

工业固废制备绿色混凝土的技术研究及工程应用

丁如平

合肥东凯新型建材有限公司, 安徽 合肥 230000

[摘要] 工业固废的积累以及传统混凝土生产所带来的环境问题, 日益严峻。通过利用矿渣、粉煤灰、钢渣等工业固废生产绿色混凝土, 不仅有效解决了固废处理的难题, 还能增强混凝土的性能, 从而推动建筑行业向绿色、低碳方向发展。为实现可持续建筑目标, 这项技术的研究与实践提供了切实可行的解决方案。

[关键词] 工业固废; 绿色混凝土; 工程应用

DOI: 10.33142/ucp.v2i2.16274

中图分类号: TU528.22

文献标识码: A

Research and Engineering Application of Industrial Solid Waste Preparation for Green Concrete Technology

DING Ruping

Hefei Dongkai New Building Materials Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract: The accumulation of industrial solid waste and the environmental problems caused by traditional concrete production are becoming increasingly severe. By utilizing industrial solid waste such as slag, fly ash, and steel slag to produce green concrete, not only does it effectively solve the problem of solid waste treatment, but it also enhances the performance of concrete, thereby promoting the development of the construction industry towards a green and low-carbon direction. To achieve sustainable building goals, the research and practice of this technology provide practical and feasible solutions.

Keywords: industrial solid waste; green concrete; engineering application

引言

随着环保意识的提升和对可持续发展日益重视, 绿色混凝土作为一种环保建筑材料, 逐渐成为关注的焦点。通过将工业固废替代传统原料, 绿色混凝土不仅减少了资源的消耗, 也有效地降低了环境污染, 推动了建筑行业朝着低碳、可持续发展的方向发展。

1 工业固废的类型与特性

工业固废指的是在工业生产过程中产生的废弃物, 这些废料通常缺乏再利用价值, 且难以进行有效处理或回收。根据其来源和组成, 工业固废可被划分为多种类型, 常见的包括矿渣、粉煤灰、钢渣、煤矸石以及建筑废弃物等。这些废料不仅占用了大量土地资源, 还可能对环境造成不同程度的污染。因此, 如何高效地将这些固废转化为可用资源, 已成为环保及可持续发展领域的重要课题。粉煤灰作为煤燃烧过程中的副产品, 主要由二氧化硅和铝土矿组成, 其细粉状特性使其在混凝土中作为水泥替代品时, 能够显著提升混凝土的耐久性, 并有效减少二氧化碳排放。矿渣和钢渣来自钢铁冶金行业, 前者富含硅酸盐, 后者则含有丰富的金属氧化物。通过将 these 材料引入混凝土, 不仅能够增强其抗压强度, 还能提升耐火性及抗化学侵蚀能力。煤矸石是煤矿开采过程中产生的废弃物, 含有一定比例的矿物质及有害成分。通过采用高温烧结等技术, 煤矸石可转化为有价值的资源, 用于生产再生骨料或作为轻质

混凝土的原料。建筑废弃物, 特别是混凝土废料与砖块, 是城市建设中的常见副产品。随着回收技术的不断进步, 建筑废弃物的再生利用正在成为减少资源浪费、实现资源最大化的有效途径。这些工业固废材料表现出较强的环境适应性, 可通过物理、化学或机械手段转化为新的建筑材料。随着技术的不断发展, 工业固废的有效资源化不仅缓解了资源紧张的压力, 还在减少环境污染方面发挥着积极作用, 为绿色建筑与可持续发展的实现提供了新的解决方案。

2 绿色混凝土的基本原理

绿色混凝土是一种注重环保与可持续发展的建筑材料, 核心目标在于通过优化原料配方及技术手段, 减少对自然资源的依赖, 降低环境污染, 同时提升混凝土的性能与耐久性。其基本原理涵盖了多个方面, 包括材料的选择、生产过程、使用性能及生命周期管理等。在材料选择上, 绿色混凝土优先采用工业固废与副产品, 替代传统的水泥原料, 如粉煤灰、矿渣、钢渣等。这些材料的使用不仅显著减少了天然资源的消耗, 还有效降低了生产过程中的碳排放。例如, 粉煤灰与矿渣作为水泥替代品, 不仅提升了混凝土的抗压强度与耐久性, 还减少了水泥的使用, 从而进一步降低了二氧化碳的排放量。在生产过程中, 绿色混凝土提倡低能耗、高效率的生产模式。传统混凝土生产中, 水泥的高温煅烧是碳排放的主要来源, 而通过充分利用工业废料, 水泥的依赖得以减少, 从而有效降低了生产过程

中的能耗。此外，绿色混凝土的生产工艺还强调采用节能环保设备，进一步减少了能源浪费。绿色混凝土在使用阶段展现出了优异的耐久性与抗环境侵蚀性能。通过掺入具有活性与稳定性的矿渣、粉煤灰等材料，绿色混凝土在长期使用过程中能够保持较高的强度与稳定性，尤其在抗化学侵蚀与抗冻融性能方面表现突出。这不仅延长了绿色混凝土的使用寿命，还有效减少了维护与更换的频率，从而减轻了环境负担。绿色混凝土的生命周期管理贯穿其整个生命周期，从生产、使用到废弃后的回收再利用，始终注重资源的循环利用与减少浪费。通过合理设计配方与优化施工工艺，绿色混凝土能够在满足工程需求的同时，最大程度地降低对环境的影响。

3 工业固废在绿色混凝土中的应用技术

3.1 粉煤灰在绿色混凝土中的应用技术

粉煤灰是燃煤电厂在燃烧过程中产生的细粉状废弃物，作为一种工业固废，具有显著的资源化潜力。其在绿色混凝土中的应用，不仅能够减少水泥的用量、降低二氧化碳的排放，还能改善混凝土的部分性能，提升其整体质量。粉煤灰的应用技术主要体现在其作为水泥替代材料的作用及对混凝土性能的优化效果上。作为水泥的替代材料，粉煤灰在降低混凝土生产成本及环境负担方面发挥了重要作用。粉煤灰中的二氧化硅与铝土矿成分具有一定的活性，能够与水泥中的氢氧化钙反应，生成具有胶结性的水化产物，从而增强混凝土的强度与耐久性。一般情况下，粉煤灰的掺量可根据具体项目需求进行调整，通常控制在10%至30%之间。在这一掺量范围内，粉煤灰不仅有效减少了水泥的使用，还能确保混凝土的强度与良好的工作性。粉煤灰的应用还显著提升了混凝土的抗渗透性与抗化学侵蚀能力。由于粉煤灰颗粒细小且表面光滑，它能够填充混凝土内部的孔隙，降低其孔隙率，从而提高混凝土的密实性。与此同时，粉煤灰中的某些成分与水泥中的水分发生化学反应，形成稳定的水化产物，这进一步增强了混凝土的耐久性，使其在抵抗酸、碱等化学介质的侵蚀时表现得更为出色。尽管如此，粉煤灰的应用也面临一定的挑战。其活性受来源及存放时间的影响较大，不同来源的粉煤灰在水化反应中的活性差异，可能会影响混凝土的性能稳定性。为了确保粉煤灰的效果，质量控制显得尤为重要，特别是在粉煤灰的细度、化学成分及颗粒分布等方面。通过优化混凝土的配合比并进行适当的实验验证，粉煤灰的潜力能够得到最大化的发挥，从而充分展现其在绿色混凝土中的优势。

3.2 矿渣和钢渣的应用技术

矿渣与钢渣是冶金行业中常见的工业固废，其在绿色混凝土中的应用为资源化利用提供了有效途径，既能显著减少环境污染，又能显著提升混凝土的性能。矿渣和钢渣的应用技术主要体现在它们的化学特性、活性及对混凝土

性能的优化作用上。高炉矿渣富含硅酸盐和铝土矿成分，具有较高的活性。作为水泥的替代材料，矿渣的应用不仅减少了水泥的使用量，降低了生产过程中的碳排放，同时还能提升混凝土的长期强度和耐久性^[1]。掺入矿渣后，其细小颗粒能够有效填充混凝土中的微孔，降低孔隙率，从而提高密实性与抗渗透性。而矿渣水化反应所产生的水化产物具备胶结性，进一步增强了混凝土的强度与抗化学腐蚀能力。矿渣的掺量通常设定在10%至50%之间，具体比例的选择根据工程需求进行，以平衡强度与耐久性的关系。钢渣，作为钢铁冶炼过程中的副产品，含有较高的金属氧化物及丰富的钙、硅、铝成分，具备一定的活性。在混凝土中使用钢渣不仅有助于减少水泥用量、降低二氧化碳排放，还能显著增强混凝土的抗压强度、抗冻融性及耐化学腐蚀性。作为粗骨料或细骨料，钢渣能改善混凝土的抗拉强度与弹性模量。此外，钢渣颗粒表面粗糙，能够提高水泥与骨料的结合力，从而进一步增强混凝土的整体性能。钢渣的掺量通常控制在10%至30%之间，但过高的掺量可能会影响混凝土的工作性与强度，因此需要根据实际需求进行优化配比。在矿渣与钢渣的应用过程中，必须充分考虑其活性与物理特性。例如，矿渣的活性受冷却方式的影响，快速冷却的矿渣通常具有较高的活性，而慢冷却的矿渣则活性较低。因此，矿渣的质量控制显得尤为重要，尤其是在矿渣的来源与存储条件方面。钢渣中可能含有游离氧化钙，这种物质有可能导致混凝土的膨胀。因此，在使用钢渣时，进行适当的预处理显得至关重要，例如进行水化处理或细磨处理，以避免其潜在的负面影响。

3.3 煤矸石与尾矿的应用技术

煤矸石与尾矿是煤炭开采和矿业作业过程中产生的固体废弃物。合理利用这些材料不仅有助于减少环境污染，同时也为绿色混凝土的生产提供了宝贵的资源。这些工业副产品在混凝土中的应用，主要体现在它们作为骨料和掺合料对混凝土性能的提升，尤其是在强度、耐久性及环保性方面的贡献。煤矸石主要来源于煤矿开采过程，含有大量的二氧化硅、铝土矿及少量的碳，通常呈粉状或块状。作为细骨料使用时，煤矸石的细颗粒能够有效改善混凝土的流动性与工作性。其矿物成分能够与水泥中的氢氧化钙发生反应，生成稳定的水化产物，从而增强混凝土的抗压强度与耐久性。此外，煤矸石的抗渗透性较好，有助于提高混凝土的密实度，减少水分渗透并增强抗冻融性能^[2]。尽管如此，煤矸石中某些有害成分（如重金属）可能会对环境造成潜在影响，因此，必须对其进行适当处理或控制使用量，以确保其在绿色混凝土中的安全性。尾矿是矿山开采过程中产生的废弃物，含有大量矿物颗粒及微量金属元素。尾矿在混凝土中的应用，主要通过将尾矿粉或尾矿砂掺入混凝土中，替代部分传统骨料或水泥。尾矿具有较高的细度和良好的填充特性，能够有效改善混凝土的密实

度,进一步提升其抗压强度及耐化学腐蚀性。尾矿中的矿物质可以参与水化反应,增强混凝土的凝结性与强度。特别是在特殊环境下,掺入尾矿的混凝土展现出更为优异的抗腐蚀性能。煤矸石与尾矿的应用效果受到材料预处理及掺量设计的影响较大。煤矸石在使用前通常需要进行粉磨处理,并去除有害物质,以提高其反应活性与环境友好性。而尾矿则需要对其矿物组成与颗粒特性进行详细分析,以确定最佳的掺入比例。一般来说,煤矸石与尾矿的掺量通常控制在10%至30%之间,过量使用可能会影响混凝土的工作性与力学性能。因此,实际应用中需根据项目的具体要求及实验数据对掺量进行调整与优化。

3.4 建筑垃圾再生骨料的应用技术

建筑垃圾再生骨料是由废旧建筑材料经过破碎与处理得到的,并能够用于新混凝土的生产。随着城市化进程的不断推进,建筑垃圾的数量急剧增加。通过回收再生骨料,不仅有助于减少垃圾填埋的需求,还为绿色混凝土提供了高效且低成本的原料。在再生骨料的应用过程中质量控制至关重要,由于其成分复杂,可能含有有害物质,因此,必须经过严格清洗与筛选,确保其符合工程要求。再生骨料的粒径、密度及颗粒形状等物理特性,直接影响混凝土的性能。通常,采用细磨与表面改性处理,能够提升其与水泥石的结合力及水化反应活性,从而优化混凝土的性能。再生骨料的重大优势,正是其循环利用的特性,特别是在替代粗骨料的应用中,能够有效减少天然砂石的消耗,进而降低资源开采对环境的负面影响。适量掺入再生骨料的混凝土,在抗压强度、抗冻融性及抗渗透性等方面均有显著改善,进而增强了混凝土的耐久性。再生骨料的应用也面临着一定的挑战,由于其粒径不规则,可能对混凝土的工作性产生影响,尤其在高强度混凝土的施工过程中,可能会导致施工困难。为克服这一问题,通常需要通过掺合剂进行调节,或者将再生骨料与其他工业副产品结合使用,以提高混凝土的流动性。此外,为避免环境污染与健康危害,必须严格检测再生骨料中的重金属含量,确保其安全性。

3.5 工业固废掺量设计与优化技术

工业固废掺量设计与优化,是绿色混凝土生产中的核心技术。通过合理调整掺量,不仅能够提升混凝土的力学性能和耐久性,还能降低生产成本并减少环境负担。科学地确定不同工业固废的最佳掺量,对确保混凝土性能的稳定性和其可持续性,至关重要。在掺量设计时,必须根据不同工业固废的性质与活性进行个性化调整。例如,粉煤灰的掺量通常在15%至30%之间,这样不仅能提高混凝土

的工作性,还能增强其长期强度;矿渣与钢渣的掺量一般设定在20%至50%之间,具体比例需依据项目需求进行优化^[3]。水化速率、反应活性以及材料与水泥的相容性,都是设计时必须考虑的关键因素。优化技术在掺量设计中的作用,日益显现。如今,人工神经网络、遗传算法等先进方法,已能够在多重因素的影响下实现精准的配比优化。通过这些技术手段,可以精确地计算出各类工业固废的最佳掺量,确保混凝土在强度、耐久性和施工性能等方面达到理想状态。在实际应用中,掺量设计不仅需要考虑到混凝土性能,还必须兼顾经济性与环境影响。对于钢渣和矿渣等固废材料,过高的掺入比例可能导致成本增加或对施工性能产生负面影响。因此,在确保混凝土质量的前提下,合理控制固废材料的使用量,便显得尤为重要,从而实现环保与经济的平衡。与此同时,优化设计时必须考虑不同工业固废的协同效应。比如,粉煤灰与矿渣的搭配,能够有效改善混凝土的工作性和长期强度,而钢渣的加入,则有助于增强其抗腐蚀性及抗冻融性能。合理地组合这些固废材料,可以进一步提升混凝土性能,推动绿色建筑材料的广泛应用,并提高资源的综合利用效率。

4 结语

工业固废在绿色混凝土中的应用,为建筑行业的可持续发展提供了关键的技术支持。通过优化固废的掺量设计,混凝土的性能得到了显著提升,环境污染得以有效减少,同时实现了资源的循环利用。尽管在质量控制和性能调节方面,仍面临一定的挑战,但随着技术的不断进步与相关标准的逐步完善,工业固废的应用前景必将更加广阔。未来,绿色混凝土将在建筑项目中发挥越来越重要的作用,为推动可持续发展目标的实现,做出积极的贡献。

[参考文献]

- [1]杨艳会,郑明,袁胜,等.矿冶固废制备混凝土配合比优化及耐久性研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(5):185-192.
 - [2]弓扶元,曹万林,王栋民,等.工业与建筑固废高效利用混凝土及其工程结构防灾研究[J].自然灾害学报,2024,33(1):1-18.
 - [3]蒙华良,黄禧,陈阳,等.工业固废制备低碳胶凝材料的研究进展[J].水泥工程,2023,11(5):75-78.
- 作者简介:丁如平(1986.9—),毕业院校:安徽建筑大学,所学专业:无机非金属材料科学工程,当前工作单位:合肥东凯新型建材有限公司,职务:试验室主任,职称级别:中级工程师。