

钢渣碳化及其在建筑材料低碳制造中的应用

李宇轩

浙江省建材集团有限公司 浙江 湖州 313000

摘要: 钢渣碳化技术通过特定反应优化钢渣性能,其原理涉及复杂化学组成与碳化机制。关键因素包括矿物组成、粒径分布及环境参数等,协同改性技术可进一步提升效果。在低碳建材中,碳化钢渣可替代混凝土骨料、掺入胶凝材料,还可用于蒸压加气混凝土,实现体积安定性改善与力学强度提升。此外,碳化钢渣沥青混合料构建了低碳闭环体系,提升路面服役性能,延长服役寿命,超薄磨耗层技术还能减少材料用量,降低碳排放,推动交通建设绿色转型。

关键词: 钢渣碳化; 低碳建筑材料; 应用路径

引言: 钢渣作为钢铁工业产生的大宗固废,其资源化利用对推动绿色低碳发展意义重大。钢渣碳化技术凭借二氧化碳与钢渣中碱性氧化物及氢氧化物的化学反应,能有效改善钢渣体积安定性、提升密实度与力学性能。该技术不仅在混凝土、蒸压加气混凝土等低碳建筑材料领域展现出多元应用潜力,还在沥青混合料中构建起碳捕集与利用的闭环体系,为建筑和交通行业低碳转型提供了新路径。

1 钢渣碳化的技术原理与基础特性

1.1 钢渣的化学组成与矿物结构

钢渣的化学组成与矿物结构较为复杂,主要包含硅酸二钙、硅酸三钙、游离氧化钙、游离氧化镁以及镁铁硅酸盐固溶体。其中,硅酸二钙和硅酸三钙属于潜在活性矿物,具备在特定条件下发生反应并展现胶凝性能的潜力;游离氧化钙和游离氧化镁是影响钢渣体积安定性的关键成分,其存在易导致钢渣在后续使用过程中出现体积膨胀,引发结构损坏;而镁铁硅酸盐固溶体的反应活性较低,在常规的钢渣碳化过程中通常不会参与化学反应,对碳化效果的影响较小,其主要以惰性组分的形式存在于钢渣体系中。

1.2 碳化反应的化学机制

钢渣碳化的核心是二氧化碳与钢渣中的碱性氧化物及氢氧化物发生的系列化学反应,最终生成稳定的碳酸盐和具有胶凝活性的硅酸凝胶。这一反应过程可分为直接碳化和间接碳化两条主要路径。直接碳化过程中,二氧化碳先溶解于水中形成碳酸,碳酸进一步与钢渣矿物表面的相关离子发生反应,逐步生成碳酸盐产物;间接碳化则通过特定的酸或碱溶液对钢渣中的钙镁离子进行萃取,使钙镁离子充分溶解于溶液中,随后再向溶液中通入二氧化碳,让二氧化碳与溶液中的钙镁离子发生反应并生成碳酸盐沉淀,完成碳化过程。

1.3 碳化对钢渣性能的优化作用

碳化处理能显著优化钢渣的多项性能,核心作用体现在改善体积安定性、提升密实度和增强力学性能三个方面。通过碳化反应,钢渣中的游离氧化钙和游离氧化镁会被有效消耗,大幅降低其含量,从而从根源上减少钢渣因这两种成分存在而产生的体积膨胀风险,提升体积稳定性。碳化反应生成的碳酸盐产物会填充于钢渣内部的孔隙中,缩小孔隙体积,提升钢渣的密实度^[1]。反应过程中伴随生成的硅酸凝胶具有良好的胶凝活性,能够增强钢渣的胶凝性能,进而改善其力学性能。相关研究数据显示,经过碳化处理后的钢渣,其抗压强度可实现大幅提升,体积收缩率也能降低一半以上,综合性能得到显著提升。

2 钢渣碳化的关键影响因素与工艺优化

2.1 内在因素: 矿物组成与粒径分布

钢渣碳化反应的效率与最终程度深受其内在特性的制约,其中矿物组成与粒径分布是起决定性作用的核心内在因素。在矿物活性差异方面,钢渣中不同矿物的碳化反应能力存在显著分异,硅酸二钙的不同晶型之间活性差异尤为明显,活性较高的晶型能够更快地与二氧化碳发生反应,碳化反应速率远高于活性较低的晶型;氢氧化钙的固碳效率在钢渣所含各类矿物中处于最高水平,可快速与二氧化碳发生反应完成固碳转化;而镁铁硅酸盐固溶体的碳化活性极低,在常规的碳化环境与反应条件下几乎不参与碳化反应,仅以惰性组分的形式稳定存在于钢渣体系中,对碳化过程几乎无积极贡献。在粒径效应方面,钢渣颗粒的粒径大小直接决定了碳化反应的速率与充分程度,粒径越小,单位质量钢渣的比表面积就越大,与二氧化碳气体的接触面积也就越广阔,反应活性位点随之大幅增多,碳化反应速率因此显著加快。较小粒径的钢渣能够在较短时间内达到较高的固碳率,

而较大粒径的钢渣由于表面接触面积有限,二氧化碳气体难以有效渗透到颗粒内部与矿物发生反应,导致固碳率大幅降低,不同粒径钢渣的固碳效果存在悬殊差距。

2.2 外部条件:环境参数与工艺控制

外部环境参数与工艺控制条件对钢渣碳化效果具有决定性的调控作用,其影响主要集中在二氧化碳浓度与压力、湿度与液固比、温度与时间三个核心维度。在二氧化碳浓度与压力方面,当浓度提升至一定水平后,碳化效率会出现显著提高,但若浓度过高,反应生成的碳酸盐产物层会快速在钢渣颗粒表面形成并覆盖,堵塞二氧化碳与内部矿物接触的通道,反而导致反应速率下降;采用压力养护的方式能够有效加速二氧化碳在钢渣体系中的扩散速度,减少反应过程中的传质阻力,从而大幅缩短养护时间,提升整体碳化效率。在湿度与液固比方面,当液固比处于适宜区间时,二氧化碳的溶解量与钙离子的浸出效率可达到最佳平衡状态,能为碳化反应持续提供充足的反应物;若液固比过低,钢渣表面易快速形成致密的低钙硅酸盐层,这一表层会阻碍二氧化碳向颗粒内部渗透,显著抑制碳化反应的持续进行^[2]。在温度与时间方面,温度升高有助于促进碳酸盐多晶相的形成,提升产物的结构稳定性,在适宜温度下,较短时间内即可实现较高的固碳量;延长碳化时间能够逐步提升反应的完成程度,但过长的反应时间会导致能耗增加、生产效率降低,实际应用中需在反应完成程度与成本控制之间寻求最佳平衡。

2.3 协同改性技术

为进一步提升钢渣碳化效果与综合应用性能,各类协同改性技术被广泛应用于钢渣碳化过程,其中碱激发与碳化协同、预碳化处理是技术成熟度较高且应用广泛的两种方式。碱激发与碳化协同技术通过添加碱性激发剂激活钢渣的潜在胶凝活性,促使钢渣内部生成具有胶凝活性的硅酸钙凝胶,该凝胶可作为碳化反应的核心活性源,为后续碳化反应持续提供充足的钙源,同时能够引导碳酸钙在钢渣内部均匀沉积,有效填充内部孔隙,提升钢渣基材料的结构密实度,进而显著增强其力学性能,使相关制品的强度得到大幅提升。预碳化处理技术则针对钢渣骨料进行提前碳化改性处理,通过这一过程预先消耗钢渣中易导致体积膨胀的游离氧化钙,从根源上消除钢渣在后续使用过程中的体积不稳定隐患。经过预碳化处理的钢渣骨料在取代部分水泥应用时,不仅能够有效缩短制品的凝结时间,还能显著提高制品的早期强度与抗硫酸盐侵蚀能力,大幅拓展钢渣在建筑材料领域的应用范围,提升钢渣资源化利用的价值。

3 钢渣碳化在低碳建筑材料中的应用路径

3.1 碳化钢渣混凝土

碳化钢渣凭借其经过改性优化的性能,在混凝土领域构建了多元化的应用路径,核心聚焦于骨料替代和胶凝材料掺合两大方向,既实现了工业固废的资源化循环利用,又精准契合建筑行业低碳减排的发展需求。在骨料替代应用中,经过系统碳化处理的钢渣骨料,其内部游离氧化钙等有害成分已通过反应转化为稳定产物,体积安定性大幅提升,同时形成了致密的碳酸盐保护层,赋予骨料优异的物理力学性能。将其用于替代天然骨料制备混凝土时,不仅能有效降低混凝土的整体堆积密度,减轻建筑结构自重,还能显著减小材料的热导率,提升混凝土构件的保温隔热性能,助力建筑节能目标的实现。更为关键的是,碳化钢渣骨料的力学强度优势明显,能够大幅提升混凝土的抗压强度,相关研究数据显示,经过特定时长的碳化养护后,混凝土可快速形成较高的早期强度,满足快速施工的需求,后续经过标准水化养护过程,强度还能进一步稳步增长,完全可适配不同工程场景的强度等级要求^[3]。在胶凝材料掺合方向,碳化钢渣经超细粉磨加工制成的微粉,具备良好的火山灰活性和填充效应,可作为矿物掺合料掺入水泥基材料体系。这一应用方式能有效降低水泥的用量占比,而水泥生产过程伴随大量二氧化碳排放,因此可显著减少混凝土生产全环节的碳排放量。与此同时,碳化处理使钢渣的水化活性得到充分激活,相较于未碳化钢渣,其与水泥水化产物的协同作用更强,且体积安定性更优,从根源上规避了未碳化钢渣因游离氧化钙、游离氧化镁等成分存在而引发的混凝土体积膨胀、开裂等质量隐患,适用于低强度等级混凝土的规模化制备,在保障工程结构安全与使用寿命的前提下,最大化实现低碳减排与资源循环的双重目标。

3.2 碳化钢渣蒸压加气混凝土

碳化钢渣蒸压加气混凝土通过养护工艺的创新性整合与材料性能的系统性优化,成为兼具绿色环保属性与优异使用功能的低碳建筑材料,在围护结构材料领域具有广阔的应用前景。在工艺整合层面,该材料突破了传统单一养护方式的局限,将蒸压养护与碳化养护进行协同融合。蒸压养护依托高温高压的水蒸气环境,为材料内部水化反应提供充足的能量与反应条件,促进水化产物的快速生成与交织生长,提升材料的结构致密性;碳化养护则通过通入二氧化碳气体,使气体与材料内部未完全反应的活性钙、镁成分发生碳化反应,生成稳定的碳酸盐产物,进一步优化材料的体积安定性。两种养护

工艺相互补充、协同增效,可同步实现材料体积安定性的显著改善与力学强度的稳步提升,确保材料在后续长期使用过程中不会出现明显的体积变形或强度衰减,具备可靠的结构稳定性与承载能力。在性能优化层面,碳化蒸压加气混凝土继承了传统蒸压加气混凝土轻质多孔的核心特性,其内部均匀分布的气孔结构不仅大幅降低了材料的干密度,还赋予其优良的保温隔热性能和隔音降噪性能,能够有效降低建筑能耗,改善室内居住舒适度,完全满足建筑围护结构对节能性能与声学性能的严苛要求^[4]。经过碳化处理后,钢渣中的重金属离子被稳定固化在碳酸盐晶体结构中,大幅降低了重金属离子的溶出风险,使材料的重金属溶出率显著低于传统建筑材料,有效规避了工业固废再利用可能带来的环境隐患。基于这些优势,该材料广泛适用于非承重墙体、内隔墙等建筑部位,既提升了建筑的整体节能效果,又践行了绿色建筑的发展理念,推动建筑材料行业向低碳环保方向转型。

3.3 碳化钢渣沥青混合料

碳化钢渣在沥青混合料中的应用,构建了“碳捕集-资源利用-永久封存的全链条低碳闭环体系,同时大幅提升了路面材料的服役性能,为交通基础设施建设的绿色转型提供了有效解决方案。在碳捕集与利用环节,钢渣在碳化安定化处理过程中,其内部的活性氧化钙、氧化镁等成分会与二氧化碳发生定向化学反应,主动吸附并固定大量二氧化碳,吸附量可达自身重量的一定比例,实现了工业排放二氧化碳的资源化捕集与封存。经过碳化处理的钢渣骨料,不仅体积安定性得到保障,其内部还留存了稳定的碳酸盐产物,将其进一步加工制备成沥青混合料骨料,可实现二氧化碳的永久封存,形成“捕集-利用-封存的完整产业闭环,从源头大幅降低交通基础设施建设领域的碳排放总量,助力“双碳目标的实现^[5]。在性能表现上,碳化钢渣骨料具备坚硬的物理特性和优良的表

面纹理,其耐磨性和抗滑性能显著优于传统的玄武岩骨料。将其应用于沥青混合料制备时,可大幅提升沥青路面的抗磨损能力和抗滑性能,有效抵御车辆行驶过程中的磨耗与剪切作用,延长路面的服役寿命,尤其适用于对耐磨、抗滑要求较高的高速公路、城市主干道等路面磨耗层。在级配设计优化层面,技术人员针对碳化钢渣独特的粒径分布特点和颗粒形态,通过系统的试验研究优化混合料的骨架密实结构级配,开发出超薄磨耗层技术。该技术能够在保证路面承载能力、抗滑性能等核心使用性能的前提下,大幅减少路面材料的用量,降低材料生产、运输及施工环节的能源消耗与碳排放量,推动交通建设领域向绿色低碳、节能高效的方向发展。

结束语:钢渣碳化技术凭借其独特原理,在改善钢渣性能上成效显著。关键影响因素的把控与协同改性技术的运用,进一步提升了其应用效果。在低碳建筑材料领域,碳化钢渣在混凝土、蒸压加气混凝土、沥青混合料等方面构建起多元应用路径,不仅实现了工业固废的资源化利用,更在低碳减排、提升材料性能等方面表现突出。未来,随着技术持续创新,钢渣碳化有望在更多领域发光发热,为绿色低碳发展注入强劲动力。

参考文献:

- [1]张恒飞,刘茂举,王东哲,等.钢渣碳化技术影响因素的研究进展[J].中国建材科技,2023,32(1):74-78.
- [2]莫立武,刘朋,徐茂淳.钢渣碳化及其在建筑材料低碳制造中的应用[J].建筑材料学报,2024,27(12):1122-1128.
- [3]杨旭.碳化钢渣在水泥基建筑材料中的研究进展[J].中国科技信息2024.(10):11-16.
- [4]张宾,谭新宇,周凤娇,等.碳化制度对加气混凝土性能及固碳量影响的研究[J].水泥,2024(12):5-9.
- [5]马俊杰,毛瑞,朱祚峤,等.基于碳化钢渣的沥青混合料性能优化与低碳技术[J].中国冶金,2025,35(7):271-279.