

电厂炉底渣在全轻混凝土中的应用研究

胡亮, 凌刚, 林希

武汉盛大长青建材有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年11月8日; 录用日期: 2023年12月7日; 发布日期: 2023年12月18日

摘要

电厂炉底渣作为锅炉底部湿排出的灰渣, 其含水高以及活性低的特点导致其难以被有效利用。为解决这一问题, 本试验研究了炉底渣在全轻混凝土的制备中应用的可行性, 分别研究炉渣砂和炉渣石等体积取代陶砂和陶粒对全轻混凝土坍扩度、容重、抗压强度的影响, 并采用SEM和EDS对全轻混凝土微观形貌进行了分析。结果表明: 炉渣砂中含有一定量粉煤灰, 取代陶砂时能发挥形貌效应和火山灰效应, 炉渣级配和密度与陶粒接近, 全取代时全轻混凝土性能能满足设计要求。炉渣石与本试验所用陶粒相差较大, 取代陶粒时对全轻混凝土的容重和抗压强度不利, 取代量不宜超过25%。从微观分析结果来看, 炉底渣掺入混凝土, 能发挥火山灰效应, 对水化有利。

关键词

电厂炉底渣, 全轻混凝土, 工作性能, 力学性能, 微观结构

Research on the Application of Power Plant Bottom Slag in Lightweight Concrete

Liang Hu, Gang Ling, Xi Lin

Wuhan Shengda Changqing Building Materials Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Nov. 8th, 2023; accepted: Dec. 7th, 2023; published: Dec. 18th, 2023

Abstract

Power plant bottom slag, as the wet ash discharged from the bottom of the boiler, is difficult to be effectively utilized due to its high moisture content and low reactivity. To solve this problem, this study investigated the feasibility of using bottom slag in the preparation of lightweight aggregate concrete. The effects of slag sand and slag stone on the workability, density, and compressive strength of lightweight aggregate concrete were studied by replacing them with ceramic sand and ceramic aggregate, and the microstructure of lightweight aggregate concrete was analyzed using SEM and EDS. The results showed that slag sand, which contains a certain amount of fly ash, can

exhibit pozzolanic and volcanic ash effects when used as a replacement for ceramic sand. The gradation and density of slag sand are similar to those of ceramic aggregate. When fully substituted, the performance of lightweight aggregate concrete can meet the design requirements. However, slag stone differs significantly from the ceramic aggregate used in this study, and its replacement has a detrimental effect on the density and compressive strength of lightweight aggregate concrete, with the replacement rate not exceeding 25%. From the microscopic analysis, it can be seen that the addition of bottom slag to concrete can exhibit a volcanic ash effect, which is beneficial for hydration.

Keywords

Power Plant Bottom Slag, Lightweight Concrete, Workability, Mechanical Properties, Microstructure

Copyright © 2023 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. 前言

电厂炉渣是从锅炉底部排渣口出来的灰渣，特点是含水率高，活性低，轻质多孔[1]，这一些特性导致了炉底渣的资源化应用价值较低。电厂炉底渣的化学成分与粉煤灰类似，但是由于排出方式不同，其性能与粉煤灰有较大的差距。电厂炉底渣的排放量约为粉煤灰的 25%，但是其利用率远不及粉煤灰，这也导致了大量的炉底渣被堆放处理。一方面会造成大量的土地资源浪费，另一方面还会造成扬尘和重金属溶出等污染。因此，电厂炉底渣的资源化利用成了一个亟待解决的问题。

随着国家对固废资源化应用的日益重视，电厂炉底渣的研究和应用也得到了人们的关注。由于炉底渣和粉煤灰是同源物质，在化学成分上相近，其硅、铝含量可达 90%左右，经烘干磨细后可以满足 II 级粉煤灰的指标要求，可以作为水泥混合材应用于混凝土和砂浆制备中[2]-[7]。但是烘干和磨细工序较为复杂并且耗费大量能源，这也在一定程度上降低了炉底渣的应用价值。

炉底渣作为骨料使用也是一个资源化利用措施，其应用领域也更加广泛。首先，炉底渣可以代替砂石粒料，用于制备道路的垫层和基层材料，可以提升路基的力学性能[8] [9]。其次，樊丽军等[10]的研究表明，采用炉底渣制备的混凝土砌块的力学性能和导热性能均优于加气混凝土和普通黏土砖砌块。王能关[11] [12]等研究发现，可以添加级配炉底渣为轻骨料制备轻质复合隔墙板。

混凝土的轻质化也是其重要的发展方向，而炉底渣具有轻质多孔的特性，其在轻质混凝土的应用也具有较高的可行性。张建鹏[13]以炉底渣为细集料，陶粒为粗集料，制备出了容重低于 1200 kg/m³的 LC5 轻质混凝土。董恒瑞[14]通过蒸养的方式，利用炉渣制备出了强度等级 LC20，密度等级 1400 轻质预制混凝土。基于以上观点，本实验利用炉底渣轻质多孔的特性，将炉底渣中的细集料和粗集料部分，分别替换陶粒混凝土中轻砂组分以及陶粒部分，制备容重 1200 级 LC10 的现浇全轻混凝土。研究了炉底渣替代率对全轻混凝土工作性能、力学性能的影响规律，进一步通过扫描电镜分析了炉渣对全轻混凝土微观结构的影响。

2. 试验

2.1. 原材料

本实验使用的水泥为产自华新水泥(大冶)有限公司的 P·O 42.5 水泥，28 天胶砂抗压强度为 51 MPa；粉煤灰来自鄂州电厂的三级灰，细度为 38%，需水量比为 99%；外加剂为公司自产轻骨料专用增稠引气

聚羧酸减水剂，推荐掺量为 1.6%。陶粒和陶砂来自宜昌页岩陶粒；炉底渣来自鄂州电厂；陶粒、陶砂和炉底渣的性能见表 1~3。炉底渣的微观结构如图 1 所示。

Table 1. Physical properties of ceramic particles and ceramic sand
表 1. 陶粒和陶砂的物理性能

种类	干松散堆积密度(kg/m ³)	粒径范围(mm)	筒压强度(MPa)	1 h 吸水率(%)
陶粒	460	5~10	1.9	7.5
陶砂	740	≤3	-	19.2

Table 2. Physical properties of power plant bottom slag particles
表 2. 电厂炉底渣颗粒的物理性能

种类	松散堆积密度(kg/m ³)	含水率(%)	含粉量(%)
电厂炉底渣砂(5 mm 以下)	801	27	12.6
电厂炉底渣石(5~16 mm)	778	12	-

Table 3. Sieving data of slag sand and pottery sand
表 3. 炉渣砂和陶砂的筛分数据

筛孔(mm)	累计筛余百分数(%)								细度模数
	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	筛底	
炉渣砂	0	6.8	10.6	10.6	12.1	35	12.3	12.6	1.7
陶砂	0	0	15.4	19.6	21	14.9	21.6	7.5	1.8

Table 4. Chemical composition of bottom slag (wt%)
表 4. 炉底渣的化学组成(wt%)

成分	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃
含量	8.44	0.66	1.42	11.52	44.74	1.06	0.42	30.17

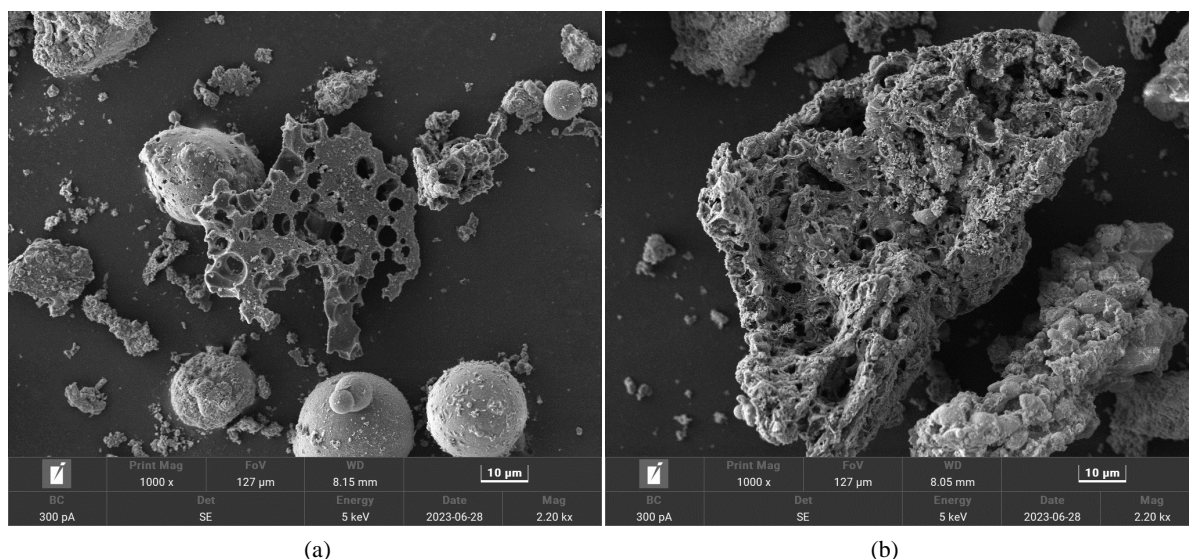


Figure 1. SEM image of furnace bottom slag
图 1. 炉底渣 SEM 图

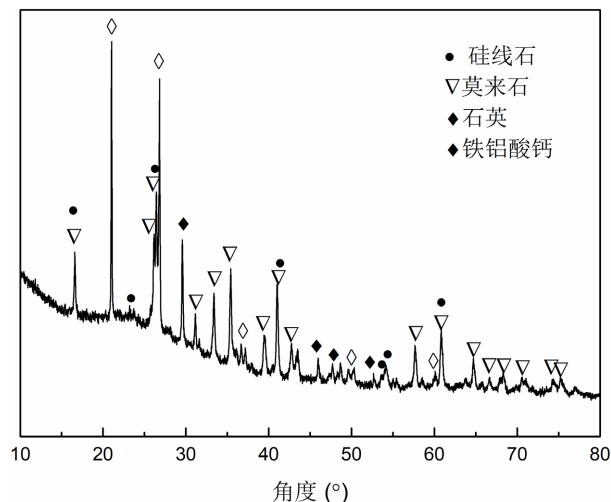


Figure 2. XRD test results of furnace bottom slag
图 2. 炉底渣 XRD 测试结果

从图 1(a)中可以看出, 炉底渣的粉体中含有一定量的球状玻璃微珠; 从图 1(b)中可以看出炉渣中的粗颗粒为无规则的多孔结构。炉底渣的化学成分如表 4 所示, 从表中可以看出, 炉底渣的主要成分含有为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 以及 Fe_2O_3 等氧化物的混合物相组成, 与粉煤灰类似。炉底渣的 XRD 测试结果如图 2 所示, 图中可以看出, 炉底渣的主要物相为硅线石、莫来石、石英以及铁铝酸钙等。

2.2. 试验方案

全轻混凝土配合比设计根据 JGJ 51-2002《轻骨料混凝土技术规范》中的松散体积法进行, 骨料总体积系数选为 1.35, 坍落度不超过 180 mm, 设计强度不低于 LC10, 混凝土密度等级不大于 1200 kg/m^3 。试验使用的炉底渣为电厂原状炉底渣, 含水率 27%, 不需要进行预湿处理。对陶粒、陶砂进行预湿 1 h 处理。试配用水量为净用水量。

用从陶砂、炉渣砂检测数据来看, 炉底渣砂在堆积密度、细度模数、级配方面与陶砂接近, 故试验设计炉渣砂等体积取代陶砂, 取代率分别为 25%、50%、75%、100%, 测试炉渣砂取代率对全轻混凝土拌合物性能、容重、强度的影响; 炉渣石(5~16 mm)也是一种轻质骨料, 研究了炉渣石等体积取代陶粒, 考虑到两者堆积密度差别较大, 设定取代率为 10%、25%、40%, 测试炉渣石取代率对全轻混凝土拌合物性能、容重、强度的影响; 对新拌混凝土的湿容重、坍落度和扩展度进行测试, 混凝土成型后进行标准养护, 测试 7 天、28 天抗压强度。将满龄期混凝土试件放入 105°C 烘箱中烘干至恒重, 然后进行称量, 记录其干容重。

3. 试验结果与讨论

3.1. 炉渣砂取代陶砂对全轻混凝土性能的影响

本试验采用炉渣砂等体积取代陶砂, 测试了炉渣砂等体积取代陶粒 0%~100% 时, 全轻混凝土拌合物容重、坍落度、抗压强度变化情况。试验配合比见表 5。炉渣砂掺量对全轻混凝土容重、坍落度以及抗压强度的影响见图 3~5。

从图 3 可以看出, 随炉渣砂掺量的增加, 全轻混凝土的湿容重、干容重均呈增加的趋势。炉渣掺量为 0% 时, 全轻混凝土干容重为 1150 kg/m^3 , 炉渣砂全取代陶砂时(掺量 100%), 全轻混凝土干容重 1240 kg/m^3 , 符合全轻混凝土密度等级 1200 级($1150\sim 1250 \text{ kg/m}^3$)的要求。原因在于, 从表 1、表 2 可以看出,

Table 5. Experimental mix proportions (kg/m^3)
表 5. 试验配合比(kg/m^3)

编号	水泥	粉煤灰	陶砂	炉底砂	陶粒	外加剂	水
1	200	80	625	(0%)	317	5.4	160
2	200	80	469	180 (25%)	317	5.4	160
3	200	80	313	361 (50%)	317	5.4	160
4	200	80	156	541 (75%)	317	5.4	160
5	200	80	0	721 (100%)	317	5.4	160

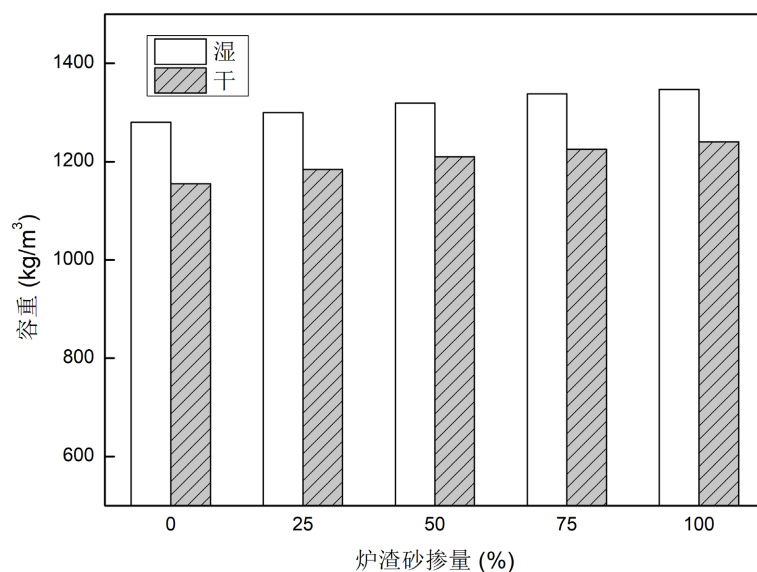


Figure 3. The effect of slag sand content on the unit weight of lightweight concrete
图 3. 炉渣砂掺量对全轻混凝土容重的影响

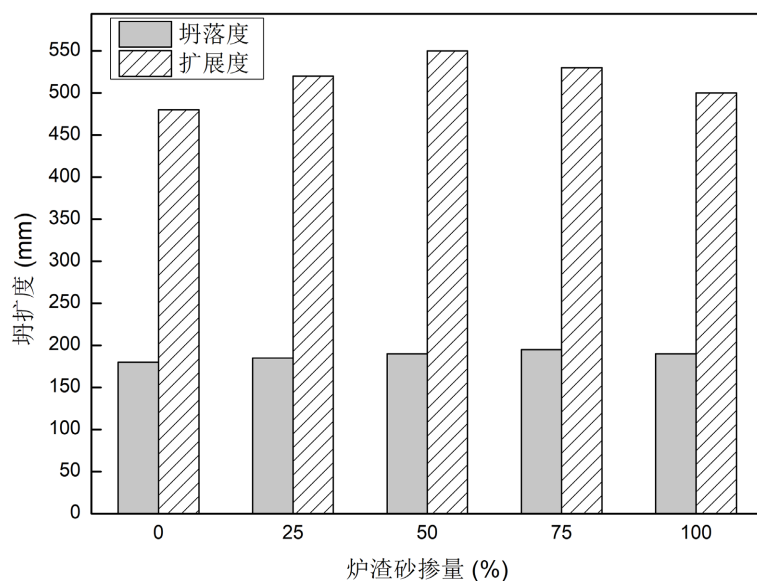


Figure 4. Effect of slag sand content on the workability of lightweight concrete
图 4. 炉渣砂掺量对全轻混凝土工作性能的影响

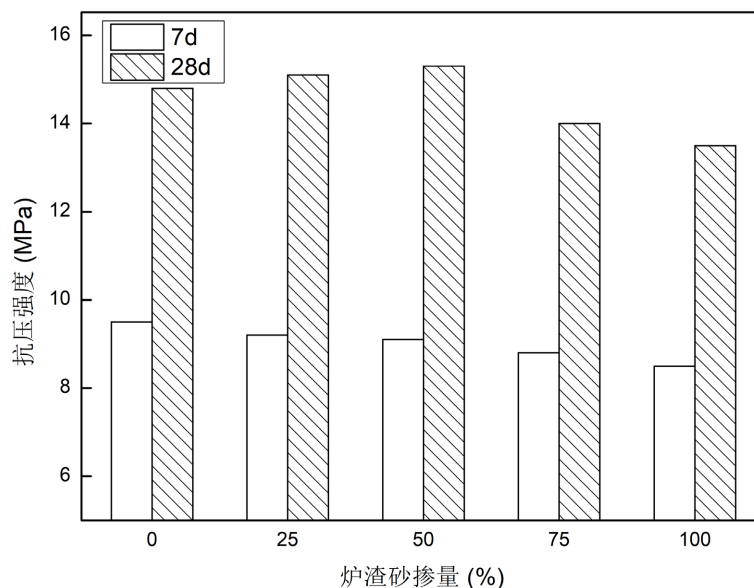


Figure 5. Effect of slag sand content on the compressive strength of lightweight concrete

图 5. 炉渣砂掺量对全轻混凝土抗压强度的影响

陶砂、炉渣砂密度不同，陶砂 740 kg/m^3 ，而炉渣砂 801 kg/m^3 ，因此随炉渣砂取代量增加，全轻混凝土容重增加。

从图 4 可以看出：随炉渣砂取代量增加，全轻混凝土拌合物坍扩度呈先增加后降低的趋势，炉渣砂全取代陶粒时，拌合物的坍落度、扩展度仍高于基准。其中，炉渣砂取代率为 50% 时，拌合物坍落度、扩展度达到最大值。原因在于，炉渣砂是电厂燃煤副产物，其化学成分和粉煤灰接近。从表 3 筛分数据看出炉渣砂中含有 12.6% 的细粉，从图 2 SEM 图看出，炉渣砂中含有一定量球状玻璃体，可以确定炉渣砂中含有细粉为粉煤灰。随炉渣砂掺量增加，其含有的粉煤灰的滚珠效应发挥，改善拌合物和易性。从图 2 SEM 还可以看出，炉渣砂是无规则多孔结构，掺加到混凝土中可能对拌物流动性不利。因此，炉渣砂取代量超过 50% 后，全轻混凝土的坍落度、扩展度出现降低。

从图 5 可以看出：随炉渣砂取代量增加，混凝土 7 d 抗压强度呈降低的趋势，28 d 抗压强度呈先增加后降低的趋势。炉渣砂取代量为 50% 时，7 d 抗压强度降低 4.3%，28 d 抗压强度增加 3.4%。取代量超过 50%，抗压强度线性降低，炉渣砂全取代陶砂时，7 d 抗压强度 8.5 MPa，28 d 抗压强度 13.5 MPa，仍符合设计 LC10 的要求。原因在于，炉渣砂较陶粒，其结构更酥松多孔，抗压性能更差，因此 7 d 强度呈降低趋势。由于炉渣砂中含有一定量粉煤灰，水化后期发挥火山灰效应，对抗压强度有增强作用。

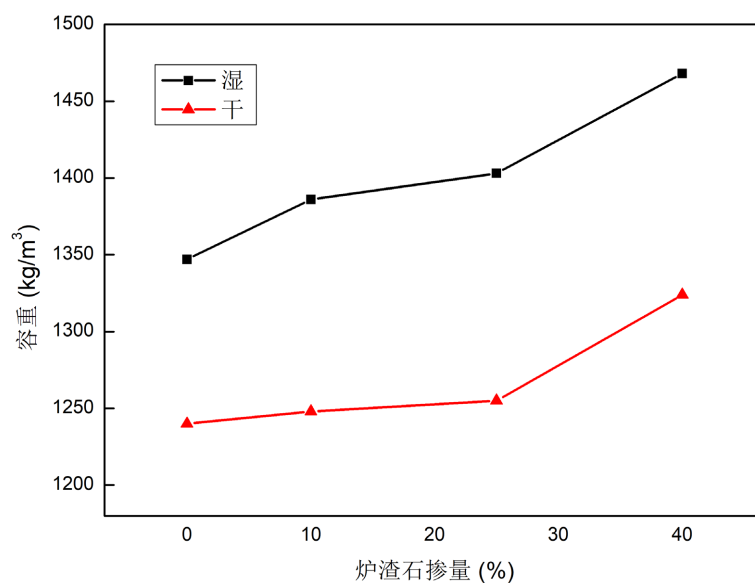
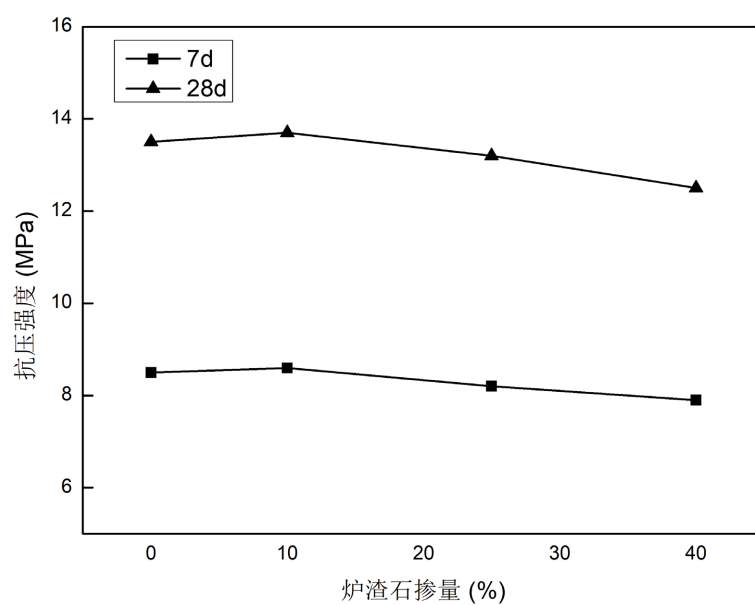
综合以上，随炉渣砂取代量增加，全轻混凝土容重呈增加趋势，坍扩度、28 天抗压强度呈先增加后降低的趋势。炉渣砂 100% 取代陶砂时，全轻混凝土性能仍能满足密度等级 1200 强度等级 LC10 的设计要求。

3.2. 炉渣石取代陶粒对全轻混凝土性能的影响

电厂炉底渣中含有一定量 5 mm 以上颗粒，其也是一种轻质多孔材料。本试验选取 5~16 mm 颗粒作为炉渣石。研究了炉渣石等体积取代陶粒对全轻混凝土容重、坍扩度、抗压强度的影响。由于炉渣石与本试验所用陶粒密度差异较大，故设计取代量为 10%、25%、40%。试验配合比见表 6。炉渣石取代陶粒对混凝土容重、抗压强度的影响见图 6 和图 7。

Table 6. Test mix proportions and workability of mixtures**表 6.** 试验配合比及拌合物工作性能

编号	水泥	粉煤灰	炉渣砂	陶粒	炉渣石	外加剂	水	工作性能
5	200	80	721	317		5.4	160	190/500
6	200	80	721	285	56	5.4	160	190/490
7	200	80	721	238	140	5.4	160	185/475
8	200	80	721	190	223	5.4	160	180/430

**Figure 6.** Effect of slag stone content on the unit weight of lightweight concrete**图 6.** 炉渣石掺量对全轻混凝土容重的影响**Figure 7.** Effect of slag stone content on the compressive strength of lightweight concrete**图 7.** 炉渣石掺量对全轻混凝土抗压强度的影响

从表 6 可以看出, 随炉渣石取代量增加, 全轻混凝土拌合物坍落度呈降低趋势。从图 6、图 7 可以看出, 随炉渣石取代量增加, 全轻混凝土容重呈增加趋势, 取代量为 25% 时, 干容重为 1255 kg/m^3 。从图 7 可以看出, 随炉渣石取代量增加, 全轻混凝土抗压强度整体呈降低趋势, 取代量为 25% 时, 28 d 抗压强度降低 2.3%, 取代量为 40% 时, 28 d 抗压强度降低 9.3%。原因在于, 炉渣石相对于陶粒, 其内部结构更酥松, 承压能力变差。且炉渣石与本试验所用陶粒密度差较大。故从密度等级考虑, 炉渣石取代量不宜超过 25%。

3.3. 全轻混凝土界面分析

从前期数据可以看出, 电厂炉底渣中含有一定量粉煤灰, 具有火山灰活性。本试验对全陶砂和炉渣砂全取代陶粒的混凝土试件(1#和 5#)进行了微观界面分析。结果见图 8 和图 9。

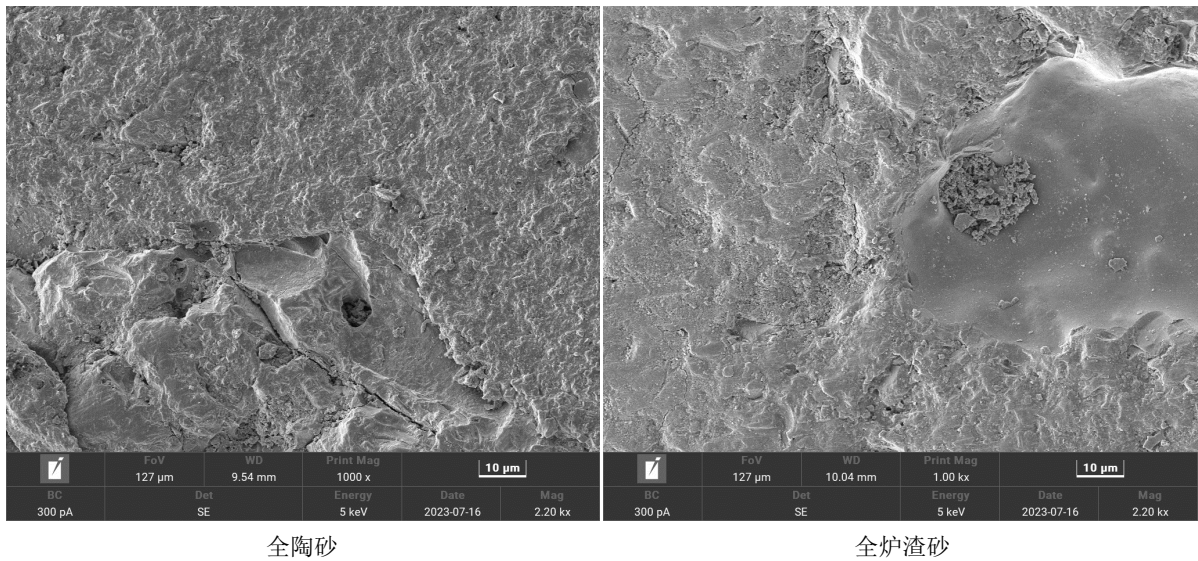


Figure 8. SEM image of the interface transition zone for ceramic sand and slag sand concrete
图 8. 全陶砂和全炉渣砂混凝土界面过渡区 SEM 图

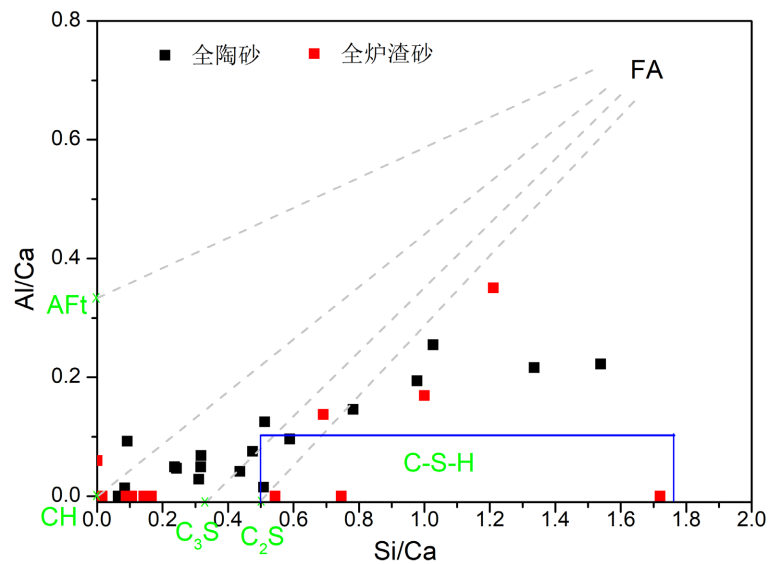


Figure 9. Statistics of element distribution point groups in slurry EDS point scanning
图 9. 浆体 EDS 点扫描元素分布点群统计

如图 8 所示分别为两实验组中陶砂 - 浆体和炉渣 - 浆体的界面过渡区的微观形貌图。从图中可以看出, 陶砂和浆体之间存在明显的界面过渡区, 而炉渣砂骨料与浆体之间的界面过渡区更不明显。

图 9 是对两组试样浆体进行 X 射线能谱分析, 对浆体中元素点群进行分析。

可以看出, 全炉渣砂混凝土的浆体的元素的点群分布具有更大的离散性, 表明浆体的水化程度更高, 生成了更多的水化产物[15]。同时, 由于炉渣微粉中含有一定量的粉煤灰组分, 导致其浆体在 C-S-H 中的 Si/Ca 比例明显偏高, 但其低 Si/Ca 比产物的比例也更多, 进一步表明浆体的水化程度更好[16] [17]。这一结果也证明了炉底渣的火山灰活性, 有益于增强浆体与炉渣骨料之间的界面过渡区。

4. 结论

本次试验旨在提高炉底渣的资源化利用价值, 研究了炉渣砂和炉渣石在制备全轻质混凝土的可行性。分别研究了炉渣砂和炉渣石对全轻质混凝土的工作性能、力学性能、容重和微观结构的影响规律, 并得到了以下结论:

1) 炉渣砂级配与陶砂接近, 等体积取代陶砂时, 会在一定程度增加混凝土干容重, 全取代陶砂时, 全轻混凝土的干容重也能满足密度等级 1200 的要求。随炉渣砂取代量增加, 全轻混凝土的坍落度、扩展度先增加后降低, 7 d 抗压强度降低, 28 天抗压强度先增加后降低, 炉渣砂取代 100% 时, 全轻混凝土抗压强度满足 LC10 的要求。

2) 炉渣石与陶粒密度差异较大, 取代陶粒后会降低混凝土抗压强度, 增加干容重。其取代量不宜超过 25%。

3) 通过 SEM + EDS 测试表明, 炉底渣的掺入可以加强全轻质混凝土的界面过渡区, 促进浆体的水化, 从而提高混凝土的后期强度。

参考文献

- [1] 张雷, 赵玉静, 俞瑾. 炉底渣磨细灰的物性参数研究[J]. 混凝土世界, 2019(6): 68-71.
- [2] 翟祥军, 张虹. 磨细炉渣作为大体积混凝土掺合料的试验研究[J]. 水力发电, 2018, 44(12): 121-125.
- [3] 郭殿波, 张继涛, 朱献. 用电厂炉渣作水泥混合材的研究[J]. 水泥工程, 2003(4): 60-67.
- [4] 章志, 陈宁, 王娟, 等. 生活垃圾焚烧炉底渣对干硬性混凝土力学性能及干燥收缩影响研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(10): 61-64, 111.
- [5] 高雪峰, 张海英, 杨向阳, 等. 燃煤炉渣作为新型掺合料在预拌混凝土中的应用[J]. 四川水泥, 2016(3): 311-313.
- [6] 高仁辉, 曹巍缤, 庞超明, 等. 电厂炉底渣的性能及在混凝土中的应用现状[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(10): 78-83, 87.
- [7] 吴建华. 炉渣综合利用是节约煤炭的一个重要途径[J]. 节能与环保, 1993(5): 29-32.
- [8] 宋碧再. 利用水泥煤渣稳定碎石的技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2007(9): 158-160.
- [9] 陈瑞毅, 杨科, 马国军, 等. 炉底渣掺量对充填体力学特性的影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(3): 71-75.
- [10] 樊丽军, 巩天真. 炉渣玻化微珠混凝土试验研究及应用[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2014, 36(1): 71-75.
- [11] 王能关, 左丽, 赖洪美, 等. 利用炉渣和粉煤灰生产轻质隔墙板[J]. 新型建筑材料, 2002(2): 19-20.
- [12] 李阳, 逯光辉. 利用装修垃圾再生骨料和炉底渣研制轻质隔墙板[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(11): 5-8.
- [13] 张建鹏, 李刚, 马玉薇, 等. 炉渣混凝土的制备及其性能研究[J]. 混凝土, 2016(2): 137-139, 144.
- [14] 董恒瑞, 邓铃夕, 王海标. 以炉底渣和破碎加气混凝土为轻骨料制备轻质混凝土的试验研究[J]. 重庆建筑, 2020, 19(4): 26-29.
- [15] Kulik, D.A. (2011) Improving the Structural Consistency of CSH Solid Solution Thermodynamic Models. *Cement and Concrete Research*, 41, 477-495. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.012>
- [16] Lothenbach, B., Matschei, T., Möschner, G., et al. (2008) Thermodynamic Modelling of the Effect of Temperature on

the Hydration and Porosity of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, **38**, 1-18.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.017>

- [17] 李博, 陈伟. C-S-H 凝胶分子结构研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1095-1100.