

文章编号:1007-9629(2023)09-0988-08

净水功能型粉煤灰透水混凝土性能研究

郭远臣*, 叶青, 向凯, 刘芯州, 王雪

(重庆三峡学院土木工程学院, 重庆 404120)

摘要:通过向透水混凝土中引入净化材料(粉煤灰、硫酸改性粉煤灰),制备了具有净水功能的透水混凝土,研究了净化材料掺量对透水混凝土力学性能、孔隙率、透水性能及吸附水中 Zn^{2+} 性能的影响。结果表明:硫酸改性粉煤灰能够促进水化硅酸钙凝胶的生成,改善透水混凝土的孔隙结构,提高其力学性能和对 Zn^{2+} 的吸附效果;当硫酸改性粉煤灰掺量为 20% 时,透水混凝土试件的抗压强度达到峰值,孔隙率与透水系数降到最低值;随着净化材料掺量的增加,透水混凝土对 Zn^{2+} 的吸附效果逐渐明显。

关键词:粉煤灰;吸附;重金属;净化

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.006

Performance of Fly Ash Pervious Concrete with Water Purification Function

GUO Yuanchen*, YE Qing, XIANG Kai, LIU Xinzhou, WANG Xue

(School of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120, China)

Abstract: Pervious concrete with water purification function was prepared by introducing purification materials (fly ash, sulfuric acid modified fly ash) into pervious concrete. The effects of purification material content on mechanical properties, porosity, water permeability and adsorption of Zn^{2+} in water of pervious concrete were studied. The results show that the addition of sulfuric acid modified fly ash can promote the formation of hydrated calcium silicate gel, improve the pore structure of pervious concrete, and improve the mechanical properties and Zn^{2+} adsorption effect. When the use level of sulfuric acid modified fly ash is 20%, the compressive strength of pervious concrete specimens reaches the peak, and the porosity and permeability coefficient decrease to the lowest value. With the increase of use level of purification materials, the adsorption effect of Zn^{2+} of pervious concrete is gradually obvious.

Key words: fly ash; adsorption; heavy metal; purification

随着中国城市化区域的发展,不透水路面逐年增加,导致城市道路排水系统的负担加重,内涝现象频发。为解决此类问题,中国提出建设具有自然积存、自然渗透、自然净化功能的海绵城市,通过“渗、滞、蓄、净、用、排”等措施^[1-2],将路面积水有序排入地下,但此过程也将路面重金属离子一同携带到地下水体中,造成了水体污染。因此,合理改善路面的透水材料至关重要。

粉煤灰(FA)因自身的吸附性能,常被用作水中

污染物的吸附剂^[3]。徐西奎^[4]、黄晟^[5]将 FA 掺入到透水混凝土中,发现其对水中重金属离子具有良好的吸附效果。高宏等^[6]、应成章等^[7]用改性粉煤灰处理含锌尾矿浸出液中的 Zn^{2+} ,发现改性粉煤灰的吸附效果相比于 FA 有了大幅提升。

综上所述,本文通过向透水路面中添加净化材料来弥补透水路面净水功能的不足,系统研究净化材料掺量对透水混凝土力学性能、孔隙率、透水性能和吸附性能的影响,分析净化材料的作用机理,以期为粉

收稿日期:2022-11-01; 修订日期:2023-01-08

基金项目:重庆市教委科学技术研究计划(KIZD-202101201);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-K201901201);重庆青年拔尖人才(CQYC201905086);重庆三峡学院研究生科研创新项目(YJSKY23037);重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-MSX0433)

第一作者(通讯作者):郭远臣(1982—),男,山东菏泽人,重庆三峡学院教授,硕士生导师,博士.E-mail:gye1982@aliyun.com

煤灰透水混凝土在海绵城市中的应用提供理论依据。

1 试验

1.1 原材料

水泥选用重庆市科华水泥厂生产的P·O 42.5普

通硅酸盐水泥;天然粗骨料选用南京市玄武岩碎石,优选粒径4.75~9.5 mm;粉煤灰选用巩义市铂润有限公司生产的F类I级FA,其指标和化学组成(质量分数,文中涉及的组成、替代率等除特别说明外均为质量分数)分别见表1、2。

表1 粉煤灰的性能指标

Table 1 Performance index of fly ash

Index	Fineness(5 μm, by mass)/%	w(IL)/%	Moisture content(by mass)/%	Density/(g·cm ⁻³)	Bulk density/(g·cm ⁻³)
Standard value	≤18.0	≤5.0	≤1.0	≤3.2	≤1.38
Test result	16.0	2.8	0.85	2.55	1.12

表2 粉煤灰的化学组成

Table 2 Chemical composition of fly ash

								w/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
45.10	24.20	5.60	2.10	1.80	0.85	0.30	0.10	

硫酸改性粉煤灰(GFA)的制备:将未处理的FA置于烧杯中,加入浓度为2.5 mol/L的硫酸溶液浸泡12 h,FA投加量为0.6 g/mL,将浸泡好的FA用去离子水洗涤后移入40 °C烘干箱中烘干,洗涤烘干过程循环3次即得到GFA粉末。

为控制径流雨水中Zn²⁺的质量浓度,径流雨水的配制选用化学试剂添加去离子水的方法,向1 L去离子水中加入10 mL Zn²⁺溶液,并添加硝酸调节溶液pH值至3左右,以防止Zn²⁺水解。

1.2 样品制备

首先,将粗骨料和一定量的水加入搅拌机预拌,待骨料表面润湿后加入胶凝材料,骨料被浆体均匀包裹后再加入剩余的水,搅拌时长约为3 min;然后,将拌和物分2层装入100 mm立方体试模中,采用人工锤捣成型,成型好的试件表面覆盖塑料薄膜,在(20±2) °C、相对湿度大于60%的养护室中养护24 h后拆模;最后,将试件放入标准养护室中养护27 d。

1.3 样品配合比

试验选用体积法进行配合比计算,水胶比0.37,目标孔隙率15%,净化材料采用等量替代水泥法掺入,替代率(R)分别为10%、20%和30%。试验的配合比见表3。

表3 试验的配合比

Table 3 Mix proportions of experiments

Specimen No.	FA	GFA	Cement	Water	Coarse aggregate
H1			393.0	145.5	1 650.0
FA1	39.3		353.7	145.5	1 650.0
FA2	78.6		314.4	145.5	1 650.0
FA3	117.9		275.1	145.5	1 650.0
GFA1		39.3	353.7	145.5	1 650.0
GFA2		78.6	314.4	145.5	1 650.0
GFA3		117.9	275.1	145.5	1 650.0

1.4 样品测试及表征

力学性能测试参考GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》执行,孔隙率测试参考DB11/T 775—2021《多孔混凝土铺装技术规程》执行,透水系数测试参考JC/T 2558—2020《透水混凝土》执行,透水试验装置为自制^[8]。

Zn²⁺动态吸附测试采用模拟径流雨水通过透水混凝土试块的方式来完成,测试装置见文献[9]。将透水混凝土试块四周用凡士林密封后放入动态吸附测试装置中,再将配置好的模拟路面径流雨水溶液(体

积为1 L)完全通过透水混凝土的过程视为1个净化循环,在70次净化循环后提取5 mL溶液来测定其中Zn²⁺的剩余质量浓度^[10](初步研究表明,溶液中Zn²⁺质量浓度在70次净化循环后保持稳定),对比试验前后路面径流雨水中Zn²⁺去除率(η)来评价不同净化材料的净水效果:

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:C₁为Zn²⁺去除前的质量浓度,mg/L;C₂为Zn²⁺去除后的质量浓度,mg/L。

采用德国 Zeiss Sigma 300 型扫描电子显微镜 (SEM) 获取 FA 经硫酸改性前后的微观形貌和掺有净化材料试件的表面微观形貌. 对动态吸附 Zn^{2+} 试件表面进行点扫描, 以获取试件表面的 Zn^{2+} 吸附情况. 选取试件水泥浆体进行 X 射线衍射 (XRD) 测试, 并使用 ICDD-PDF 数据库对数据进行物相鉴定. 得到 XRD 图谱后, 利用 TOPAS 软件, 采用 Rietveld 法进行定量分析.

2 结果与讨论

2.1 力学性能

图 1 为粉煤灰透水混凝土试件的 28 d 抗压强度. 从图 1 可以看出:

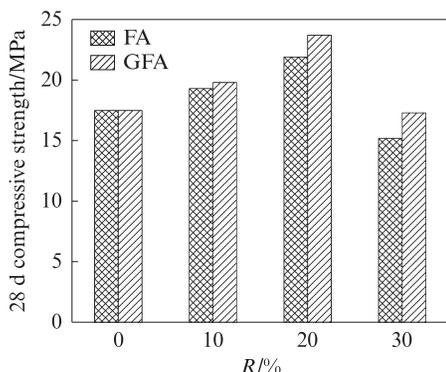


图 1 粉煤灰透水混凝土试件的 28 d 抗压强度
Fig. 1 28 d compressive strength of fly ash pervious concrete specimens

(1) 当净化材料替代率从 0% 增加到 20% 时, 粉煤灰透水混凝土试件的 28 d 抗压强度呈上升趋势. 在替代率为 20% 时, 粉煤灰透水混凝土试件的抗压强度达到峰值, 分别为 21.9、23.7 MPa. 分析原因如下: 一方面, 作为矿物掺合料的 FA 内部含有大量的活性物质 SiO_2 和 Al_2O_3 , 它能与水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 发生火山灰反应, 在减少浆体中 $Ca(OH)_2$ 含量的同时还会生成水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶和水化硅铝酸钙 (C-A-S-H) 凝胶 (以下统称 C-(A)-S-H 凝胶), 使水泥石结构以及水泥与骨料的黏结界面得到改善; 另一方面, 因净化材料的粒径较小, 易填充到界面空隙和水泥粒子之间, 使试件内部结构更加密实, 从而提高了试件的力学性能.

(2) 当净化材料替代率从 20% 增加到 30% 时, 粉煤灰透水混凝土试件的 28 d 抗压强度呈下降趋势. 在替代率达到 30% 时, 粉煤灰透水混凝土试件的抗压强度均处于最低值, 分别为 15.2、17.3 MPa, 相较于试件 H1 的抗压强度 (17.5 MPa), 试件 FA3 和 GFA3 的抗压强度均出现缩减. 分析原因在于, 当

净化材料替代率过高时, 会导致水泥浆体对骨料的包裹不完全、界面间黏结不牢等现象发生. 以上试验结果说明, 粉煤灰透水混凝土试件的抗压强度主要受净化材料替代率、水泥浆体对骨料包裹程度的影响, 合理的净化材料替代率会在一定程度上提高粉煤灰透水混凝土试件的力学性能.

在 2 种净化材料替代率相同的情况下, GFA 试件的 28 d 抗压强度均优于 FA 试件. 这与试件内部 C-(A)-S-H 凝胶的强度息息相关. 研究发现, 通过降低 C-(A)-S-H 凝胶的钙硅比, 可以在一定程度上提高凝胶的力学性能^[11], 并且低钙硅比还有利于凝胶的微观形貌向箔片状发展^[12], 使凝胶的强度得到提升. 杨军等^[13] 通过向 C-(A)-S-H 凝胶结构中引入 Al 来提高凝胶的铝硅比和交联程度, 大幅提升了凝胶的力学性能. GFA 的加入可调节凝胶的钙硅比和铝硅比, 使 GFA 试件的力学性能优于 FA 试件.

2.2 孔隙率

粉煤灰透水混凝土试件的 28 d 孔隙率如图 2 所示. 从图 2 可以看出:

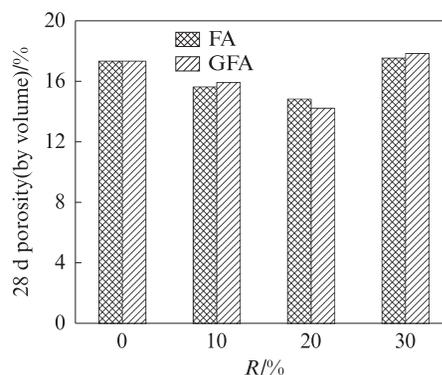


图 2 粉煤灰透水混凝土试件的 28 d 孔隙率
Fig. 2 28 d porosity of fly ash pervious concrete specimens

(1) 当净化材料替代率从 0% 增加到 20% 时, 粉煤灰透水混凝土试件的孔隙率呈下降趋势; 当 2 种净化材料的替代率均为 20% 时, FA 试件的孔隙率下降到最低值 14.8%, GFA 试件的孔隙率也下降到最低值 14.2%. 分析原因在于, 由于净化材料的密度相对较小, 胶凝材料的总体积随着净化材料替代率的增加而增大, 使试件内部大量的孔隙得到了填充, 导致粉煤灰透水混凝土试件的孔隙率降低.

(2) 当净化材料替代率从 20% 增加到 30% 时, FA 试件的孔隙率上升到最高值 17.5%, GFA 试件的孔隙率也达到最高值 17.8%, 说明在掺入过量的净化材料后, 水泥浆体对骨料的包裹不完全, 导致界面间的孔隙变多, 间隙变大, 粉煤灰透水混凝土试件的

孔隙率也随之升高。

2.3 透水性能

粉煤灰透水混凝土试件的28 d透水系数如图3所示.从图3可以看出:

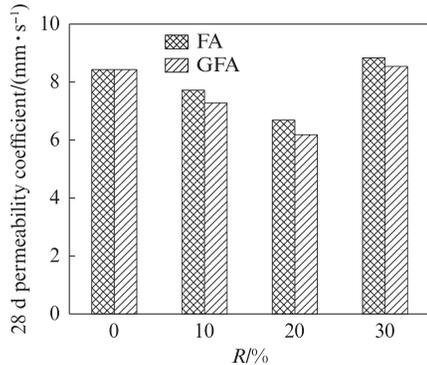


图3 粉煤灰透水混凝土试件的28 d透水系数

Fig. 3 28 d permeability coefficient of fly ash pervious concrete specimens

(1)当净化材料替代率从0%增加到20%时,粉煤灰透水混凝土试件的透水系数呈下降趋势.当2种净化材料的替代率均为20%时,FA试件的透水系数达到最低值6.67 mm/s,GFA试件的透水系数同样达到最低值6.17 mm/s.分析原因在于,密度较小的净化材料替代部分水泥作为胶凝材料掺入到试件中,使试件内部的孔隙得到了填充,且净化材料中的活性物质会与水泥水化产物发生火山灰反应,生成的C-(A)-S-H凝胶填补了试件的孔隙,导致试件的透水系数降低.

(2)当净化材料替代率从20%增加到30%时,FA试件的透水系数达到最高值8.81 mm/s,GFA试件的透水系数也达到最高值8.52 mm/s,说明当2种净化材料替代率过高时,将会影响水泥浆体对骨料的包裹,使试件的透水系数升高.在净化材料替代率相同的情况下,GFA试件的透水系数均小于FA试件,其发展规律与试件力学性能的发展规律相对应且成反比关系,与实际应用结果相符.若合理控制净化材料的替代率,粉煤灰透水混凝土试件的力学性能和透水性能将达到最优状态,并能调控出满足不同工程要求的透水路面.

2.4 Zn²⁺吸附性能

图4为经过70次净化循环后溶液中Zn²⁺的去除率.由图4可知:

(1)试件H1对溶液中Zn²⁺的吸附效果不明显,去除率仅达到17.4%,但也存在一定的作用.分析原因在于,透水混凝土由于自身多孔的结构特点,对溶液中的污染物具有一定的滞留效果.同时,在水泥水

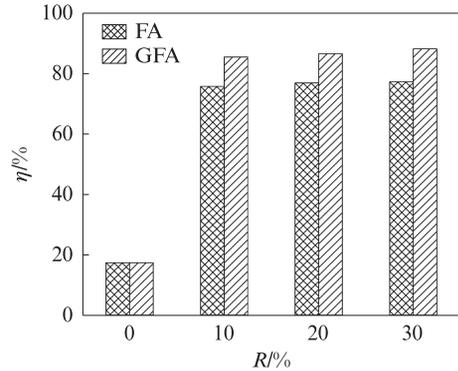


图4 经过70次净化循环后溶液中Zn²⁺去除率

Fig. 4 Removal rate of Zn²⁺ in the solution after 70 purification cycles

化过程中,透水混凝土自身的Ca²⁺、Mg²⁺会与Zn²⁺发生同晶置换^[14],使Zn²⁺进入到水化产物内部.并且水泥浆体呈碱性,大量的OH⁻会与Zn²⁺发生复分解反应,也能达到吸附、固定Zn²⁺的效果.

(2)在净化材料替代率从10%增长到30%时,FA试件和GFA试件的Zn²⁺去除率呈上升趋势.当净化材料替代率为10%时,溶液中Zn²⁺的去除率分别为75.8%和85.5%.当净化材料替代率为30%时,Zn²⁺的去除率分别为77.3%和88.2%,分别上升了1.5%和2.7%,这是因为净化材料中的FA颗粒大部分呈球状玻璃体,比表面积较大,具有很强的吸附性,能对水中的Zn²⁺起到吸附作用.同时,净化材料的掺入会促进试件内部生成具有吸附效果的C-(A)-S-H凝胶.汤昊源等^[15]通过试验发现,C-(A)-S-H凝胶的含量随着FA替代率的增加而增多,与本试验结果一致.

(3)当2种净化材料的替代率相同时,GFA试件对Zn²⁺的去除率均高于FA试件.分析原因在于,经硫酸改性后的GFA颗粒表面产生了大量的凹槽和孔洞,使GFA颗粒的物理吸附能力得到了提升,并且经硫酸激发后的GFA颗粒会溶出更多的活性物质参与火山灰反应,提升了C-(A)-S-H凝胶的含量.后续元素分析可以看到GFA试件的钙硅比明显小于FA试件.这是因为FA中富含Al₂O₃和SiO₂,经硫酸改性后能提供大量的Al和Si,使GFA试件中的水泥浆体及C-(A)-S-H凝胶拥有更低的钙硅比^[16].相关研究表明,低钙硅比C-(A)-S-H凝胶对Zn²⁺的吸附固化作用优于高钙硅比C-(A)-S-H凝胶^[17].C-(A)-S-H凝胶对重金属离子的吸附效果还与C-(A)-S-H凝胶的比表面积有关,凝胶比表面积则受钙硅比控制,当钙硅比下降时,C-(A)-S-H凝胶的比表面积上升^[18],比表面积越大,对重金属离子的吸附效果越强^[19].以上研究结果充分说明,与FA的掺

入相比,GFA的加入更利于凝胶钙硅比的下降,促使凝胶的吸附效果得到提升.

(4)试件的孔隙率也会影响净化材料对水中 Zn^{2+} 的吸附效果,即吸附剂(净化材料)对溶液中吸附质(Zn^{2+})的吸附效果与二者接触时间密切相关^[20].当试件的孔隙率较小时,相同体积径流雨水透过试件的时间相应较长,导致净化材料与溶液中 Zn^{2+} 的接触时间随之延长, Zn^{2+} 的去除率随之增高.但是,当试验中净化材料的替代率从20%增长到30%时,试件的孔隙率分别提高了2.7%和3.6%,可 Zn^{2+} 的去除率不减反增,说明净化材料替代率对 Zn^{2+} 的吸附起

主导作用.

2.5 SEM分析

图5为FA经硫酸改性前后的SEM图像.从图5可以看出:改性前的FA颗粒大部分呈球状玻璃体,比表面积大,可以容纳相当数量的被吸附物质,且含有未完全燃烧的炭粒,起到了活性炭的作用;因硫酸的强氧化性和脱水性,经硫酸改性后的GFA表面快速氧化、焦化,导致GFA表面变得粗糙多孔,产生了大量的凹槽和孔洞,有利于吸附、固定重金属离子^[21-22].同时,未燃尽炭粒表面也变得粗糙多孔,增加了物理吸附能力^[23].

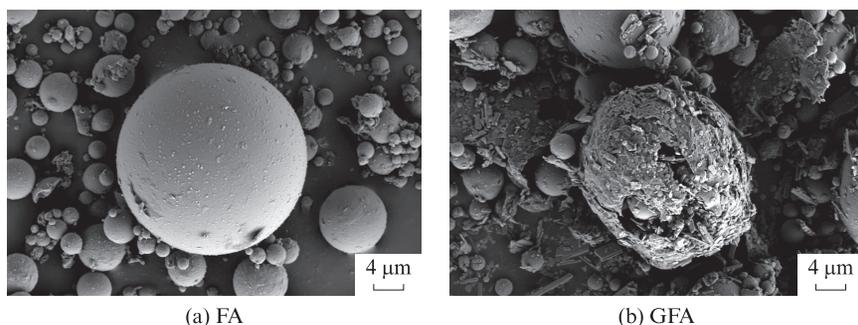


图5 粉煤灰经硫酸改性前后SEM图像
Fig. 5 SEM images of fly ash before and after modification by sulfuric acid

图6为试件表面的SEM图像.由图6可见:

(1)试件FA3表面结晶完整、晶体整齐,产物大多为扁薄的六方板状 $Ca(OH)_2$ 晶体;试件GFA3表面主要是具有吸附效果的低钙硅比C-(A)-S-H凝胶.一般而言,低钙硅比C-(A)-S-H凝胶的表面疏松多孔,内部孔隙结构发达^[24],对重金属离子的吸附效果明显.

(2)试件FA3和GFA3中均存在部分未水化的球形玻璃体FA颗粒,其周围的水化产物较少,结构稀疏,说明净化材料的加入不仅会促进水化反应的进行,还会增加浆体与颗粒间的连接界面.当净化材料替代率过高时,水泥浆体中未水化的FA微珠含量随之升高,使试件的连续性降低,这也是导致FA试件和GFA试件力学性能下降的原因之一.

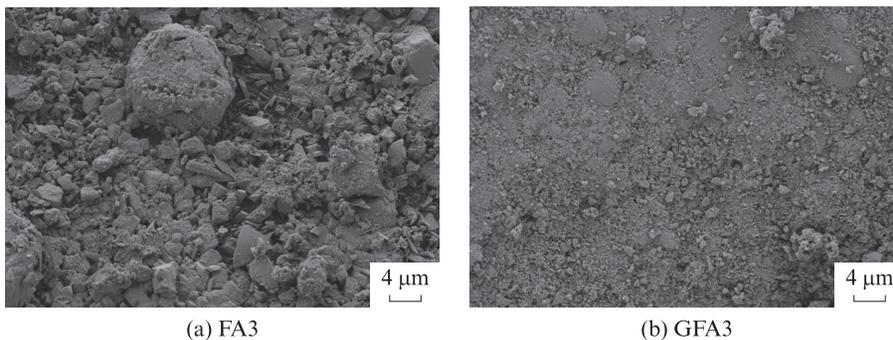


图6 试件表面的SEM图像
Fig. 6 SEM images of specimen surface

2.6 EDS分析

图7为试件表面的元素分布.从图7中可以看出:

(1)试件GFA3表面Si、Al的含量较改性前上升明显,Ca的含量有所下降.原因在于FA内所含活性

物质 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等被封闭于表面致密的玻璃相内,其吸附性能和应用范围受到了限制^[25].但适量的硫酸可以腐蚀FA的玻璃体结构,使内部的活性物质得到溶出,部分溶出的 Al_2O_3 、 SiO_2 被硫酸溶解,使Si、Al有较高的浸出率^[26-27].

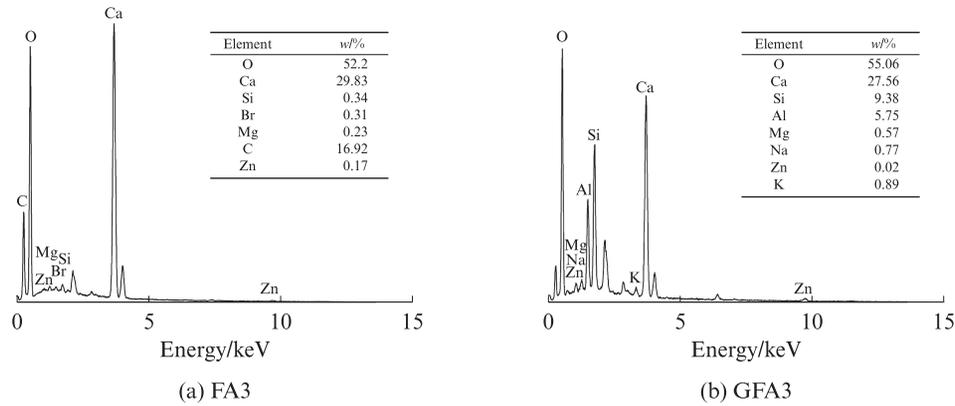


图7 试件表面的元素分布
Fig. 7 Element distribution of specimen surface

(2)Ca峰值的降低是因为添加硫酸而导致硫酸根离子有所残留,因其自身的强吸附性使其与溶液中的Ca²⁺结合,从而减弱了CaCO₃晶体表面对Ca²⁺的吸附能力.并且,试件GFA3在水化过程中会生成更多的C-(A)-S-H凝胶,会消耗游离的Ca²⁺来促进反应的进行.试件FA3表面Zn的含量为0.17%,试件GFA3表面Zn的含量为0.02%,从化学元素分布层面证实了试件GFA3会生成更多C-(A)-S-H凝胶来吸附水中的Zn²⁺,如Thevenin等^[28]研究发现C-S-H与Zn反应生成Zn-C-S-H.

2.7 XRD分析

图8为粉煤灰透水混凝土的XRD图谱及物相组成.从图8中可以看出:Zn²⁺主要以化合物ZnO的形式存在,分析原因在于Zn(OH)₂的失水;在掺入净化材料后,试件中莫来石的含量得到增加,Ca(OH)₂的含量明显降低;与试件FA3相比,试件GFA3中不利于基体力学性能的Ca(OH)₂含量更少.说明硫酸对FA的改性效果明显,为火山灰反应的进行提供了更多的活性物质,促使试件GFA3中含有更多的C-(A)-S-H凝胶,这也是导致GFA试件抗压强度优于FA试件的关键因素.

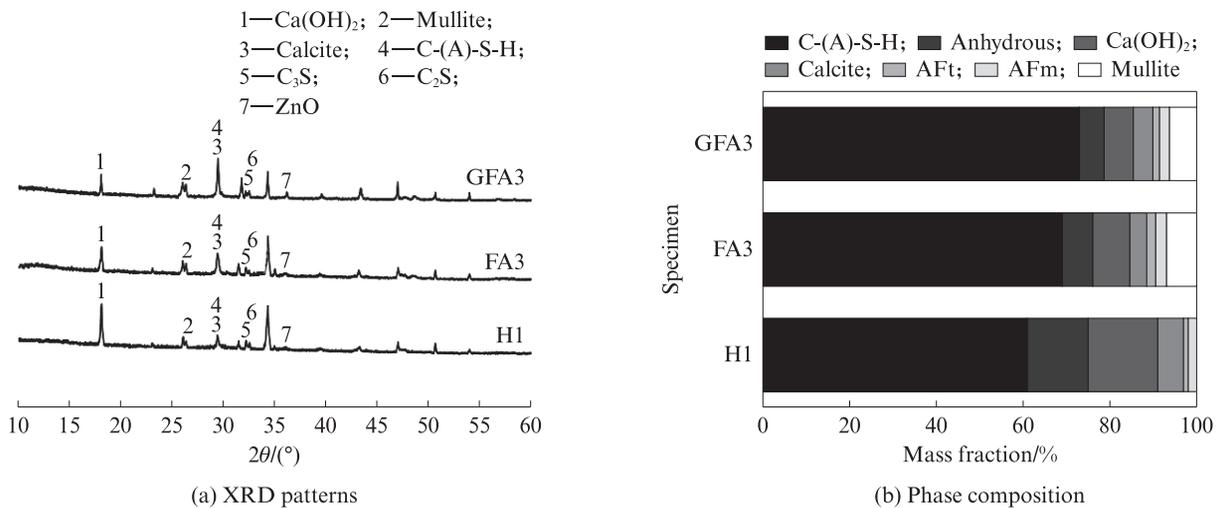


图8 粉煤灰透水混凝土的XRD图谱和物相组成
Fig. 8 XRD patterns and phase compositions of fly ash pervious concrete

3 结论

(1)随着净化材料替代率的增加,粉煤灰(FA)透水混凝土试件的抗压强度呈现出先上升后下降的趋势,孔隙率和透水系数则与之相反.在净化材料替代率达到20%时,粉煤灰透水混凝土试件的抗压强度达到最大值,孔隙率和透水系数均降到最低值,且硫酸改

性粉煤灰(GFA)试件的力学性能均优于FA试件.

(2)溶液中Zn²⁺的去除率随着试件内净化材料替代率的增加而提高.与FA试件相比,GFA试件具有更强的Zn²⁺吸附效果.

(3)对溶液中Zn²⁺起到吸附效果的是FA颗粒和水化硅(铝)酸钙(C-(A)-S-H)凝胶,净化材料替代率及活性会影响C-(A)-S-H凝胶的钙硅比和生成数

量,从而作用于溶液中 Zn^{2+} 的吸附.

(4)FA 的加入能促进水泥浆体火山灰反应的进行,使浆体中 $Ca(OH)_2$ 的含量降低.GFA 作为净化材料掺入后,浆体中 $Ca(OH)_2$ 含量下降得更加明显.

参考文献:

- [1] CHINDAPRASIRT P, HATANAKA S, CHAREERAT T, et al. Cement paste characteristics and porous concrete properties[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(5):894-901.
- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见[J]. 城镇供水, 2016(1):11-12, 15.
General Office of the State Council. Guiding opinions of the general office of the state council on promoting sponge city construction[J]. City and Town Water Supply, 2016(1):11-12, 15. (in Chinese)
- [3] DUBEY S, UMA, SUJARITTANONTA L, et al. Application of fly ash for adsorptive removal of malachite green from aqueous solutions[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(1):91-98.
- [4] 徐西奎. 可吸附重金属离子的透水性水泥基材料研究[D]. 北京:北京工业大学, 2008.
XU Xikui. Research on the adsorption of water permeable cement-based to heavy metal ions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] 黄晟. 净水型玄武岩纤维透水水泥混凝土性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
HUANG Sheng. Study on the properties of basalt fiber pervious concrete with function of water purification[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [6] 高宏, 李恒, 贺波, 等. 用改性粉煤灰微珠吸附处理铅锌硫化矿选矿废水[J]. 湿法冶金, 2018, 37(1):40-44.
GAO Hong, LI Heng, HE Bo, et al. Adsorption treatment of beneficiation wastewater of Pb-Zn sulfide ore by sulphuric acid modified fly ash[J]. Hydrometallurgy of China, 2018, 37(1):40-44. (in Chinese)
- [7] 应成章, 黄雪芬, 蒙敏, 等. 应用复合改性粉煤灰吸附尾矿浸出液中的 Zn[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9):5152-5158.
YING Chengzhang, HUANG Xuefen, MENG Min, et al. Adsorption of zinc in tailings leaching solution by composite modified fly ash [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9):5152-5158. (in Chinese)
- [8] 郭远臣, 叶青, 刘芯州, 等. 用于测试透水混凝土透水系数的简易型试验装置:CN217542772U[P]. 重庆:2022-10-04.
GUO Yuanchen, YE Qing, LIU Xinzhou, et al. Simple test device for testing permeability coefficient of pervious concrete: CN217542772U[P]. Chongqing:2022-10-04. (in Chinese)
- [9] 丁崧, 陈潇, 夏飞跃, 等. 净水型赤泥-矿渣基地聚合物透水混凝土的研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):48-55.
DING Song, CHEN Xiao, XIA Feiyue, et al. Study on red mud-slag based geopolymer pervious concrete with function of water purification[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):48-55. (in Chinese)
- [10] CHEN X, GUO Y G, DING S, et al. Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207:789-800.
- [11] PELISSER F, GLEIZE P J P, MIKOWSKI A. Effect of the Ca/Si molar ratio on the micro/nanomechanical properties of synthetic CSH measured by nanoindentation[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(32):17219-17227.
- [12] TAJUELO RODRIGUEZ E, RICHARDSON I G, BLACK L, et al. Composition, silicate anion structure and morphology of calcium silicate hydrates(CSH) synthesised by silica-lime reaction and by controlled hydration of tricalcium silicate (C_3S) [J]. Advances in Applied Ceramics, 2015, 114(7):362-371.
- [13] 杨军, 张高展, 丁庆军, 等. 铝掺杂水化硅酸钙的分子结构和力学性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6):565-571, 584.
YANG Jun, ZHANG Gaozhan, DING Qingjun, et al. Molecular structure and mechanical properties of aluminum substituted C-S-H[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6):565-571, 584. (in Chinese)
- [14] 管宗甫, 何军志. 混凝土固化废弃物中有害金属离子浸出研究[J]. 安阳师范学院学报, 2007(2):74-77.
GUAN Zongpu, HE Junzhi. Concrete solidifying waste and the infusion method of harmful metal ion [J]. Journal of Anyang Normal University, 2007(2):74-77. (in Chinese)
- [15] 汤昊源, 左晓宝, 邹欲晓, 等. 矿物掺合料对硅酸盐水泥净浆氯离子结合能力的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):571-578.
TANG Haoyuan, ZUO Xiaobao, ZOU Yuxiao, et al. Chloride binding capacity of hardened portland cement paste by adding mineral admixtures[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):571-578. (in Chinese)
- [16] 乔春雨, 倪文, 王长龙. 水化硅酸钙的合成与水泥化学热力学计算[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(5):903-907, 912.
QIAO Chunyu, NI Wen, WANG Changlong. Synthesis and thermodynamic calculation of cement chemistry of C-S-H[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(5):903-907, 912. (in Chinese)
- [17] 刘晶, 王昕, 汪澜, 等. C-S-H 凝胶对 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附固化作用[J]. 水泥, 2012(10):9-12.
LIU Jing, WANG Xin, WANG Lan, et al. Effect of absorption and binding of Cd^{2+} , Zn^{2+} and Cu^{2+} with C-S-H gel[J]. Cement, 2012(10):9-12. (in Chinese)
- [18] ROOSZ C, GABOREAU S, GRANGEON S, et al. Distribution of water in synthetic calcium silicate hydrates [J]. Langmuir, 2016, 32(27):6794-6805.
- [19] 陆国森, 邓敏, 莫立武, 等. C-S-H 凝胶对 K^+ 和 Na^+ 的吸附作用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(1):31-38.
LU Guosen, DENG Min, MO Liwu, et al. Adsorption of K^+ and Na^+ by C-S-H gel [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science), 2017, 39(1):31-38. (in Chinese)
- [20] AI-ZBOON K, AL-HARAHSEH M S, HANI F B. Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 188(1-3):414-421.

- [21] 朱静,吴丰昌. 改性粉煤灰在处理铋矿选矿废水中的应用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2):361-367.
ZHU Jing, WU Fengchang. Treatment of wastewater released from antimony ore processing using acidified coal fly ash[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(2):361-367. (in Chinese)
- [22] LI Y Z, LIU C J, LUAN Z K, et al. Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1):374-383.
- [23] XU K, DENG T, LIU J T, et al. Study on the phosphate removal from aqueous solution using modified fly ash[J]. Fuel, 2010, 89(12):3668-3674.
- [24] 祁光霞,雷雪飞,孙方研,等. 粉煤灰源C-S-H吸附U(VI)性能及机理[J]. 化工学报, 2016, 67(10):4255-4263.
QI Guangxia, LEI Xuefei, SUN Fangyan, et al. Performance and mechanisms of coal fly ash-derived C-S-H on adsorption of U(VI) [J]. CIESC Journal, 2016, 67(10):4255-4263. (in Chinese)
- [25] 伍昌年,凌琪,唐玉朝,等. 微波辅助酸改性粉煤灰对镉的吸附性能研究[J]. 应用化工, 2016, 45(8):1428-1430.
WU Changnian, LING Qi, TANG Yuchao, et al. Study on the adsorption performance of cadmium with microwave-assisted acid modified fly ash[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(8):1428-1430. (in Chinese)
- [26] 张凡,欧阳平,张贤明,等. 粉煤灰改性及其吸附应用研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(4):747-750.
ZHANG Fan, OUYANG ping, ZHANG Xianming, et al. Progress of research on modification and adsorption of fly ash[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(4):747-750. (in Chinese)
- [27] 欧阳平,范洪勇,张贤明,等. 基于吸附的粉煤灰改性机理研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(4):619-624.
OUYANG ping, FAN Hongyong, ZHANG Xianming, et al. Research progress of the modification mechanism of flyash based on adsorption[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, 32(4):619-624. (in Chinese)
- [28] THEVENIN G, PERA J. Interactions between lead and different binders[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(10):1605-1610.