

# 固硫灰渣泡沫混凝土制备与性能研究

王 路, 杨赞中, 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9月2日; 录用日期: 2020年9月15日; 发布日期: 2020年9月22日

## 摘 要

以水泥、固硫灰、渣为主要原料, 采用物理发泡的方式制备泡沫混凝土。通过正交试验研究了固硫渣掺量、水泥掺量、水料比、泡沫添量对制品干密度及抗压强度的影响, 确定了最优的配合比方案。基于正交试验确定的配合比方案, 研究了固硫渣颗粒集配、养护制度对制品抗压强度的影响。通过优化固硫渣颗粒集配、采用40℃恒温养护的方式, 对制品抗压强度分别提升72%与59%。在实验室条件下, 按照固硫渣: 水泥: 固硫灰 = 50:35:15、水料比0.36、泡沫添加量1.6L进行配合比设计, 调整固硫渣颗粒集配为(6~0.3 mm):(0.3~0.125 mm):(<0.125 mm) = 65:25:15, 选用40℃恒温养护、养护14 d, 制备出A06级泡沫混凝土, 抗压强度达3.83 MPa, 固废利用率高达65%。

## 关键词

固硫灰渣, 泡沫混凝土, 正交试验, 物理发泡

# Preparation and Properties Study of Foamed Concrete with CFBC Ash/Slag

Lu Wang, Zanzhong Yang, Chuanlong Shan

School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong

Email: yzz@sdut.edu.cn

Received: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2020

## Abstract

Using cement, CFBC ash and slag as the main raw materials, foam concrete was prepared by physical foaming. Through orthogonal experiments, the effects of CFBC slag content, cement content, water-to-material ratio and foam content on the dry density and compressive strength of the

product were studied, and the optimal mix ratio scheme was determined. Based on the mix ratio scheme determined by the orthogonal experiment, the influence of the combination and curing system of sulfur-fixing slag particles on the compressive strength of the product was studied. By optimizing the distribution of solid sulfur slag particles and adopting the method of 40°C constant temperature curing, the compressive strength of the products is increased by 72% and 59% respectively. Under laboratory conditions, we design the mix ratio according to the CFBC slag: cement: CFBC ash = 50:35:15, the water to material ratio 0.36 and the foam addition amount 1.6 L, and adjust the concentration of CFBC slag particles to (6 - 0.3 mm):(0.3 - 0.125 mm):(<0.125 mm) = 65:25:15, choose 40°C constant temperature curing for 14 d, prepare A06 foam concrete. The compressive strength is 3.83 MPa, and the solid waste utilization rate is as high as 65%.

## Keywords

CFBC Ash/Slag, Foam Concrete, Orthogonal Test, Physical Foaming

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

随着我国墙体材料改革与建筑节能政策的推行, 泡沫混凝土作为一种节能型建筑材料, 其开发和应用受到广泛的重视[1] [2] [3]。尽管目前国内外对现浇泡沫混凝土的研究已经取得了一些进展, 但依然存在诸多问题[4] [5] [6]。诸如: 原材料选用大量消耗水泥和矿产资源不仅造成制备成本提高、资源浪费, 而且对制品性能也有不好的影响, 主要表现在开裂、体重大等问题; 以固废为生产原料, 能够有效降低成本, 但是制品性能不佳; 生产制备工艺受环境影响, 导致制品性能浮动较大, 不利于工艺的推广使用。因此, 亟需研发容重低、强度高、使用性能好、成本低的泡沫混凝土制备技术。

随着能源资源紧张以及环保排放标准越来越严苛, 循环硫化床燃煤技术得到普及, 固硫灰渣的排放量也越来越大, 但是其资源化利进程缓慢[7]-[12]。固硫渣经过高温煅烧具有优异的力学性能, 其酥松多孔的结构, 使得炉渣相较于砂石具有更低的密度, 采用固硫渣代替砂石应用于泡沫混凝土的制备能够显著降低材料的密度。固硫灰应用与传统混凝土的制备易造成制品体积安定性不良的问题。泡沫混凝土多孔的结构能够有效的克服固硫灰体积膨胀造成的制品安定性不良的问题, 固硫灰代替部分水泥, 能够有效的降低生产成本, 同时对制品的性能影响不大[13] [14]。

基于目前行业发展现状, 本论文以固硫渣代替砂石起骨料的作用, 固硫灰部分代替水泥起胶凝材料的作用, 采用物理发泡的方式制备 A06 级泡沫混凝土。通过多因素正交试验确定最优的配合比方案, 在此基础上对制备工艺进行改进, 研究关键共性技术, 解决制备过程中的科学及工艺问题; 由此, 既可为低成本制备高性能泡沫混凝土材料提供理论和技术支持, 又可为固硫灰渣资源材料化高附加值利用探寻一条有效的途径。

## 2. 试验

### 2.1. 原料与试剂

固硫灰、渣来自淄博周边电厂, 水泥为山东铝业集团生产 42.5#普通硅酸盐水泥, 自配复合外加剂, 减水剂选用市售聚羧酸高效减水剂; 自配动物蛋白类发泡剂, 稀释倍数 40 倍、发泡倍数 20 倍, 泌水量

5.6 g/(L·h), 泡沫密度 50 g/L。材料的具体信息如表 1~4 所示。

**Table 1.** 42.5# cement physical properties

**表 1.** 42.5#水泥物理性能

比重/(g/cm <sup>3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> /g)	凝结时间/min		水泥安定性	抗折/MPa		强度/MPa	
		初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
3.18	0.66	205	280	良	4.6	7.8	28.9	47.9

**Table 2.** Physical properties of sulfur-fixing ash

**表 2.** 固硫灰物理性能

比重(g/cm <sup>3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> /g)	含水率/w%	烧失量/w%	粒度分布			
				D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	离散度
2.2	1.41	3	3.52	5.56	28.5	90.3	2.97

**Table 3.** Physical properties of sulfur-fixing slag

**表 3.** 固硫渣物理性能

比重(g/cm <sup>3</sup> )	固硫渣原始粒度集配/w%					
	>6 mm	6~2 mm	2~0.3 mm	0.3~0.125 mm	0.125~0.088 mm	<0.088 mm
1.1	3.90	19.25	31.08	21.76	7.31	16.7

**Table 4.** Chemical composition of cement and sulfur-fixing ash

**表 4.** 水泥与固硫灰化学组成

化学组成/w%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Loss
固硫灰	32.1	28.7	12.2	1.29	18.2	0.658	0.795	3.55	3.52
42.4#水泥	21.5	10.3	2.66	3.16	52.6	0.328	0.674	3.22	2.35

## 2.2. 正交试验配合比设计

以固硫渣代替砂石起到骨料的作用, 以固硫灰代替水泥起到辅助胶凝材料的作用, 通过自配外加剂改性, 采用物理发泡的方式制备泡沫混凝土。控制外加剂添量不变, 改变固硫渣、水泥的配比, 用固硫灰的添加量控制干基料的总质量不变。改变泡沫的添加量得到不同容重的泡沫混凝土制品。以固硫渣用量、水泥用量、水料比、泡沫添加量为 4 个因素, 每个因素取四个水平设计 L<sub>16</sub> (4<sup>4</sup>) 正交试验表, 正交试验因素与水平如表 5 所示。

**Table 5.** Orthogonal test factors and levels

**表 5.** 正交试验因素与水平

水平	因素			
	A (固硫渣用量/w%)	B (水泥用量/w%)	C (水料比)	D (泡沫添加量/L)
1	44	33	0.341	1.6
2	46	35	0.349	1.7
3	48	37	0.357	1.8
4	50	39	0.365	1.9

### 2.3. 泡沫混凝土制备工艺

为了保证料浆的流动性成功制备出泡沫混凝土制品，通过添加减水剂调整料浆的流动度，以等稠度的标准配置泡沫混凝土料浆。将固硫渣、水泥、固硫灰、添加剂，加入搅拌机干拌 1 min，之后加入自来水、减水剂低速搅拌 1 min，后改为高速搅拌 3 min 得到水泥料浆；采用真空发泡机将泡沫剂水溶液制备成细腻均匀的泡沫，称取一定体积的泡沫加入到搅拌罐内，高速搅拌 40 s 后，得到混合均匀的泡沫混凝土料浆，之后浇筑成型，标准养护 28 d 后测试材料性能。制备流程图，如图 1 所示。

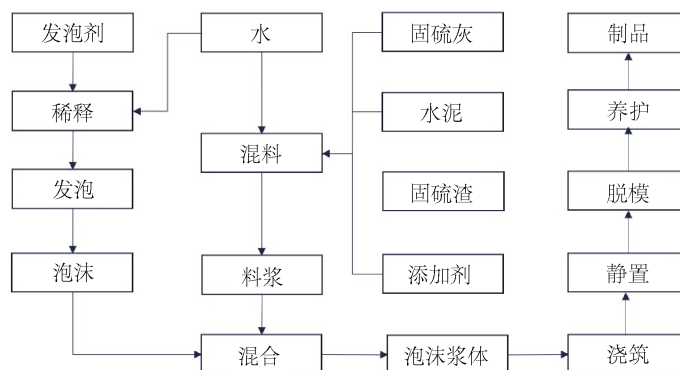


Figure 1. Foam concrete process flow chart  
图 1. 泡沫混凝土工艺流程图

### 2.4. 测试方法

#### a) 粒度与比表面积分析

使用 Mastersizer3000 型激光粒度分析仪对 1~4# 固硫灰粒度进行分析，数据采集速度 10 kHz、重复性： $\leq 0.5\%$ 、精确度： $\leq \pm 1\%$ ；使用 ASAP2460 比表面分析仪对 1~4# 粉煤灰比表面积进行分析。

#### b) 强度测试

泡沫混凝土力学性能按照《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T2357-2016)的要求进行操作。设备：水泥强度试验机，加压速度 0.8 KN/s。

#### c) 化学成分分析

仪器：X 射线荧光光谱仪，型号：日本理学 ZSX-100e

## 3. 试验结果与讨论

### 3.1. 正交试验结果与讨论

正交试验设计与试验结果如表 6 所示，通过极差分析研究四因素及其不同水平对制品干密度与抗压强度影响程度，极差分析如表 7 所示。通过极差分析，得到各因素对制品性能影响的显著程度。通过正交试验结果确定制备泡沫混凝土的最优方案。

Table 6. Orthogonal experimental design and results

表 6. 正交试验设计与试验结果

试验编号	因素				制品性能	
	A	B	C	D	干密度/(kg/m <sup>3</sup> )	抗压强度/(MPa)
1	48	37	0.34	1.7	597	0.84

Continued

2	46	35	0.35	1.9	564	0.81
3	48	35	0.36	1.6	620	1.36
4	50	39	0.36	1.8	621	1.31
5	50	33	0.34	1.9	578	0.81
6	46	33	0.36	1.7	611	0.77
7	50	37	0.35	1.6	615	0.85
8	46	39	0.34	1.6	570	0.63
9	44	39	0.35	1.7	590	0.92
10	44	33	0.37	1.6	587	1.03
11	46	37	0.37	1.8	555	0.68
12	44	37	0.36	1.9	526	0.90
13	44	35	0.34	1.8	534	0.82
14	48	33	0.35	1.8	514	0.47
15	50	35	0.37	1.7	544	0.73
16	48	39	0.37	1.9	489	0.46

Table 7. Orthogonal test range analysis table

表 7. 正交试验极差分析表

因素		A 固硫渣	B 水泥	C 水料比	D 泡沫
抗压强度	k1	0.92	0.77	0.78	0.97
	k2	0.72	0.93	0.76	0.82
	k3	0.78	0.82	1.09	0.82
	k4	0.93	0.83	0.73	0.75
	R	0.21	0.16	0.37	0.22
	排秩	3	4	1	2
	最优水平	A4	B2	C3	D1
最优组合		A4B2C3D1			
干密度	k1	559	573	570	598
	k2	575	566	571	586
	k3	555	573	595	556
	k4	590	568	544	539
	R	35	7	51	59
	排秩	3	4	2	1
	最优水平	A4	B2	C3	D1
优组合		A4B2C3D1			

将制品的干密度与抗压强度以柱状图的方式展示出来, 如图 2 所示, 以各因素为横坐标, 各因素的极差分析结果为纵坐标, 画出极差分析图如图 3 所示。

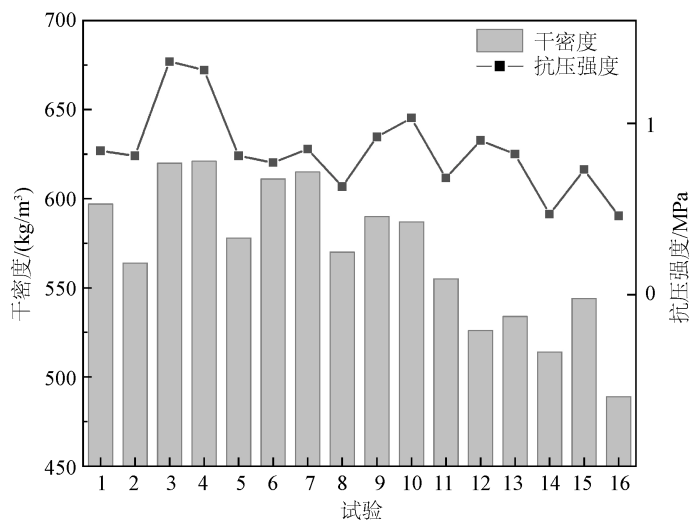


Figure 2. Orthogonal test results

图 2. 正交试验结果

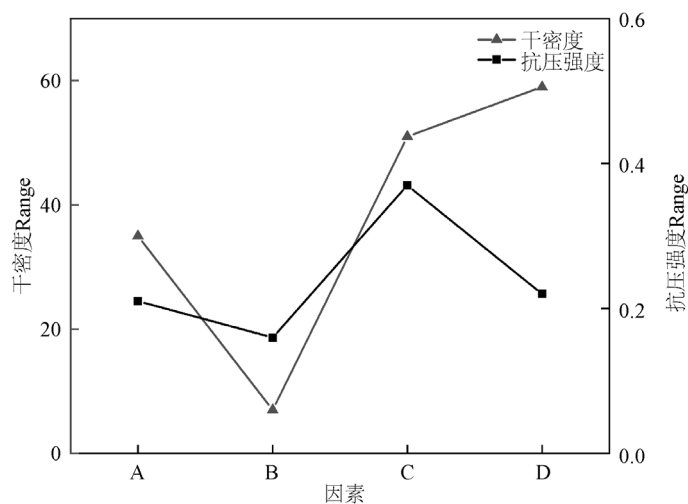


Figure 3. Range analysis results

图 3. 极差分析结果

通过极差分析, 对抗压强度的影响由大到小依次为: 泡沫 > 水料比 > 固硫渣 > 水泥, 最优的组合为 A4B2C3D1; 对干密度的影响由大到小依次为: 水料比 > 泡沫 > 固硫渣 > 水泥, 试验目标为制备出 A06 级泡沫混凝土, 因此最优组合为 A4B2C3D1。泡沫混凝土抗压强度是考察的重要指标, 制品的干密度能够在一定的范围内变化, 因此以抗压强度的最优方案, 作为最优配合比方案。通过正交试验确定了掺加固硫灰、渣 A06 级泡沫混凝土配合比最优方案为: 炉渣 50%、水泥 35%、水料比 0.36、泡沫添加量 1.6 L。

为了更好的研究不同因素对制品容重及抗压强度的影响, 将不同因素对制品性能的影响以折线图的方式展示出来, 如图 4 所示。

由图 4 趋势图可以看出: ① 随着泡沫添加量增加, 制品的干密度和抗压强度呈下降的趋势, 泡沫添加量增加, 制品的孔隙率增加, 从而使得制品干密度降低, 伴随着干密度的降低, 制品内部泡孔壁的厚度变薄, 使得制品的强度变低。② 水料比对干密度及抗压强度的影响呈现先增加后降低的趋势, 这是因

为,当水料比过低时料浆流动性较差,不利于料浆搅拌均匀,与泡沫混合时,大部分泡沫发生破裂,使得料浆发生离析、上下分层浇筑后的制品容重分布不均匀、内部结构较差,因而抗压强度较低;随着水料比的增加,料浆流动性得到改善、保泡性提高,与泡沫拌和时能够形成均匀的泡沫料浆,浇筑后试块容重分布均匀,制品内部结构得到改善,强度提高;继续增加水料比,料浆变稀,包裹泡沫的料浆变少,制品硬化后形成的泡壁变薄,制品容重降低的同时,其抗压强度也随之降低。水料比对料浆的和易性影响较大,过大过小对制品性能都具有不好的影响,因此在合适的水料比 0.36 处制品抗压强度最高。③ 泡沫混凝土的抗压强度随着水泥添加量的增加,呈现一定的波动,但是对整体性能的影响不大,其原因在于,固硫灰的掺加起到了辅助胶凝材料的作用,水泥与固硫灰的掺量是此消彼长的关系,因而制品的性能得到平衡,这也在侧面反映出,固硫灰替代部分水泥做辅助胶凝材料具有优良材料属性。④ 固硫渣密度相较于水泥与固硫灰要小的多,在泡沫混凝土中作为骨料替代砂石能够有效的降低制品的容重,随着固硫渣的掺量增加,其强度呈现先降低后增加的趋势,在 50%处达到最大,但是过高的固硫渣掺量会使得胶凝材料(水泥、固硫灰)含量降低,从而使得制品的性能变差。

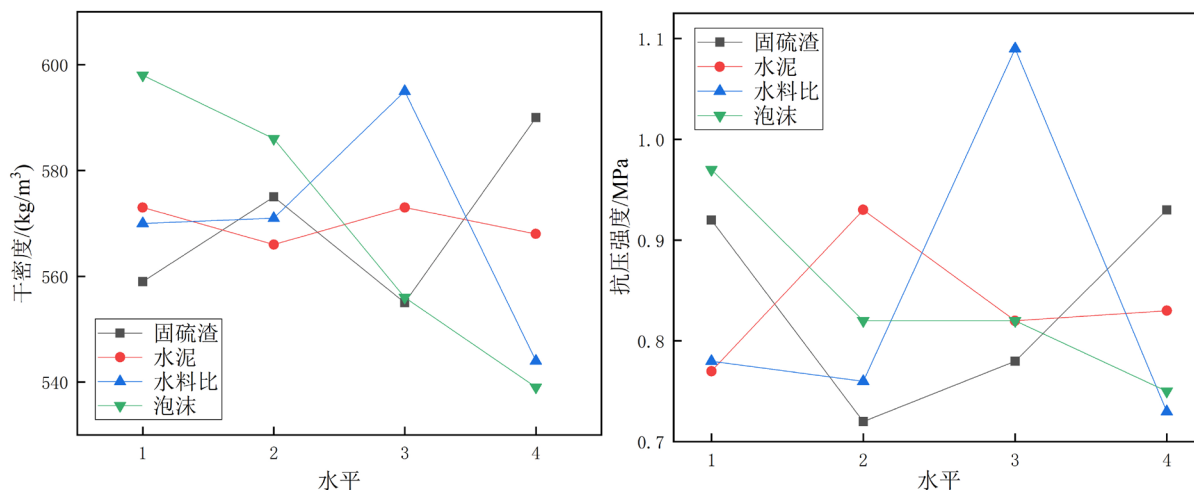


Figure 4. The influence of four factors on the dry density and compressive strength of products

图 4. 四因素对制品干密度及抗压强度的影响

通过正交试验得到的最优配合比方案,并不在 16 组正交试验中,以最优配合比试验制备出的泡沫混凝土其干密度  $610 \text{ kg/m}^3$ 、标准养护 28 d 抗压强度 1.42 MPa。

### 3.2. 固硫渣粒度集配对制品性能影响的研究

为了制备出性能更加优良的泡沫混凝土制品,在正交试验最优配合比方案的基础上研究了固硫渣粒度集配对制品性能的影响,对炉渣进行筛分处理,得到不同粒度范围的炉渣颗粒,之后根据试验设计的集配方案,进行称量混合,用于试验研究,试验结果如表 8 所示。

对表 8 的数据进行分析:① 随着骨料中粗骨料(6~0.3 mm)占比增加,细骨料(<0.125)占比降低,料浆的水料比逐渐降低,细骨料具有较大的比表面积,未燃烧的碳粉主要存在于细骨料中,其具有较大的吸附性,大大提高了料浆拌和的需水量,因而当细骨料含量降低时能够有效的降低水料比同时改善料浆的和易性。② 干密度与抗压强度随着粗骨料的含量增加呈现先增加后降低的趋势,这是因为,随着粗骨料的含量增加水料比降低,料浆稠度增加,制品泡沫壁厚度增加,制品干密度提高,抗压强度提高。随着粗骨料占比继续增加,此时粗骨料的体积效应表现出来,增加了拌和后料浆的体积,从而使得浇筑制品的容重降低,制品内部泡壁变薄;细骨料含量高时对于料浆的和易性具有不好的影响,但是细骨料同

时起着微集料的特性，一定的细骨料存在于制品内部能够提高制品的致密程度。因此当粗骨料含量高时其体积效应变得明显，伴随着细骨料含量的降低，使得制品强度变差。

**Table 8.** Research on the Influence of CFBC Slag Set on Product Performance

**表 8.** 固硫渣集配对制品性能影响研究

试验	集配/w%			制品性能		
	6~0.3 mm	0.3~0.125 mm	<0.125 mm	水料比	干密度/(kg/m <sup>3</sup> )	抗压强度/MPa
G1	50	25	25	0.37	605	1.62
G2	55	25	20	0.36	613	1.85
G3	60	25	15	0.35	622	2.41
G4	65	25	10	0.34	604	2.22
G5	70	25	5	0.33	589	2.11

综合分析，当固硫渣颗粒集配为 6~0.3 mm (60w%)、0.3~0.125 (25w%)、<0.125 (15w%)时制品性能最佳，A06 级泡沫混凝土，标准养护 28 d 抗压强度达 2.41 MPa，制品性能提升 72%。

### 3.3. 养护制度对制品性能的影响

在前期试验的基础上，考查了标准养护、淋水养护与 40℃ 恒温养护当养护龄期为 3 d、7 d、14 d、28 d 时对制品抗压强度的影响，其试验结果如表 9 所示。标准养护条件为温度：20℃、湿度：95%；淋水养护的方式，每隔 3 h 对制品表面进行淋水，保持制品表面一直为湿润的状态，温度：北方夏季环境温度 27℃~33℃、湿度：环境湿度 33%~70%；40℃ 恒温养护，采用恒温恒湿养护箱进行养护，温度：40℃、湿度：100%。

**Table 9.** The effect of maintenance system on the compressive strength of products

**表 9.** 养护制度对制品抗压强度的影响

养护制度	养护条件		抗压强度/MPa			
	温度/℃	湿度/%	3 d	7 d	14 d	28 d
标准养护	20	95	1.44	1.82	2.23	2.41
淋水养护	27~33	30~70	1.62	2.27	2.84	3.22
40℃ 养护	40	100	2.43	3.42	3.83	3.65

由表 9 数据可以看出，选用淋水养护与 40℃ 恒温养护对制品强度的提升明显。淋水养护与标准养护相比，早期强度发展速度有所提升，7 d 强度达到标准养护 14 d 强度，同时具有更高的后期强度，28 d 强度可达 3.22 MPa，强度提升 34%。采用 40℃ 恒温养护早期强度提升较快，3 d 强度达到标准养护 28 的强度，选用恒温养护能够显著缩短制品的龄期，同时其后期强度提高更多，14 d 强度达到最高的 3.83 MPa 与标准养护 28 d 强度比，提升 59%，但是继续增加恒温养护的龄期达到 28 d 时，其强度是降低的。

## 4. 结论

1) 正交试验研究了固硫渣、水泥、水料比、泡沫对制品干密度及抗压强度的影响，结果显示对制品干密度影响程度：泡沫 > 水料比 > 固硫渣 > 水泥，对抗压强度的影响程度：水料比 > 泡沫 > 固硫渣 > 水泥。确定了 A06 级泡沫混凝土最优配合比：固硫渣 50%、水泥 35%、水料比 0.36、泡沫 1.6 L。



2) 在正交试验确定的最优配合比的基础上,研究了固硫渣集配对制品性能的影响。研究表明固硫渣的集配对制品性能具有较大的影响,固硫渣中细骨料含量高会提高拌和用水量,进而提高水料比,对料浆和易性造成影响,但是细骨料具有微集料的作用,填充于制品内部能够提高制品的致密程度。粗骨料含量高能够有效的降低水料比,改善制品的性能,但是过高的粗骨料含量,具有较大的体积效应,会增加浇筑料浆的体积,从而降低材料的干密度。最优的骨料集配为 6~0.3 mm (60w%)、0.3~0.125 mm (25w%)、<0.125 mm (15w%),通过改善固硫渣集配,制品抗压强度提升 72%,A06 级制品抗压强度达 2.41 MPa。

3) 在前期研究的基础上研究了养护制度对制品性能的影响,淋水养护与 40℃ 养护对制品强度的提升都具有较好的影响。选用 40℃ 恒温养护,制品 3 d 强度可达标准养护 28 d 强度,14 d 强度达到 3.83 MPa,制品抗压强度提升 59%。

4) 按照固硫渣:水泥:固硫灰 = 50:35:15、水料比 0.36、泡沫添加量 1.6 L 进行配合比设计,优化固硫渣颗粒集配为 6~0.3 mm (60w%)、0.3~0.125 (25w%)、<0.125 (15w%),选用 40℃ 恒温养护 14 d,制备出 A06 级泡沫混凝土,抗压强度达 3.83 MPa,固废利用率达 65%。

## 参考文献

- [1] 中国混凝土与水泥制品协会泡沫混凝土分会. 2017 年度泡沫混凝土行业发展报告[J]. 混凝土世界, 2018.
- [2] 王静文, 刘旭照, 尹泽飞. 泡沫混凝土生产应用现状与前景分析[J]. 中国建材科技, 2018, 27(6): 51-54.
- [3] 王明轩, 李应权, 迟碧川. 2015 泡沫混凝土行业发展报告[J]. 混凝土世界, 2016(4): 18-23.
- [4] 邹定雄. 泡沫混凝土的研究和应用现状[J]. 施工技术, 2018(8): 16-17.
- [5] 王静静, 武斌, 刘高凯. 大掺量矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰, 2015(3): 39-42.
- [6] 李晓英, 李柱凯, 高文洁. 粉煤灰、渣对水泥基泡沫混凝土性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(10): 9-14.
- [7] 赵改菊. 水泥生料的固硫行为及硫铝酸盐的形成机理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [8] Zhao, G.J. (2004) Study on the Sulfur Fixation Behavior of Cement Raw Meal and the Formation Mechanism of Sulfoaluminate. Wuhan University of Technology, Wuhan. (In Chinese)
- [9] Zhang, Y., Sun, W. and Shang, L. (1997) Mechanical Properties of High Performance Concrete Made with High Calcium High Sulfate Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 27, 1093-1098. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00087-2)
- [10] Tsimas, S. and Moutsatsou-Tsima, A. (2005) High-Calcium Fly Ash as the Fourth Constituent in Concrete: Problems, Solutions and Perspectives. *Cement and Concrete Composites*, 27, 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.012>
- [11] Anthony, E.J., Bulewicz, E.M., Dudek, K., et al. (2002) The Long Term Behaviour of CFBC Ash-Water Systems. *Waste Management*, 22, 99-111. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00059-9)
- [12] 张良. 循环流化床锅炉技术的现状及发展前景[J]. 科研, 2016, 7(35): 00294-00294.
- [13] 陈雪梅. 固硫灰泡沫混凝土的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2014.
- [14] 贾艳涛, 杨永敢. 泡沫混凝土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016(35): 2804-2809.