

文章编号:1007-9629(2024)09-0837-09

碳化条件下循环流化床粉煤灰的水化性能

刘洋¹, 李驰^{1,2,3}, 高瑜^{1,2,3,*}, 李拴虎^{1,2,3}

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 地质技术与岩土工程内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古工业大学 沙旱区地质灾害与岩土工程防御自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:以固废——循环流化床粉煤灰和脱硫石膏为矿物掺合料制备砂浆,通过碳化试验、强度试验以及 X 射线衍射仪、扫描电镜-能谱等微观测试手段,探究了砂浆在碳化条件下的固碳能力、力学性能和反应机理。结果表明:固废的掺入增加了浆体孔隙,提高了钙源含量,使砂浆的 CO₂ 吸收量显著提高;碳化养护后砂浆的力学性能显著提高,消除了高硫带来的膨胀问题;应用该工艺可将内蒙古地区工业固废利用率提高至 36.5%。

关键词:循环流化床;粉煤灰;碳化;CO₂吸收量;资源化利用

中图分类号:TU528.09;X773 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2024.09.009

Hydration Properties of Circulating Fluidized Bed Fly Ash under Carbonation Condition

LIU Yang¹, LI Chi^{1,2,3}, GAO Yu^{1,2,3,*}, LI Shuanhu^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Geological Technology and Geotechnical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards and Geotechnical Engineering Defense in Sandy and Drought Regions at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Mortars were prepared using solid waste—circulating fluidized bed fly ash and flue gas desulphurisation gypsum as mineral admixtures. The carbon sequestration capacity, mechanical properties and reaction mechanism of mortars under carbonation conditions were investigated through carbonation tests, strength tests, X-ray diffraction and scanning electron microscopy-energy spectroscopy. The results show that the incorporation of solid waste increases the pore space and the content of calcium source, and significantly improves the CO₂ absorption of the mortars. Furthermore, the mechanical properties of the mortars are significantly improved after carbonation and maintenance, and the expansion problem caused by high sulphur is eliminated. The application of this process can increase the utilisation rate of industrial solid waste in Inner Mongolia region by up to 36.5%.

Key words: circulating fluidized bed; fly ash; carbonization; CO₂ absorption; resource utilization

循环流化床机组在中国电力行业大力推广,其燃烧后得到大量灰渣——循环流化床粉煤灰(CFBFA)。由于 CFBFA 性质不稳定,其利用率仅为 20%;脱硫石膏(FGD)利用率虽可达到 71%。但在经济欠发达地区

收稿日期:2023-11-16;修订日期:2024-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12262031,52378348);内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0344);内蒙古自治区自然科学基金青年基金资助项目(2023QN04016)

第一作者:刘洋(1999—),男,内蒙古包头人,内蒙古工业大学硕士生.E-mail:754536579@qq.com

通讯作者:高瑜(1984—),女,内蒙古呼和浩特人,内蒙古工业大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:nmggaoyu@imut.edu.cn

工业固废利用率仍然较低,综合利用率也不足20%^[1-2].

CFBFA中过高的f-CaO和SO₃含量使其水化前期产物中生成较多的钙矾石(Aft)和二水石膏(CaSO₄·2H₂O),导致水泥浆体的体积膨胀率增加,限制了其使用^[3].FGD中硫含量较高,会使试件内生成过多的Aft,对水泥后期的安定性产生影响^[4].Aft等膨胀性物质的过量生成限制了CFBFA和FGD的资源化利用.Song等^[5-6]提出可通过提前释放膨胀源实现对浆体膨胀行为的控制.牛茂威等^[7]通过研磨减小灰渣粒径使f-CaO和CaSO₄等反应速率加快,提前释放膨胀源,改善了制品的强度.此外,碳化可以快速消耗浆体中的胶凝材料和水化产物,使其快速转化生成碳酸盐^[8-9].该反应机理表明可通过碳化养护的处理方式消耗浆体中的膨胀源,获得稳定的制品,进而提高固废的综合利用率.

本文以工业固废CFBFA和FGD为矿物掺合料

制备CFBFA-FGD砂浆,利用FGD的缓凝特性调节浆体前期的膨胀速率,并通过碳化试验、强度试验以及利用X射线衍射(XRD)、扫描电镜-能谱(SEM-EDS)等微观测试手段,研究了砂浆的固碳能力、碳化前后的强度变化、反应机理以及在该工艺下工业固废的消纳量,为工业固废资源化利用提供参考依据.

1 试验

1.1 原材料

水泥为呼和浩特市冀东水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥P·O 42.5.CFBFA、FGD为内蒙古自治区鄂尔多斯市某发电厂的固废,材料经烘干、破碎和筛分后取粒径小于75 μm的微粉备用.原材料的化学组成(质量分数,文中涉及的含量、比值等均为质量分数或质量比)见表1,其XRD图谱见图1.砂为市售ISO标准砂;外掺剂为聚羧酸高效减水剂,减水率为28%;拌和

表1 原材料的化学组成
Table 1 Chemical compositions (by mass) of raw materials

Raw Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Other
Cement	22.23	4.75	63.41	2.54	2.62	1.38	0.82	2.25
CFBFA	40.32	37.02	12.10	4.76	2.83	0.34	0.31	2.32
FGD	5.94	1.43	43.01	46.35	1.21	0.43	1.11	0.52

Unit: %

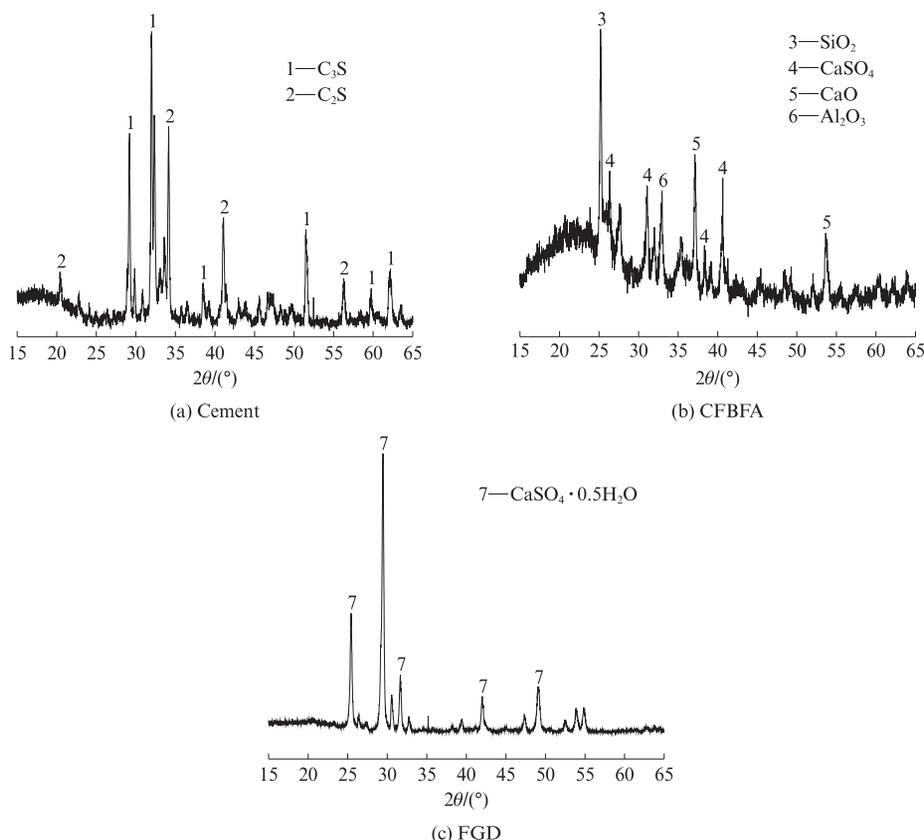


图1 原材料的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of raw materials

水为自来水;CO₂为呼和浩特市蒙氧气体有限责任公司生产的工业级CO₂气体,含量大于99.5%。

1.2 配合比设计

按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》制备试件.CFBFA取代率(以总胶凝材料质量计)为30%,水胶比为1:2,胶砂比为1:3.

FGD等质量取代水泥,设置FGD的掺量 w_{FGD} (内掺)为0%、3%、6%、9%,制备的试件分别记为FG-0、FG-3、FG-6和FG-9,此为改性组;设置纯水泥为对照组,记为PC.经前期试验调配,取减水剂掺量为胶凝材料总质量的0.2%.试件的配合比见表2.

表2 试件的配合比
Table 2 Mix proportions of specimens

Specimen	Cement	CFBFA	FGD	Sand	Water	Superplasticizer
PC	450.0	0	0	1 350.0	225.0	0
FG-0	315.0	135.0	0	1 350.0	225.0	0.9
FG-3	302.0	135.0	13.0	1 350.0	225.0	0.9
FG-6	288.0	135.0	27.0	1 350.0	225.0	0.9
FG-9	275.0	135.0	41.0	1 350.0	225.0	0.9

Unit: g

1.3 CO₂固化方案

试件的碳化养护过程为:(1)模内养护;(2)脱模预养护;(3)标准条件下碳化养护.将试件在模内养护24 h成型,并置于(20±2)°C、相对湿度(90±5)%的恒温恒湿养护箱中预养护24 h,以获得一定的初始强度.将预养护24 h的试件置于TH-B型CO₂标准养护箱((20±2)°C、相对湿度(60±5)%、CO₂质量分数(20±2)%)中碳化养护至不同龄期 t_c .通过CO₂吸收量和试件的强度增益来评价砂浆的固碳能力和力学性质.

1.4 固碳能力测试

碳化过程中CO₂吸收量的测试方法有两种:一种是基于系统质量平衡的质量增益法^[10];另一种是基于碳酸化样品的热分析,如热重分析(TGA)、马弗炉加热^[11]等.本文采用马弗炉加热法,通过测试加热脱碳阶段样品的质量损失来确定CO₂吸收量.测试步骤为:将碳化后的样品沿横截面切割,得到5 mm的薄片;将约30 g的薄片置于马弗炉中,由室温分别加热至550、950 °C.550~950 °C温度区间的质量损失为CaCO₃的分解,即样品中释放的CO₂的质量.CO₂吸收量 α 的计算式^[12]为:

$$\alpha = \frac{(m_{550} - m_{950}) - (M_{550} - M_{950})}{M_C} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_{550} 、 m_{950} 分别为550、950 °C时碳化薄片的质量; M_{550} 、 M_{950} 分别为550、950 °C时非碳化薄片的质量; M_C 为薄片干水泥的质量.

1.5 力学性能及微观性能测试

采用尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的标准试件,按照GB/T 17671—2021测试标准条件和碳化条件养护下砂浆试件的抗折强度和抗压强度.碳化

前后砂浆的物相变化用X射线衍射仪(XRD)进行测试,采用Cu靶辐射,X射线管压40 kV,管流100 mA,扫描速率为3 (°)/min,步宽0.02°,测试范围为5°~90°连续扫描.用捷克TESCAN MIRA LMS型扫描电子显微镜(SEM)观测碳化前后砂浆试件的微观形貌.

2 结果与讨论

2.1 砂浆固碳能力分析

不同碳化养护龄期下砂浆的CO₂吸收量见图2.由图2可见:根据CO₂吸收量的增长速率,可将砂浆的碳化过程分为早期碳化阶段(0~24 h,阶段I)、中期碳化阶段(24~168 h,阶段II)和后期碳化阶段(168~672 h,阶段III);各阶段下改性组砂浆的CO₂吸收量均高于对照组,这与掺合料的矿物组成及物理性质有关.

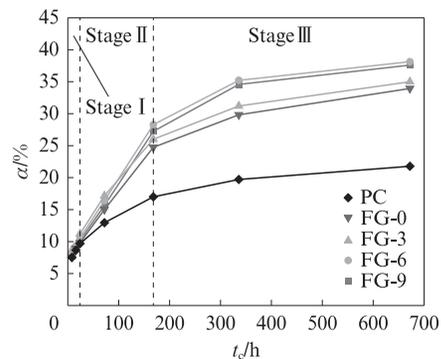


图2 不同碳化养护龄期下砂浆的CO₂吸收量
Fig. 2 CO₂ absorption of mortars at different carbonation ages

砂浆碳化反应示意图见图3.结合图2、3可见:(1)早期碳化阶段 由于碳化初期砂浆孔隙中存在过多

的水分,阻碍了CO₂的进入,延缓了碳化反应的进行^[13],各组砂浆试件CO₂吸收量增长缓慢.(2)中期碳化阶段 CO₂吸收量显著提高,随着反应的进行,浆体中水分逐渐蒸发,CO₂在孔隙中的扩散速率加快,溶解于水中的CO₂与水化硅酸钙(C-S-H)、AFt等水化产物以及含钙相剧烈反应,使得碳化反应速率加快;随着FGD掺量的增加,水泥颗粒被稀释,导致砂浆孔结构发育不良,内部孔隙增大,增加了溶解于水中的CO₂与含钙相之间的接触^[14],同时CFBFA和FGD中含有较多的SO₃和CaO,极易水化生成AFt,为碳化反应提

供更多反应物和成核点位,进一步促进了碳化反应的进行,CO₂吸收量显著提高.(3)后期碳化阶段 各组砂浆试件CO₂吸收量仍在增加,但增长速率放缓,究其原因:一方面,由于碳化反应生成的CaCO₃填充了孔隙,阻碍CO₂的进入,延缓了进一步的碳化;另一方面,先前的碳化反应消耗了大量水化产物和含钙相,浆体中可参与反应物质的减少也降低了碳化反应速率.当碳化养护龄期为672 h(28 d)时,PC组的CO₂吸收量为21.8%,改性组的CO₂吸收量随着FGD掺量的增加依次为33.9%、35.0%、38.1%和37.6%.

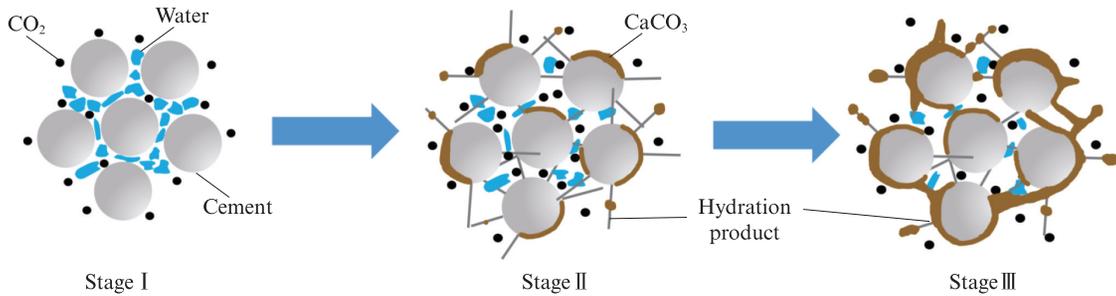


图3 砂浆碳化反应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of carbonation reaction of mortars

2.2 力学性能分析

2.2.1 标准养护砂浆

不同养护龄期 *t* 下标准养护砂浆的抗折强度和抗压强度见图4.由图4可见:各养护龄期下改性组的力学性能均低于对照组;随着FGD掺量的增加,改性组砂浆前期的力学性能降低,72 h(3 d)龄期下试件FG-3、FG-6和FG-9抗压强度依次降低了10.2%、26.2%、41.8%;随着养护龄期的增

加,改性组强度增大.这是因为FGD在浆体中起到了缓凝作用,其在水化过程中生成的CaSO₄·2H₂O和AFt增加了浆体稠度^[15],抑制了Ca(OH)₂的生成,降低了CFBFA的火山灰反应活性,导致砂浆前期力学性能的降低;随着养护龄期的增加,CFBFA的高火山灰活性使得火山灰反应的产物与水泥水化反应的产物填充孔隙,提高了砂浆强度.

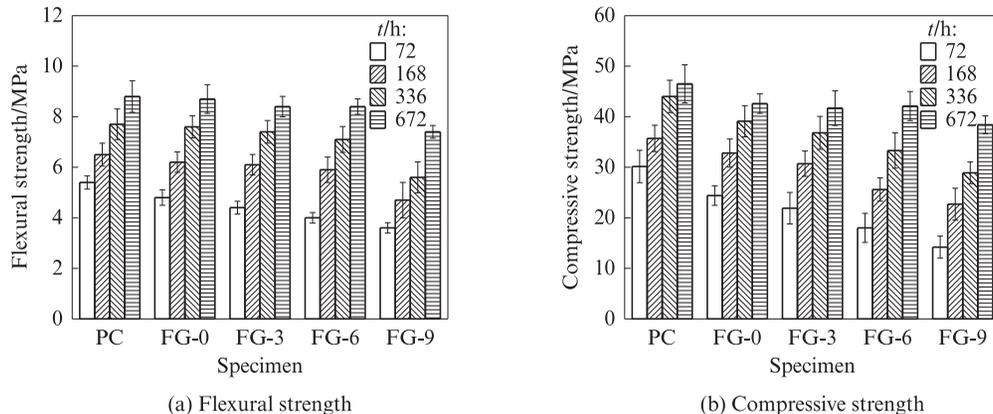


图4 不同养护龄期下标准养护砂浆的抗折强度和抗压强度

Fig. 4 Flexural strength and compressive strength of standard curing mortars under different curing ages

2.2.2 碳化养护砂浆

碳化早期(0~24 h)砂浆的抗折强度和抗压强度见图5.由图5可见:碳化早期,随着碳化养护龄期的延长试件的强度逐渐增大;当碳化养护龄期为24 h

时,试件的强度已接近于PC组标准养护72 h(3 d)的强度.可见在早期碳化环境下,CO₂与水泥中的硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)颗粒快速发生碳化反应,生成了大量CaCO₃,从而使试件强度增加^[16].

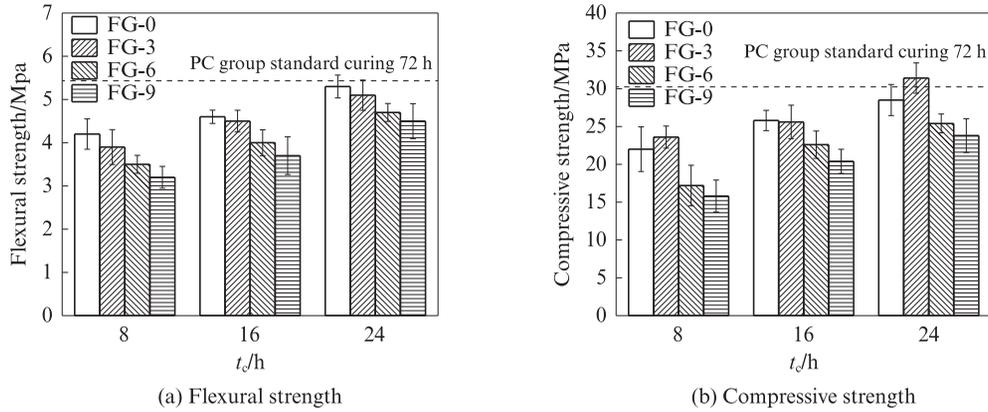


图5 碳化早期砂浆的抗折强度和抗压强度

Fig. 5 Flexural strength and compressive strength of mortars in early stage of carbonation(0-24 h)

碳化养护龄期为72~672 h(3~28 d)砂浆的抗折强度和抗压强度见图6.由图6可见:当碳化养护龄期为72~168 h时,试件强度增加最为显著,且碳化对抗压强度的提升效果要优于抗折强度;当碳化养护龄期为168 h时,试件FG-3的抗折强度为8.5 MPa,抗压强度为46.5 MPa,基本达到PC组标准养护672 h的强度,这与Wei等^[17]的研究结果一致;随着FGD掺量的增加,碳化对砂浆抗压强度的提升效果越好,这是因为FGD的掺入降低了水化反应程度,而其中所含

的CaO增强了浆体的碳化活性;试件FG-3强度高于其他试件,表明适量FGD的掺入生成了更多的碳化产物,形成了更加致密的结构,增强了基体的密实程度,有助于试件强度的发展;过量FGD的掺入,虽然增加了强度的提升效果,但由于其本身结构性差,试件强度仍然较低;当碳化养护龄期为336、672 h时,试件强度进一步提升,但提升速率减慢;当碳化养护龄期为672 h时,试件FG-0、FG-3、FG-6和FG-9的抗折强度分别为PC组标准养护下的119.3%、120.5%、117.0%、112.5%,抗压强度分别为110.3%、116.6%、

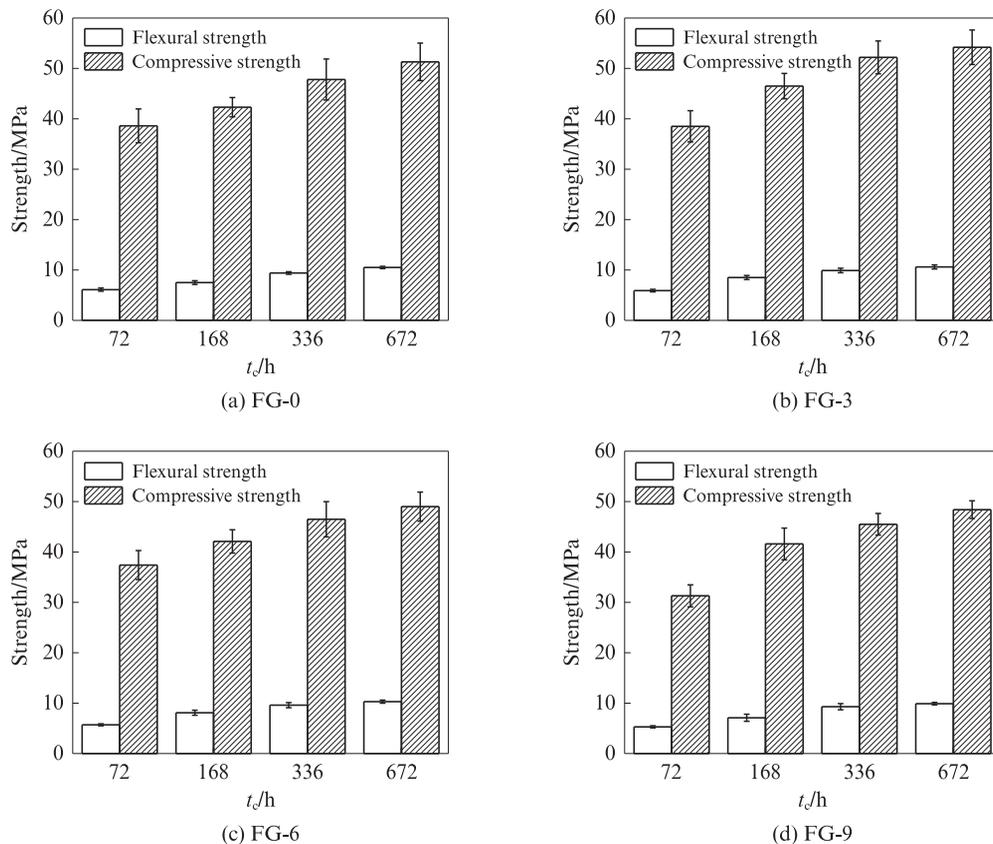


图6 碳化养护龄期为72~672 h砂浆的抗折强度和抗压强度

Fig. 6 Flexural strength and compressive strength of mortars with carbonation age of 72-672 h

105.4%、104.1%。综上,可以通过碳化养护来提高高固废掺量砂浆的力学性能,从而提高固废的综合利用率。

2.3 碳化机理

2.3.1 XRD测试

砂浆的XRD图谱见图7。由图7可见:(1)当标准养护168 h时,试件中存在的晶相主要为 SiO_2 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和AFt;浆体中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和AFt的变化趋势反应了FGD掺入后对CFBFA水化的影响,未掺入FGD的试件FG-0中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 衍射峰峰强度较低,AFt衍射峰峰强度较高,此时浆体中的CFBFA反应活性较高;随着FGD掺量的增加,C-S-H衍射峰峰强逐渐降低,导致改性组宏观力学性能降低,且大量 $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 水化生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,消耗了浆体中过多的水分, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 衍射峰峰强逐渐升高,而AFt衍射峰呈

现先降低后增加的趋势,可见CFBFA前期水化活性大幅度降低,但FGD也增加了浆体中钙、硫元素的含量,使浆体中AFt含量增加。(2)当碳化养护168 h时,试件中水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H凝胶和AFt衍射峰峰强均降低,并出现了 CaCO_3 衍射峰,表明碳化养护消耗了大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H凝胶和AFt;随着FGD掺量的增加,浆体中 CaCO_3 的衍射峰峰强逐渐增大,如2.1所述,这是因为CFBFA、FGD的掺入使浆体中出现了更多可供 CO_2 气体通行的孔道,有更多的 CO_2 参与到了碳化反应中,碳化产物增加。(3)对不同碳化龄期下的试件FG-6,其72~168 h内 CaCO_3 衍射峰峰强显著提高,表明在碳化中期反应比较剧烈,这与2.1、2.2讨论一致;随着碳化龄期的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H凝胶衍射峰基本消失, CaCO_3 、 SiO_2 衍射峰逐渐增强,表明水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H凝

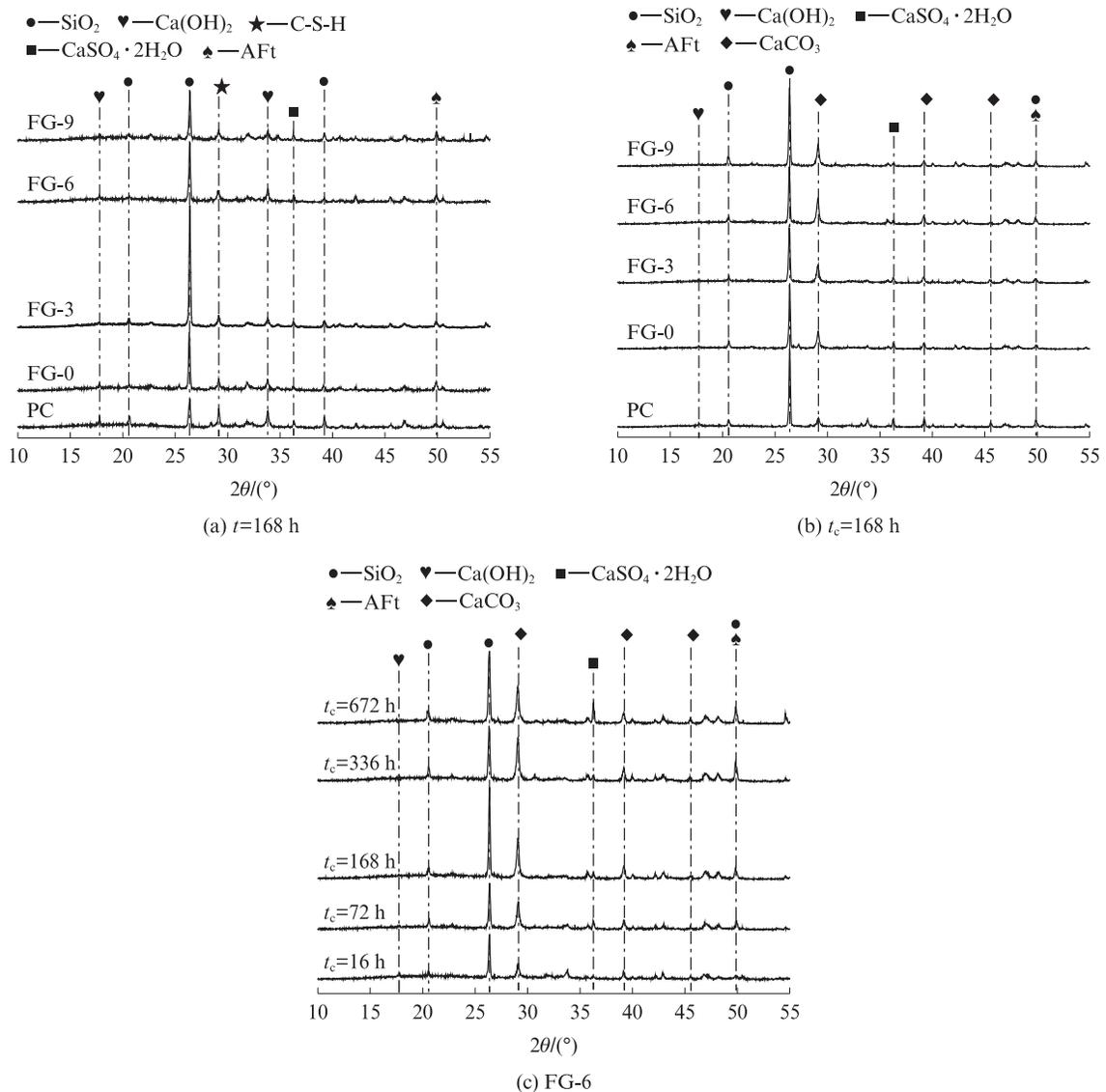


图7 砂浆的XRD图谱

Fig. 7 XRD patterns of mortars

胶等被大量消耗,并与 CO_2 反应生成了 CaCO_3 和 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ^[18],这不仅提高了试件的力学性能,也为控制其体积稳定性作出了贡献.

2.3.2 SEM测试

试件FG-6的微观形貌见图8.由图8可见:(1)当标准养护168 h时,试件水化产物中发现了无定形C-S-H凝胶、片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和絮状的AFt;无定形C-S-H凝胶聚集,相互连接提供了一定的早期强度;在C-S-H凝胶表面和孔隙中发现了大量细小的针棒状AFt,AFt的存在减缓了水分子扩散速率,延缓了胶砂的凝结时间,且其形貌比较细小,发育不完全,导致了砂浆前期强度的缺失.(2)当碳化养护16 h时,试件内部孔隙较多,且AFt生长在CFBFA颗粒的表面,此时碳化生成的 CaCO_3 将水化产物链接,改善了试件的孔结构.(3)当

碳化养护168 h时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 已被完全消耗,试件内部形成了致密的微观结构^[19];在AFt表面观测到了 CO_2 的侵蚀,表明在高浓度 CO_2 环境中AFt开始转化为石膏和方解石^[13];C-S-H凝胶表面有颗粒状物质生成,点1的EDS能谱显示C、O、Si和Ca出现了高强度峰,表明碳化产物与C-S-H混杂在了一起,以C-S-H凝胶、AFt为成核点生成的 CaCO_3 与水化产物交织堆叠,改善了砂浆的力学性能.(4)当碳化养护672 h时,试件的碳化程度达到最大,产物中没有观察到C-S-H凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,只有少量AFt存在于 CaCO_3 表面.综上,浆体大多数水化产物转化为稳定的 CaCO_3 ,并填充试件内部孔隙,相较于标准养护,碳化养护条件下掺固废试件可更快速且稳定地获得强度,同时也解决了高硫带来的试件膨胀开裂隐患.

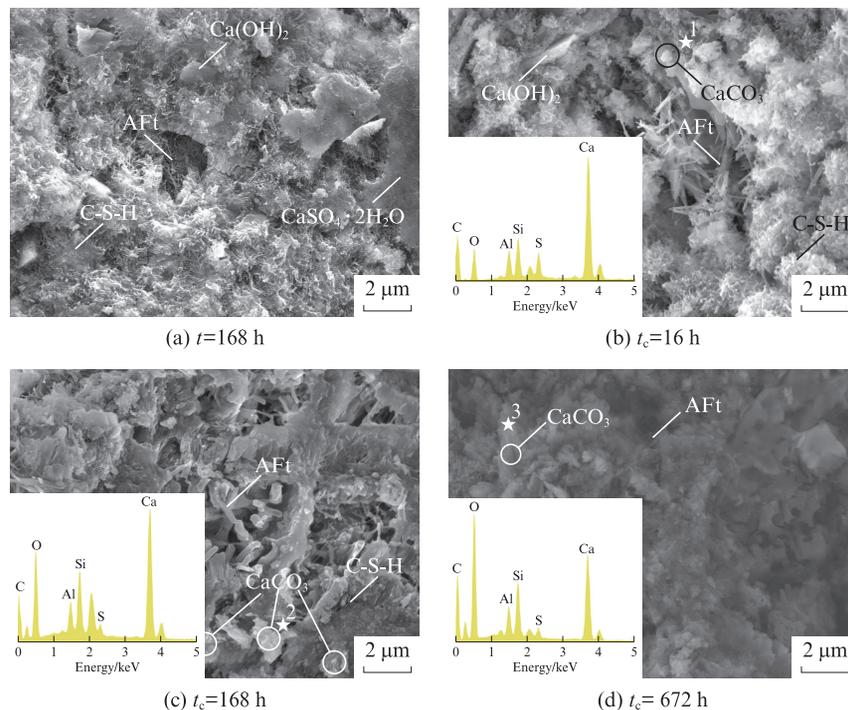


图8 试件FG-6的微观形貌

Fig. 8 Microstructures of specimen FG-6

2.4 固废消纳分析

由国家统计局数据^[20]可知,内蒙古自治区工业固废排放量占中国排放量的9%以上,但综合利用量仅为4%~6%,远远落后于中国平均水平.目前未被利用的大宗工业固废一般以灰场堆放、渣场堆放等方式处置,存在安全隐患和一定的生态环境问题.以1.00 t水泥为基准,在CFBFA掺量为30%、FGD掺量为3%的条件下,通过碳化养护的方式制备预制砂浆,预计可消纳0.30 t的CFBFA和0.03 t的FGD.2021年内蒙古自治区水泥产量约为3 668万t,若全

部使用该工艺,将减少1 100万t的CFBFA和110万t的FGD堆积,同时减少1 210万t水泥的使用量.2021年内蒙古自治区一般工业固废综合利用量为13 814万t,利用率为33.5%,通过应用本文工艺,可扩大内蒙古自治区工业固废的消纳量,在建材领域为大宗固废的资源化利用贡献3个百分点,将内蒙古自治区工业固废的利用率提高至36.5%.

3 结论

(1)以固废——循环流化床粉煤灰(CFBFA)和

脱硫石膏(FGD)为矿物掺合料制备了砂浆,其CO₂吸收量随着FGD掺量的增加而增大.72~168 h碳化龄期下,砂浆的碳化反应速率最快,CO₂吸收量显著提高.672 h碳化龄期下,砂浆的CO₂吸收量接近最大值,除对照组与试件FG-0以外,均大于等于35.0%.

(2)标准养护条件下,砂浆强度随着FGD掺量的增加而降低,72 h龄期下其强度降低最高达41.8%.碳化养护使砂浆强度在72~168 h龄期下显著提高,试件FG-3的168 h抗折、抗压强度分别可达8.5、46.5 MPa.当碳化养护至672 h时,试件FG-3的抗折、抗压强度分别为对照组的120.5%、116.6%,远高于纯水泥砂浆的强度.

(3)碳化养护将砂浆中的Ca(OH)₂、C-S-H凝胶和AFt转化为CaCO₃和无定形硅胶,改善了砂浆在标准养护下内部结构疏松的问题,消耗了AFt等可能导致砂浆体积膨胀的水化产物.

(4)以内蒙古自治区2021年水泥产量为基准,采用碳化养护工艺预计可消耗1 210万t的工业固废,在建材领域为全区大宗固废的资源化利用贡献3个百分点,使工业固废综合利用率提高至36.5%.

参考文献:

- [1] 李娜,万瑶宇,柴丽.内蒙古大宗工业固废在交通建设领域综合利用问题及对策研究[J].内蒙古公路与运输,2021(6):60-62. LI Na, WAN Yaoyu, CHAI Li. Research on problems and countermeasures of comprehensive utilization of bulk industrial solid wastes in Inner Mongolia in the field of transportation construction[J]. Transportation in Inner Mongolia, 2021(6): 60-62. (in Chinese)
- [2] 潘祖超,焦芬,覃文庆,等.烟气脱硫石膏与冶炼行业石膏渣综合利用研究进展[J].中国有色金属学报,2022,32(5):1391-1402. PAN Zuchao, JIAO Fen, QIN Wenqing, et al. Research progress on comprehensive utilization of flue gas desulfurization gypsum and gypsum slag in smelting industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1391-1402. (in Chinese)
- [3] ZHANG W, GU J R, ZHOU X, et al. Circulating fluidized bed fly ash based multi-solid wastes road base materials: Hydration characteristics and utilization of SO₃ and f-CaO[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316:128355.
- [4] ZHENG D P, WANG D M, CUI H Z, et al. Hydration characteristics of cement with high volume circulating fluidized bed fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2023, 380: 131310.
- [5] SONG Y M, QIAN J S, LIU J X, et al. Effect of curing conditions on the hydration and performance of CFBC ash cementitious system [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2014, 29(1):93-96.
- [6] 陈德玉,陈鑫林,刘元正,等.固硫灰的膨胀及其控制[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(2):198-204,208. CHEN Deyu, CHEN Xinlin, LIU Yuanzheng, et al. Expansion of circulating fluidized bed fly ash and control measures[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2015, 47(2): 198-204, 208. (in Chinese)
- [7] 牛茂威,谢小莉,林洲,等.磨细固硫灰渣作为混合材对水泥性能的影响[J].非金属矿,2013,36(3):1-3. NIU Maowei, XIE Xiaoli, LIN Zhou, et al. Performance of cement blending pulverized ash and slag from fluidized bed combustion[J]. Non-Metallic Mines, 2013, 36(3): 1-3. (in Chinese)
- [8] ZHANG D, CAI X H, SHAO Y X. Carbonation curing of precast fly ash concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11):4016127.
- [9] 莫媛媛,唐薇,占宝剑,等.碳化再生微粉水泥基材料的性能及其碳足迹评价[J].建筑材料学报,2023,26(11):1207-1213. MO Yuanyuan, TANG Wei, ZHAN Baojian, et al. Performance and carbon footprint evaluation of cement-based composites incorporating carbonated recycled fine powder[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1207-1213. (in Chinese)
- [10] 邹庆焱,史才军,郑克仁,等.预养护对砌块混凝土二氧化碳养护的影响[J].建筑材料学报,2008,11(1):116-120. ZOU Qingyan, SHI Caijun, ZHENG Keren, et al. Effect of pre-conditioning on CO₂ curing of block concretes[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(1):116-120. (in Chinese)
- [11] TU Z J, GUO M Z, POON C S, et al. Effects of limestone powder on CaCO₃ precipitation in CO₂ cured cement pastes[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72:9-16.
- [12] ZHANG D, ELLIS B, JAWORSKA B, et al. Carbonation curing for precast engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2021, 313:125502.
- [13] CHEN T F, GAO X J. Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 34:74-86.
- [14] YAN D M, LU J Y, SUN Y F, et al. CO₂ pretreatment to aerated concrete with high-volume industry wastes enables a sustainable precast concrete industry [J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2021, 9(8):3363-3375.
- [15] 廖宜顺,董兴智,廖国胜,等.磷建筑石膏矿渣水泥的水化过程与耐水性能[J].建筑材料学报,2024,27(5):391-399. LIAO Yishun, DONG Xingzhi, LIAO Guosheng, et al. Hydration and water resistance of calcined phosphogypsum slag cement[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(5):391-399. (in Chinese)
- [16] 罗凯.固碳胶凝材料的制备及其水化-碳化协同耦合机制[D].绵阳:西南科技大学,2023. LUO Kai. Preparation of carbon fixing cementitious material and its coupling mechanism of hydration and carbonation [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

- [17] WEI J X, MO K H, LING T C. Roles of subsequent curing on the pH evolution and further hydration for CO₂ cured cement pastes[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 64:105701.
- [18] 曹伟达, 杨全兵. 碳化养护对钢渣-熟石灰固碳砖耐久性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(3):324-331.
CAO Weida, YANG Quanbing. Effect of carbonation curing on durability of carbon fixing steel slag-slaked lime brick[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(3):324-331. (in Chinese)
- [19] 秦玲, 毛星泰, 高小建, 等. 碳化养护蒸压加气混凝土改性水泥的抗硫酸盐侵蚀性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(12):1269-1276.
QIN Ling, MAO Xingtai, GAO Xiaojian, et al. Sulfate resistance of carbonation curing autoclaved aerated concrete modified cement paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(12):1269-1276. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国统计出版, 2022.
National Bureau of Statistics of China. *China statistical yearbook-2022* [M]. Beijing: China Statistical Publishing, 2022. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 831 页)

- [34] CHAVDA M A, BERNAL S A, APPERLEY D C, et al. Identification of the hydrate gel phases present in phosphate-modified calcium aluminate binders[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 70:21-28.
- [35] SUGAMA T. Hot alkali carbonation of sodium metaphosphate modified fly ash/calcium aluminate blend hydrothermal cements [J]. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(11):1661-1672.
- [36] IRISAWA K, GARCIA-LODEIRO I, KINOSHITA H. Influence of mixing solution on characteristics of calcium aluminate cement modified with sodium polyphosphate [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 128:105951.
- [37] SUGAMA T, WEBER L, BROTHERS L E. Sodium-polyphosphate-modified fly ash/calcium aluminate blend cement: Durability in wet, harsh geothermal environments[J]. *Materials Letters*, 2000, 44(1):45-53.
- [38] 曹集舒. 硅酸盐水泥耐高温性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(4):1452-1456.  
CAO Jishu. High temperature resistance performance of Portland cement[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(4):1452-1456. (in Chinese)
- [39] TAKAHATAKE Y, WATANABE S, IRISAWA K, et al. Structural characterization by X-ray analytical techniques of calcium aluminate cement modified with sodium polyphosphate containing cesium chloride [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, 556:153170.
- [40] IRISAWA K, NAMIKI M, TANIGUCHI T, et al. Solidification and stabilization of strontium and chloride ions in thermally treated calcium aluminate cement modified with or without sodium polyphosphate[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 156:106758.
- [41] SAJI G. Review on water radiolysis in the fukushima daiichi accident: Potential cause of hydrogen generation and explosion [C]// *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE*. Prague: Nuclear Engineering Division, 2014.
- [42] LETURCQ G, GRANDJEAN A, RIGAUD D, et al. Immobilization of fission products arising from pyrometallurgical reprocessing in chloride media[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2005, 347(1/2):1-11.
- [43] MARTELL A E. Atmospheric aspects of strontium-90 fallout: Fallout evidence indicates short stratospheric holdup time for middle-latitude atomic tests[J]. *Science*, 1959, 129:1197-1206.
- [44] NIELSEN S P. The biological role of strontium[J]. *Bone*, 2004, 35(3):583-588.