

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.043



开放科学(资源服务)标识码OSID:



工艺参数对钢渣基固碳纤维板碳化性能 与微观结构的影响

张程^{1,2}, 陈劲戈^{1,2}, 曹鑫铖^{1,2}, 张宇洋^{1,2}, 骆静静^{1,2}, 刘松辉³

(1. 苏州混凝土水泥制品研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 2. 江苏省高耐久性混凝土工程技术研究中心, 江苏 苏州 215004; 3. 河南理工大学材料科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要:为探究工艺参数对钢渣基固碳纤维板(CSFS)碳化性能与微观结构的影响,通过正交试验研究了成型压力、碳化养护时间、CO₂压力及养护温度对CSFS的CO₂吸收率、饱水抗折强度、吸水率的影响。结果表明,最优力学性能的工艺参数为成型压力30 MPa、CO₂压力0.3 MPa、养护温度20℃、碳化养护时间24 h。极差分析表明,养护温度对各项性能影响最为显著,其次为碳化养护时间,CO₂压力和成型压力影响相对较弱。微观分析表明,钢渣碳化反应后生成以方解石为主的碳酸钙晶体,其填充孔隙并在纸浆纤维表面及内部沉积,增强了纤维与基体的界面结合;孔结构测试表明,优化工艺参数能有效降低孔隙率并细化孔径分布。CSFS的生产成本低于传统纤维水泥平板,兼具固废资源化、CO₂封存及低碳建材应用的综合效益。

关键词:钢渣;固碳纤维板;工艺参数;碳化性能;微观结构

中图分类号:TU525.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Effect of process parameters on the carbonation performance and microstructure of steel slag-based CO₂ sequestered fiber sheet

ZHANG Cheng^{1,2}, CHEN Jingge^{1,2}, CAO Xincheng^{1,2}, ZHANG Yuyang^{1,2},
LUO Jingjing^{1,2}, LIU Songhui³

(1. Suzhou Concrete and Cement Products Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, Jiangsu, P. R. China;
2. Jiangsu High Durability Concrete Engineering Technology Research Center, Suzhou 215004, Jiangsu, P. R. China;
3. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, P. R. China)

Abstract: The effects of process parameters on the carbonation performance and microstructure of steel slag-based CO₂ sequestered fiber sheet (CSFS) were investigated. An orthogonal experimental design was employed to investigate the effects of forming pressure, carbonation curing time, CO₂ pressure, and curing temperature on the CO₂ uptake, saturated flexural strength, and water absorption of CSFS. The optimal process parameters

收稿日期:2026-02-26

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3803105);苏州市面向全球“揭榜挂帅”关键核心技术攻关项目(SZJB202505)

作者简介:张程(1998-),男,主要从事CO₂协同固废制备建材制品研究,E-mail: zhangcheng05250@163.com.

骆静静(通信作者),女,高级工程师,E-mail: 986458436@qq.com.

Received: 2026-02-26

Foundation items: National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3803105); Suzhou's Global "Open Competition" Project for Tackling Key Core Technologies (No. SZJB202505)

Author brief: ZHANG Cheng (1998-), main research interest: synergistic utilization of CO₂ and solid waste for the production of building materials, E-mail: zhangcheng05250@163.com.

LUO Jingjing (corresponding author), senior engineer, E-mail: 986458436@qq.com.

for mechanical performance were determined as follows: forming pressure of 30 MPa, CO_2 pressure of 0.3 MPa, curing temperature of 20 °C, and carbonation curing time of 24 h. Range analysis indicated that curing temperature had the most significant effect on all measured properties, followed by carbonation curing time, while CO_2 pressure and forming pressure exhibited comparatively minor effects. Microscopic analysis shows that the carbonation reaction of steel slag generates calcite-dominated calcium carbonate crystals, which fill pores and deposit on the surface and interior of pulp fibers, thereby enhancing the interfacial bonding between fibers and the matrix. Pore structure tests indicate that the optimized process parameters can effectively reduce porosity and refine the pore size distribution. The production cost of CSFS is lower than that of traditional fiber cement flat sheets, while offering comprehensive benefits including solid waste resource utilization, CO_2 sequestration, and low-carbon building material applications.

Keywords: steel slag; CO_2 sequestered fiber sheet; process parameters; carbonation performance; microstructure

钢铁行业作为全球碳排放与固体废弃物排放的主要源头之一,正面临严峻的可持续发展挑战。钢铁行业研究了3个阶段(源头、过程和末端)的减碳技术,其中末端阶段主要是实现钢渣资源化利用^[1]。2025年中国钢渣产出量超过1.51亿t,累计堆存量超过16.56亿t,但利用率不足30%^[2-3]。大量未利用钢渣通过填埋处置,造成了土地资源的浪费,并且钢渣中游离氧化钙、重金属离子等成分更可能造成土壤碱化与地下水污染等环境风险^[4]。因此,实现钢渣资源化可持续利用,对推动钢铁行业绿色低碳发展和环境保护至关重要。

目前,钢渣主要的利用途径为沥青路面材料^[5]、陶瓷材料^[6]、辅助胶凝材料^[7]、混凝土^[8]等。但由于不同区域炼钢原材料、工艺、设备等的不同,不同的钢渣矿物组成、胶凝活性、微观结构等表现出显著差异,严重制约其大规模应用。近年来,利用 CO_2 养护钢渣制品,具备养护周期短、有效提升性能等优势,能够解决钢渣大规模应用的问题,受到了广泛关注。当前,相关研究主要集中两方面:一方面是利用碳化钢渣微粉用作辅助胶凝材料^[9-10],另一方面是通过加速碳化技术开发固碳钢渣制品,如固碳砌块^[11]、固碳人造骨料^[12]、固碳纤维板(CSFS)^[13]。因此,开发钢渣高附加值和高性能化技术,实现固废处置与碳封存协同增效,已成为钢渣大规模资源化应用的研究焦点。

研究发现,固碳钢渣制品的性能受 CO_2 浓度、 CO_2 压力、养护温度、相对湿度、养护时间等因素影响。 CO_2 的浓度和压力直接影响扩散过程和 CO_2 的溶解度,提升 CO_2 浓度和 CO_2 压力,可显著提升固碳制品的力学性能^[14-15]。养护温度和相对湿度控制了钢渣中碱金属离子的溶解和碳化反应速度。在不同的研究中,养护温度和相对湿度对固碳制品的影响,有着相似的规律。Luo等^[16]研究了不同养护温

度对钢渣砌块的影响,结果表明,在碳化早期,提高养护温度有利于抗压强度和 CO_2 吸收率的提高,但随着养护时间的延长,在0 °C和90 °C养护的样品的抗压强度和 CO_2 吸收率远低于在中温(即30 °C和60 °C)养护的样品。李善武等^[17]的研究表明,温度和相对湿度的交互作用对钙离子和 CO_2 的扩散具有显著影响,通过适当提高养护温度和相对湿度,可增加钢渣制品力学性能。碳化反应作为一个气-液-固三相共同参与的反应,试样的尺寸显著影响了制品的碳化程度^[18]。与砌块等制品相比,CSFS制品理论上具有面积大、厚度薄的特点,使得 CO_2 的接触面积大幅增加,展现出更为优异的碳化效果。Xie等^[13]探究了不同PAN纤维掺量对镁渣基固碳纤维板的影响,在1%PAN掺量下,可显著提升抗折强度和拉伸性能,碳化程度超过45%。刘松辉等^[19]研究了养护制度对固碳纤维板的影响,结果表明,碳化后持续水化可进一步提升力学性能,这是因为碳酸钙晶体与水化产物共同填充了孔隙,增强了纤维与基体结合。目前针对CSFS产品,缺少相应工艺参数的研究。

笔者基于正交试验对CSFS的工艺参数进行初步研究,分析不同参数对CSFS性能的影响,结合物相组成、微观结构等揭示了碳化养护对CSFS的影响机理,并对其进行了耐久性和经济效益分析。

1 试验

1.1 原材料

钢渣取自中国宝武集团有限公司,其化学成分如表1所示,主要为 CaO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 SiO_2 、 MgO 等;矿物组成如图1所示。钢渣经过球磨后的粒径分布如图2所示,其中 D_{50} 为10.61 μm ,比表面积为481 m^2/kg 。纸浆纤维由纤维水泥平板企业提供,其基本物理性能如表2所示。 CO_2 气体为工业级,

其体积浓度达到 99.9%。

表 1 钢渣的化学成分

Table 1 Chemical composition of the steel slag

单位: %							
CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	other
44.16	8.68	3.07	1.56	33.90	0.17	0.33	8.13

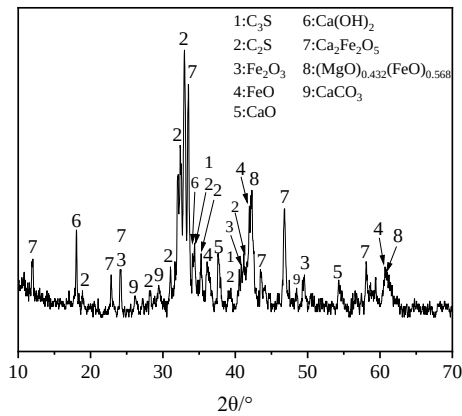


图 1 钢渣的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of steel slag

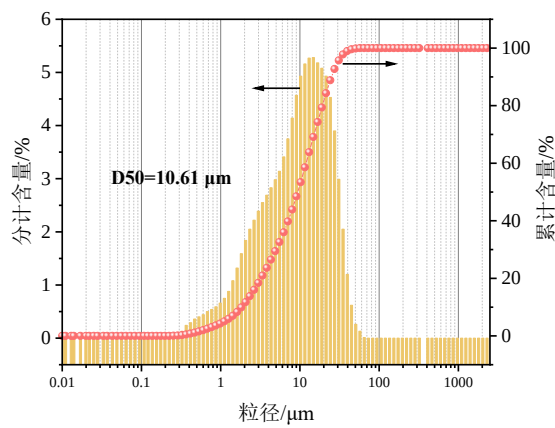


图 2 钢渣的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of steel slag

表 2 纸浆纤维的物理性能

Table 2 Physical properties of pulp fibers

纤维长度/mm	叩解度/(°SR)	湿重/g	帚化率/%	浓度/%
1.81	25	11.32	7.41	4.5

1.2 正交试验设计

为探究不同工艺参数对 CSFS 性能的影响,采用正交试验方法,选取成型压力(Forming pressure, A)、碳化养护时间(Carbonation curing time, B)、CO₂ 压力(CO₂ pressure, C)、养护温度(Curing temperature, D)4 个影响因素,每个因素 3 个水平,设计 L9(3⁴)的正交试验设计表,如表 3 所示。然后对 CSFS 进行 CO₂ 吸收率、抗折强度、吸水率测试。

表 3 正交试验设计

Table 3 Orthogonal test design

水平	成型压力/ MPa	碳化养护时 间/h	CO ₂ 压力/ MPa	养护温 度/℃
1	25	6	0.1	20
2	27.5	12	0.2	50
3	30	24	0.3	80

1.3 试验方法

1.3.1 CSFS 制备与养护

参照刘松辉等^[19]的 CO₂ 养护固废基纤维板的成型与养护方法制备 CSFS,其中纸浆纤维的干重质量是钢渣质量的 8%。首先将纸浆纤维搅拌分散,然后将钢渣加入纸浆中制备料浆,充分搅拌均匀后倒入抽滤模具中进行抽滤,抽滤得到的坯体经过压力压制进一步脱水和成型,最终得到纤维板坯体。纤维板坯体在预养护箱中进一步脱水,直至纤维板坯体的剩余含水率在 8%。随之,将纤维板坯体转运至碳化养护反应釜中,待碳化养护结束,从反应釜中取出得到尺寸为 200 mm×200 mm×6 mm 的 CSFS。其中碳化过程中,采用水浴加热的方式控制反应釜的养护温度。

1.3.2 CO₂ 吸收率

采用直接增重法^[20],以碳化前后试件质量的增加量为 CO₂ 吸收率,如式(1)所示。

$$\omega = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中:ω 为 CSFS 的 CO₂ 吸收率,%;m₁ 为 CSFS 碳化前试件的质量,g;m₂ 为 CSFS 碳化后试件的质量,g。

1.3.3 测试方法

根据《纤维水泥制品试验方法》(GB/T 7019—2024)的试验方法,对 CSFS 进行抗折强度、吸水率、抗冻性的测试,其中饱水抗折强度需在测试前将 CSFS 浸泡水中持续 24 h。

1.3.4 微观测试

取厚度与 CSFS 试件一致的小块样品,将其在真空干燥箱中烘干后进行破碎和粉磨,粉磨至细度过 75μm 筛。矿物相分析采用日本理学 SmartLab 型号的 X 射线衍射仪(XRD)进行测试,采用 Cu 靶,在扫描范围为 5°~70°、扫描速度为 10 (°)/min 的条件下进行测试分析。采用综合热分析仪(BJ-HCT-3)对样品进行测试,测试温度范围为 30~1 000 ℃,升温速率为 10 ℃/min。取 CSFS 中心薄片样品经过喷金处理后用于微观形貌测试,采用德国蔡司 MERLIN Compact 超高分辨率场发射扫描电镜,在电压 15 kV 下进行扫描电镜(SEM)测试。将 CSFS 薄片进行树脂固化,经过打磨、抛光后,在 20 kV 的

电压下获得BSE的图像。

1.3.5 孔结构测试

试样真空干燥后在-0.1 MPa条件下饱水处理24 h,以确保试样内部充满水。采用Niumag公司的MesoMR12-060V进行低场核磁测试(LF-NMR),以表征试样的孔结构。测试参数为:探头线圈直径

为25 mm、重复间隔时间3 000 ms、扫描次数128次。

2 结果与讨论

表4所示不同条件下CSFS的试验结果,对CO₂吸收率、饱水抗折强度、吸水率进行了极差分析。

表4 CSFS正交试验结果表
Table 4 Orthogonal test results of CSFS

编号	A/MPa	B/h	C/MPa	D/℃	CO ₂ 吸收率/%	饱水抗折强度/MPa	吸水率/%
NO.1	25	6	0.1	20	6.11	7.68	15.73
NO.2	25	12	0.2	50	4.90	7.30	16.18
NO.3	25	24	0.3	80	4.85	6.82	16.25
NO.4	27.5	6	0.2	80	4.34	4.69	16.88
NO.5	27.5	12	0.3	20	8.26	9.25	15.31
NO.6	27.5	24	0.1	50	6.77	7.92	15.86
NO.7	30	6	0.3	50	4.75	7.29	15.78
NO.8	30	12	0.1	80	3.84	5.32	16.76
NO.9	30	24	0.2	20	7.51	10.12	15.16

2.1 正交试验极差分析

2.1.1 CO₂吸收率

CO₂吸收率是评估CSFS在养护过程中封存CO₂量的重要指标。NO.5试件的CO₂吸收率最高,达到8.26%,不同影响因素的极差分析见表5。由表5可见,对CO₂吸收率的影响由大到小的顺序依次为:养护温度>碳化养护时间>成型压力>CO₂压力(D>B>A>C)。不同影响因素对其CO₂吸收率的影响如图3所示。当成型压力由25 MPa提高至27.5 MPa时,CO₂吸收率明显提高,而进一步增至30 MPa后则有所下降,整体表现为先升后降的

趋势,说明适中的成型压力有利于提升CO₂吸收率,而过高压力会产生负面作用。碳化养护时间和CO₂压力的增加对CO₂吸收率具有提升作用。随着养护时间由6 h延长至24 h,CO₂吸收率整体呈上升趋势,表明延长反应时间有利于CO₂向试件内部进一步扩散。同时,随着CO₂压力的提高,CO₂吸收率提升,说明较高分压有助于增强CO₂传输。相比之下,养护温度对CO₂吸收率的影响最为显著。随着温度由20℃升高至80℃,CO₂吸收率明显降低,表明较高温度不利于CSFS的碳化过程。

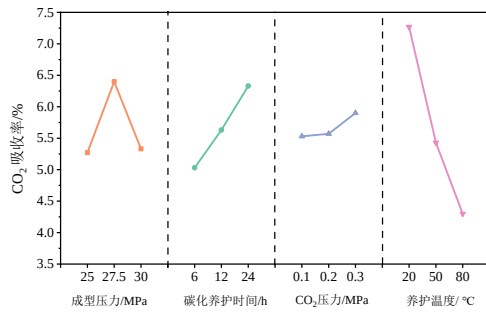
表5 各指标因素极差分析表
Table 5 Analysis table of range of various indicator factors

项目	指标	A	B	C	D	影响等级
CO ₂ 吸收率/%	K1	5.29	5.07	5.57	7.29	D>B>A>C
	K2	6.46	5.67	5.58	5.47	
	K3	5.37	6.38	5.95	4.34	
	R	1.17	1.31	0.38	2.95	
饱水抗折强度/MPa	K1	7.27	6.55	6.97	9.02	D>B>C>A
	K2	7.29	7.29	7.37	7.53	
	K3	7.58	8.29	7.79	5.61	
	R	0.31	1.74	0.82	3.41	
吸水率/%	K1	16.05	16.13	16.12	15.40	D>B>C>A
	K2	16.02	16.08	16.07	15.94	
	K3	15.9	15.76	15.78	16.63	
	R	0.15	0.37	0.34	1.23	

2.1.2 饱水抗折强度

饱水抗折强度是评估CSFS力学性能的重要指标,其中NO.9试件的饱水抗折强度最高为10.12

MPa。不同影响因素的极差分析见表5,可得出对饱水抗折强度的影响由大到小的顺序依次为:养护温度>碳化养护时间>CO₂压力>成型压力(D>B

图3 各因素对CO₂吸收率的影响Fig. 3 Effect of each factor on CO₂ uptake ratio

>C>A)。不同影响因素对饱水抗折强度的影响如图4所示。结果表明,随着成型压力增加,CSFS更加密实,碳化后CSFS的饱水抗折强度逐渐增加。虽然成型压力在30 MPa下的CSFS的CO₂吸收率下降,但CSFS在更高的压力下密实度更高,使得饱水抗折强度高于成型压力为27.5 MPa下的试件强度。随着碳化时间与CO₂压力增加,CSFS的碳化程度更高,碳化产物填充在孔隙中,增加了CSFS的密实度,从而提升CSFS的饱水抗折强度。养护温度的提升,导致CSFS的饱水抗折强度呈现逐渐下降的趋势。其主要原因是CO₂吸收率下降,没有充足的碳化产物构建致密的硬化基体,导致强度难以提升。以上结果表明,工艺参数的最佳组合,需要综合考虑以达到最优性能。

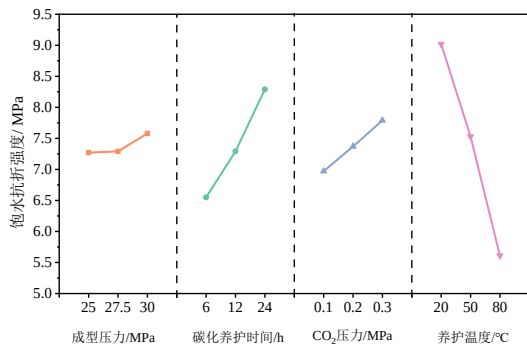


图4 各因素对饱水抗折强度的影响

Fig. 4 Effect of each factor on water-saturated flexural strength

2.1.3 吸水率

不同影响因素的极差分析见图5。由图5可见,对吸水率的影响由大到小的顺序依次为:养护温度>碳化养护时间>CO₂压力>成型压力(D>B>C>A)。不同影响因素对其吸水率的影响如图5所示。结果表明,随着成型压力、碳化时间、CO₂压力的增加,吸水率呈现逐渐下降趋势,代表CSFS逐渐密实,宏观表现为力学性能更高。而养护温度提升,吸水率逐步上升,表现出力学性能更差。CSFS

的吸水率与饱水抗折强度的趋势较为一致,吸水率越低,饱水抗折强度越高。

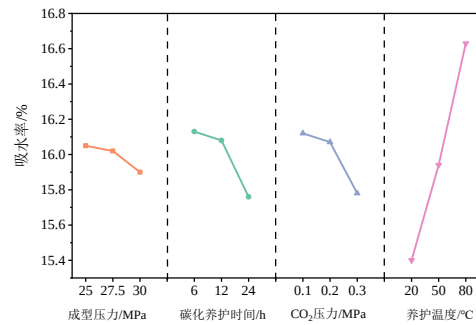


图5 各因素对吸水率的影响

Fig. 5 Effect of each factor on Water absorption

2.2 抗冻性

抗冻性是纤维水泥平板耐久性的重要因素。参照《纤维水泥平板 第1部分:无石棉纤维水泥平板》(JC/T 412.1—2018),采用100次冻融循环前后CSFS饱水强度之比,用于表征CSFS的抗冻性。图6所示为NO. 9组的CSFS冻融循环前后的饱水抗折强度。结果表明,冻融循环后的强度损失为9.85%,抗折强度比率超过70%,符合JC/T 412.1—2018的要求,且试件在冻融循环期间未发现分层和破裂现象。上述结果表明,CSFS具有较好的抗冻性。目前仅验证了CSFS的抗冻性能,后续可开展热学性能、浸泡-干燥性能、热雨性能等耐久性试验,为该板材在建筑外墙等场景的长期应用提供数据支撑与技术依据。

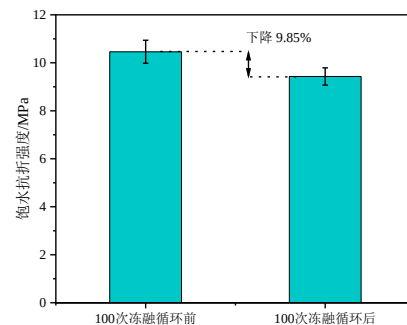


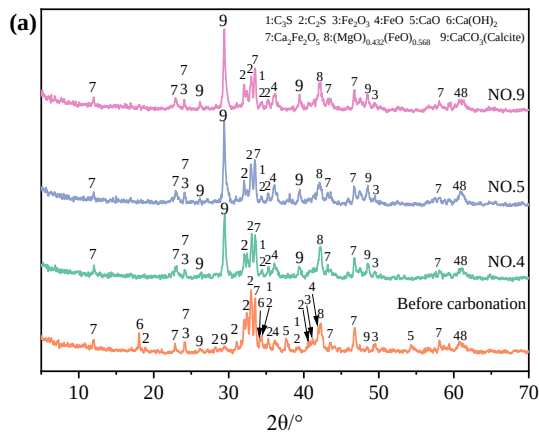
图6 CSFS冻融循环前后的饱水抗折强度

Fig. 6 Water-saturated flexural strength of CSFS before and after freeze-thaw cycles

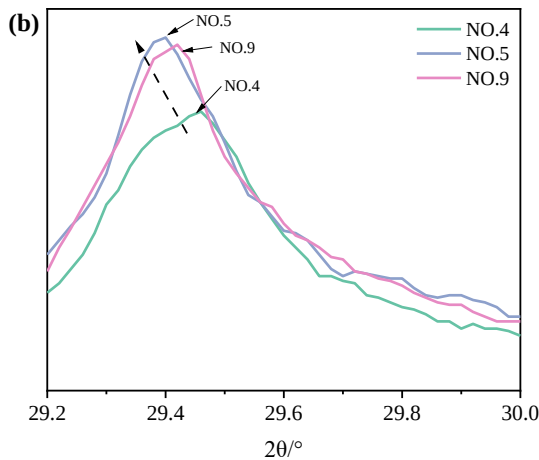
2.3 物相组成

为了进一步探明不同影响因素下CSFS碳化产物,选取3组不同CO₂吸收率的试件(NO. 4、NO. 5、NO. 9)进行测试。图7显示了碳化前后CSFS的XRD图谱。由图7(a)可见,在碳化前,样品主要由C₂S、f-CaO、Ca(OH)₂、Ca₂Fe₂O₅等组成。经CO₂养护后,3组试件均出现明显的方解石特征衍射峰,表明养护过程中生成了大量方解石型碳酸钙。碳酸

钙晶体通过相互堆叠、搭接与机械咬合作用,构建了连续致密的基体结构,从而赋予CSFS良好的宏观力学性能。3组试件碳化产物主要区别为方解石衍射峰的强度。由图7(b)可见,NO.5的方解石衍射峰最强,其次为NO.9、NO.4,其与 CO_2 吸收率具有一致的现象。另外,钢渣中f-CaO水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会导致体积膨胀97.9%,而CSFS通过碳化养护消耗了较多的f-CaO,有效减少了因游离氧化钙后期水化膨胀引发的体积变形与开裂风险。



(a) XRD 图谱



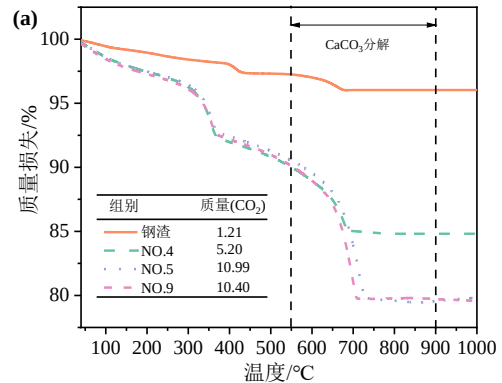
(b) 局部放大图

图7 XRD 图谱

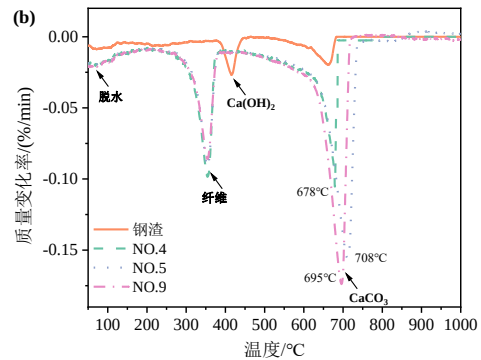
Fig. 7 XRD patterns

图8为不同影响因素下CSFS的TG-DTG曲线。结果表明,CSFS在加热过程中的质量变化主要有4个阶段。50~200℃的质量损失归因于产物中物理、化学结合水蒸发,在300~400℃的质量损失为纸浆纤维的分解,415℃附近的质量损失为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱去结构水导致,550~900℃的质量损失为碳酸钙分解。因此,由图8(a)可计算出钢渣、NO.4、NO.5和NO.9的碳酸钙分解导致的质量损失率分别为1.21%、5.20%、10.99%、10.40%。该结果规律与XRD的规律一致。由图8(b)可知,钢

渣碳化前含有少量的碳酸钙和氢氧化钙。碳化后,CSFS中氢氧化钙分解峰完全消失,碳酸钙分解峰显著增加。此外,碳酸钙含量越高,其分解温度越高,说明方解石的结晶状态更好。



(a) 热重曲线



(b) 微商热重曲线

图8 CSFS的TG-DTG 曲线

Fig. 8 TG-DTG curves of CSFS

2.4 微观形貌

图9所示为不同影响因素下CSFS的SEM图。由图9(a)、(b)可见,在低成型压力、高温条件下,纸浆纤维与碳化基体结合不紧密,存在较多的孔隙;此外,大量碳酸钙附着在纸浆纤维上,但碳酸钙较为分散,不能形成连续的致密结构。由图9(c)、(d)可见,在高成型压力、常温下条件下,CSFS表现出连续且致密的碳化基体,并且纸浆纤维与基体之间互相连接。由图9(c)、(d)是EDS能谱分析可见,打点处分别为纸浆纤维、碳酸钙。这表明碳酸钙附着在纸浆纤维上,增强了界面连接,有助于提升力学性能。

图10所示为CSFS的BSE图,其中最暗的区域为纸纤维,基本由C元素组成,灰白色为碳酸钙。通过EDS面扫描发现,纸浆纤维分布区域富集大量Ca、O元素,而Si元素较少,结合图8(d)点谱中检测到的Ca元素,可证实纤维上存在碳酸钙沉淀。纸浆纤维表面具有羟基等官能团且为中空结构,这为钙离子提供了吸附位点;在 CO_2 养护过程中,富集于纤

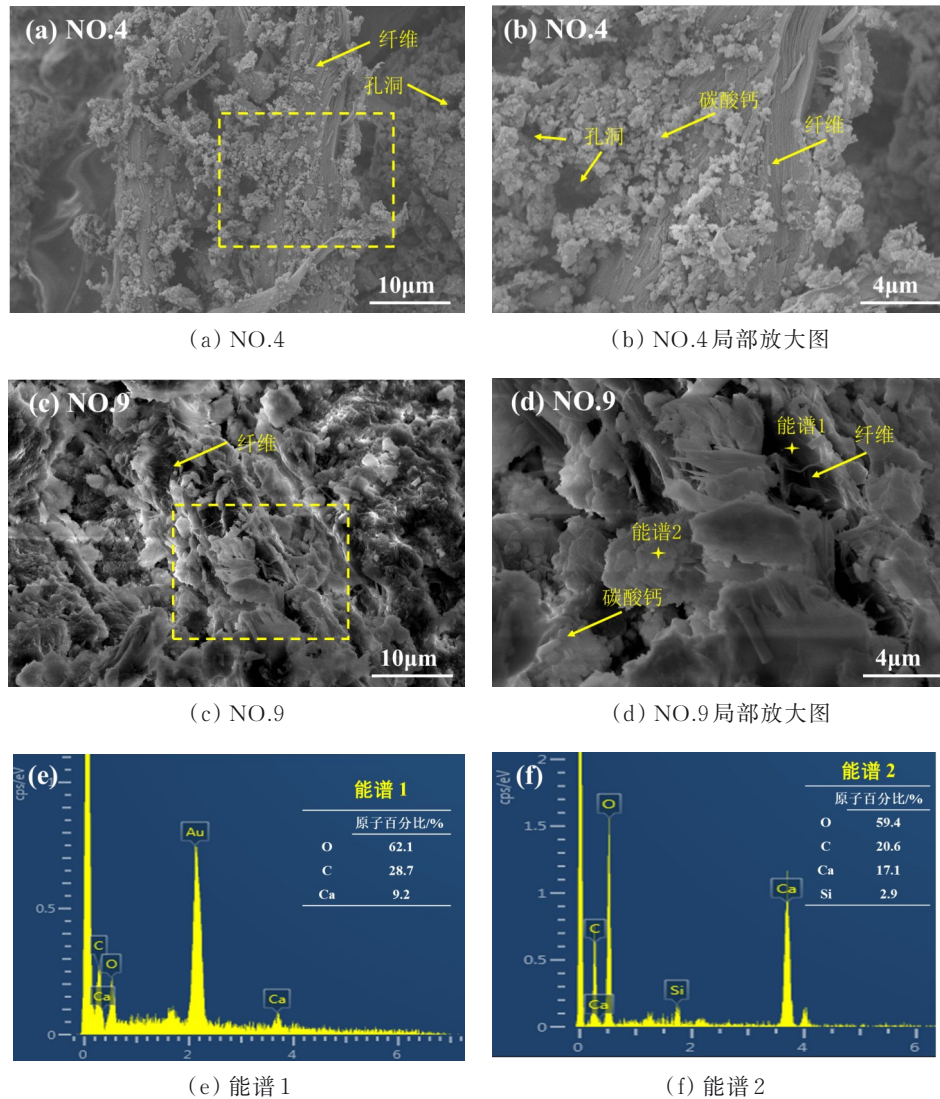


图9 CSFS的SEM图

Fig.9 SEM images of CSFS

维表面及内部的钙离子参与碳化反应并生成了碳酸钙。纤维与基体界面结合紧密,这归因于碳酸钙所起的连接作用;同时,碳酸钙晶体填充了纤维的部分中空结构,增强在基体中的嵌合能力。这种由碳酸钙生长所构建的微观结构,有助于在材料受力时充分发挥纤维的增强增韧效应,从而有效提升CSFS的抗折强度。

2.5 孔结构分析

试样的孔径主要划分为细孔($<0.1\mu\text{m}$)、中孔($0.1\sim1.0\mu\text{m}$)和大孔($>1.0\mu\text{m}$)^[21]。图11所示为CSFS的孔结构分布。由图11可知,3组试件孔结构分布受成型压力与碳化养护工艺影响呈现差异。NO.4(高温碳化养护)试件的细孔与大孔数量均为3组中最高,导致力学性能最低;降低养护温度后,NO.5试件细孔和大孔数量减少,力学性能有所提升;NO.9(采用高成型压力与常温碳化养护),细孔和大孔占比降至最低,碳化产物充分填充孔隙,基

体更加密实,获得最高抗折强度。另外,碳化产物对孔隙的填充与孔径优化作用,使得总孔隙率由NO.4的4.11%降至NO.9的3.16%,这与力学性能的变化一致,表明通过优化工艺参数能优化孔结构和降低孔隙率,进而提升力学性能。

2.6 影响机理分析

图12所示为2种工艺参数下CSFS的强度影响机理。如图12(a)所示,在低成型压力与高温养护条件下,低压力使坯体初始结构不够密实。另外,碳化反应需要水的参与,CSFS因高养护温度导致水分快速蒸发,使钢渣颗粒表面的水膜减少,并且温度升高会降低 CO_2 在水中的溶解度,导致碳酸钙的数量会因水膜中钙离子和碳酸根离子总量的减少而降低,使得 CO_2 吸收率降低^[22-23]。综合导致CSFS吸水率增加、力学性能下降。如图12(b)所示,在高成型压力与常温养护条件下,较高的成型压力增加坯体初始密实度,常温环境能维持钢渣表

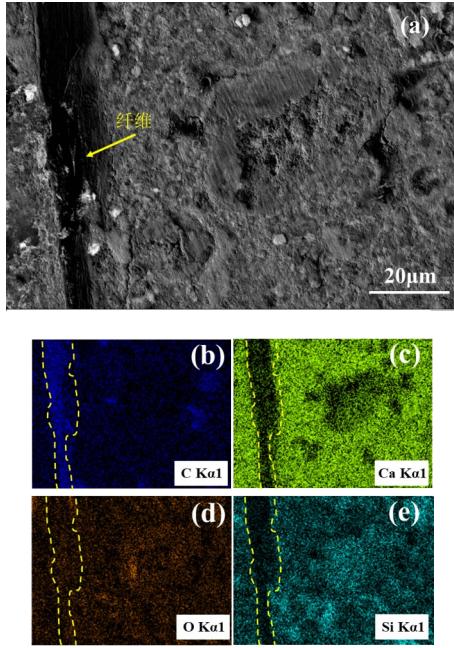
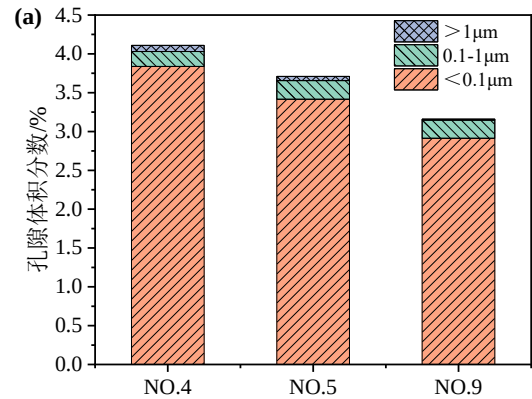


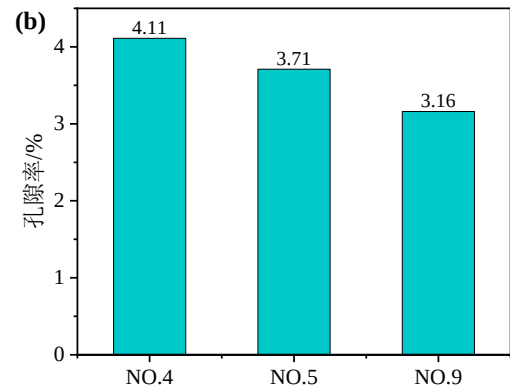
图 10 CSFS 的 BSE 图

Fig.10 BSE graph of CSFS

面水膜未有较大程度减少,可溶解更多的钙离子和碳酸根离子,碳酸钙沉淀数量增加,表现为 CO_2 吸收率增加。因此,大量生成以方解石为主的碳酸钙晶体填充孔隙,优化孔结构并降低了总孔隙率,并且在纸浆纤维表面及中空结构处大量沉积、搭接与生长,增强了纤维与碳化基体间的结合,减少了界面孔隙,从而显著提升力学性能。该工艺参数提升了 CO_2 吸收率和优化了孔隙结构,通过碳酸钙晶体相



(a) 孔分布曲线



(b) 孔隙率

图 11 CSFS 的孔隙体积分数和孔隙率

Fig. 11 Pore volume fraction and porosity of CSFS

互堆叠、搭接与机械咬合作用,进而提升了CSFS的性能。

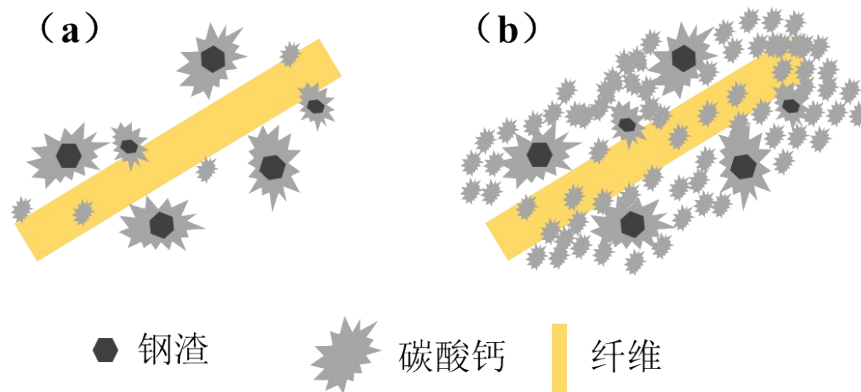


图 12 CSFS 的强度影响机理

Fig.12 Strength influence mechanism of CSFS

2.7 经济效益

表6所示是粗略计算的CSFS、压蒸纤维水泥平板(HPCFS)、常温养护纤维水泥平板(NHPCFS)的成本。CSFS的配比为8%纤维、92%钢渣,养护条件为 CO_2 压力为0.3 MPa、常温、养护时间为24 h;HPCFS的配比为8%纤维、36.8%水泥、55.2%石英砂,养护条件为180℃、饱和蒸汽压力为1.2

MPa、养护时间为24 h;NHPCFS配比为8%纤维、72%水泥、20%粉煤灰。结果表明,生产每平方米CSFS、HPCFS、NHPCFS的成本分别为5.37元、6.02元、5.45元。相比HPCFS、NHPCFS,采用钢渣制备CSFS的成本分别降低10.8%、1.5%。NHPCFS与CSFS的成本差距不大,但是NHPCFS的养护周期通常较长,超过7 d,而CSFS的养护时

间可控制在 24 h 以内。因此,CSFS 在效率上有较大的优势。在表 6 中也可以发现,CO₂ 养护成本的占比较高。随着 CO₂ 富集等技术的发展,CO₂ 养护的成本可进一步降低,从而降低 CSFS 的成本。当

前全国碳市场的碳排放配额交易价约为 80 元/吨 CO₂,按照 CO₂ 吸收率为 7.51% 计算,那么每平方米 CSFS 可获得 0.07 元的收益。随着未来碳税相关政策的普及,CSFS 因封存 CO₂ 可获取更多的收益。

表 6 CSFS、HPCFS 和 NHPDFS 的成本
Table 6 Cost of CSFS, HPCFS, and NHPDFS

单位:元/m ²							
项目	纸浆纤维 ¹⁾	水泥 ¹⁾	石英砂 ¹⁾	粉煤灰 ¹⁾	钢渣 ¹⁾	二氧化碳养护 ^{[24][2]}	蒸汽养护 ^[24]
CSFS	0.34				3.88	1.15	
HPCFS	0.44	2.01	3.02				0.55
NHPDFS	0.44	3.92		1.09			

注:1)原材料可在市场上买到,其成本参考 <https://p4psearch.1688.com/hamlet.html>;2)根据《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021年)》计算二氧化碳的富集和运输成本。

3 结论

1)正交试验与极差分析表明,养护温度对 CSFS 的 CO₂ 吸收率、饱水抗折强度及吸水率影响最为显著,高温会明显降低材料性能,而提高成型压力、延长碳化养护时间、提升 CO₂ 压力均有利于性能提升;综合力学性能最优的工艺参数组合为成型压力 30 MPa、CO₂ 压力 0.3 MPa、养护温度 20 ℃、碳化养护时间 24 h。

2)微观结构与物相分析显示,CSFS 经碳化养护后形成以方解石为主的致密碳化基体,碳酸钙在纸浆纤维表面及内部沉积并紧密黏结纤维与基体,高成型压力配合常温碳化养护可优化孔结构、降低孔隙率,而低成型压力与高温养护会导致碳化产物分散、界面孔隙多、基体疏松,这是 CSFS 力学性能具有差异的原因。

3)CSFS 生产成本约 5.37 元/m²,低于传统压蒸与常温养护纤维水泥平板,同时具备良好抗冻性,在冻融循环后强度损失小、无分层破裂,兼具钢渣大宗资源化、CO₂ 封存与低碳建材应用的经济与环境效益。

参考文献

[1] Zhang J H, Guo H Y, Yang G Y, et al. Sustainable transition pathways for steel manufacturing: low-carbon steelmaking technologies in enterprises[J]. Sustainability, 2025, 17(12): 5329.

[2] 岳德钰, 张大江, 王剑锋, 等. 乙二胺衍生物对钢渣水硬化特性的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(11): 159-166.

Yue D Y, Zhang D J, Wang J F, et al. Effect of ethylenediamine derivatives on hydration and hardening properties of steel slag[J]. Materials Reports, 2025, 39(11): 159-166. (in Chinese)

[3] 任旭, 王会刚, 吴跃东, 等. “双碳”目标下钢渣处理及资源化利用探讨[J]. 环境工程, 2022, 40(8): 220-224.

Ren X, Wang H G, Wu Y D, et al. Discussion on steel slag treatment and resource utilization under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(8): 220-224. (in Chinese)

[4] Sun Z K, Zhang Z H, Lu G Y, et al. Recent advances in research on steel slag for asphalt pavements: a review[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22: e04698.

[5] Hu K, Li W Y, Hu R X, et al. Carbonation-activated steel slag recycling for low-carbon pavements: mechanistic insights into interface stabilization and road performance enhancement[J]. Construction and Building Materials, 2025, 489: 142294.

[6] Yang C H, Yu H W, Zhang Z K, et al. Preparation of steel slag-based porous ceramic composite phase change materials for thermal energy storage by sacrificial template method[J]. Ceramics International, 2025, 51(16): 22209-22219.

[7] Zheng Z Q, Wang Y B, Tan H B, et al. High efficiency preparation of superfine steel slag particles and the effects on hydration of Portland cement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 23: e04839.

[8] 王成刚, 刘耀伟, 王帅, 等. 钢渣双掺混凝土力学与耐久性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(8): 2846-2855.

Wang C G, Liu Y W, Wang S, et al. Mechanical properties and durability of double-doped steel slag concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42 (8): 2846-2855. (in Chinese)

[9] Li L S, Chen T F, Gao X J, et al. Unveiling the impact of carbonation treatment on BOF slag hydration activity: formation and development of the barrier layer[J]. Construction and Building Materials, 2024, 436: 136959.

[10] Ma Z H, Jiang Y, He J H, et al. Revealing the connec-

- tion between carbonation regimes and early pozzolanic reactivity of recycled concrete powder: Impact of composition and microstructure[J]. *Cement and Concrete Research*, 2024, 186: 107697.
- [11] Hou G H, Yan Z W, Sun J F, et al. Microstructure and mechanical properties of CO₂-cured steel slag brick in pilot-scale[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121581.
- [12] Zhang Y H, Zhang M L, Huang D F. Polycarboxylate superplasticizer as strengthening additive in carbonated artificial steel slag aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133136.
- [13] Xie D M, Chen J Z, Wu T J, et al. Valorization of magnesium slag and CO₂ towards a low carbon fiber reinforced cement board[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 93: 109866.
- [14] Zhang Y H, Zhang Z, Wang Q, et al. Preparation of ultra-high strength carbonated compacts via accelerated carbonation of magnesium slag[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2024, 83: 102829.
- [15] Wang Y, Liu J H, Hu X, et al. Utilization of accelerated carbonation to enhance the application of steel slag: a review[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2023, 12(4): 471-486.
- [16] Luo Z T, Wang Y, Yang G J, et al. Effect of curing temperature on carbonation behavior of steel slag compacts[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123369.
- [17] 李善武, 樊展霖, 刘剑辉, 等. 温度和相对湿度对 CO₂ 养护钢渣制品性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2025, 28(1): 33-41.
- Li S W, Fan Z L, Liu J H, et al. Effect of temperature and relative humidity on performance of CO₂ curing steel slag products[J]. *Journal of Building Materials*, 2025, 28(1): 33-41. (in Chinese)
- [18] 孙一夫. 二氧化碳养护固废轻质混凝土配方优化及工业化应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- Sun Y F. Formulation optimization and industrial application of carbon dioxide curing solid waste lightweight concrete[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [19] 刘松辉, 张程, 管学茂. CO₂协同镁渣基固废制备纤维板及其性能与微结构[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(9): 2166-2178.
- Liu S H, Zhang C, Guan X M. Properties and microstructure of fiberboard prepared from CO₂ and magnesium slag[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(9): 2166-2178. (in Chinese)
- [20] 郭若楠, 易臻伟, 王涛, 等. 二氧化碳养护混凝土活性组分固碳率评价方法[J]. *化工进展*, 2022, 41(5): 2722-2732.
- Guo R N, Yi Z W, Wang T, et al. Assessment method of CO₂ uptake ratio of carbonation-cured concrete based on reactive compositions[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(5): 2722-2732. (in Chinese)
- [21] 郑大鹏, 杨建祥, 赵德博, 等. 碳化养护条件下 AASF 砂浆孔结构对传输性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(10): 3713-3724.
- Zheng D P, Yang J X, Zhao D B, et al. Influence of pore structure on transport properties of AASF mortar under carbonation curing[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(10): 3713-3724. (in Chinese)
- [22] 向玮衡, 刘俊, 胡成, 等. 细度和水胶比对精炼钢渣负碳胶结料碳矿化性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(7): 2549-2556.
- Xiang W H, Liu J, Hu C, et al. Effects of fineness and water-binder ratio on carbon mineralization performance of ladle furnace slag carbon-negative binder[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(7): 2549-2556. (in Chinese)
- [23] 穆元冬. 硅酸钙矿物碳酸化固化机理及其材料性能提升机制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- Mu Y D. Carbonation-induced hardening mechanism of calcium silicate minerals and the performance-enhancing strategies of the carbonated materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [24] Xie D M, Zhang Z P, Liu Z C, et al. Utilization of magnesium slag to prepare CO₂ solidified fiber cement board[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134345.

(编辑 XXX)