

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2023.01.015

钢渣碳化技术影响因素的研究进展

Research progress of influencing factors of steel slag carbonation technology

张恒飞^{1,2}, 刘茂举^{1,2}, 王东哲^{1,2}, 付玉^{1,2}, 张学雷³, 钟秦粤³, 李晓³

(1. 黄河三角洲京博化工研究院有限公司, 山东 滨州 256600; 2. 山东大学(京博) 高端化工与新材料研究院, 山东 济南 250100; 3. 山东京韵泰博新材料科技有限公司, 山东 滨州 256600)

ZHANG Hengfei^{1,2}, LIU Maoju^{1,2}, WANG Dongzhe^{1,2}, FU Yu^{1,2}, ZHANG Xuelei³, ZHONG Qinyue³, LI Xiao³

(1. Yellow River Delta Chambroad Institute Co., Ltd., Binzhou 256600; 2. Institute of Advanced Chemical and New Materials, Shandong University (Chambroad), Jinan 250100; 3. Shandong ChamTopper New Material Technology Co., Ltd., Binzhou 256600)

摘要: 钢渣碳化技术不仅可以减少碳排放, 还能实现工业废渣废气的回收再利用。本文分析了钢渣的组成和碳化机理, 综述了近年来外加剂、制备过程参数及碳化过程参数对钢渣碳化技术影响的研究进展, 并对碳化技术的研究方向进行展望。

关键词: 钢渣; 碳化; 影响因素; 研究进展

Abstract: Steel slag carbonization technology can not only reduce carbon emissions, but also realize the recycling of industrial waste slag and waste gas. This paper analyzes the composition and carbonation mechanism of steel slag, reviews the research progress of influence of additives, preparation process parameters and carbonation process parameters on steel slag carbonization technology in recent years, and finally prospects the research direction.

Key words: steel slag; carbonization; influencing factors; research progress;

中图分类号: X756 文献标志码: A 文章编号: 1003-8965(2023)01-0074-05

0 引言

2019年全球粗钢产量为18.7亿吨, 每生产1吨钢约产生13%~20%的钢渣, 钢渣产量约为2.4~3.7亿吨。我国钢铁产量巨大, 2020年达13.25亿吨。欧美日等国的钢渣利用率高达95%以上, 基本实现了零排放。而我国钢渣存量巨大, 利用率仅为10%~20%。大量的钢渣堆积不仅造成环境污染, 且占用大量土地^[1]。

目前, 钢渣利用主要分为内循环和外循环^[2-3]。内循环是将钢渣作为助溶剂回炉进行炼钢的二次利用。外循环包括钢渣作为水泥掺合料和制备建筑材料, 其中水泥掺合料主要利用钢渣的水化作用, 取代部分水泥用量。相比于水化作用, 钢渣具有更迅速的碳化反应。近年来, 采用碳化技术制备钢渣建筑材料得到了广泛关注。

CO₂作为温室气体的主要成分之一, 其含量增加一倍, 全球气温升高3~5℃, 造成气候干旱, 冰川融化, 海平面上升, 严重危机人类生存发展。钢渣含有大量的CaO等金属氧化物, 是非常好的CO₂固碳材料^[4]。CO₂排放主要来自钢铁、火电等高耗能行业。如果将这些排放的CO₂尾气收集, 并利用钢渣进行永久固定, 不仅可以实现CO₂的减排, 且碳化后的钢渣具有一定的强度, 可以制备具有高强度的结构材料, 同时实现CO₂的回收利用和钢渣的变废为宝。

近年来, 国内外在钢渣碳化机理、碳化影响因素、提高

碳化反应程度、增强碳化制品的强度等方面进行了研究。本文综述近年来关于钢渣碳化机理和提高碳化反应程度的研究, 总结采用钢渣碳化技术进行CO₂的固定和制备建筑材料的进展。

1 钢渣的组成

1.1 钢渣的化学成分

我国各钢厂的钢渣成分见表1。从表1可以看出, 钢渣的主要成分为CaO, 不同钢厂的CaO含量有所不同, 大约占钢渣组成的40%~50%。若仅依据CaO与CO₂的反应生成CaCO₃计算, 理论上每吨钢渣约固定300~400kg CO₂。数据显示, 2020年我国新增钢渣约1亿吨, 理论固碳约3000~4000万吨。

表1 国内部分炼钢厂钢渣的化学组成^[5](%)

Tab.1 Chemical composition of steel slag from some domestic steelmaking plants^[5] (%)

钢厂	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O
太钢	38~49	8~15	6~20	4~8	1~6	0.6~2	0.2~2
宝钢	45~49	6~9	8~20	5~7	2~5	0.9~3	1~3
攀钢	40~42	8~11	8~19	5~9	2~4	1~3	1~2.5
上钢	45~53	8~11	7~19	5~10	2~6	1~3	0.5~3
鞍钢	50~54	7~12	8~18	5~9	1~6	0.5~2	1~2.8

基金项目: 黄河三角洲京博化工研究院有限公司项目“固碳石外加剂的开发与应用研究”(YJY-2022-12)

第一作者: 张恒飞(1994-), 博士, 中级工程师, 研究方向为固体废弃物处理。zhanghengfei6275@163.com

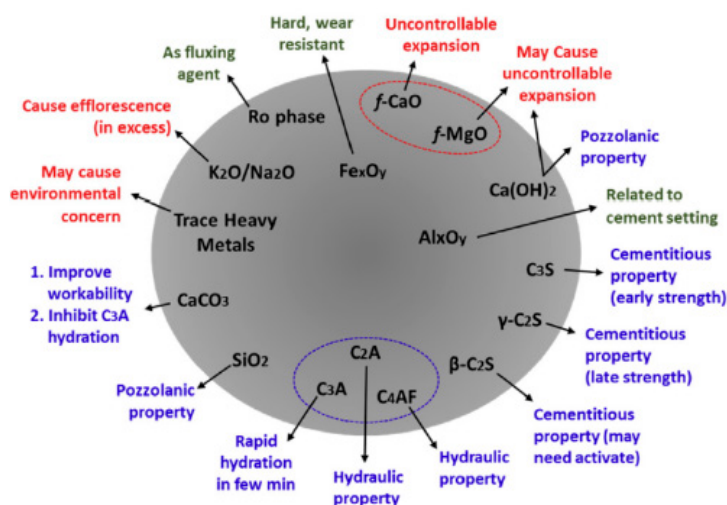

 图1 钢渣的矿物组成及其功能^[10]

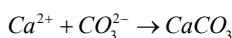
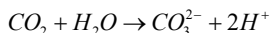
 Fig.1 Mineral composition and functions of steel slag^[10]

1.2 钢渣的矿物组成

钢渣的矿物组成主要包括硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、RO相(MgO 和 FeO 等金属氧化物的固溶体)及少量的铁铝酸钙(C_4AF)和游离氧化钙($f-CaO$)等^[6],其中, C_2S 约占15%~25%, C_3S 约占20%~25%,RO相约占40%~45%,其他约占0~5%^[7]。钢渣中矿物组成及其功能如图1所示。其中, C_2S 和 C_3S 具有一定的水化活性,可以与水反应生成具有胶凝作用的水化硅酸钙,为钢渣提供初始强度。 C_2S 根据晶型的不同可以分为 $\beta-C_2S$ 和 $\gamma-C_2S$, $\gamma-C_2S$ 的水化活性极低,但碳化活性很高, $\beta-C_2S$ 和 C_3S 虽然也有碳化活性,但是 $\gamma-C_2S$ 的碳化速率更高,是钢渣碳化的主要成分^[8]。 $f-CaO$ 是钢渣的不安定性成分,水化后体积膨胀98%,含量较多会造成制品的结构破坏^[9]。

2 钢渣碳化反应机理

图2是钢渣碳化过程机理图。



首先, CO_2 扩散到固体表面的液膜,在水的作用下,形成 CO_3^{2-} 离子,同时 Ca^{2+} 溶出,并扩散到固体表面。然后, CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 发生碳酸化反应,生成 $CaCO_3$ 沉淀。随着 CO_2 的扩散和 Ca^{2+} 溶出,碳酸化在固体内部和表面均有发生。当固体表面形成致密层 $CaCO_3$ 时,会阻止 CO_2 由外界扩散进入固体内部与未反应 CaO 等发生反应,从而造成固体内部碳化不彻底。钢渣的主要碳化成分为 $\gamma-C_2S$, $\gamma-C_2S$ 的溶解沉淀模型如图3所示^[12-14]。硅酸钙被水覆盖后发生水解反应,生成 Ca^{2+} 、 OH^- 和 $Si-O$ 基

团,其中 Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 生成 $CaCO_3$, $Si-O$ 基团与未碳化的颗粒表面的 $Si-OH$ 发生脱水缩合反应,生成无定形硅胶,最终形成外层碳酸钙、中间层无定型硅胶结构,内核未反应硅酸钙三层结构。相邻之间的硅酸钙晶体生长形成了联接纽带,为碳酸化后的材料提供了宏观强度。虽然 $\gamma-C_2S$ 与钢渣组分相比简单,但是其碳化过程为钢渣碳化增加了新的理解,即碳化过程除了形成 $CaCO_3$,还形成 SiO_2 ,且该硅胶层位于 $CaCO_3$ 层内部,进一步阻碍了 CO_2 的渗透。研究者在提高钢渣碳化反应程度的机理研究时,不应只考虑 $CaCO_3$ 的阻碍作用,还应加入硅胶层对 CO_2 的阻碍效果,寻找击破该硅胶层的添加剂或工艺,从而提高钢渣的碳化程度。

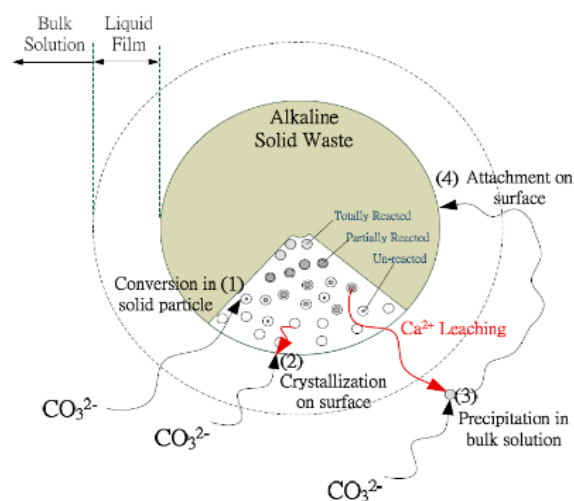
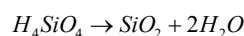
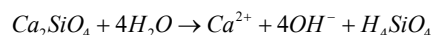

 图2 碳化过程机理图^[11]

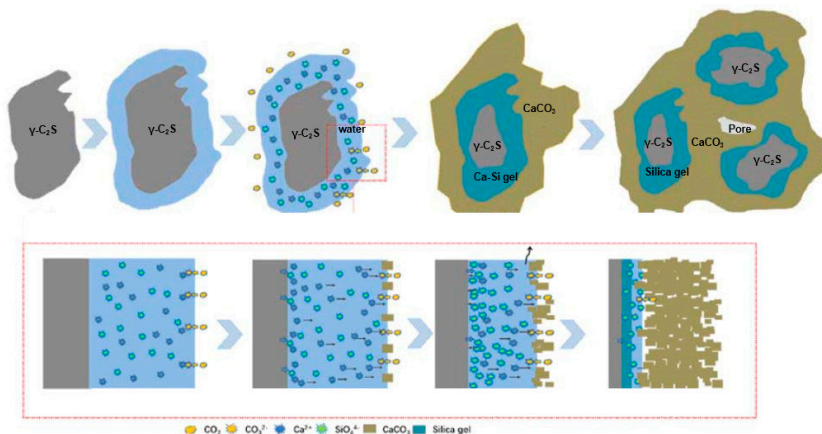
 Fig.2 Process mechanism diagram of carbonation^[11]

 图3 $\gamma-C_2S$ 碳酸化过程溶解沉淀过程概念模型^[12]

 Fig.3 A conceptual model of dissolution-precipitation process of $\gamma-C_2S$ in carbonation^[12]

3 钢渣碳化影响因素

3.1 外加剂

根据钢渣的组成及反应机理,可以得出增加 Ca^{2+} 的浓度或提高 CO_3^{2-} 的浓度均能提高碳化反应程度。基于此,研究者通过掺入外加剂,改变钢渣的组成,提高碳化反应的程度,从而提高碳化制品的固碳量和强度。这种掺入外加剂的方式在很多文献中被称为钢渣的化学激发,外加剂被称为碱激发剂^[15-16],本文中统称为外加剂。常见外加剂有 CaSO_4 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 、 NaOH 、 Na_2CO_3 、水玻璃及微生物等。储健^[17]研究了石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的掺入量(5~20wt.%)对钢渣碳化砖抗压强度的影响,随着石膏含量的增加,碳化砖的抗压强度先增加后降低,石膏掺入量为15wt.%时,碳化砖抗压强度最优为24.9MPa,抗折强度达到4.5MPa。叶家元等^[18]研究了 NaOH 、 Na_2CO_3 和 $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3.2\text{SiO}_2$ 作为外加剂提高钢渣碳化程度及碳化制品的强度,对钢渣碳化效果提升的顺序依次为 $\text{NaOH} > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{Na}_2\text{O} \cdot 3.2\text{SiO}_2$,但是掺入 NaOH 会引起制品的变形和表面泛霜现象,不利于制品制备,而 Na_2CO_3 最宜作为外加剂提高碳化制品的强度,随着 Na_2CO_3 的增加,碳化制品的强度先增加后降低,增加的原因是 Na_2CO_3 对于碳化过程的促进作用,当 Na_2CO_3 的含量增加到一定程度时,其水解造成 HCO_3^- 离子浓度增大,阻碍了 CO_2 的溶解,限制了碳化过程的进行,造成碳化制品强度降低。张丰等^[19]在钢渣中掺入 MgO 和 CaO 外加剂来制备钢渣制品,添加5% CaO 和15% MgO 的碳化钢渣制品的抗压强度达到71.6MPa,是未加外加剂的碳化制品抗压强度的2倍。顾红霞等^[20]研究了一种碱土金属类氢氧化物作为外加剂加入钢渣水泥复配混合中制备碳化制品,相比于未加外加剂的样品,抗压强度提高29%。外加剂的加入影响了碳化产物的形貌,随着外加剂含量的增加,碳化产物由不规则形状向交错的长条状 CaCO_3 转变,当外加剂过量时,又由条状转变为球状 CaCO_3 晶体,其中条状 CaCO_3 的生成对于提高碳化制品的抗压强度最有利。沈卫国等^[21]研究了 Na_2SO_4 外加剂对碳化反应的影响,当 Na_2SO_4 含量为1%~4%时,相比未掺入的样品,碳化强度分别提升45.7%、36.2%、16.95%和19.8%,这是因为 Na_2SO_4 可激发钢渣活性,促进钢渣水化反应,增加水化产物数量,提高钢渣制品的强度。李刚林等^[22]研究了 CaCO_3 对碳化反应程度及碳化砖性能的影响,发现随着 CaCO_3 含量的增加,碳化程度逐渐提高,但抗压强度逐渐降低。碳化程度逐渐提高是因为掺入的 CaCO_3 在钢渣碳化过程诱导形成了碳酸钙晶核,加快了碳酸钙晶体的发育,加快了碳化过程,提高碳化程度。当 CaCO_3 含量为3%时,抗压强度达到最大为99.6MPa,碳化程度为18.5%。有研究发现,在微生物的作用下, CO_2 向 CO_3^{2-} 的转化反应被催化加速。胶质芽孢杆菌可以加速 CO_2 水合生成 HCO_3^- 的特性,理论上可以加速约 10^7 倍,同时能分泌胶凝性物质,在微生物固碳领域得到广泛研究^[23-24]。钱春香等^[25]通过微生物(胶质芽孢杆菌)矿化技术研究不同含量的微生物对于钢渣碳化反应的影响,结果表明,微生物能够加速 CO_2 向 CO_3^{2-} 的转化反应,提高钢渣中氧化物和硅酸盐的碳化反应速率,降低制品的孔隙率,从而达到提高碳化制品强度的

目的,微生物-钢渣碳化制品的抗压强度可达40MPa以上。

3.2 制备过程参数

除上述外加剂在化学组成方面影响钢渣的碳化反应外,不同的钢渣制品的制备过程参数,如水固比、pH值、成型压力、颗粒级配等,也会影响碳化反应程度。钢渣制品碳化后的强度与其内部结构有重要关系。碳化制品具有强度的根本原因是碳化生成的 CaCO_3 等颗粒填充孔隙,使制品的结构趋于致密化,从而实现强度提升。碳化前的成型压力和颗粒级配均会影响碳化制品的孔隙率,进而影响制品的抗压和抗折性能。储健指出,成型压力小于10MPa时,制品的强度随压力的增加成线性增大,当成型压力大于20MPa时,强度增长不大,且易出现开裂^[17]。一般成型压力应控制在15~20MPa。随着成型压力的增加,制品的固碳量逐渐降低,抗压强度先增加后降低。这是因为随着成型压力的增加,制品的孔隙率逐渐降低,比表面积逐渐降低,导致碳化程度降低,固碳量减小。成型压力的增大,导致制品的致密度增加,抗压强度增大,但是当成型压力过大时,碳化反应不完全,会造成制品的强度降低。随着水固比的增加,碳化增重先增大后减小。这是因为随着水分的增加, CO_2 溶于水的含量增加,导致碳化程度增加。当水分增加到一定程度时,由于毛细管力的作用,水分子吸附占据了孔道,阻碍了 CO_2 的渗入,造成制品内部碳化不完全,从而降低砖块的强度^[26]。涂茂霞等^[27]以气-液-固三相为基础进行水淬钢渣碳化试验,研究钢渣粒径对于碳化反应的影响。结果表明,钢渣粒度越细越有利于固碳过程,钢渣粒径 $d_{0.5}=17.1\mu\text{m}$ 时,固碳率达27.9%,钢渣粒径 $d_{0.5}=85.4\mu\text{m}$ 和 $85.4\mu\text{m}$ 时,固碳率仅为5%和2.6%。钢渣粒径越小,比表面积越大,越有利于钢渣中的钙镁等离子浸出,促进碳化反应。吴昊泽等^[28]研究了不同水分含量对于以粗粉(平均粒径 $14.74\mu\text{m}$)、细粉(平均粒径 $112.5\mu\text{m}$)和粗颗粒(平均粒径 3mm)为原料的钢渣制品的吸碳量和抗压强度的影响,三者均表现出随着水分的增加,钢渣制品的吸碳量和抗压强度先增加后降低的趋势。钢渣粒径尺寸不同,钢渣制品达到最佳吸碳量和抗压强度的最佳含水量也有所不同,微粉、粗粉和粗颗粒的最佳含水量分别为9.75%、8.35%和6.2%。相比于粗粉和粗颗粒钢渣制品,采用微粉钢渣在最佳含水量下制备的钢渣制品的吸碳量和抗压强度最高,分别为10.79%和40.81MPa。这是因为,粉体的粒径越小,比表面积越大,从而增加了 CO_2 与钢渣的接触面积,促进了碳化反应,而碳化反应程度的增加消耗了更多的 CO_2 ,从而提高了制品的吸碳量。同时,碳化反应程度的增加形成了更多的反应产物 CaCO_3 ,使得制品的致密度增加,提高了制品的抗压强度。刘梅等^[29]研究加入pH值为1.87~13.12的水溶液对钢渣碳化反应的影响,结果表明,pH值为6.08和12.55时,碳化制品的吸碳量较高,表明弱酸和强碱环境有利于钢渣的碳化反应。

3.3 碳化过程参数

除了上述制备过程参数对于碳化反应的影响,根据化学反应速率及化学平衡的影响因素,碳化温度、碳化湿度、 CO_2 浓度、碳化压力、碳化时间等碳化过程参数也会影响碳化反应程度。碳化时钢渣制品会释放出水分,造成碳

化室内湿度增加,不利于碳化反应的进行,为营造良好的碳化环境湿度,碳化室应保持气体流通,相对湿度保持在50%~70%^[17]。随着碳化时间的增加,固碳量和强度逐渐增大,在1~3h增加最快,3h后基本保持不变。随着CO₂压力的增加,碳化砖的固碳量和抗压强度均是先增加后减小^[26]。CO₂压力达到0.5MPa时,碳化砖的固碳量和抗压强度达到最大。这是因为随着CO₂压力的增大,碳化反应的速度和程度逐渐增大,使得砖块的固碳量和强度增大,但是当CO₂压力增加到一定程度时,碳化反应速率过快,造成制品表面快速形成一层致密的CaCO₃,阻碍了CO₂进入制品内部,造成碳化不均匀,从而导致制品固碳量和强度降低。吴昊泽等^[30]研究了单一CO₂压力和交替CO₂压力对钢渣碳化过程的影响,研究发现,随着单一CO₂压力的增加,钢渣的碳化程度先增加后降低,而在交替CO₂压力下,钢渣的CO₂吸收量和制品抗压强度得到明显提升。郜效姣和蒋伟丽等^[31-32]考察了不同的碳化温度(30℃、60℃、90℃、120℃)对钢渣砖块的固碳量和抗压强度的影响,结果显示,随着碳化温度的增加,钢渣砖的固碳量和抗压强度均增加。张林菊等^[33]通过正交实验研究了不同制备工艺参数和碳化参数对于钢渣制品的碳化程度的影响规律,得出各工艺参数对钢渣碳化的影响程度依次为钢渣粒度>CO₂气体压力>成型压力>碳化时间,且最佳工艺条件为钢渣粒度<0.9mm,成型压力=100kN,CO₂压力=1.5MPa,碳化时间=3h。

4 结语与展望

钢渣成分复杂,钢渣碳化过程包含了水化和碳化。本文从外加剂、钢渣制备过程参数和碳化过程参数三个方面综述了其对于钢渣碳化制品的固碳和性能影响。通过筛选合适的外加剂、优化制备过程参数和碳化参数,可以大幅提高钢渣制品的碳化反应程度。制备过程参数和碳化过程参数的优化只能在一定程度上提高钢渣的碳化反应程度,并不能使钢渣制品的固碳和性能有质的提高。相比之下,外加剂的选择可以在一定程度上成倍地提高钢渣制品的性能。目前,外加剂的选择主要以加速水化过程、增加Ca²⁺浸出率为理论依据,来提高碳化反应程度。碳化反应程度过快会造成制品表面形成致密层,阻碍CO₂气体向内部渗透,造成钢渣制品内部碳化不完全的现象。未来可以从增加制品孔隙率和添加CO₂吸附材料的角度出发,例如添加多孔沸石分子筛、MOFs等多孔无机刚性材料,在获得高孔隙率的同时,依旧保持较高的结构强度。CO₂吸附材料,可以是含胺基、醚氧基、羧基官能团的有机物,从而增加钢渣对CO₂的吸附作用,在外层已致密化的同时,内部含有大量吸附的CO₂分子,为内部未发生碳化反应的钢渣提供CO₂,从而提高碳化反应程度。

参考文献

- [1]王爱国,何懋灿,莫立武,等. 碳化养护钢渣制备建筑材料的研究进展[J]. 材料导报,2019,33(17):2939-2948.
- [2]张亚曼. C40大掺量钢渣集料水泥混凝土的性能研究[D]. 济南:山东交通学院,2016.
- [3]张慧宁,徐安军,崔健,等. 钢渣循环利用研究现状及

发展趋势[J]. 炼钢,2012,28(03):74-77.

[4]张书繁,程星星,王鲁元,等. 碳中和背景下的钢渣碳酸化固碳路径研究[J]. 华电技术,2021,43(06):86-91.

[5]段思宇. 钢渣-粉煤灰-脱硫石膏复合胶凝体系的反应机制及应用研究[D]. 太原:山西大学,2020.

[6]杨建伟. 钢渣和含钢渣的复合矿物掺合料对混凝土性能的影响[D]. 北京:清华大学,2013.

[7]翁一男. 钢渣水泥胶凝材料水化膨胀数学模型及强度研究[D]. 北京:北京化工大学,2020.

[8]刘芷怡. 胶凝材料氢氧化钙石碳化性能的影响因素及其机理研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.

[9]谢智超,汪保印,蒋正武. 工程中钢渣骨料混凝土体积安定性及其抑制效果评价研究[J]. 建筑材料学报,2022(10):1077-1085.

[10]PAN S Y, ADHIKARI R, CHEN Y H, et al. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation[J]. Journal of cleaner production, 2016,137:617-631.

[11]PAN S Y, CHANG E. E, CHIANG P C. CO₂ capture by accelerated carbonation of alkaline wastes: a review on its principles and applications[J]. Aerosol and air quality research, 2012,12(5):770-791.

[12]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.

[13]ZHAO S X, LIU Z C, MU Y D, et al. Effect of chitosan on the carbonation behavior of γ -C2S[J]. Cement and concrete composites, 2020,111:103637.

[14]ZHAO S X, LIU Z C, WANG F Z, et al. Effect of extended carbonation curing on the properties of γ -C2S compacts and its implications on the multi-step reaction mechanism[J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2021,9(19):6673-6684.

[15]张长森,李杨,胡志超,等. 钠盐激发钢渣水泥的早期水化特性及动力学[J]. 建筑材料学报,2021,24(04):710-715.

[16]曾路,余意恒,任毅,等. 碱激发钢渣-矿渣加气混凝土的制备研究[J]. 建筑材料学报,2019,22(02):206-213.

[17]储健. 转炉钢渣碳化砖的试验研究初探[J]. 粉煤灰,1998(2):26-37.

[18]叶家元,张文生,史迪,等. 钢渣碳化砖的碱激发-碳化协同效应影响因素[J]. 硅酸盐学报,2019,47(11):1582-1592.

[19]张丰,莫立武,邓敏,等. 碳化对钢渣-水泥-CaO-MgO砂浆强度和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报,2017,20(06):854-861.

[20]顾红霞,吴其胜,吴阳,等. 碳化水泥-钢渣复合胶凝材料的强度和微观结构[J]. 材料科学与工程学报,2019,37(01):35-39.

[21]沈卫国,刘焱,閻海峰,等. 激发剂对钢渣碳化率的影响研究[J]. 新世纪水泥导报,2020,26(01):69-74.

[22]李刚林. 碳化钢渣制备墙地建材制品[D]. 济南: 济南大学, 2015.

[23]FAVRE N, CHRIST M L, PIERRE A C. Biocatalytic capture of CO₂ with carbonic anhydrase and its transformation to solid carbonate[J]. Journal of molecular catalysis B: enzymatic, 2009,60(3):163-170.

[24]LI W, YU L, XU H. Prokaryotic carbonic anhydrase[J]. Chemistry of life, 2002,22(6):526-529.

[25]钱春香, 张霄, 伊海赫. 微生物提升钢渣胶凝材料安定性和强度的作用及机理[J]. 硅酸盐通报, 2020,39(08):2363-2371.

[26]胡玉芬. 钢渣免烧砖碳化影响因素研究[J]. 山东科学, 2015,28(01):97-101.

[27]涂茂霞, 雷泽, 吕晓芳, 等. 水淬钢渣碳酸化固定

CO₂[J]. 环境工程学报, 2015,9(09):4514-4518.

[28]吴昊泽, 张林菊, 叶正茂, 等. 水分对钢渣碳化的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2009,23(03):221-224.

[29]刘梅. 钢渣及其矿物碳酸化机理的研究[D]. 济南: 济南大学, 2010.

[30]吴昊泽, 徐东宇, 梁晓杰. CO₂压力对钢渣碳化的影响研究[J]. 水泥工程, 2020(4):26-28.

[31]郜效娇, 卢豹, 蒋伟丽, 等. 压蒸条件下钢渣的碳化过程[J]. 材料导报, 2016,30(04):106-110.

[32]蒋伟丽, 卢豹, 张峰, 等. 矿渣碳化硬化过程的研究[J]. 硅酸盐通报, 2017,36(02):539-544.

[33]张林菊, 吴昊泽, 叶正茂, 等. 正交实验钢渣碳化工艺条件[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2009,23(02):127-130.

(上接第117页)

度和压缩强度均呈先增大后减小的趋势; 在掺量为3%时, 人造石弯曲强度和压缩强度达到最大。偏高岭土和硅灰对人造石的压缩强度影响较弯曲强度显著, 其中偏高岭土对人造石早期压缩强度影响最显著。

3) 由于偏高岭土中含有大量的Al₂O₃, 因此其在早期的火山灰效应比硅灰明显, 改善了人造石7d弯曲强度和压缩强度, 在对早期强度要求较高的工程中具有一定的优势。

参考文献

[1]雷翅, 徐海军, 祝雯. 人造石材的研究与发展现状[J]. 广州建筑, 2014,42(01):37-40.

[2]赵宝军, 吴琛, 曾正祥, 等. 新型无机人造石的制备及常见问题解决措施[J]. 新型建筑材料, 2021,48(09):146-148+155.

[3]张国明, 李桦, 郑致远. 改性无机人造石材的力学性能研究[J]. 佛山陶瓷, 2021,31(06):16-20.

[4]孙洁平. 我国人造石绿色建材评价现状与建议[J]. 石材, 2022(02):8-11.

[5]史伟超, 戚栋, 赵轶, 等. 偏高岭土对模拟商混站强碱性废泥基人造石强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022,41(06):2024-2030+2038.

[6]李康伟. 利用石材加工废料制备人造石研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[7]王建昭, 刘广录, 卢金山, 等. 大理石废料制备人造石的研究[J]. 科技风, 2017(09):155-157.

[8]DUAN D D, LIAO H Q, SONG H P, et al. Hydration mechanism of solid waste-based artificial stone prepared by hot pressing[J]. Construction and building materials, 2022,27(6):129317.

[9]GB/T 35160. 2-2017, 合成石材试验方法 第2部分: 弯曲强度的测定[S].

[10]GB/T 35160. 3-2017, 合成石材试验方法 第3部分: 压缩强度的测定[S].