

钢渣沥青混凝土在近海环境下的生态评价体系构建

张之骋, 许添耀, 黄楠

台州学院, 浙江 台州 317700

摘 要 : 本文针对近海环境下沥青混凝土路面病害频发、寿命短的问题, 研究了钢渣沥青混凝土的生态化设计及其在近海公路中的应用。先分析了钢渣表面特征及钙基矿物的自转变行为, 揭示了钢渣表面孔隙对沥青的吸收以及活性矿物潜在的体积膨胀问题。随后, 基于钙基矿物的自转变行为, 提出了钢渣表面钙基矿物的定向修饰与性能缺陷调控方法, 有效解决了钢渣集料表面孔隙对沥青的吸收以及活性矿物潜在的体积膨胀问题。制备了改性钢渣沥青混凝土, 并对其在近海环境下的服役性能进行了研究, 结果表明, 改性钢渣沥青混凝土具有良好的耐久性, 适用于近海公路建设。最后, 构建了适用于钢渣沥青混凝土的生态评价体系, 并分析了其在近海环境下的综合生态表现, 结果表明, 改性钢渣沥青混凝土具有良好的生态效益, 是一种具有潜力的生态建筑材料。

关 键 词 : 钢渣沥青混凝土; 近海环境; 生态评价体系; 生命周期评价; 层次分析法

Construction of an Ecological Evaluation System for Steel Slag Asphalt Concrete in Offshore Environments

Zhang Zhicheng, Xu Tianyao, Huang Nan

Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 317700

Abstract : This paper addresses the frequent occurrence of diseases and short lifespan of asphalt concrete pavement in offshore environments by studying the ecological design of steel slag asphalt concrete and its application in offshore highways. Firstly, the surface characteristics of steel slag and the self-transformation behavior of calcium-based minerals were analyzed, revealing the absorption of asphalt by steel slag surface pores and the potential volume expansion of reactive minerals. Subsequently, based on the self-transformation behavior of calcium-based minerals, a method for targeted modification and performance defect regulation of calcium-based minerals on the steel slag surface was proposed, effectively solving the problems of asphalt absorption by steel slag aggregate surface pores and potential volume expansion of reactive minerals. Modified steel slag asphalt concrete was prepared, and its service performance in the offshore environment was studied. The results showed that the modified steel slag asphalt concrete has good durability and is suitable for offshore highway construction. Finally, an ecological evaluation system suitable for steel slag asphalt concrete was constructed, and its comprehensive ecological performance in the offshore environment was analyzed. The results indicated that the modified steel slag asphalt concrete has good ecological benefits and is a potential ecological building material.

Keywords : steel slag asphalt concrete; offshore environment; ecological evaluation system; life cycle assessment; analytic hierarchy process

引言

钢铁工业的快速发展带来了巨大的经济效益, 但也伴随着钢渣排放量的大幅增加。如何有效处理和利用钢渣, 实现资源化再利用, 成为亟待解决的问题。沥青混凝土作为重要的道路建筑材料, 在近海公路建设中发挥着重要作用。然而, 近海环境的特殊性, 如海水侵蚀、盐雾腐蚀等, 会对沥青混凝土的性能产生不利影响, 导致路面病害频发, 影响道路使用寿命和行车安全。

钢渣集料由于其独特的颗粒表面特征和优异的粘结性能, 被认为是一种具有潜力的替代传统集料的材料。然而, 钢渣集料表面孔隙对沥青的吸收以及活性矿物潜在的体积膨胀问题, 限制了其在近海公路中的应用。近年来, 随着可持续发展和生态文明建设的不断推进, 生态建筑材料和生态道路建设逐渐成为研究热点。生态评价体系作为一种综合评估材料或工程项目对环境、资源、社会等方面影响的工具, 在建筑材料领域得到了广泛应用。构建适用于钢渣沥青混凝土的生态评价体系, 量化其在近海环境下的综合生态表现, 为钢渣沥青混凝土在近海公路中的应用提供科学依据, 具有重要的理论和现实意义。

一、钢渣表面特征及钙基矿物的自转变行为

(一) 钢渣表面特征分析

利用扫描电镜、能谱分析等技术手段,对钢渣表面的元素组成进行定量分析,揭示不同元素在钢渣表面的分布规律,并建立叠加区域与矿物相种类的对对应关系。

通过X射线衍射、电子探针等手段,分析钢渣表面的矿物组成,确定硅酸盐矿物、体积活性矿物、孔隙的位置分布,以及彼此可能存在的内在关联性。

利用氮气吸附-脱附等实验方法,分析钢渣表面孔隙的形态、大小和分布,并提出全孔(微孔、介孔、大孔)孔径分布的表征方法。

研究发现,钢渣是一种密度大、吸水率大、压碎值小、黏附性良好的集料;钢渣表面存在较多的粉体颗粒,孔隙分布丰富,大于 $1\mu\text{m}$ 的孔隙占比达到65.24%;钢渣的棱角性高于石灰岩和玄武岩集料,表面纹理指标介于石灰岩和玄武岩之间,球度指标优于石灰岩和玄武岩集料^[1]。

(二) 钙基矿物自转变行为研究

钢渣集料表面富含硅酸盐矿物,如硅酸三钙和硅酸二钙,这些矿物在自然环境中会自发地与水分和空气反应,最终转变为碳酸钙(CaCO_3)。这一动态过程受温度、湿度和空气流速等反应条件的影响,决定了 CaCO_3 的产物数量和尺寸。生成的 CaCO_3 能够有效地填充钢渣表面的孔隙,改善其微观形貌和物理性能,进而降低其对沥青的吸收,提高沥青混凝土的耐久性^[2]。此外, CaCO_3 形成的致密产物层可以阻止水分进入钢渣内部,抑制低活性f-MgO等体积活性矿物进一步水化,消除其对钢渣体积稳定性的负面影响。通过精确控制反应条件,可以实现对钢渣集料表面性能缺陷的定向修饰,为制备高性能的钢渣沥青混凝土提供理论基础和技术支持。

二、钢渣表面钙基矿物的定向修饰与性能缺陷调控

(一) 碳化反应条件对钢渣表面特征的影响

在碳化过程中,钢渣表面的孔隙特性经历显著变化。随着碳化时间的延长,孔隙率逐渐降低,这是由于 CaCO_3 晶体的形成与生长逐渐填充了孔隙,从而减少了孔隙体积。同时,孔隙形态也由原本的不规则形状向近似球形转变,这一变化是 CaCO_3 晶体生长对孔隙空间重塑的结果^[3]。此外,碳化时间的增加导致 CaCO_3 产物层的厚度增加,这不仅影响了钢渣与沥青的粘结性能,还可能对钢渣的体积稳定性产生重要影响。

在钢渣碳化过程中,温度是影响碳化速率的关键因素,温度越高,碳化速率越快,这是因为高温条件下可以加速 CaCO_3 晶体的生长。然而,温度同样会影响 CaCO_3 晶体的形貌,进而影响其填充孔隙的效果;例如,高温环境下可能导致 CaCO_3 晶体变得粗大,不利于微孔的填充。此外,温度对钢渣的体积稳定性也有显著影响,过高的温度可能导致f-CaO、f-MgO的快速水化反应,引起体积膨胀,从而影响钢渣的整体稳定性。

在钢渣的碳化反应中,湿度也是影响碳化速率的一个重要因素。湿度水平对碳化过程有着直接的影响,过高的湿度可能导致水分饱和,进而影响 CaCO_3 晶体的生长^[4]。同时,湿度也会作用于 CaCO_3 晶体的形貌,影响其填充孔隙的效果;例如,过湿的条件可能导致形成的 CaCO_3 晶体过于细小,不利于形成致密的保护层。此外,湿度对钢渣的体积稳定性也有显著作用,过湿的环境可能导致水分渗入钢渣内部,促进f-CaO、f-MgO的水化反应,从而影响钢渣的体积稳定性。

空气流速同样也会影响反应速率和产物的特性。较高的空气流速能够提供充足的氧气,从而加速碳化反应的进程。然而,空气流速也会对 CaCO_3 晶体的形貌产生影响,进而影响其填充孔隙的效果;例如,过高的空气流速可能导致形成的 CaCO_3 晶体过于细小,不利于形成致密的保护层。此外,空气流速对钢渣的体积稳定性也有一定的影响,因为过高的空气流速可能导致水分蒸发速度加快,进而影响钢渣内部的水化反应,最终影响其体积稳定性。

(二) 钢渣表面孔隙的定向修饰机制

在钢渣碳化过程中, CaCO_3 晶体对孔隙的填充作用至关重要。晶体的生长速度必须适中,以确保能够有效填充不同尺度的孔隙;过快的生长速度会导致晶体变得粗大,不利于微孔的填充,而生长速度过慢则可能无法实现孔隙的有效填充^[5]。此外, CaCO_3 晶体的形貌对其填充孔隙的效果也有显著影响,细小晶体适合填充微孔,而较大晶体则更适合填充大孔。同时,晶体的堆积方式也是决定填充效果的关键因素,紧密堆积的晶体能够形成致密的填充层,从而有效封堵孔隙,而松散堆积的晶体则可能无法达到理想的封堵效果。

在钢渣碳化过程中,形成的 CaCO_3 产物层对于孔隙的封堵作用至关重要。产物层的厚度必须足够,以确保能够有效封堵孔隙,防止水分渗透进入钢渣内部。同时,产物层的致密性也是关键,只有形成了具有一定致密性的 CaCO_3 层,才能有效地阻隔水分。此外,产物层与钢渣的结合方式同样影响着封堵效果,通过化学键结合的产物层相较于仅通过物理堆积的产物层,能够提供更优越的封堵性能。

(三) 钢渣性能缺陷调控方法

为提高钢渣碳化反应的效率,需精确调控反应时间、温度、湿度和空气流速等关键参数,以优化 CaCO_3 晶体的生长速度及其形貌,进而实现钢渣表面孔隙的有效填充与封堵^[6]。同时,通过调整 CaCO_3 产物层的厚度和致密性,可以有效阻隔水分渗透,减少f-CaO、f-MgO水化引起的体积膨胀。此外,选择适宜规格的钢渣集料可以减少表面孔隙数量,进而降低沥青吸收量。结合使用改性沥青,可以进一步提高沥青与钢渣的粘结性能,有效降低沥青的吸收量,从而全面提升钢渣在沥青混凝土中的应用性能。

三、改性钢渣沥青混凝土在近海环境下的服役性能

(一) 改性钢渣沥青混凝土的制备

在钢渣集料的预处理过程中,首先通过筛选与清洗步骤,去

除集料中的杂质和不合格颗粒，同时清洗掉表面附着的粉尘，确保集料的洁净度。随后，根据前期研究所确定的优化碳化反应条件，对钢渣集料进行碳化改性，以引导钙基矿物定向生长，有效填充表面孔隙，并形成致密的碳化产物层。最后，对经过碳化处理的钢渣集料进行干燥，并采取适当的存储措施，以防止二次污染和确保碳化层的完整性不受破坏。

在改性钢渣沥青混凝土的配合比设计过程中，首先根据钢渣集料的粒径分布和性能特点进行集料级配设计，以确定粗细集料的比例，保障混合料骨架结构的稳定性^[7]。接着，考虑钢渣集料对沥青的吸收性，进行沥青用量的精确设计，以确保混合料在施工和实际路用中的性能。此外，根据具体性能需求选择适宜的外加剂，如抗剥落剂、抗车辙剂等，以进一步提升混合料的整体性能。

（二）改性钢渣沥青混凝土的耐久性研究

为综合评估改性钢渣沥青混凝土的性能表现，开展了系列试验研究。初始阶段，通过冻融循环试验和浸水马歇尔试验，对混合料在不同水分环境下的抗水损害能力及稳定性进行了评价，并分析了冻融作用次数与水浸泡条件对混合料性能的具体影响。随后，采用四点弯曲疲劳试验和动态模量试验，对混合料的抗疲劳特性及动态力学行为进行了深入探讨，考察了荷载循环次数、温度及荷载频率对疲劳寿命和力学性能的作用。进一步，通过低温弯曲试验和低温收缩试验，对混合料的低温抗裂性能及体积稳定性进行了评价。最终，借助浸泡试验和盐雾试验，对改性钢渣沥青混凝土在海水及盐雾环境中的耐侵蚀和抗腐蚀性能进行了评估，以探究这些环境因素对混合料长期性能的影响。

（三）改性钢渣沥青混凝土的生态效益分析

为全面评价改性钢渣沥青混凝土的环境影响及资源效率，实施了一系列系统化的分析和评估。首先，计算了其在生产及施工阶段的资源与能源消耗，以确定资源利用效率^[8]。接着，通过环境输出分析，对改性钢渣沥青混凝土在各个生命周期阶段的环境影响进行了评价，涵盖了废气、废水和固体废弃物的排放情况。最终，运用全生命周期评价方法，构建了针对钢渣沥青路面的生态评价体系，量化了经过调控的钢渣集料沥青路面在近海环境中的生态特性，以此作为工程决策的科学支撑。

四、钢渣沥青混凝土在近海环境下的生态评价体系构建

（一）生态评价体系指标选取

构建一个全面的生态评价体系对于钢渣沥青混凝土而言，需涵盖其整个生命周期，包括原材料的采集、生产、使用直至废弃阶段^[9]。该体系应综合考虑多个维度的指标，包括资源消耗指标（如原材料开采量、运输距离、水资源消耗等），能源消耗指标（如生产过程和运输过程中的能源消耗），环境影响指标（如温室气体排放、固体废弃物排放、水污染和土壤污染等），以及社会效益指标（如经济成本、社会成本和环境影响等），以实现对钢

渣沥青混凝土综合性能的全面评估。

（二）生态评价模型构建

在针对钢渣沥青混凝土进行生态评价时，可以采用层次分析法（AHP）和生命周期评价法（LCA）两种模型。层次分析法通过对评价指标进行层次化处理，并利用专家打分来确定各指标的权重，从而计算出综合生态效益得分；而生命周期评价法则全面考量钢渣沥青混凝土从原材料采集到废弃处理的整个生命周期，分析各阶段的资源消耗、能源消耗和环境影响，并对其进行量化，以评估其生态效益^[10]。这两种方法的结合使用，能够为钢渣沥青混凝土的生态评价提供科学、全面的分析和决策支持。

（三）生态评价体系应用

构建完成的生态评价体系可广泛应用于多个领域：为政府部门提供科学依据，以制定环保政策；为企业选择环保型建筑材料提供决策参考；指导企业改进产品设计和生产工艺，提升产品环保性能；同时，通过社会宣传，提高公众对钢渣沥青混凝土等环保型建筑材料的认识和接受度。

五、结束语

本研究为钢渣沥青混凝土在近海公路中的应用提供了坚实的理论依据，为推动钢渣资源化再利用和生态道路建设提供了参考和指导。然而，本研究在生态评价体系构建方面仍存在一些局限性，例如评价指标的选取和权重分配需要进一步细化和完善，生态评价模型的精度和适用性也需要进一步提升。

未来研究可以进一步完善生态评价体系，并将其应用于其他类型的生态建筑材料。为生态道路建设提供更加全面和系统的指导，推动我国道路工程向更加绿色、可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1] 张保卫, 郑新, 朱富万, 等. 钢渣集料微观与宏观形貌特征试验分析 [J]. 现代交通技术, 2022, 19(06):6-11.
- [2] 蒋方听, 代莉芳. 钢渣沥青混凝土路用性能研究及工程应用试验 [J]. 四川水泥, 2024, (09):248-250.DOI:10.20198/j.cnki.scn.2024.09.081.
- [3] 韩健, 张亚军, 梁新春, 等. 钢渣陈化处理与钢渣沥青混凝土浸水稳定性研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51(07):127-132+143.
- [4] 赛奎雨. 钢渣沥青混凝土配合比设计与施工 [J]. 建筑机械, 2024, (05):178-180. DOI:10.14189/j.cnki.cm1981.2024.05.026.
- [5] 马爱佳, 李鄂豪, 胡健坤. 钢渣沥青混凝土在道路工程中的应用现状研究 [J]. 交通节能与环保, 2024, 20(02):136-138.
- [6] 杨武, 宣强, 贾羽. 钢渣橡胶沥青混凝土在宁夏公路养护工程中的应用 [J]. 运输经理世界, 2024, (07):107-109.
- [7] 天津公路持续开展钢渣沥青混凝土应用 [J]. 天津建设科技, 2023, 33(04):30.
- [8] 李军. 沥青钢渣混凝土面层现场碾压工艺与路用性能分析——以AC-25型与AC-16型为例 [J]. 交通世界, 2023, (24):72-74.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.24.025.
- [9] 李晓刚, 郭永奇, 周洪军, 等. 钢渣沥青混凝土耐久性室内试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12):5267-5277.
- [10] 赵英. 钢渣在沥青混凝土中的应用研究 [J]. 四川水泥, 2023, (03):1-3.