

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.009

# 玻璃粒径及掺量对可控性低强度材料性能影响

储诚富<sup>1</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 董满生<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章探究玻璃掺量及粒径对可控性低强度材料(controlled low strength materials, CLSM)的工作性能、力学性能及耐久性能的影响。根据流动度确定水胶比,开展经时流动度、泌水率、无侧限抗压强度(unconfined compressive strength, UCS)及冻融耐久性试验;采用X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析CLSM的微观结构及强度机理。研究表明:玻璃掺量过多会导致保水性下降、增大离析泌水;所有配比28 d抗压强度均大于0.5 MPa, 90 d最大增至5.2 MPa;玻璃掺量过多(玻璃与黏结剂质量比为2.0和2.5)且粒径为3~5 mm的CLSM耐久性较差。随养护时间增加, C-S-H特征峰值增加,并出现托贝莫来石晶体特征峰, CLSM强度提高。玻璃与黏结剂质量比为1.0的CLSM各性能可达到最理想效果;综合破碎工序,粒径3~5 mm、质量比1.0为最佳参数。

**关键词:**可控性低强度材料(CLSM); 废弃玻璃; 固废处理; 绿色材料; 微观结构

**中图分类号:**X705; TQ177.69 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)06-0770-06

## Effects of glass particle size and content on properties of controlled low strength materials

CHU Chengfu<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, DONG Mansheng<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The effects of glass content and particle size on the working performance, mechanical properties and durability of controlled low strength materials (CLSM) were investigated. The water-to-binder ratio was determined according to the fluidity, and the time-dependent fluidity loss, bleeding rate, unconfined compressive strength (UCS) and freeze-thaw durability tests were carried out. The microstructure and strength mechanism of CLSM were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The results showed that excessive glass content would lead to decreased water retention and increased segregation bleeding. The 28 d compressive strength of all ratios was greater than 0.5 MPa, and the maximum compressive strength increased to 5.2 MPa at 90 d. The durability of CLSM with excessive glass content (glass-to-binder ratio of 2.0 and 2.5) and particle size of 3-5 mm was poor. With the increase of curing time, the peak value of C-S-H increased, and the characteristic peak of Tobermorite crystal appeared, and the strength of CLSM increased. The optimal CLSM performance can be achieved with a glass-to-binder ratio of 1.0. The particle size of 3-5 mm and the glass-to-binder ratio of 1.0 are the optimal parameters in terms of glass breaking process.

**Key words:** controlled low strength materials (CLSM); waste glass; solid waste treatment; green materials; microstructure

收稿日期:2023-04-18;修回日期:2023-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42172307);安徽省自然科学基金资助项目(2008085MD118)

作者简介:储诚富(1975—),男,安徽潜山人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

董满生(1973—),男,安徽怀宁人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: dongms@hfut.edu.cn.

可控性低强度材料(controlled low strength materials, CLSM)是一种具有高流动性、在自重作用下无需或少许振捣即可自行填充、替代传统回填材料的胶凝材料<sup>[1]</sup>,具有强度低、自流平、易于再开挖等优点,常用于回填、路面基础、公路修复等方面。

传统的 CLSM 混合物组成与水泥混凝土类似,通常包括水、硅酸盐水泥、粉煤灰(fly ash, FA)、外加剂及粗细骨料。CLSM 可基于成本及对流动性、易开挖性等特殊需求来选择原材料。近几年,我国水泥年产量突破  $20 \times 10^8$  t,碳排放量超  $12 \times 10^8$  t,占全国总排放量的 13%,对“双碳”目标的实现提出巨大挑战<sup>[2]</sup>。用可持续黏结剂取代硅酸盐水泥开始被大量研究。粉煤灰和高炉矿渣是目前生产碱活化水泥最常用的固体前体。文献[3]研究了一种无水泥黏结剂煤灰基 CLSM,所有工程性能和环境影响均符合 CLSM 规范,并对其进行一般性能测试后成功用作并孔热交换器的热灌浆,且与常规灌浆的热导值相比,CLSM 混合物的热导值更高。

玻璃作为固体废弃物因其化学成分稳定且含硅量高,已有不少使用回收玻璃作为骨料<sup>[4-5]</sup>或使用玻璃粉(glass powder, GP)<sup>[6-8]</sup>作为混凝土水泥替代的可行性研究。文献[9]研究从玻璃中回收废玻璃粉渣作为部分矿物前体来生产碱活化材料(alkali active materials, AAMs)的可行性,结果表明与粉煤灰相比,玻璃粉具有较高的二氧化硅和钙溶解度,能更好地参与碱活化过程,为玻璃粉作为矿物前体在碱性水泥生产中的实际应用奠定了理论基础。

本文以废弃玻璃作为细骨料,粉煤灰和电石渣(carbide slag, CS)作为黏结剂,在氢氧化钠碱激活下制备无水泥的 CLSM,探究最适玻璃粒径范围及最佳玻璃掺量。粉煤灰可提高 CLSM 的流动性和强度,减少泌水、收缩和渗透性,电石渣碱性强且含钙量高,可用于激发粉煤灰的活性。本文研究为玻璃煤灰基 CLSM 今后应用于工程实践提供了参考,可实现废弃物的绿色、高效、可持续利用。

## 1 原材料及方法

### 1.1 原材料

玻璃样品取自安徽合肥永顺玻璃厂,主要为玻璃剪裁时的边角料及尺寸不合的废弃部分;粉煤灰和电石渣样品取自巩义市元亨净水材料厂,

其中粉煤灰为二级粉煤灰。通过 X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence spectrum, XRF)对 3 种原材料的化学成分进行分析,结果见表 1 所列。实验所用氢氧化钠购自国药集团化学试剂有限公司,样品使用自来水混合。

表 1 废弃玻璃、粉煤灰、电石渣化学成分分析

化学成分	$w/\%$		
	玻璃	粉煤灰	电石渣
SiO <sub>2</sub>	62.07	38.96	1.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.46	17.94	0.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.84	12.53	1.18
CaO	24.42	8.87	91.94
CO <sub>2</sub>	2.34	10.09	3.08
SO <sub>3</sub>	1.21	0.86	0.70
Na <sub>2</sub> O	2.82	—	—
TiO <sub>2</sub>	—	2.36	0.10
MgO	1.20	0.26	—

### 1.2 试验方法

本研究将粉煤灰和电石渣作为黏结剂,固定  $m(\text{CS})/m(\text{FA})=0.2$ ,激发剂 NaOH 掺量为黏结剂总量的 3.5%。将玻璃粒径划分为小于 2 mm(I)、2~<3 mm(II)和 3~5 mm(III) 3 个范围,采用不同的玻璃与黏结剂质量比( $m(\text{GP})/m(\text{CS}+\text{FA})$ 为 1.0、1.5、2.0、2.5,用  $w$  表示)制作 12 组样品,研究 CLSM 的性能。组别 I-1.5 表示玻璃粒径小于 2 mm,  $w$  为 1.5,以此类推。

CLSM 的水胶比( $m(\text{水})/m(\text{黏结剂})$ )是将流动度控制在 180~250 mm 间来确定。CLSM 达到所需流动度的用水量会随着原材料的不同而变化。使用水泥胶砂搅拌机拌合,测试 CLSM 的可工作性。每组试验均不断改变水胶比,直到流动度达 200 mm 左右,即为该组 CLSM 试验水胶比。

使用确定的水胶比制作 CLSM,进行经时流动度(0、30、60、120 min)和泌水试验。将 CLSM 倒入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的模具中,用保鲜膜紧密密封,48 h 后脱模,放入温度(20±2)℃、相对湿度在 95%以上的标准养护箱中养护。在 7、14、28、90 d 后进行无侧限抗压强度(unconfined compressive strength, UCS)试验,每组配比设置 3 个平行样,试验结果取平均值。

对养护 28 d 的 CLSM 样品进行冻融耐久性试验。由于目前没有相关试验规范,本试验综合参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[10]</sup>和《建筑砂浆基本

性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)<sup>[11]</sup>中有关冻融循环的相关规范,自行设计 CLSM 的冻融循环试验过程。将标准养护的 CLSM 在 26 d 龄期取出,放入(20±2)℃的水中浸泡 48 h,于 28 d 龄期进行冻融循环试验。对比试件浸泡后放入标准养护箱中养护,待测试试件完成冻融循环后与测试试件同时测量无侧限抗压强度。对比试件和测试试件每组配比、每次循环均设置 3 个平行样,试验结果取平均值。测试试件放入(-18±2)℃的试验箱中 4 h,再放入(20±2)℃水中浸泡 6 h 为 1 个循环。分别进行 3、6、9 次循环,测量无侧限抗压强度损失进行耐久性评价。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 工作性能

#### 2.1.1 流动度

水胶比是控制流动度的关键指标。CLSM 水胶比随流动度的变化如图 1 所示。

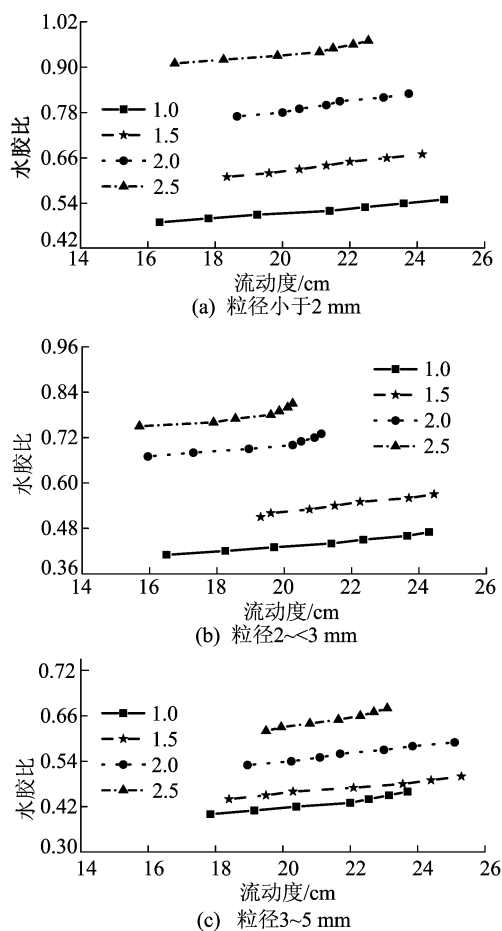


图 1 不同配比 CLSM 的水胶比随流动度变化关系

从图 1 可以看出,  $w$  越低, CLSM 随水胶比变化而变化的速度越快; 玻璃粒径越小, 掺量越多,

达到所需流动度的水胶比越大。

根据试验观察, 玻璃掺量较少的 CLSM 更不容易发生离析泌水, 当  $w$  增大, 玻璃掺量增多, 离析泌水严重。当玻璃粒径为 2~<3 mm、 $w$  为 2.0 和 2.5 时, CLSM 流动性过低, 测量结果不准确, 不满足 CLSM 的高流动性、自密实要求。

在实际工程应用中, CLSM 可能会在搅拌站集中厂拌, 再运输到施工地点, 因此还要考虑在此过程中流动度下降的问题。流动度随时间变化如图 2 所示。

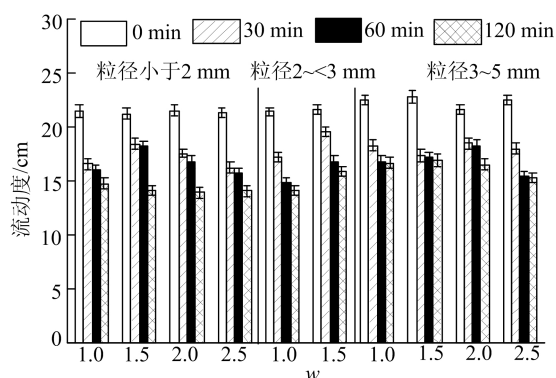


图 2 经时流动度随时间的变化

从图 2 可以看出, 拌合物的流动性随  $w$  的增大而减小, 其原因是黏结剂中粉煤灰内部的球形玻璃体充当滚珠轴承提高了拌合物的流动性, 微小颗粒充当集料填充浆体中的孔隙提高了材料的密实性和保水性, 当黏结剂质量减少时, 粉煤灰质量分数相对较少, 这一物理性能效果减弱, 从而导致拌合物流动性降低。

#### 2.1.2 泌水率

CLSM 2 h 内泌水小于 5%, 则被认为是稳定的, 一般在 2%~3% 范围内。本试验进行泌水试验所有配比 60 min 后不再泌水, 因此试验结果仅取前 60 min。10 组 CLSM 2 h 内泌水率及泌水率小于 5% 的 CLSM 在各时间点下的泌水情况如图 3 所示。

从图 3a 可以看出, 10 组 CLSM 的泌水率范围为 2.0%~19.6%, 其中  $w$  为 1.0 的 3 组及 III-1.5、III-2.0 组 CLSM 的泌水率在 5% 左右, 这 5 组 CLSM 不同时间点下的泌水率变化如图 3b 所示。CLSM 的泌水率与玻璃掺量成正比, 玻璃掺量相同的情况下, 泌水率与玻璃粒径成反比, 这可能是由于随着玻璃掺量增加, 拌合物比表面积增大, 需要更多的用水量, 且 CLSM 内部黏结力较小, 拌合物会出现离析泌水现象。随玻璃粒径

增大,达到所需流动度的用水量减少,自由水减少,降低了泌水的可能性。

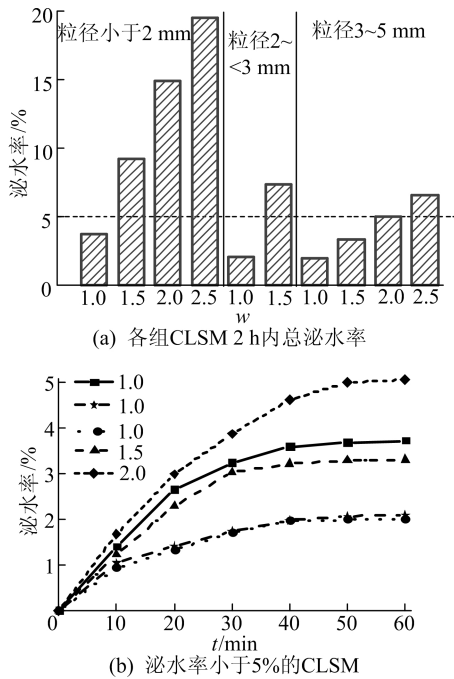


图 3 CLSM 2 h 泌水率及泌水率小于 5%CLSM 泌水率变化

### 2.2 力学性能

对不同龄期的 CLSM 进行无侧限抗压强度试验,结果如图 4 所示。抗压强度一般随养护时间的增加而增加,与玻璃粒径成正比,与玻璃掺量成反比。10 组 CLSM 28 d 的 UCS 均大于人行交通所需最低强度<sup>[12]</sup> (0.5 MPa), 范围在 0.59~2.19 MPa 之间,表明了废玻璃利用的可行性。

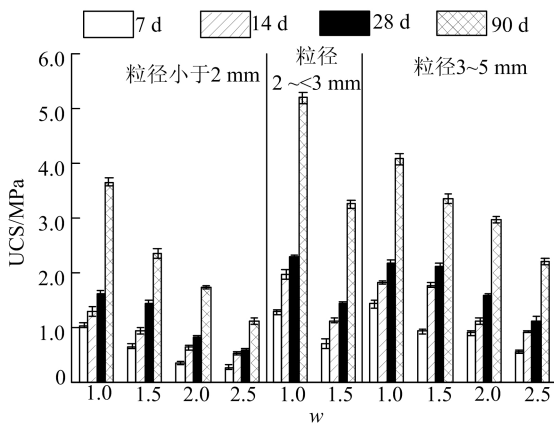


图 4 无侧限抗压强度试验结果

废玻璃、粉煤灰和电石渣制作的 CLSM 强度增长主要是发生火山灰反应,生成 C-S-H 凝胶。粉煤灰和电石渣质量比越高,拌合物中的 CaO、SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量比越高,即参与火山灰反应的

原材料越多,能生成更多的水化硅酸钙和水化铝酸钙等水化产物。另外,玻璃的物理性能也提供了一定的抗压强度,尤其是粒径在 3~5 mm 范围内的玻璃。

由于火山灰反应的进程较慢,早期水化程度不深。为探究火山灰反应潜力,本文对试件进行 90 d 养护,测量其抗压强度。结果显示,试件在 28~90 d 内抗压强度增长迅速,90 d 抗压强度几乎都达到了 28 d 的 2 倍,随养护龄期增长,火山灰反应充分。

### 2.3 冻融耐久性

冻融耐久性是耐久性研究的一个重要分支,用来描述在冻融循环下长期保持良好的使用性能的能力。对养护 28 d 的 CLSM 进行冻融循环试验,根据强度变化进行耐久性评价,10 组样品的冻融循环 UCS 损失率如图 5 所示。

CLSM 的 UCS 损失率随冻融循环次数增加而增大,主要是由于 CLSM 结冰膨胀,冰晶吸收周围水分,内部产生裂缝,融化时进入自由水,下次冷冻时会产生更大的裂缝,如此恶性循环,导致冻融循环下强度逐渐降低。当 w 超过 1.5 后,火山灰反应材料的量减少,CLSM 抵抗冻融循环能力大大减弱,在 6 次或 9 次循环后强度损失率达最大值。其中:粒径小于 2 mm、w 为 2.0 和 2.5 的 CLSM 在 6 次循环后强度损失率分别达 73.40% 和 76.32%;粒径 3~5 mm、w 为 2.0 和 2.5 的 CLSM 在 9 次循环后强度损失率分别达 71.79% 和 73.50%。而其他组 w 小于 2.0 的 CLSM 强度损失率低于 50%。因此在实际工程应用中,可通过控制玻璃掺量制备出具有良好抗冻融耐久性的 CLSM。

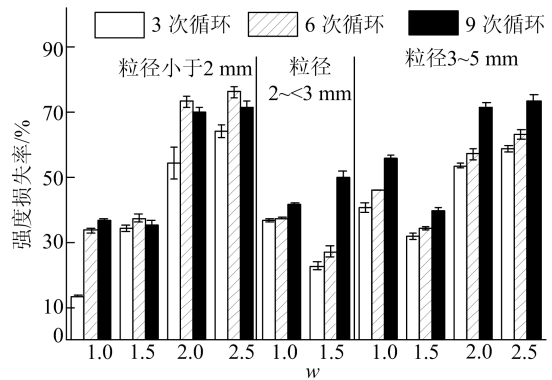


图 5 冻融循环次数与 UCS 损失率关系

对养护 90 d CLSM 试件进行 9 次冻融循环试验,测量强度损失。结果表明,90 d 后火山灰反应充分,CLSM 强度高,冻融循环后残余抗压强

度均远高于养护 28 d 经历同等试验的 CLSM。琉璃粒径小于 2 mm,  $w$  为 1.0 的 CLSM 养护 28、90 d 进行 9 次冻融循环后的残余抗压强度分别为 1.39、2.31 MPa。这一结果与 2.2 节力学性能研究结果一致。

## 2.4 微观结构分析

### 2.4.1 X 射线衍射分析

不同配比的 CLSM 养护 7、90 d 的 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析结果如图 6 所示。

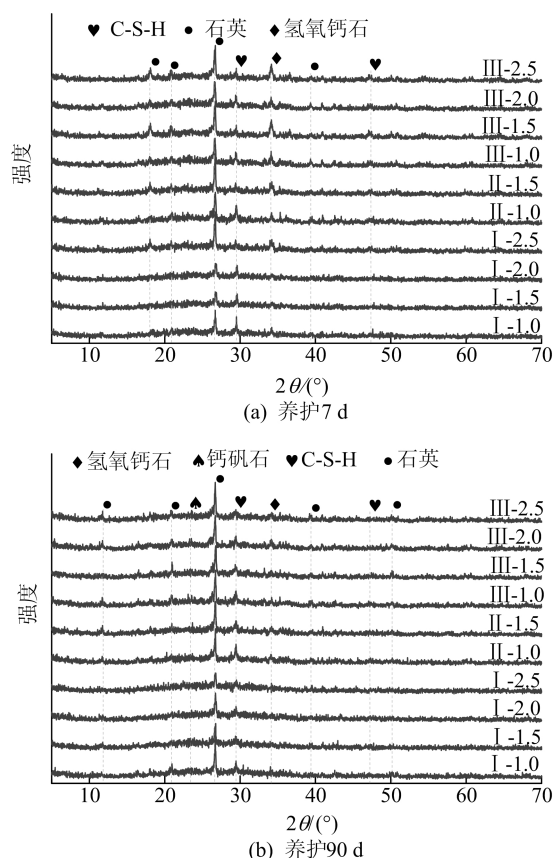


图 6 不同养护时间下 CLSM 的 XRD 结果

不同配比条件下 CLSM 水化产物基本相同, 为水化硅酸钙(C-S-H)、钙矾石和氢氧化钙等。

从图 6 可以看出: 7 d 时氢氧化钙特征峰明显, 此时粉煤灰和电石渣中的氢氧化钙还未反应完全; 90 d 时, 火山灰反应消耗大量氢氧化钙, 氢氧化钙峰值降低, 生成水化硅酸钙凝胶, C-S-H 峰值增加, 在 C-S-H 特征峰中混合出现托贝莫来石晶体特征峰。C-S-H 凝胶有利于强度提高, 对砂浆和混凝土的性能起到关键影响, C-S-H 越多, 越有助于获得更好的力学性能<sup>[13]</sup>。I-1.0、I-1.5、II-1.0、II-1.5、III-1.0 及 III-1.5 组的 CLSM 相对具有更高的 C-S-H 含量, 即具有更高的强度,

与冻融耐久性结果一致。

### 2.4.2 扫描电子显微镜分析

为进一步了解 CLSM 砂浆的表面形貌, 采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对 CLSM 进行结构表征。CLSM 不同养护时间下的 SEM 图像如图 7 所示。

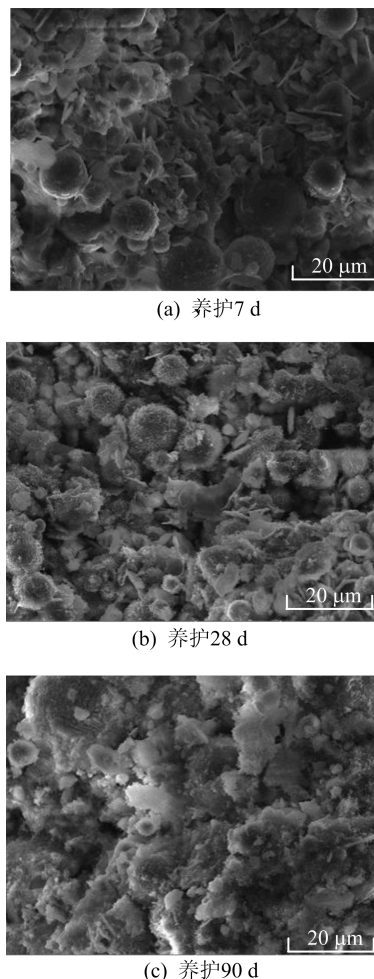


图 7 不同养护时间下的 CLSM 的 SEM 图片

由图 7a 可知, 7 d 时材料表面有针棒状产物, 为钙矾石的特征<sup>[14]</sup>, 在粉煤灰周围包裹一层 C-S-H 凝胶。由图 7b 可知, 养护时间为 28 d 的 CLSM 为短粗针状晶体, C-S-H 的繁殖促进了钙矾石的晶粒尺寸变小, 粉煤灰开始反应, C-S-H 凝胶的形貌从纤维状的晶体变化到网状的非晶态<sup>[15]</sup>, 更多的 C-S-H 凝胶像网一样覆盖在粉煤灰表面, 使 CLSM 表面密度更大, 促进了 UCS 的增长。由图 7c 可知, 与 7 d 和 28 d 相比, 90 d CLSM 的空隙中生成了更多 C-S-H 凝胶等水化产物, 粉煤灰的承载能力有限, 当原位生长的 C-S-H 数量超过粉煤灰的承载极限时, 冗余的 C-S-H 从粉煤灰上脱落并在其周围生长, 显著提高了混合物

的 UCS。

### 3 结 论

1) CLSM 可工作性主要受到水胶比的影响。玻璃粒径小于 2 mm 和 3~5 mm 的 CLSM 比玻璃粒径在 2~<3 mm 的 CLSM 随水胶比变化而变化的速度更快。粉煤灰能提高材料的流动性和保水性,因此  $w$  为 1.0 和 1.5 的 CLSM 粉煤灰质量比相对较多,保水性较好。CLSM 的泌水率与玻璃掺量成正比,与玻璃粒径成反比,10 组 CLSM 泌水率最大为 19.6%,其中 I-1.0、II-1.0、III-1.0 和 III-2.0、III-2.5 组的 CLSM 泌水率均控制在 5% 以内。

2) 无侧限抗压强度随养护时间增加而增加。UCS 与玻璃粒径成正比,与玻璃掺量成反比。UCS 主要是发生火山灰反应,由生成的 C-S-H 凝胶提供。10 组 CLSM 28 d 抗压强度在 0.59~2.19 MPa 之间,表明了废玻璃利用的可行性。粉煤灰后期水化反应表现出良好优势,养护 90 d 的 CLSM 的 UCS 约为 28 d 时的 2 倍,90 d 时产生托贝莫来石和钙矾石等晶体。

3) 玻璃掺量较多( $w$  为 2.0、2.5)与玻璃粒径较大(3~5 mm)的 CLSM 耐久性差,I-2.0 组和 I-2.5 组 CLSM 在 6 次冻融循环后 UCS 损失率分别达 73.40% 和 76.32%,III-2.0 组和 III-2.5 组 CLSM 在 9 次冻融循环后强度损失率分别达 71.79% 和 73.50%。在实际工程应用中应注意避免。

4) 养护时间为 7 d 时粉煤灰和电石渣中的氢氧化钙还未反应完全,XRD 结果中氢氧化钙特征峰明显,SEM 观测到材料表面有针棒状钙矾石产物,粉煤灰周围包裹一层 C-S-H 凝胶,试件强度较低。90 d 时,火山灰反应消耗大量氢氧化钙,氢氧钙石峰值降低,生成水化硅酸钙凝胶,C-S-H 峰值增加,CLSM 强度显著提高。

本文研究结果证实了废弃玻璃、粉煤灰和电石渣在氢氧化钠碱性条件下制备可控性低强度材料的可行性。为废弃玻璃及其他工业固体废弃物的大规模绿色处理提供了思路。试验结果表明,玻璃作为细骨料可通过控制掺量,使玻璃与黏结剂质量比为 1.0 的 CLSM 的各性能可达到最理想效果;综合破碎成本,粒径 3~5 mm、质量比 1.0 为最佳参数。

### [参 考 文 献]

- [1] ACI Committee. Controlled low strength materials; ACI 299R-99[R]. Farmington Hills, Mich: Concrete Institute, 1999:1-3.
- [2] 付立娟,杨勇,卢静华. 水泥工业碳达峰与碳中和前景分析[J]. 中国建材科技,2021,30(4):80-84.
- [3] DO M T, KANG G O, GO G H, et al. Evaluation of coal ash-based CLSM made with cementless binder as a thermal grout for borehole heat exchangers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(6):1-11.
- [4] 陈宣东,黄达,刘光焰,等. 废弃玻璃在混凝土中应用进展[J]. 混凝土,2019(10):135-139.
- [5] ATOVEBI O D, GANA A J, LONGE J E. Strength assessment of concrete with waste glass and bankoro (Morinda Citrifolia) as partial replacement for fine and coarse aggregate[J]. Results in Engineering, 2020, 6:100124.
- [6] 静行,赵毅. 不同粒径废玻璃粉对水泥胶砂力学性能的影响[J]. 混凝土,2020(2):90-93.
- [7] MARIAKOVA D, MOCOVA K A, FORTOVA K, et al. Waste glass powder reusability in high-performance concrete: leaching behavior and ecotoxicity[J]. Materials, 2021, 14(16):4476.
- [8] SZUDEK W, GOLEK L, MALATA G, et al. Influence of waste glass powder addition on the microstructure and mechanical properties of autoclaved building materials[J]. Materials, 2022, 15(2):434.
- [9] MOBASHERI F, IRVALAD S, HIRZADI JAVID A A, et al. Waste glass as a precursor in alkali-activated materials: mechanical, durability, and microstructural properties [J]. Structural Concrete, 2022, 23(6):3651-3671.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:1-164.
- [11] 陕西省建筑科学研究院. 建筑砂浆基本性能试验方法标准:GJ/T 70—2009[S]. [出版地不详:出版者不详],2009:1-22.
- [12] 王树兴. 高速公路隧道智能监控管理技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,2019:263-267.
- [13] 刘新,冯攀,沈叙言,等. 水泥水化产物:水化硅酸钙(C-S-H)的研究进展[J]. 材料导报,2021,35(9):9157-9167.
- [14] CAI Y M, TAO Y, XUAN D X, et al. Effect of seawater on the morphology, structure and properties of synthetic ettringite [J]. Cement and Concrete Research, 2023, 163:107034.
- [15] 杨进波,赵钰洋,尹航. 基于分子动力学的 C-S-H 凝胶性能研究进展[J]. 材料导报,2021,35(5):5095-5101,5121.

(责任编辑 吴 亮)