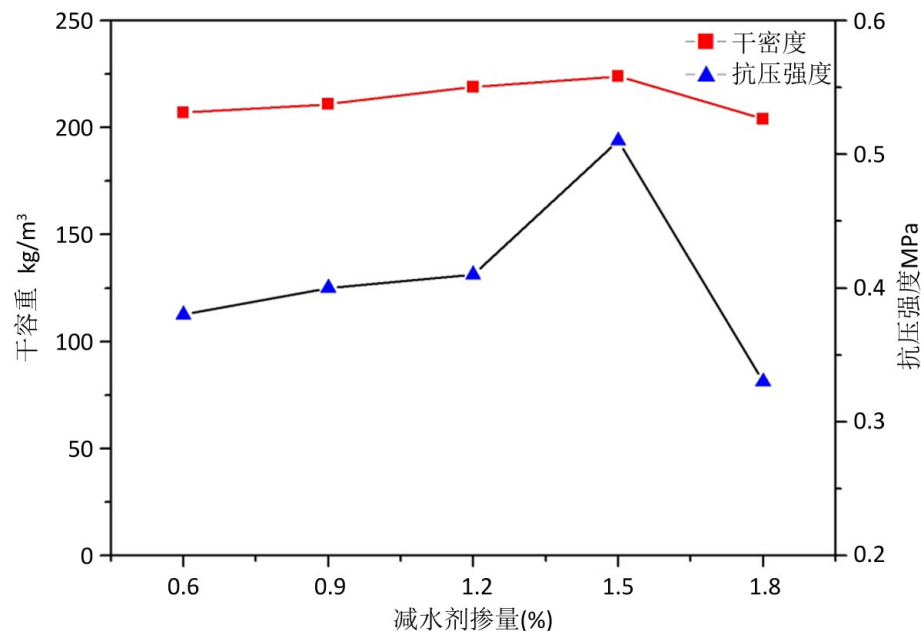


Figure 2. Effect of the amount of water reducing agent on bulk density and compressive strength

图 2. 减水剂掺量对体积密度和抗压强度的影响

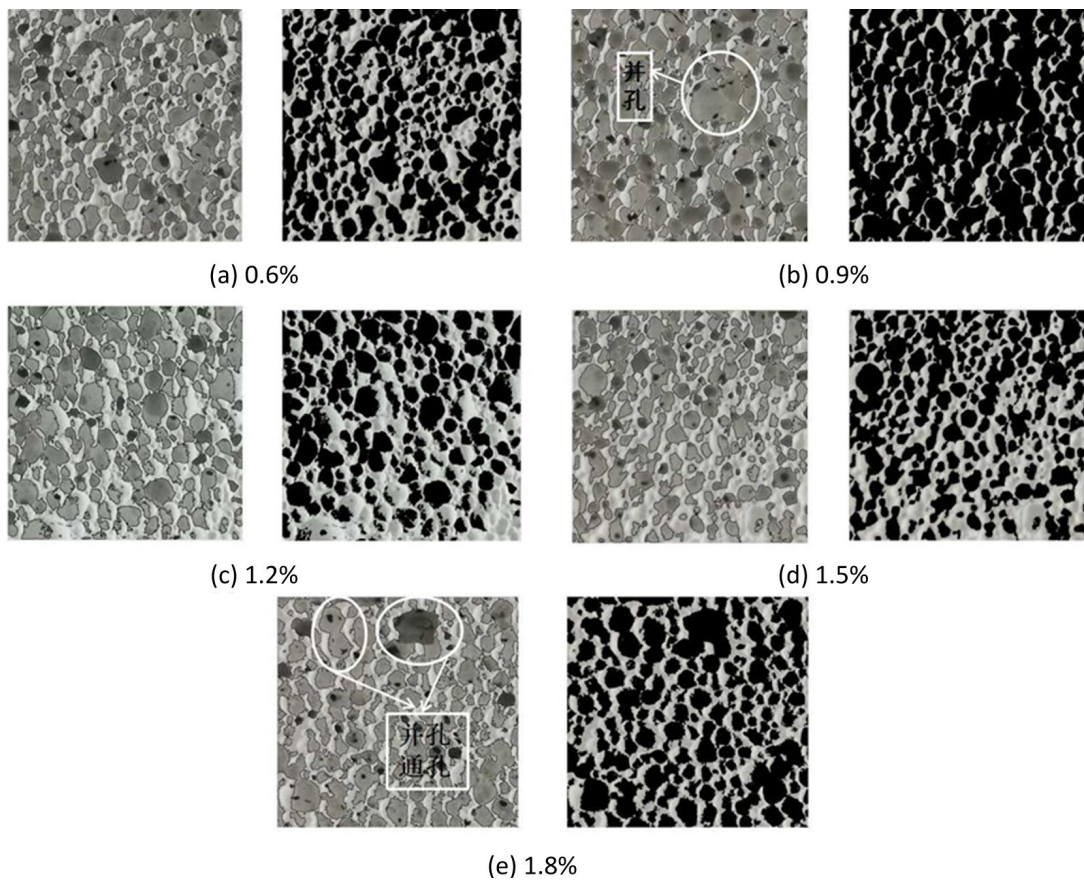


Figure 3. Effect of the amount of water reducing agent on the stomata structure

图 3. 减水剂添加量对气孔结构的影响

根据图 4、图 5 可知,随着早强剂添量增加,气孔结构趋于均匀。此时,尽管样品的容重随之降低,但其抗压强度反而有所增加。尤其是在早强剂掺量为 2%时,样品的气孔浑圆(图 5(d)),平均孔径 1.19 mm,体积密度为 190 kg/m³、抗压强度达 0.60 MPa,导热系数仅为 0.043 W/(m·k)。由于甲酸钙在水溶液中呈弱酸性,降低了体系 pH 值,加速了 C₂S 和 C₃S 的水化,使早期料浆的凝结硬化与泡沫的赋存状态相适应,从而保证了良好气孔结构的形成;但早强剂掺量过高时,会出现凝结过快而影响制品后期养护的强度[20] [21]。因此,早强剂掺量占总物料 2%时超轻蒸压泡沫混凝土性能存在最优值。

泡沫混凝土因含大量气泡,且泡沫内部和表面所处环境不同,在与胶凝材料混合过程中易使泡沫破损,导致泡沫混凝土抗压强度低。因此,可通过添加减水剂,提高料浆流动性,改善料浆无机坯体与有机泡沫相容性;添加早强剂加快胶凝材料凝结硬化,提高制品早期强度,保持泡沫在料浆中的稳定性,改善制品性能。综合上述实验结果,减水剂、早强剂掺量对超轻蒸压泡沫混凝土样品抗压强度、体积密度和气孔结构的影响均存在最优值,实验可知,在减水剂掺量占胶凝材料的 1.5%,早强剂掺量占总物料的 2%时,制得体积密度 190 kg/m³、抗压强度 0.60 MPa、导热系数 0.043 W/(m·k)的超轻蒸压泡沫混凝土。

Table 7. Effect of Early Strength Agent Addition on Porosity and Pore Size
表 7. 早强剂添加量对孔隙率及孔径的影响

早强剂掺量/%	体积密度/kg/m ³	抗压强度/MPa	平均孔径/mm	平均粒径级别数
0.5	230	0.50	1.40	-4.27
1.0	225	0.52	1.35	-4.11
1.5	220	0.50	1.31	-4.07
2.0	190	0.60	1.19	-3.80
2.5	176	0.28	1.92	-5.17

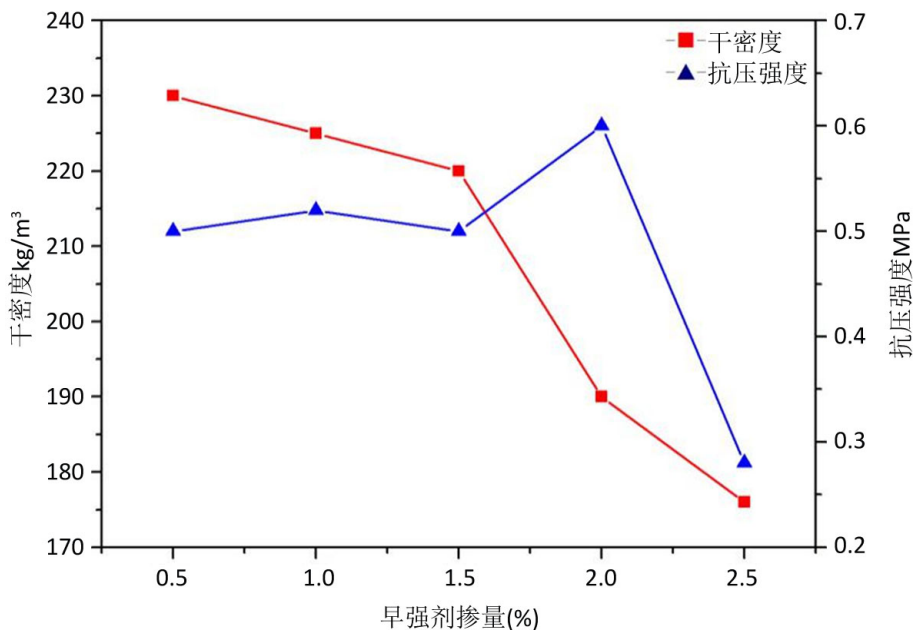


Figure 4. Effect of early strength agent content on bulk density and compressive strength
图 4. 早强剂掺量对体积密度和抗压强度的影响

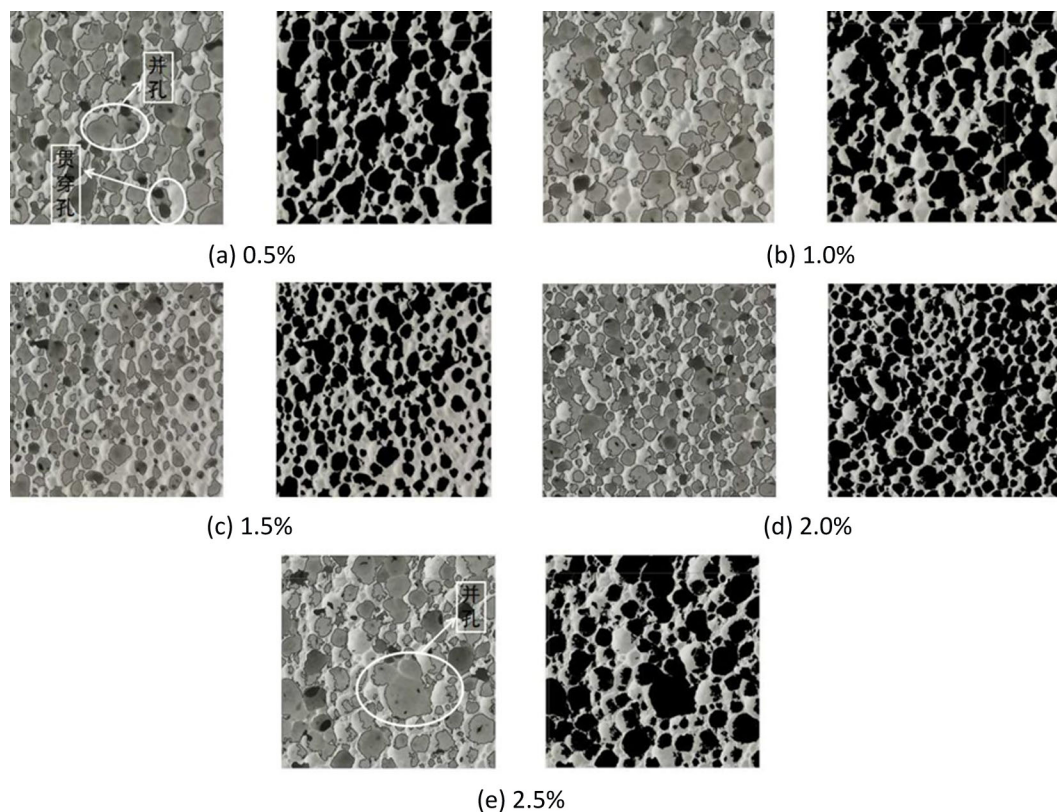


Figure 5. Effect of Early Strength Additive on Stomatal Structure
图 5. 早强剂添加量对气孔结构的影响

4. 结论

1) 正交试验结果分析表明, 水泥、生石灰和水料比掺量在适当范围内均可有效控制样品的体积密度, 改善制品体积密度及抗压强度。各因素对超轻蒸压泡沫混凝土制品体积密度和抗压强度的影响程度依次为: 水泥 > 水料比 > 生石灰, 最佳实验组合为: 水泥 11%、生石灰 15% 及水料比 0.86。

2) 萘系减水剂增加了无机基体分散性, 使料浆均匀包裹在气泡表面, 提高泡沫在料浆中的稳定性; 早强剂加快早期水泥中硅酸三钙水化, 增加料浆的早期强度, 有利于泡沫在无机浆体中稳定存在和均匀分布, 形成良好的气孔结构。

3) 按陶瓷废渣粉: 水泥: 生石灰 = 74:11:15、水料比为 0.86 配料, 另添加胶凝材料 1.5% 的萘系高效减水剂和总物料 2% 的甲酸钙早强剂, 制得孔径均匀, 容重为 190 kg/m^3 、抗压强度达 0.60 MPa, 导热系数仅 $0.043 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$ 的超轻质蒸压泡沫混凝土。

基金项目

山东省重大科技专项(2014GZX201008); 淄博市校城融合发展计划(2016ZBXC141); 淄博市创新发展重点项目(2016CX16A011)。

参考文献

- [1] 刘延杰. 基于泡沫混凝土的泡沫及其工程特性研究综述[J]. 科学技术创新, 2019(5): 122-123.
- [2] Collision, P.G. and Evans, J.R.G. (1994) An Assessment of Expressions for the Apparent Thermal Conductivity of Cellular Materials. *Journal of Materials Science*, 29, 486-498. <https://doi.org/10.1007/BF01162512>

- [3] 蔡娜. 超轻泡沫混凝土保温材料的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [4] Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., et al. (2001) New Lightweight Composite Construction Materials with Low Thermal Conductivity. *Cement and Concrete Composites*, **23**, 65-70.
- [5] 李猛, 黄寅生, 张少波, 等. 泡沫混凝土的研究进展及展望[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2016(1): 402-405.
- [6] 张静. 泡沫混凝土研究现状及发展应用[J]. 山西建筑, 2013, 39(5): 92-95.
- [7] 刘雪丽, 焦双健, 王振超. 发泡剂及泡沫混凝土研究综述[J]. 价值工程, 2017(28), 236-237.
- [8] 王跃奇. 浅谈蒸压加气混凝土气孔结构及其影响因素[J]. 绿色环保建材, 2017(6): 136.
- [9] 蒋俊. 超轻泡沫混凝土制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- [10] 泡沫混凝土[S]. JG/T266-2011.
- [11] 李庆繁. 应加大蒸压泡沫混凝土制品生产技术研究——对国家标准《墙体材料应用统一技术规范》强制性条文“墙体不应采用非蒸压加气混凝土制品”的解读[J]. 墙材革新与建筑节能, 2011(5): 26-33.
- [12] 张伟, 刘忠明, 许国平. 混凝土的自然养护[C]//土木工程建设管理: 2006年辽宁省土木建筑学会建筑施工专业委员会论文集: 2006卷. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社有限公司, 199-200.
- [13] Huang, Z., Zhang, T. and Wen, Z. (2015) Proportioning and Characterization of Portland Cement-Based Ultra-Lightweight Foam Concretes. *Construction and Building Materials*, **79**, 390-396.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.051>
- [14] 罗云峰, 杨展, 刘运江, 等. 蒸压泡沫混凝土砖隔热性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(6): 36-39.
- [15] Mestnikov, A., Semenov, S., Strokova, V., et al. (2016) Autoclave Foam Concrete: Structure and Properties. *Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction"*, Tomsk, Russia, 6-9 October 2015, 070010. <https://doi.org/10.1063/1.4937880>
- [16] 李奎, 马一平. 基于正交设计的超轻泡沫混凝土制备研究[J]. 混凝土世界, 2018(2): 74-82.
- [17] 王炜, 张云飞. 水泥品种和用量对泡沫混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰, 2013(2): 34-37.
- [18] 杨赞中, 王涵, 王永在, 等. 抛光砖废渣复合发泡法制备闭孔泡沫陶瓷[J]. 材料导报, 2017, 31(20): 122-126.
- [19] 赵田田. 陶瓷废渣制备自保温墙体材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 淄博: 山东理工大学.
- [20] 刘博. 外加剂对贝利特-硫铝酸钡钙水泥结构和性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学
- [21] 许凤桐, 陈瑞波, 顾轲. 甲酸钙早强剂在干粉砂浆中的应用[J]. 墙材革新与建筑节能, 2008(2): 70-72.