

# 废玻璃粉对泡沫混凝土性能和微观孔结构的影响及其价值工程分析

尹鹏翔, 李 静

(华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641)

**摘要:** 玻璃研磨成粉后的主要成分与粉煤灰相似, 具备潜在的火山灰活性。为提高我国对废弃玻璃的循环利用率, 将泡沫混凝土与废玻璃粉结合用于改善泡沫混凝土性能, 减少水泥消耗量, 提高废玻璃的循环利用率。本文研究了以废玻璃粉作为胶凝材料替代部分水泥, 并探究废玻璃粉对泡沫混凝土抗压强度、干密度、干缩率、软化系数等的影响。结果表明: 在替代胶凝材料总质量的0%~30% (质量分数, 下同) 时, 废玻璃粉会提高泡沫混凝土的抗压强度; 且在废玻璃粉掺量为20%时, 泡沫混凝土28、56 d抗压强度达到最大值; 而在120 d时, 废玻璃粉掺量为30%的泡沫混凝土抗压强度达到最大值。废玻璃粉会降低泡沫混凝土的干缩值, 且掺量越大, 干缩值的降低程度越大, 这有助于解决泡沫混凝土易开裂的问题。废玻璃粉能够明显提高泡沫混凝土的软化系数, 便于其在潮湿或水下环境应用。此外, 从微观孔结构的角度对废玻璃粉引起的泡沫混凝土力学及耐久性能的变化规律做出解释, 最后对废玻璃粉引入泡沫混凝土后的价值进行分析, 定量证明了废玻璃粉的环保性和经济性。

**关键词:** 废玻璃粉; 泡沫混凝土; 力学性能; 耐久性能; 微观孔结构; 价值工程分析

中图分类号: TU55<sup>+</sup>1.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-1625(2024)03-1021-09

## Effect of Waste Glass Powder on Properties and Micro Pore Structure of Foamed Concrete and Its Value Engineering Analysis

YIN Pengxiang, LI Jing

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The main composition of glass after grinding is similar to that of fly ash, which has potential pozzolanic activity. In order to improve the recycling rate of waste glass, the combination of foamed concrete and waste glass powder is used to improve the performance of foamed concrete, reduce cement consumption and enhance the recycling rate of waste glass. The effect of waste glass powder used as cementitious material to replace part of cement on compressive strength, dry density, drying shrinkage rate and softening coefficient of foamed concrete were studied. The results show that compressive strength of foamed concrete can improve by adding waste glass powder content within 0%~30% (mass fraction, the same below) of total mass of alternative cementitious materials. When waste glass powder content is 20%, the compressive strength of 28 and 56 d reach the maximum value, while the compressive strength of foamed concrete with 30% waste glass powder content reaches the maximum value at 120 d. Waste glass powder reduces the dry shrinkage value of foamed concrete, and the greater the content, the greater the reduction of dry shrinkage value, which helps to improve the problem of foamed concrete easily to crack. The addition of waste glass powder can significantly improve the softening coefficient of foamed concrete, which is conducive to its application in wet or underwater environments. In addition, from the perspective of changes of micro pore structure, the rules of mechanical and durability properties of foamed concrete caused by waste glass powder were explained. Finally, by analyzing the value of foamed concrete with waste glass powder, its environmental protection and economy were quantitatively proved.

**Key words:** waste glass powder; foamed concrete; mechanical property; durability property; micro pore structure; value engineering analysis

收稿日期: 2023-11-13; 修订日期: 2023-12-12

作者简介: 尹鹏翔(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事泡沫混凝土改性的研究。E-mail: y15688119797@163.com

通信作者: 李 静, 博士, 副教授。E-mail: cvjingli@scut.edu.cn

## 0 引言

混凝土是现代建筑工业中使用最多的建筑材料之一,其生产需要消耗大量的水泥,而水泥工业是二氧化碳排放的主要源头之一。水泥工业产生的二氧化碳占全世界人为二氧化碳排放量的8%<sup>[1]</sup>,预计到2050年,全球水泥的用量还将翻一番<sup>[2]</sup>。水泥中的二氧化硅属于不可再生资源,因此合理控制水泥用量可以使混凝土变为更具可持续性的建筑材料,这也是实现节能减排、节约资源、保护环境、促进建筑行业可持续发展的共同要求。在品类繁多的混凝土中,泡沫混凝土因其轻质、保温、隔声、耐火性能好等特点而备受关注和研究。2020年,我国泡沫混凝土总产量约为6 000万立方米,远高于其他国家<sup>[3]</sup>,因此对水泥的消耗量不容忽视。作为一种多孔轻质建筑材料,泡沫混凝土一般用于非承重或半承重结构,对强度的要求标准较低,这就使得用于制备泡沫混凝土的胶凝材料在普通硅酸盐水泥的基础上具备了更多可能性。

玻璃是一种难以自然降解的材料,废弃玻璃会对土壤造成严重的负担,但目前我国对废玻璃的回收利用率大约只有50%<sup>[4]</sup>。性能稳定的玻璃中含有约70%(文中掺量均为质量分数)的二氧化硅<sup>[5]</sup>,化学组成与粉煤灰相似,具备潜在的火山灰活性,可作为水泥替代物。废玻璃粉作为胶凝材料使用在普通混凝土领域已有较为充分的研究和广泛的应用,宋百姓<sup>[6]</sup>在制备含有废玻璃粉的胶砂试件时发现废玻璃粉用作矿物掺合料时存在最佳粒径范围。樊磊等<sup>[7]</sup>发现过度增加废玻璃粉的研磨时间不但会增加成本,而且其较大的比表面积会使活性损失较快,细小颗粒的聚集也会减弱粉磨效果。机械磨细35 min后,此时废玻璃粉比表面积合适,充当物理填充时更能有效地分散到复合胶凝材料的孔隙中,改善复合胶凝材料的孔结构,使复合胶凝材料的结构更加密实,从而增大抗压强度。王鹏飞<sup>[8]</sup>则指出玻璃粉越细活性相对越好,但当玻璃粉粒径小到一定程度后,继续减小则活性增加不明显。由此可见,为充分发挥活性并控制制备成本,废玻璃粉作为胶凝材料的替代物时存在一个最合适的粒径范围。万里等<sup>[9]</sup>通过立方体标准抗压强度试验发现,废玻璃粉的掺入使得混凝土7、28、56 d抗压强度均有所下降。李特<sup>[10]</sup>将试验跨度延长至90 d,也得到了混凝土的强度随玻璃粉取代水泥掺量的增加而下降的结论。而李娇<sup>[11]</sup>的试验结果则表明,在0~60 d养护期内,当玻璃粉取代水泥的掺量小于10%(文中均为质量分数)时,混凝土抗压强度随玻璃粉掺量增大而增大。当掺量大于10%时,混凝土抗压强度随掺量增加而降低,即存在一个最优值,为10%。由此可见,废玻璃粉火山灰活性的发挥是一个缓慢的过程,且有关废玻璃粉对混凝土抗压强度的影响规律存在分歧。黄达等<sup>[12]</sup>将废玻璃粉以10%~30%的掺量等质量替代水泥,测量各组试件的干缩率后发现,在自然环境养护下掺入废玻璃粉能有效抑制混凝土的干燥收缩,并且废玻璃粉的掺量越高,降低混凝土干燥收缩的作用就越大。而在泡沫混凝土的相关研究中,Khan等<sup>[13]</sup>认为粒径小于45 mm的废玻璃粉替代水泥的20%时能够提高泡沫混凝土的抗压强度,提高了约4.65%,而当掺量为40%时,泡沫混凝土的抗压强度降低了约7%,且废玻璃粉的掺入会降低泡沫混凝土的干密度。Kashani等<sup>[14]</sup>用玻璃粉替换10%的水泥后得到了具有更高强度的泡沫混凝土,并且由于孔径的重新排列以及单位质量的减少而产生了孔隙强化效果,明显降低了泡沫混凝土的干燥收缩率。

以上研究表明,废玻璃粉作为辅助胶凝材料使用是具备可行性和发展潜力的,但不同废玻璃粉的来源、物理性质、化学组成等具有极大的差异,其对泡沫混凝土力学及耐久性能的影响没有明确或完整的结论。因此本文在明确废玻璃粉来源、粒径分布、化学组成的基础上,探究其掺量对泡沫混凝土标准龄期与长期抗压强度、干密度、软化系数、干燥收缩率等性能的影响,完善其掺量对泡沫混凝土改性规律的相关结论,并对废玻璃粉的掺入进行价值工程分析,从实用性与经济性的角度为废玻璃粉的充分利用提供理论依据。

## 1 实验

### 1.1 原材料

#### 1) 水泥

本试验选用石井牌P·O 42.5 R水泥,烧失量为1.06%,密度为3 100 kg/m<sup>3</sup>,比表面积为376 m<sup>2</sup>/kg。

水泥的主要化学组成如表1所示。

表1 水泥的主要化学组成  
Table 1 Main chemical composite of cement

Composite	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
Mass fraction/%	21.00	5.60	5.03	64.84	1.45	1.02

## 2) 废玻璃粉

将购自废品回收厂的无色平板玻璃经过除杂清洗、破碎机破碎、球磨机球磨、粒度分析得到试验所需废玻璃粉。使用 LA960S 激光粒度仪测试球磨 30 min 的废玻璃粉中位粒径、不同累积百分率对应的粒径、粒径分布等参数,球磨 30 min 的废玻璃粉  $D_{50}$  为 15.866 2  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  为 82.984 2  $\mu\text{m}$ , 粒径分布如图 1 所示。为了避免球磨时间过长导致能耗过高,本试验选取球磨 30 min 的废玻璃粉作为后续试验的原材料。

使用波长色散型 X 射线荧光光谱仪对废玻璃粉的化学组成进行定量分析,结果如表 2 所示。

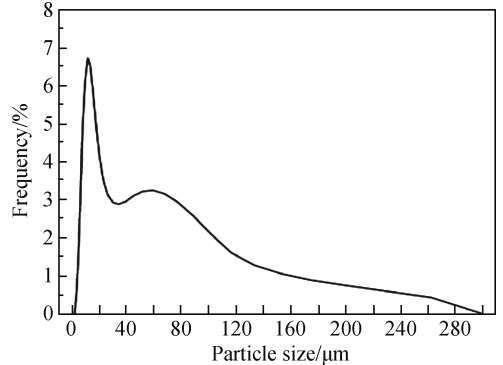


图1 球磨 30 min 的废玻璃粉粒径分布  
Fig. 1 Particle size distribution of waste glass powder after 30 min ball milling

表2 废玻璃粉的主要化学组成

Table 2 Main chemical composite of waste glass powder

Composite	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Mass fraction/%	74.18	11.72	8.23	3.24	0.88	0.87	0.50	0.25	0.03

## 3) 外加剂

本试验选用甲基纤维素 (methyl cellulose, MC) 作为保水剂,其在一定时间内能够降低泡沫混凝土拌合物的泌水率,增强拌合物黏性,有利于拌合物包裹泡沫并防止其因重力作用下滑挤压泡沫,从而维持泡沫的稳定性。选用陕西秦奋建材公司生产的聚羧酸系高性能减水剂提高拌合物流动性。保水剂与减水剂经过正交预试验确定其用量,分别为干物料总质量的 0.1% 与 0.3%。

### 1.2 试验方法

干密度、抗压强度试验方法参照《泡沫混凝土》(JGT 266—2011)中规定的方法进行。参考《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T 2357—2016)进行软化系数试验。干燥收缩值测定方法依据《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020)进行。使用广州融衡建筑装饰工程有限公司生产的 RH-FP-05 型号发泡机制备泡沫;使用上海禹鹏建筑仪器厂生产的 SJD30 型号砂浆搅拌机对浆体进行搅拌;使用济南中路昌试验机制造有限公司所生产的 YAW-300CE 型压力试验机测试试块抗压强度;使用深圳市安东星科技有限公司生产的型号为 ANDONSTAR 的高清数码显微镜拍摄截面样图,利用 Image-Pro Plus 软件对样图进行黑白二值化处理并分析计算泡沫混凝土孔隙率和平均孔径。

### 1.3 配合比设计

通过正交预试验、结合相关文献[15]的研究结论,本试验选用的水胶比为 0.45。采用物理发泡法,使用稀释倍数为 45~50 倍的动物蛋白发泡剂制备泡沫混凝土。参考《泡沫混凝土应用技术规程》(JGJ/T 341—2014)中的计算方法,设计干密度 900 kg/m<sup>3</sup>,以此为基础按体积计算每组泡沫用量。废玻璃粉取代水泥的质量分数为 0%、10%、20% 和 30%,分别命名为 G-0%、G-10%、G-20% 和 G-30%,配合比如表 3 所示。

表3 泡沫混凝土的配合比  
Table 3 Mix proportion of foamed concrete

Group	Mix proportion/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )					Foam volume/ $\text{m}^3$
	Cement	Waste glass powder	Water	Water reducing agent	Water retaining agent	
G-0%	750.0	—	337.5	2.25	0.75	0.546 7
G-10%	675.0	75.0	337.5	2.25	0.75	0.539 2
G-20%	600.0	150.0	337.5	2.25	0.75	0.531 6
G-30%	525.0	225.0	337.5	2.25	0.75	0.524 1

## 2 结果与讨论

### 2.1 废玻璃粉对泡沫混凝土抗压强度与干密度的影响

废玻璃粉具有明显的长期活性,研究其对泡沫混凝土长期抗压强度的影响具有重要意义。废玻璃粉掺量对泡沫混凝土抗压强度和干密度的影响如图2所示。掺入废玻璃粉后,泡沫混凝土的抗压强度随废玻璃粉掺量的增大而先增大后减小,28、56、120 d抗压强度均得到提升,且均高于对照组。与28 d相比,掺入废玻璃粉后泡沫混凝土的56 d抗压强度有明显的提升,掺入10%、20%和30%废玻璃粉的泡沫混凝土抗压强度比28 d时分别提高了17.29%、17.04%和8.51%;掺入废玻璃粉后泡沫混凝土的120 d抗压强度较28 d时分别提高了57.5%、58.73%和66.59%。当废玻璃粉掺量为20%时,泡沫混凝土的28、56 d抗压强度都达到最大值,分别为4.87、5.70 MPa,相较于基准组(G-0%)分别提高了6.56%、24.73%。而当养护龄期为120 d时,废玻璃粉掺量为30%的泡沫混凝土抗压强度达到了最大值,为7.83 MPa,比基准组(G-0%)提高了47.74%。以上表明,30%以内废玻璃粉掺量能提升泡沫混凝土的抗压强度,当养护龄期在56 d以内时,废玻璃粉的最佳掺量为20%,而养护龄期达到120 d时,废玻璃粉掺量为30%的泡沫混凝土展现出最优异的强度。这充分证明废玻璃粉有着明显的长期活性,在28 d水泥水化基本完成后,仍可与水泥的水化产物氢氧化钙反应,生成水硬性的水化硅酸钙,从而增强泡沫混凝土的抗压强度。

如图2(b)所示,在0%~30%掺量内,废玻璃粉的加入会增大泡沫混凝土的干密度,且影响趋势与抗压强度相同。与28 d相比,56、120 d时泡沫混凝土的干密度均有所提高,这是废玻璃粉的火山灰反应不断进行而产生新的水化硅酸钙所致。因此在30%掺量内,废玻璃粉的火山灰反应能够使得泡沫混凝土中的水化产物在总量上相比于对照组增多,从而在干密度上有直接的体现。

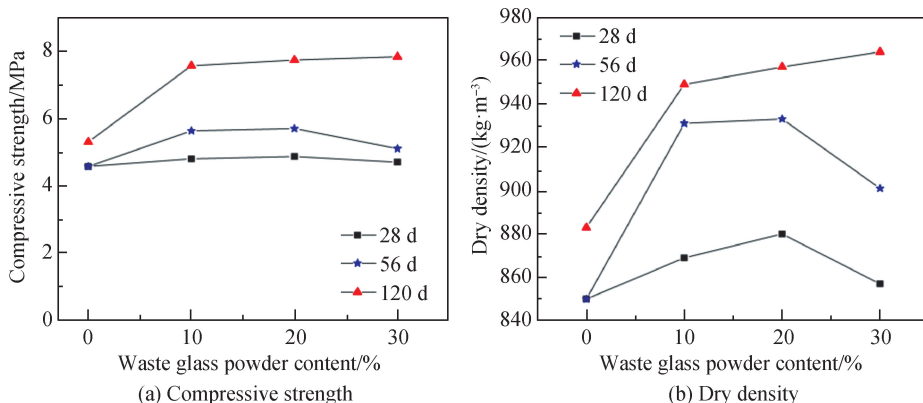


图2 废玻璃粉掺量对泡沫混凝土抗压强度和干密度的影响

Fig. 2 Influence of waste glass powder content on compressive strength and dry density of foamed concrete

### 2.2 废玻璃粉对泡沫混凝土干燥收缩率与软化系数的影响

图3为废玻璃粉掺量对泡沫混凝土干燥收缩率和软化系数的影响。由图3(a)可知,玻璃粉的掺入能够降低泡沫混凝土的干缩率,且掺量越高、泡沫混凝土干缩率越小。当玻璃粉掺量为30%时,泡沫混凝土的56 d干缩值相比于基准组降低了约11.37%。无论是活性未显现的废玻璃粉还是参与火山灰反应生产硅酸

钙的废玻璃粉,其掺入对泡沫混凝土的孔隙结构都能起到了一定的填充作用<sup>[17]</sup>,增大水分在泡沫混凝土内部的迁徙难度,从而使干缩率降低。废玻璃粉对泡沫混凝土干缩率的降低效果为解决一般泡沫混凝土干缩值较大、易开裂的问题提供了一条新路径,这使得废玻璃粉应用于泡沫混凝土具备了实际工程价值。

如图3(b)所示,废玻璃粉的掺入明显提高了泡沫混凝土的软化系数,在废玻璃粉掺量达30%时,其软化系数达92.59%。火山灰反应宜在有水的条件下进行,软化系数试验中的泡水步骤加速了废玻璃粉的火山灰反应过程,生成了较多的水化硅酸钙,从而在一定程度上弥补了泡水过后的强度损失。软化系数超过75%即为耐水材料,掺入废玻璃粉后明显提升了泡沫混凝土的软化系数,这为其应用于潮湿或水下环境提供了数据支持。

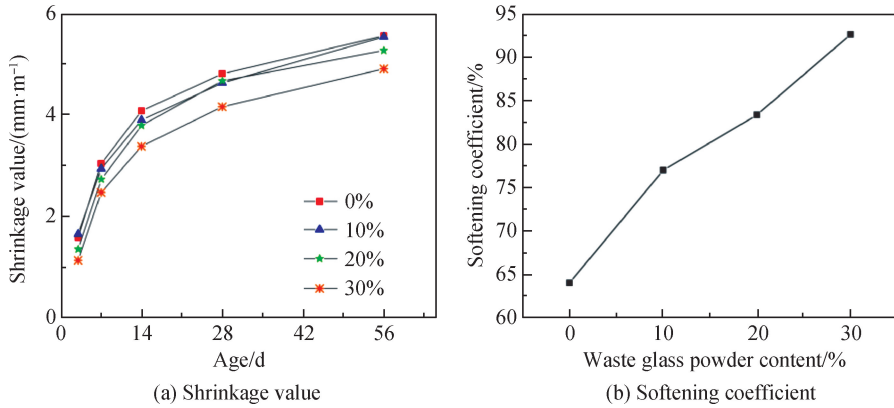


图3 废玻璃粉掺量对泡沫混凝土干燥收缩率和软化系数的影响

Fig. 3 Influence of waste glass powder content on shrinkage value and softening coefficient of foamed concrete

### 2.3 废玻璃粉对泡沫混凝土微观孔结构的影响

废玻璃粉掺量对泡沫混凝土微观孔结构的影响如图4所示。在0%~30%掺量内,废玻璃粉会减小泡沫混凝土的孔隙率,孔隙率随废玻璃粉掺量的增大而减小。掺入30%废玻璃粉的泡沫混凝土的28d孔隙率相较于基准组减小了5.53%,在56d减小了10.1%,在120d减小了12.06%。随着养护龄期的增长,泡沫混凝土的孔隙率不断降低,且掺入废玻璃粉后废玻璃粉孔隙率变化程度明显高于基准组,养护120d时废玻璃粉掺量为30%的泡沫混凝土孔隙率相较于基准组降低的程度最大,为28.98%。这是由于废玻璃粉本身和其火山灰反应的生成物填充了泡沫混凝土的孔隙,使孔隙率减小,结构更加密实,水分迁移难度增大,这一变化规律从微观结构方面解释了宏观性能中抗压强度随废玻璃粉掺量的增大而增大以及干缩率随掺量增大而降低的原因。养护龄期越长,孔隙率均越低,这是由于泡沫混凝土内部水化产物随时间不断增多并填充孔隙所致,也从微观层面验证了56、120d抗压强度不断增大的结论。

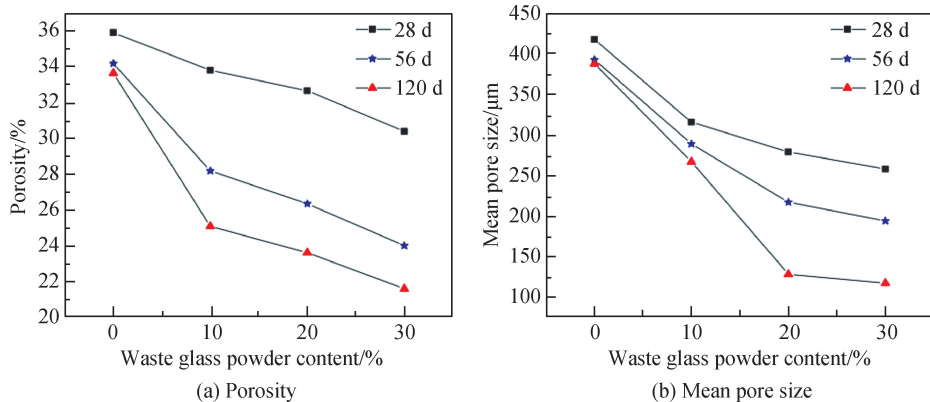


图4 废玻璃粉掺量对泡沫混凝土微观孔结构的影响

Fig. 4 Effect of waste glass powder content on micro pore structure of foamed concrete

由图4(b)可知,在0%~30%掺量内,废玻璃粉会减小泡沫混凝土的平均孔径,其掺量越大,泡沫混凝土的平均孔径越小,当废玻璃粉掺量为30%时,与基准组相比,其平均孔径在28 d减小了160  $\mu\text{m}$ ,在56 d减小了199  $\mu\text{m}$ ,在120 d减小了271  $\mu\text{m}$ 。各掺量下泡沫混凝土的56 d平均孔径均小于28 d,120 d平均孔径小于56 d。这表明废玻璃粉本身以及其火山灰反应的生成物填充了泡沫混凝土原有较大孔隙中的一部分,使得其平均孔径减小,从细观结构方面证实了随着废玻璃粉掺量增大与养护龄期的延长,泡沫混凝土抗压强度增大的原因。

### 3 废玻璃粉泡沫混凝土价值工程分析

价值工程分析法是指以产品所具备的功能与所需要的成本进行对比的一种定量分析方法,它能够衡量产品性价比,从经济角度评估产品的优劣势。价值工程主要由3个核心理念组成:成本 $C$ 、功能 $F$ 、价值 $V$ <sup>[18-19]</sup>。三个核心理念之间的基本关系表达式如式(1)所示。

$$V = \frac{F}{C} \quad (1)$$

式中: $F$ 为废玻璃粉泡沫混凝土的功能,主要对不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的抗压强度、干燥收缩率、软化系数进行分析; $C$ 为生产废玻璃粉泡沫混凝土的环境成本,主要对不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的碳排放量进行分析; $V$ 为废玻璃粉泡沫混凝土的价值,为满足实际需要的程度提供量化指标。

#### 3.1 废玻璃粉泡沫混凝土的功能系数分析

由于废玻璃粉具有长期活性,废玻璃粉泡沫混凝土的抗压强度会在28 d龄期过后继续增长,而普通泡沫混凝土的强度不会再有明显变化。为便于对比,计算功能系数时取所有废玻璃粉掺量的泡沫混凝土28 d抗压强度为原始数据,干燥收缩值取56 d时的数据,不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土试验数据如表4所示。

表4 不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土试验数据

Table 4 Test data of foamed concrete with different waste glass powder content

Group	Compressive strength/MPa	Shrinkage value/(mm · m <sup>-1</sup> )	Softening coefficient/%
G-0%	4.57	5.56	64.00
G-10%	4.80	5.54	76.98
G-20%	4.87	5.27	83.33
G-30%	4.70	4.91	92.59

以基准组(G-0%)的各项功能数值为单位1,计算出不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土各项功能的比例,比例越大表明某项功能越优异,并取三项功能的平均值作为该试验组的功能值 $A_i$ ( $i=0,1,2,3$ ),不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土功能值如表5所示。

表5 不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土功能值

Table 5 Functional values of foamed concrete with different waste glass powder content

Group	Compressive strength/MPa	Shrinkage value/(mm · m <sup>-1</sup> )	Softening coefficient/%	Functional value
G-0%	1.000	1.000	1.000	1.000
G-10%	1.050	1.004	1.202	1.085
G-20%	1.066	1.055	1.302	1.141
G-30%	1.028	1.132	1.447	1.202

不同试验组功能值占总体功能的权重能够体现出其功能表现的相对优劣,将该权重定义为功能系数 $F$ 。根据式(2)计算不同试验组的功能系数 $F_i$ ( $i=0,1,2,3$ ),结果如表6所示。从抗压强度、干燥收缩率、软化系数来看,废玻璃粉的掺量越大,其功能系数就越大。

$$F_i = \frac{A_i}{\sum_{i=0}^3 A_i} \quad (2)$$

式中: $F_i$ 为不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的功能系数, $A_i$ 为废玻璃粉泡沫混凝土三种性能比的平均值。

表6 不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的功能系数

Table 6 Functional coefficient of foamed concrete with different waste glass powder content

Group	Functional coefficient
G-0%	0.226
G-10%	0.245
G-20%	0.258
G-30%	0.271

### 3.2 废玻璃粉泡沫混凝土的环境成本系数分析

掺废玻璃粉的泡沫混凝土与普通泡沫混凝土的环境成本差异主要体现在水泥使用量的减少和制备废玻璃粉过程中产生的碳排放量之间。从原料开采到运输完成,每生产1 t本试验所用普通硅酸盐水泥大约需要产生1 000 kg CO<sub>2</sub><sup>[20]</sup>。制备废玻璃粉使用的颚式破碎机每次最大破碎量为5 kg,电机功率为3 kW,破碎一批废玻璃物料需要5 min,经换算可得破碎1 t废玻璃的能耗为50 kW·h。球磨机每次最大研磨量为5 kg,电机功率为1.5 kW,球磨一批废玻璃渣需要30 min,经换算可得球磨1 t废玻璃的能耗为150 kW·h,因此制备本试验所用废玻璃粉所产生的能耗为200 (kW·h)/t。根据中国能源大数据报告(2022)<sup>[21]</sup>,我国火力发电的碳排放量为0.832 kg/(kW·h),因此核算可得每生产1 t废玻璃粉大约产生166.4 kg CO<sub>2</sub>。假设每生产1 m<sup>3</sup>的泡沫混凝土碳排放总量为水泥制备与废玻璃粉制备全周期的碳排放量之和,并用 $B_i$  ( $i=0, 1, 2, 3$ )表示,则各试验组的碳排放量如表7所示。

表7 不同废玻璃粉掺量泡沫混凝土的碳排放量

Table 7 Carbon emission of foamed concrete with different waste glass powder content

Group	Cement/(kg CO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	Waste glass powder/(kg CO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	Carbon emission $B_i$ /(kg CO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )
G-0%	750	0	750.00
G-10%	675	12.48	687.48
G-20%	600	24.96	624.96
G-30%	525	37.44	562.44

不同试验组环境成本量占总体成本的权重能够衡量出该试验组环境成本的相对大小,将该权重定义为成本系数 $C$ 。根据式(3)计算不同试验组的成本系数 $C_i$  ( $i=0, 1, 2, 3$ ),结果如表8所示。

$$C_i = \frac{B_i}{\sum_{i=0}^3 B_i} \quad (3)$$

式中: $C_i$ 为不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的环境成本系数, $B_i$ 为不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土胶凝材料制备全周期的碳排放总量。

表8 不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的成本系数

Table 8 Cost coefficient of foamed concrete with different waste glass powder content

Group	Cost coefficient
G-0%	0.286
G-10%	0.262
G-20%	0.238
G-30%	0.214

### 3.3 废玻璃粉泡沫混凝土价值分析

得到各试验组的功能与成本系数后,可以根据式(1)计算得出不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的价值,将对照组的价值单位化后可得如表9所示的结果。

由价值分析可得,在0%~30%掺量内,泡沫混凝土的功能性随废玻璃粉掺量的增大而提高,且其碳排放成本随废玻璃粉掺量的增大而降低,故其价值性随废玻璃粉掺量的增大而增大。因此在30%掺量内,废玻璃粉是具备实际工程价值且经济环保的水泥替代物。

表9 不同掺量废玻璃粉泡沫混凝土的价值系数

Table 9 Value coefficient of foamed concrete with different waste glass powder content

Group	Value coefficient
G-0%	1.000
G-10%	1.184
G-20%	1.372
G-30%	1.603

## 4 结 论

1) 在0%~30%掺量内,随着废玻璃粉掺量的增加,泡沫混凝土的干密度与抗压强度均呈先增加后降低的趋势,相较于基准组均有所提升。

2) 废玻璃粉具有明显的长期活性。养护28 d后,普通泡沫混凝土的抗压强度基本不再改变,而掺入废玻璃粉的泡沫混凝土抗压强度有明显的提升,掺20%废玻璃粉的泡沫混凝土56 d抗压强度相比于28 d提高了17.04%。掺30%废玻璃粉的泡沫混凝土120 d抗压强度达到了最大值,为7.83 MPa,相较于基准组(G-0%)提高了47.74%。

3) 废玻璃粉的掺入能够降低泡沫混凝土的干缩率,其掺量越高,干缩值越小。当掺量为30%时,56 d干缩值相比于基准组降低了约11.37%。

4) 废玻璃粉的掺入会增大泡沫混凝土的软化系数,其掺量越高,软化系数越大。当废玻璃粉掺量达30%时,其软化系数达92.59%。

5) 在0%~30%掺量内,泡沫混凝土的功能性随废玻璃粉掺量的增大而提高,且其碳排放量,即环境成本随废玻璃粉掺量的增大而降低,故其价值性随废玻璃粉掺量的增大而增大。因此从经济、实用、环保的角度来看,在30%掺量内,废玻璃粉是具备实际工程价值的水泥替代物。

6) 废玻璃粉掺量超过20%后,其28、56 d抗压强度均出现下降趋势,应进一步提高其掺量,探究更完整的试验结论。

## 参 考 文 献

- [1] CHICA L N, ALZATE A. Cellular concrete review: new trends for application in construction[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200(10): 637-647.
- [2] MONTEIRO H, MOURA B, SOARES N. Advancements in nano-enabled cement and concrete: innovative properties and environmental implications[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104736.
- [3] 泡沫混凝土分会. 我国泡沫混凝土发展现状与展望: 泡沫混凝土分会2020年度行业发展报告[J]. 混凝土世界, 2021(10): 18-22. Foam Concrete Branch. Present situation and prospect of foam concrete development in china: industry development report of foam concrete branch in 2020[J]. China Concrete, 2021(10): 18-22 (in Chinese).
- [4] 李碧雄, 汪知文, 饶丹, 等. 废玻璃在水泥混凝土中的应用研究评述[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2449-2457. LI B X, WANG Z W, RAO D, et al. Review on application of waste glass in cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8): 2449-2457 (in Chinese).
- [5] 杨南如. 机械力化学过程及效应(I): 机械力化学效应[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(1): 19-26. YANG N R. Processes and effects of mechanochemistry (I): chemical effects of mechanochemistry[J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(1): 19-26 (in Chinese).
- [6] 宋百姓. 废玻璃粉活性激发试验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013. SONG B X. Experimental Study on activation of waste glass powder[D]. Hengyang: University of South China, 2013 (in Chinese).
- [7] 樊磊, 刘光焰, 卢瑞阳, 等. 玻璃粉粒度对复合胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 180-185. FAN L, LIU G Y, LU R Y, et al. Influence of glass powder particle size on properties of complex binder[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1): 180-185 (in Chinese).
- [8] 王鹏飞. 玻璃粉用作矿物掺合料对预制混凝土墙板胶粘剂性能影响的实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. WANG P F. Experimental study on the effect of glass powder as mineral admixture on the properties of adhesive for precast concrete wallboard[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [9] 万里, 陈颖, 曾杰凯. 玻璃粉取代水泥对混凝土性能的影响[J]. 福建建材, 2021(6): 4-6.



- WAN L, CHEN Y, ZENG J K. Influence of glass powder replacing cement on concrete performance[J]. Fujian Building Materials, 2021(6): 4-6 (in Chinese).
- [10] 李 特. 玻璃粉对混凝土性能的影响[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(2): 72-76.  
LI T. Effect of glass powder on properties of concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2022, 44(2): 72-76 (in Chinese).
- [11] 李 娇. 玻璃粉混凝土最佳配合比试验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.  
LI J. Experimental study on optimum mix proportion of glass powder concrete[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020 (in Chinese).
- [12] 黄 达, 高鹏飞, 刘光焰, 等. 玻璃粉混凝土干燥收缩影响效果及作用机理研究[J]. 混凝土, 2021(2): 77-81.  
HUANG D, GAO P F, LIU G Y, et al. Study on effect and mechanism of drying shrinkage of glass powder concrete[J]. Concrete, 2021(2): 77-81 (in Chinese).
- [13] KHAN Q S, SHEIKH M N, MCCARTHY T J, et al. Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: a sustainable solution for future construction[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 369-379.
- [14] KASHANI A, NGO T D, HAJIMOHAMMADI A. Effect of recycled glass fines on mechanical and durability properties of concrete foam in comparison with traditional cementitious fines[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 120-129.
- [15] 潘晓冰. 掺加纤维的高性能泡沫混凝土微观结构与宏观性能的关系研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
PAN X B. Study on the relationship between microstructure and macro-performance of high performance foam concrete with fiber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [16] 高 华. 泡沫混凝土配合比设计与干缩特性试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.  
GAO H. Experimental study on mix proportion design and drying shrinkage characteristics of foamed concrete[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [17] 安田鑫. 废玻璃粉对混凝土干燥收缩特性的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2016.  
AN T X. Effect of waste glass powder on drying shrinkage characteristics of concrete[D]. Hengyang: University of South China, 2016 (in Chinese).
- [18] 朱 昭, 李艳蓉, 陈 辰. 绿色建筑全生命周期节能增量成本与增量效益分析评价[J]. 建筑经济, 2018, 39(4): 113-116.  
ZHU Z, LI Y R, CHEN C. Analysis and evaluation of energy-saving incremental costs and benefits of green building during the whole life cycle[J]. Construction Economy, 2018, 39(4): 113-116 (in Chinese).
- [19] 刘光焰, 高鹏飞, 李德成, 等. 基于价值工程分析法的玻璃粉混凝土经济性分析[J]. 混凝土, 2020(6): 163-165 + 174.  
LIU G Y, GAO P F, LI D C, et al. Economic analysis of glass powder concrete based on value engineering analysis[J]. Concrete, 2020(6): 163-165 + 174 (in Chinese).
- [20] 俞海勇, 杨 辉, 张 贺, 等. 水泥生命周期碳排放研究[J]. 四川建材, 2017, 43(1): 1-3.  
YU H Y, YANG H, ZHANG H, et al. Research of carbon emission of cement in lifecycle[J]. Sichuan Building Materials, 2017, 43(1): 1-3 (in Chinese).
- [21] 王雪辰. 中国能源大数据报告(2022): 电力行业发展[R]. 中能传媒研究院, 2022.  
WANG X C. China energy big data report (2022): power industry development[R]. Zhongneng Media Research Institute, 2022 (in Chinese).