

# ECC 路面面层的生命周期评价和成本分析

熊晓立 杨政险 罗盛洋 林佳福 董世林

(福州大学土木工程学院先进土木工程材料福建省高校研究中心,福州 350108)

**摘要:** 超高延性水泥基复合材料(ECC)构建的面层相较于普通刚性混凝土路面面层,具有更长的使用寿命。本研究对六种典型 ECC 材料制作而成的面层进行了生命周期评价和成本分析。结果表明,虽然 ECC 面层短期内在环境影响和成本方面不占优势,但是超长的使用寿命和较低的维护频率使其在整个生命周期内的环境影响和成本远低于普通刚性混凝土面层。与普通刚性混凝土面层相比,含辅助胶凝材料(粉煤灰或矿渣)和环保纤维(聚丙烯纤维或玄武岩纤维)的 ECC 面层在生命周期内减少了 63.2%~68.5% 的增温潜势,且成本只占普通刚性混凝土面层的 9.6%~23.3%。

**关键词:** 水泥基复合材料; 辅助胶凝材料; 路面面层; 生命周期评价; 增温潜势; 成本分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-1625(2023)11-3927-10

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2023.11.019

## Life Cycle Assessment and Cost Analysis of ECC Pavement Overlay

XIONG Xiaoli, YANG Zhengxian, LUO Shengyang, LIN Jiafu, DONG Shilin

(Fujian Provincial University Research Center for Advanced Civil Engineering Materials,  
College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Compared with normal rigid concrete pavement overlay, the overlay constructed with ultra-high ductile engineered cementitious composites (ECC) has a longer service life. Life cycle assessment and cost analysis of overlayer made of six typical ECC materials were carried out. The results show that although ECC overlays do not have short-term advantages in terms of environmental impact and cost, their long-term environmental impact and cost are significantly lower than those of normal rigid concrete overlay due to their exceptionally long service life and lower maintenance frequency. Compared with normal rigid concrete overlay, ECC overlays with supplementary cementitious materials (fly ash or ground granulated blast furnace slag) and environmentally friendly fibers (polypropylene fiber or basalt fiber) reduce the global warming potential by 63.2%~68.5% within a life cycle, while their costs only account for 9.6%~23.3% of normal concrete overlay.

**Key words:** engineered cementitious composite; supplementary cementitious material; pavement overlay; life cycle assessment; global warming potential; cost analysis

## 0 引言

全球变暖是人类面临的最复杂的环境挑战之一,从 19 世纪中旬到 21 世纪初,地球表面温度上升了 1.09 °C<sup>[1]</sup>。在第 75 届联合国大会上,中国正式提出了在 2030 年实现“碳达峰”,在 2060 年实现“碳中和”的目标<sup>[2]</sup>。混凝土是一种高耗能高污染的脆性材料,具有开裂后耐久性差和水泥含量高的缺点。水泥制造是一个高碳排放的行业,其碳排放量占全球二氧化碳排放量的 5%~8%。据报道,在 2022 年,我国水泥产量为 21.3 亿吨<sup>[3]</sup>。因此,为了实现建筑和道路行业的“碳中和”,必须减少水泥的使用。其中一种方法是引入辅助胶凝材料(supplementary cementitious materials, SCM)来替代水泥,包括粉煤灰(fly ash, FA)、粒化高炉矿渣(ground granulated blast furnace slag, GGBFS)、硅灰以及偏高岭土等<sup>[4-5]</sup>。另外,混凝土结构和路面(刚

收稿日期: 2023-06-08; 修订日期: 2023-08-14

基金项目: 福州市科技局科技创新平台项目(2021-P-031)

作者简介: 熊晓立(1998—),男,硕士研究生。主要从事固废综合利用的研究。E-mail: 420571030@qq.com

通信作者: 杨政险,博士,教授。E-mail: zxyang@fzu.edu.cn

性路面) 由于易开裂和抗拉强度低,存在着耐久性差的问题。为此, Li<sup>[6]</sup> 发明了超高延性水泥基复合材料 (engineered cementitious composites, ECC)。ECC 的平均裂缝宽度低于 60  $\mu\text{m}$ , 在拉伸应力下的应变能力超过 2%<sup>[7]</sup>。图 1 展示了 ECC 在拉应力作用下的应变硬化行为和微裂缝开展模式。在首次开裂后, 随着应变增加, 应力逐渐恢复并超过了开裂应力, 超过纤维桥接能力后, 应力开始单调下降<sup>[8]</sup>。

ECC 的原材料主要包括水泥、SCM、水、石英砂 (silicon-sand, SCS)、纤维、高效减水剂 (superplasticizer, SP) 和增稠剂 (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC)。值得注意的是, ECC 一般不含粗骨料 (coarse aggregate, CA), 并且含有较低的砂胶比, 这些原因导致 ECC 的胶凝材料占比较高。在 ECC 中常用的纤维包括聚乙烯醇纤维 (polyvinyl alcohol fiber, PVAF)、聚乙烯纤维 (polyethylene fiber, PEF)、聚丙烯纤维 (polypropylene fiber, PPF) 和玄武岩纤维 (basalt fiber, BF)。为降低水泥用量, Wang 等<sup>[9]</sup> 将大量的 FA 加入 ECC 中, 发现制得的复合材料 M45 (FA-PVAF) 能达到 3%~4% 的极限拉伸应变和 4.5 MPa 以上的抗拉强度。Said 等<sup>[10]</sup> 测试了不同 PEF 含量对 ECC 抗弯能力和抗压强度的影响, 发现掺入 2% (体积分数) PEF 的 ECC (FA-PEF) 的抗压强度能达到 47.53 MPa, 四点抗弯强度为 6.41 MPa, 极限跨中挠度为 49.95 mm。Chen 等<sup>[11]</sup> 制备了掺入 GGBFS 的 ECC (GGBFS-PVAF), 其中水泥替代量为 60% (质量分数) 时, GGBFS-PVAF 在单轴拉伸试验中表现出了明显的应变硬化行为, 抗拉强度为 4.68 MPa, 抗压强度为 56 MPa。Özkan 等<sup>[12]</sup> 研究了 PVAF 和 BF 复掺对 ECC 力学性能的影响, 发现含 0.5% (体积分数) PVAF + 1.5% (体积分数) BF 的 ECC (FA-PVAF-BF) 在 28 d 时的抗压强度和弯拉强度分别为 50.0 和 6.8 MPa。Tan 等<sup>[13]</sup> 研究了含 PPF 的 ECC (FA-PPF), 发现 PPF 在裂纹扩展过程中起到桥接和耗能作用, 有利于 ECC 的裂纹宽度控制和应变硬化, 其中含 2% (体积分数) PPF 的 ECC 在 28 d 的弯拉强度为 7.5 MPa。

ECC 路面虽然初期受环境影响较大, 但是耐久性能优异<sup>[14-15]</sup>, 在较长的使用寿命内可能实现比刚性混凝土路面更高的环保性。生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 是分析和评估产品整个生命周期内对环境的影响, 特别适用于对 ECC 进行环境影响评估。Qian 等<sup>[16]</sup> 对含 FA 的 ECC 和普通刚性混凝土路面面层进行了使用寿命和环保性分析, 发现与刚性混凝土面层相比, ECC 面层厚度较小, 且有更长的使用寿命 (40 年), 所以 ECC 面层的可持续性更高。根据 Pranav 等<sup>[17]</sup> 的研究发现, 在整个生命周期中, 相比于普通刚性混凝土面层, 含有 FA 和金刚砂的 ECC 面层能够节约 1.99% 的成本, 同时降低约 1.22% 的电力消耗、11.57% 的气体排放以及 1.04% 的全球增温潜势 (global warming potential, GWP)。Van den Heede 等<sup>[18]</sup> 对 ECC 制备的桥面铺装层的 GWP 进行了研究, 发现具有 60 年使用年限的 ECC 修复层与使用年限为 25 年的普通刚性混凝土桥面板相比, 能够减少约 80% 的 GWP。

为进一步量化 ECC 在道路领域的环保性, 本研究基于上海市的城市次干道, 使用 SimaPro 9.0 软件, 采用 ReCiPe (2016) 的评估方法, 从 GWP、人类健康 (human health) 损害、生态系统 (ecosystems) 损害和资源 (resources) 损害几个方面, 对含不同 SCM (FA 和 GGBFS) 和不同纤维 (PVAF、PEF、PPF 和 BF) 的六种典型 ECC 路面面层进行 LCA, 并用综合单价法对 ECC 面层进行成本分析。本研究旨在为 ECC 材料的评估和推广提供参考。

## 1 目标和范围

### 1.1 系统边界

本研究的系统边界涵盖了路面面层从原材料生产到维护阶段的全过程, 按生命周期阶段可分为四个主要阶段: 原材料获取阶段、运输阶段、施工阶段和维护阶段。虽然完整的“从摇篮到坟墓”的 LCA 通常还包括

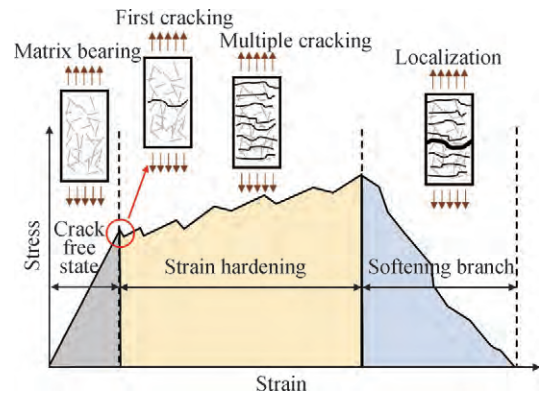


图 1 ECC 的典型应力应变曲线

Fig. 1 Typical stress-strain curve of ECC

使用寿命终止阶段,但是目前鲜有关于 ECC 路面的拆除和回收的报告。因此,使用寿命终止阶段没有被规划到本研究的 LCA 范围内。值得注意的是,本文只研究路面面层,不涉及垫层、基层和其他道路附属设施。表 1 为参照混凝土(C-REF)面层、参照 ECC(ECC-REF)面层和五种典型混合 ECC 面层的配合比。根据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012),用于建造中等交通等级路面面层的水泥混凝土的抗压强度和抗弯拉强度应分别不低于 30 和 4.5 MPa,所选 ECC 材料均满足这一要求。作为参照组,C-REF 的配合比与满足该标准的普通混凝土 C30 的配合比相同<sup>[17]</sup>。ECC-REF 采用不含任何 SCM 的 PVAF 基 ECC 材料<sup>[19]</sup>。另外,剩下五种典型 ECC 面层(FA-PEF、FA-PVAF、GGBFS-PVAF、FA-PVAF-BF 以及 FA-PPF)所用 ECC 材料在引言部分均有介绍。

表 1 参照混凝土和 ECC 路面面层的配合比

Table 1 Mix proportion of C-REF and ECC pavement overlay

Sample	Mix proportion/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )												
	Cement	FA	GGBFS	PEF	PVAF	PPF	BF	SCS	RS	CA	Water	SP	HPMC
C-REF <sup>[19]</sup>	348.3	—	—	—	—	—	—	—	654.4	1 212.2	188.1	—	—
ECC-REF <sup>[9]</sup>	838	—	—	—	26	—	—	838	—	—	366	17	1.26
FA-PEF <sup>[10]</sup>	820	205	—	26	—	—	—	656	—	—	379	3.3	—
FA-PVAF <sup>[9]</sup>	571	685	—	—	26	—	—	455	—	—	153	4.9	—
GGBFS-PVAF <sup>[11]</sup>	491	—	736	—	26	—	—	446	—	—	326	16	—
FA-PVAF-BF <sup>[12]</sup>	571	685	—	—	6.3	—	19.7	455	—	—	331	4.95	—
FA-PPF <sup>[13]</sup>	480	720	—	—	—	26	—	600	—	—	360	11.3	—

## 1.2 功能单元

本研究基于上海市城区内的一条中等交通量的次干道(双向四车道,道路设计速度为 50 km/h),选用长为 1 km、宽为 30 m 的路面面层作为功能单元。Qian 等<sup>[16]</sup>通过有限元分析和疲劳试验发现,当 ECC 面层的厚度为 65 mm 时,其使用寿命可达 40 年。虽然普通混凝土路面面层的设计年限为 20 年(CJJ 37—2012),为了对 ECC 路面面层进行生命周期评价,选择两种面层的使用寿命均为 40 年。这意味着在第 20 年左右,普通混凝土面层需进行重建。根据《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)对中等交通量的次干道水泥混凝土面层厚度的要求,本文选择 C-REF 厚度为 210 mm。对于 ECC 路面面层的厚度尚无相关规范,根据 Smith 等<sup>[20]</sup>的研究,无筋混凝土路面面层的最小厚度不应小于 100 mm。因此,本研究假定 ECC 面层的厚度为 100 mm。路面的设计横截面如图 2 所示,其中路基为黏土土质。垫层和基层都符合 CJJ 37—2012 的要求,其设计和分析过程超出了本研究的范围,这里不再讨论。

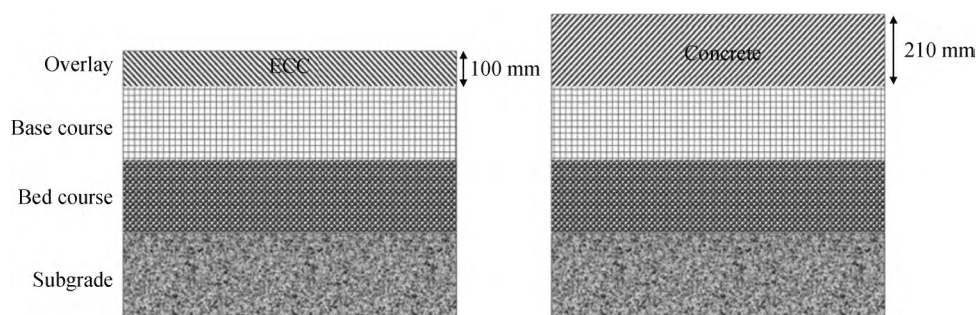


图 2 两类路面的横截面

Fig. 2 Cross section of two types of pavement

## 2 生命周期清单分析

### 2.1 原材料获取阶段

Ecoinvent 3 数据库中已经存在几种原材料的数据,包括水泥(cement)、粒化高炉矿渣(GGBFS)、石英砂(SCS)、河沙(river sand, RS)、粗骨料(CA)、水(water)、高效减水剂(SP)、增稠剂(HPMC)以及聚丙烯纤维

(PPF)。比利时水泥联合会发布的含有粉煤灰的复合水泥的环境产品声明(EPDs)中显示 FA 的制备没有上游环境影响<sup>[19]</sup>。据报道,制备 1 t FA 需要大约 9.3 kWh<sup>[21]</sup>的电力。此外,假定发电厂和工厂之间的运输距离为 10 km。聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)颗粒的制备过程包括乙烯酯的聚合和酯化反应。Jungbluth 等<sup>[22]</sup>为 PVA 颗粒进行了非常详细的生命周期清单分析(life cycle inventory analysis)将 PVA 颗粒熔化,并进行湿法纺丝,可以得到 PVAF。Akbar 等<sup>[21]</sup>收集了有关用 PVA 颗粒制备 PVAF 的数据。BF 是一种用熔化的玄武岩生产的纤维,其生产过程与玻璃纤维的生产过程相似。Akbar 等<sup>[21]</sup>从玻璃纤维的生产中推导出生产 BF 的清单。本研究对各个原材料数据进行汇总整理,得到了各 ECC 路面和 C-REF 的原材料清单,结果如表 2 所示。

表 2 原材料获取阶段的清单  
Table 2 Inventory of raw material acquisition stage

Sample	Mix proportion/kg												
	Cement	FA	GGBFS	PEF	PVAF	PPF	BF	SCS	RS	CA	Water	SP	HPMC
C-REF <sup>[19]</sup>	2.19 × 10 <sup>6</sup>	—	—	—	—	—	—	—	4.12 × 10 <sup>6</sup>	7.64 × 10 <sup>6</sup>	1.19 × 10 <sup>6</sup>	—	—
ECC-REF <sup>[9]</sup>	2.51 × 10 <sup>6</sup>	—	—	—	7.80 × 10 <sup>4</sup>	—	—	2.51 × 10 <sup>6</sup>	—	—	1.10 × 10 <sup>6</sup>	5.10 × 10 <sup>4</sup>	3.78 × 10 <sup>3</sup>
FA-PEF <sup>[10]</sup>	2.46 × 10 <sup>6</sup>	6.15 × 10 <sup>5</sup>	—	7.8 × 10 <sup>4</sup>	—	—	—	1.97 × 10 <sup>6</sup>	—	—	1.14 × 10 <sup>6</sup>	9.90 × 10 <sup>3</sup>	—
FA-PVAF <sup>[9]</sup>	1.71 × 10 <sup>6</sup>	2.06 × 10 <sup>6</sup>	—	—	7.80 × 10 <sup>4</sup>	—	—	1.37 × 10 <sup>6</sup>	—	—	4.59 × 10 <sup>5</sup>	1.47 × 10 <sup>4</sup>	—
GGBFS-PVAF <sup>[11]</sup>	1.47 × 10 <sup>6</sup>	—	2.21 × 10 <sup>6</sup>	—	7.80 × 10 <sup>4</sup>	—	—	1.34 × 10 <sup>6</sup>	—	—	9.78 × 10 <sup>5</sup>	4.80 × 10 <sup>4</sup>	—
FA-PVAF-BF <sup>[12]</sup>	1.71 × 10 <sup>6</sup>	2.06 × 10 <sup>6</sup>	—	—	1.89 × 10 <sup>4</sup>	—	5.91 × 10 <sup>4</sup>	1.37 × 10 <sup>6</sup>	—	—	9.93 × 10 <sup>5</sup>	1.49 × 10 <sup>4</sup>	—
FA-PPF <sup>[13]</sup>	1.44 × 10 <sup>6</sup>	2.16 × 10 <sup>6</sup>	—	—	—	7.80 × 10 <sup>4</sup>	—	1.80 × 10 <sup>6</sup>	—	—	1.08 × 10 <sup>6</sup>	3.39 × 10 <sup>4</sup>	—

2.2 运输与施工阶段

考虑到大部分原材料来自上海本地的工厂,将卡车作为主要的运输工具。根据百度地图估算了生产工厂和施工现场之间的距离,每种原材料的平均运输距离为 100 km。运输阶段的清单见表 3。施工阶段的工作量包括使用搅拌车将混凝土从搅拌站运输到工地,以及混凝土浇筑设备的操作,但不包括人工劳动和施工机械的运输。摊铺过程中,振动压实是必要的。与普通混凝土面层需要用切缝机切割不同,ECC 面层可以直接铺设。对于面层施工过程中所涉及的各种机械以及所需班次,可以参考《公路工程预算定额(上、下册)》(JTG/T 3832—2018)。此外,参考《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T 3833—2018)提供的每种机械的能耗信息,得到了施工阶段消耗的柴油和电力的清单,如表 4 所示。其他种类的 ECC 面层在运输阶段的清单与 ECC-REF 相同。

表 3 卡车运输清单  
Table 3 Inventory of transportation by truck

Item	C-REF	ECC-REF	FA-PEF	FA-PVAF	GGBFS-PVAF	FA-PVAF-BF	FA-PPF
Unit/(kg · km)	1.51 × 10 <sup>9</sup>	6.26 × 10 <sup>8</sup>	6.27 × 10 <sup>8</sup>	5.68 × 10 <sup>8</sup>	6.12 × 10 <sup>8</sup>	6.22 × 10 <sup>8</sup>	6.59 × 10 <sup>8</sup>

表 4 施工阶段的清单  
Table 4 Inventory of construction stage

Material	C-REF	ECC
Diesel mass/kg	8.93 × 10 <sup>3</sup>	3.72 × 10 <sup>3</sup>
Electricity/kWh	1.80 × 10 <sup>4</sup>	2.60 × 10 <sup>3</sup>

2.3 维护阶段

在 C-REF 和 ECC 面层达到特定的损坏指数后,需对其进行相应的维修。Qian 等<sup>[16]</sup>的有限元模拟结果

显示(见图 3),在 40 年的跨度内,普通刚性混凝土面层需要重建一次,并维修两次,而 ECC 面层只需要修理一次。因此设定 C-REF 在第 11 年和第 33 年需要进行维修,在第 22 年需要进行重建。普通混凝土面层的维修方法参照文献 [23],采用组合式水泥混凝土加铺,对面层表面进行打磨和喷砂处理,然后涂上一层环氧树脂黏结剂,再在上面铺上一层 24 mm 的 C30 混凝土。而重建方法即先对混凝土面层进行拆除,再进行重建。C-REF 拆除的工作量参照李肖燕 [24] 的研究,拆除所用的机械为破路机和机动空压机。假定这六种 ECC 路面具有相同的耐久性能,只需在第 23 年时进行修理。ECC-REF 的修理方法参考了文献 [25],即先对 ECC 面层进行人工碾压清理,然后用灌缝机对 ECC 面层的裂缝进行环氧树脂填充。假设 ECC 面层每 5 m 有一个横向接缝,每条车道有一个纵向接缝,每 100 m 的裂缝处理需要 25 kg 的环氧树脂来填充。表 5 总结了维修阶段的 LCI。其他种类的 ECC 面层在维护阶段的清单与 ECC-REF 相同。

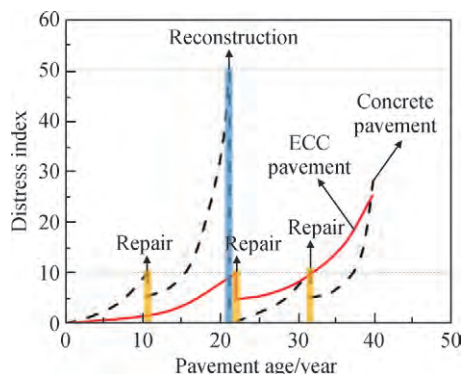


图 3 普通刚性混凝土和 ECC 面层的时间线、损坏指数和维修时间表 [16]

Fig. 3 Timeline, distress index and maintenance schedule for normal rigid concrete and ECC overlay [16]

表 5 维护阶段的清单

Table 5 Inventory of maintenance stage

Material	C-REF	ECC-REF
Epoxy resin mass/kg	$1.40 \times 10^4$	$3.60 \times 10^3$
C30 mass/kg	$1.73 \times 10^6$	—
<sup>a</sup> Transportation/(kg · km)	$4.36 \times 10^7$	$9.02 \times 10^4$
Diesel mass/kg	$3.28 \times 10^5$	—

Note: <sup>a</sup>Transportation by truck.

### 3 生命周期影响评价

在生命周期影响评价( life cycle impact assessment, LCIA) 阶段,本研究运用的方法为 ReCiPe,其基本模型框架如图 4 所示。ReCiPe 在生命周期清单分析中包括 22 种中点影响(包括 GWP)和 3 种终点损害。其中终点损害包括人类健康( human health) 损害、生态系统( ecosystems) 损害和资源( resources) 损害。人类健康损害的单位是伤残调整寿命年( disability adjusted life years, DALYs),它是指从发病到死亡所损害的全部健康寿命年。生态系统损害的单位是生物种群的潜在减少值( loss of species in a year, species. year) 表明在单位年内特定区域内的物种损害。此外,资源损害以美元货币( \$) 为单位 [26]。ReCiPe 的精髓在于它能够通过一个端点特征模型将中点影响和终点损害联系起来。通过使用一组终点损害因子,将中点影响结果转换为终点损害结果。具体转换过程如式( 1) 所示 [27]。

$$RL_j^{EN} = RL_j^E \times RN_j \times RW_j \tag{1}$$

式中:  $RL_j^{EN}$  为标准化后的终点损害类别  $j$  的损害结果,  $RL_j^E$  为  $j$  的损害结果,  $RN_j$  为  $j$  的标准化因子,  $RW_j$  为  $j$  的权重因子。

#### 3.1 ReCiPe 中点影响评价结果

增暖潜势( global warming potential, GWP) 是 ReCiPe 方法中最重要的中点影响评价之一。GWP 以单位  $CO_2$  排放量作为基准值,其他温室气体换算成  $CO_2$  eq。图 5 展示了原材料获取阶段的 GWP 评价结果。在原材料获取阶段, ECC-REF 的 GWP 最高,达到了  $3.3 \text{ kt } CO_2 \text{ eq}$ ,明显高于 C-REF 的 GWP(  $2.2 \text{ kt } CO_2 \text{ eq}$ )。含辅助胶凝材料和环保纤维的混合 ECC 的 GWP 较低,特别是 FA-PPF 所产生的 GWP(  $1.7 \text{ kt } CO_2 \text{ eq}$ ) ,其只占 C-REF 的 GWP 的 77.3%。另外在胶凝材料方面,水泥的 GWP 的占比在所有路面面层原材料中都是最高的。特别是对于 C-REF,水泥的 GWP 占到了全部原材料 GWP 的 92.3%。而在 ECC-REF 中,水泥的 GWP



也占到了 70%。另外 SCM 的加入大幅降低了胶凝材料 GWP 的占比。在含 SCM 的 ECC 中,胶凝材料的 GWP 在 56.7%~84.4%。在纤维方面,四种纤维所产生的 GWP 的关系是 PVAF > PEF > PPF > BF,特别是 PPF 和 BF 所产生的 GWP 的占比很小,只占 FA-PPF 和 FA-PVAF-BF 的 GWP 的 10.9% 和 4.3%。

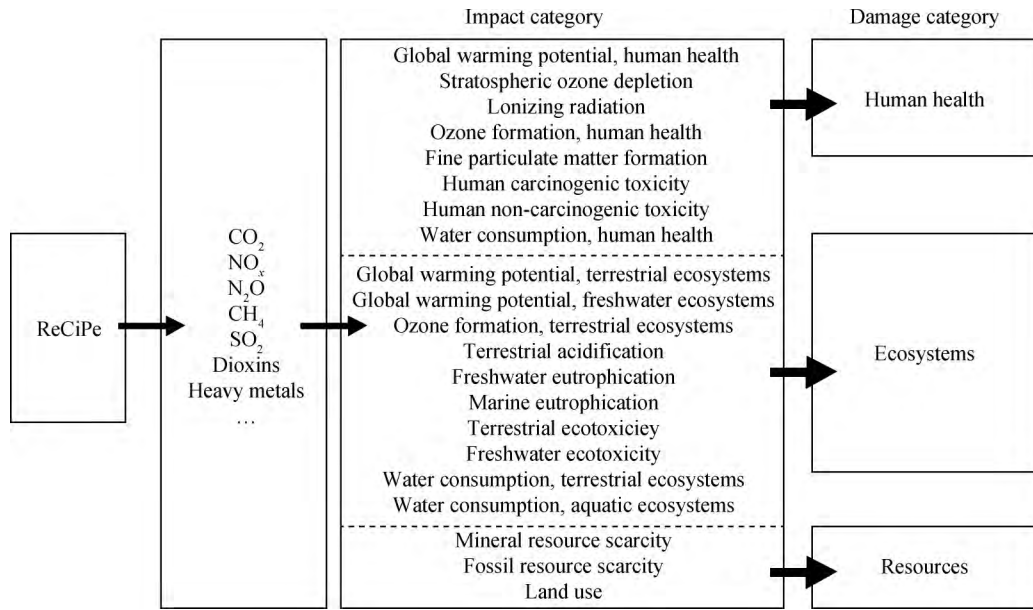


图 4 ReCiPe 方法的模型

Fig. 4 Model of ReCiPe method

图 6 展示了生命周期的 C-REF 和 ECC 面层的 GWP 评价结果。值得注意的是,由于 C-REF 在第 22 年需要重建(见图 3)这使得其产生的 GWP 在 40 年的使用寿命内翻倍,最终远大于各 ECC 面层。研究还发现,不管是 C-REF 还是各 ECC 面层,其原材料获取阶段所产生的 GWP 都远大于其他阶段。这一点和查蓉昕<sup>[24]</sup>的研究结果相似。因此,为降低参照混凝土和 ECC 面层的碳排放量,关键是要采用更环保的原材料。和 ECC-REF 相比,辅助胶凝材料和环保纤维(PPF 和 BF)的掺入使得混合 ECC 的 GWP 大幅下降。FA-PEF、FA-PVAF、GGBFS-PVAF、FA-PVAF-BF 和 FA-PPF 在 40 年的使用寿命内的 GWP 分别为 2.80、2.64、2.56、2.09 和 1.79 kt CO<sub>2</sub> eq,仅为 C-REF GWP 的 49.3%、46.5%、45.1%、36.8% 和 31.5%。这说明在长寿命路面领域,混合 ECC 材料具有良好的碳减排优势。

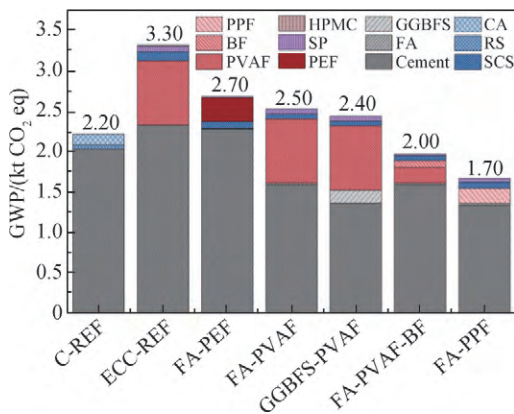


图 5 参照混凝土和 ECC 面层在原材料获取阶段的全球增温潜势

Fig. 5 GWP of C-REF and ECC overlay at raw material acquisition stage

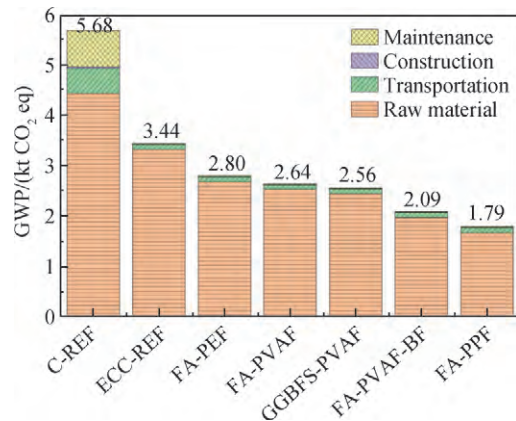


图 6 参照混凝土和 ECC 面层在生命周期内的全球增温潜势

Fig. 6 GWP of C-REF and ECC overlay within life cycle

### 3.2 ReCiPe 终点损害评价结果

#### 3.2.1 原材料获取阶段

对 SimaPro 9.0 中 ReCiPe 方法的终点损害评价结果进行标准化处理(见式(1)),得到了不同面层的各项环境损害值,结果如图 7 所示。可以看出:在人体健康、生态系统和资源损害方面,ECC-REF 的损害都是最高的,分别是 C-REF 的 1.61 倍、1.60 倍以及 3.08 倍,这主要是因为掺入了大量水泥和 PVAF。类似于 GWP 的结果,当加入 SCM 和环保纤维(PPF 和 BF)后,各终点损害分数开始下降,特别是 FA-PVAF-BF 和 FA-PPF,最终其在人体健康和生态系统损害方面优于 C-REF,而在资源损害方面和 C-REF 相当。

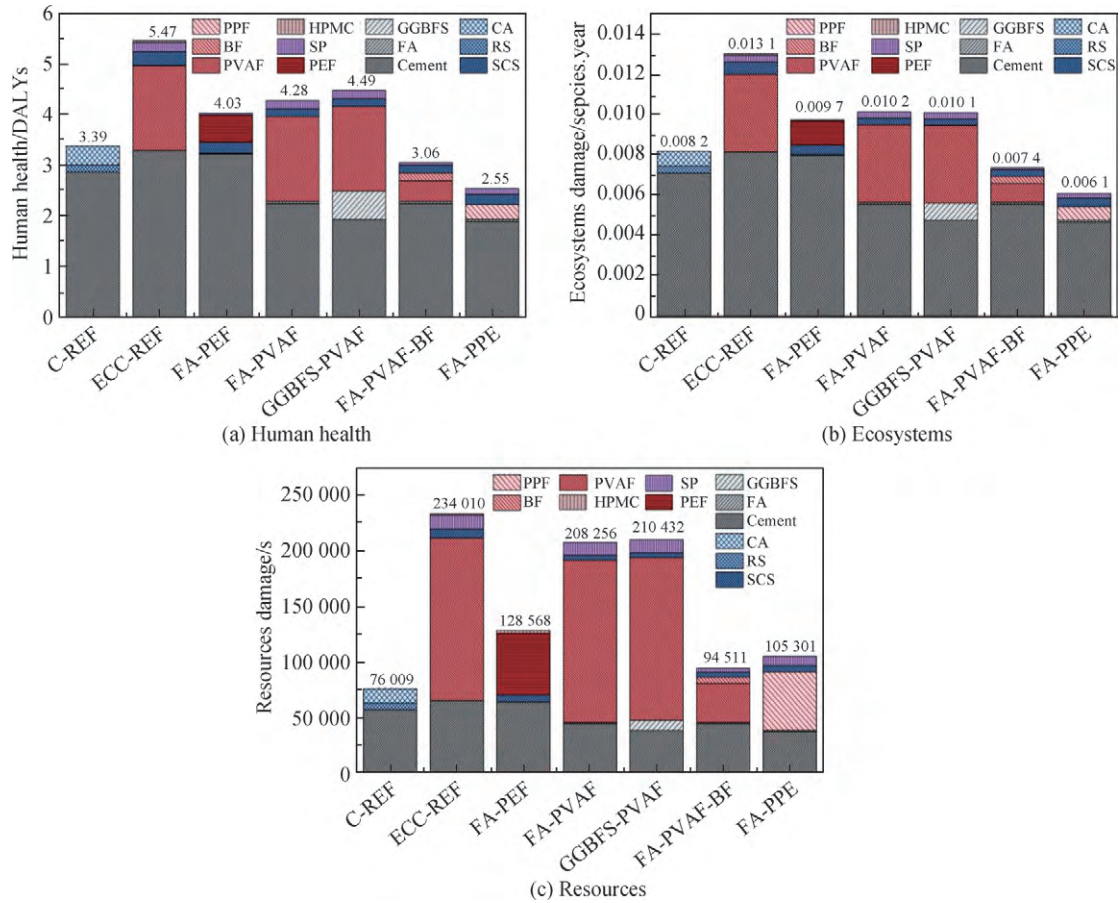


图 7 参照混凝土和 ECC 面层原材料阶段的终点损害

Fig. 7 End point damage of C-REF and ECC overlay at raw material acquisition stage

另外,在人体健康和生态系统方面,水泥的环境损害是最高的,占到了 86% 以上,其次是 PVAF。Radwan 等<sup>[28]</sup>的研究也指出,在原材料阶段水泥的环境损害最为严重。在资源方面,PVAF 的环境损害是最高的,其次是水泥。PVAF 在资源方面的高损害主要是因为其生产需要大量使用不可再生资源,如天然气和柴油。相比于 PVAF 和 PEF,BF 和 PPF 是环境损害较小的环保纤维。值得注意的是,ECC 面层材料中仅水泥和 PVAF 环境损害之和就占到了全部原材料的 90% 以上。所以为了降低环境损害,必须限制 ECC 材料的水泥和 PVAF 用量。

#### 3.2.2 生命周期

表 6 展示了特征化和归一化处理后的全阶段 C-REF 和 ECC 路面面层的终点损害。ECC 高耐久性为其环保性带来了巨大优势,如超长的使用年限和较低的维护频率,这使得 ECC 面层在生命周期内的环境影响远低于 C-REF。具体而言,ECC-REF 在人体健康、生态系统和资源方面的环境损害分别只占到 C-REF 的 62.1%、61.9% 和 58.0%。由于 SCM 和环保纤维的加入,混合 ECC 面层在全阶段范围内的各项终点损害比 ECC-REF 低,特别是 FA-PPF,其各方面的损害几乎只占到 ECC-REF 的二分之一。此外,FA-PVAF 对人体健

康、生态系统和资源方面的环境损害分别占 C-REF 的 49.0%、48.7%、51.8% ,GGBFS-PVAF 对人体健康、生态系统和资源方面的环境损害分别占 C-REF 的 51.3%、48.7%、52.5% ,这表明 FA 和 GGBFS 在长期内的环保性表现相似。另外,在纤维的环保性方面,对比 FA-PVAF-BF、FA-PPF、FA-PEF、FA-PVAF 可以看出,BF 的环保性最优,而 PVAF 的环保性最差。纤维长期环保性的具体优劣顺序为 BF > PPF > PEF > PVAF。

表6 参照混凝土和 ECC 面层在生命周期内的终点损害

Table 6 End point damage of C-REF and ECC overlay within life cycle

Category	C-REF	ECC-REF	FA-PEF	FA-PVAF	GGBFS-PVAF	FA-PVAF-BF	FA-PPF
Human health/DALYs	9.20	5.71	4.27	4.51	4.72	3.30	2.80
Normalized result /%	100.0	62.1	46.4	49.0	51.3	35.9	30.4
Ecosystems damage/species.year	$2.20 \times 10^{-2}$	$1.36 \times 10^{-2}$	$7.99 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-2}$	$1.07 \times 10^{-2}$	$7.94 \times 10^{-3}$	$6.70 \times 10^{-3}$
Normalized result /%	100.0	61.9	36.3	48.7	48.7	36.1	30.5
Resources damage / \$	$4.36 \times 10^5$	$2.53 \times 10^5$	$1.48 \times 10^5$	$2.26 \times 10^5$	$2.29 \times 10^5$	$1.14 \times 10^5$	$1.26 \times 10^5$
Normalized result /%	100.0	58.0	33.9	51.8	52.5	26.1	28.9

为进一步降低生命周期的环境损害,未来研究仍需从 ECC 材料微观力学理论入手,通过复掺 SCM 减少水泥用量,控制基体的断裂韧性以及改善其纤维与基体间黏结,从而更有效地限制裂缝的扩展,进一步提高其耐久性,延长 ECC 面层的使用寿命。此外,也要利用多尺度复掺的原理,尽量提升环保性表现好的 BF 和 PPF 掺量,减少 PEF 和 PVAF 的使用。

## 4 成本分析

经过对上海周边市场和工厂的调研,得到截至 2023 年各原材料的价格,汇总结果如表 7 所示。另外,上海本地的货运价格为 800/t。本文采用综合单价法对各 ECC 面层的造价进行了分析,结果如表 8 所示。值得注意的是 FA-PEF 在原材料阶段的价格最高,甚至是 C-REF 的两倍,这主要是因为 PEF 单价过高(见表 7),另外,三种高 PVAF 掺量的 ECC(ECC-REF、FA-PVAF 和 GGBFS-PVAF)的原材料价格与 C-REF 相比也不占优势。而 FA-PVAF-BF 和 FA-PPF 的原材料价格远低于 C-REF,分别只占其原材料成本的 69.2% 和 24.2%。可见降低 ECC 面层成本的关键是选用低成本的纤维。另外,在 40 年的使用寿命内,C-REF 的重建使其成本几乎翻了一倍。相反,不同的 ECC 面层因其超长的使用寿命均体现出明显的成本优势,ECC 面层在生命周期内的成本只占 C-REF 的 9.6% ~ 63.1%。

表7 参照混凝土和 ECC 面层的原材料市场价格

Table 7 Market price of raw materials for C-REF and ECC overlay

Material	Price/( \$ · t <sup>-1</sup> )	Material	Price/( \$ · t <sup>-1</sup> )	Material	Price/( \$ · t <sup>-1</sup> )
OPC	75	PEF	23 012	HPMC	6 400
FA	36	PVAF	10 629	C30	69
GGBFS	34	PPF	3 528	Epoxy resin	2 008
SCS	22	BF	4 940	Diesel	1 053
Water	0.8	SP	7 100		

注:用电成本为 0.07 \$ · kWh<sup>-1</sup>。

表8 参照混凝土和 ECC 面层的成本比较

Table 8 Cost comparison of C-REF and ECC overlay

Stage	C-REF	ECC-REF	FA-PEF	FA-PVAF	GGBFS-PVAF	FA-PVAF-BF	FA-PPF
Raw material price / \$	$1.05 \times 10^6$	$1.07 \times 10^6$	$2.11 \times 10^6$	$1.06 \times 10^6$	$1.04 \times 10^6$	$7.27 \times 10^5$	$2.54 \times 10^5$
Life cycle price / \$	$3.47 \times 10^6$	$1.15 \times 10^6$	$2.19 \times 10^6$	$1.14 \times 10^6$	$1.12 \times 10^6$	$8.07 \times 10^5$	$3.34 \times 10^5$

## 5 结论

1) 各 ECC 面层和 C30 混凝土面层的环境影响都集中在原材料获取阶段。在此阶段,ECC-REF 的 GWP



是 C-REF 的 1.5 倍。高水泥和高 PVAF 含量是 ECC-REF GWP 高的主要原因,水泥和 PVAF 的 GWP 之和占原材料获取阶段 GWP 的 94.8%。由于 PEF 对 GWP 的影响小于 PVAF,FA-PEF 的 GWP 与 ECC-REF 相比减少了 19%。此外,粉煤灰、矿渣、PPF 和 BF 的加入能大幅降低 ECC 面层的 GWP,特别是 FA-PVAF-BF 和 FA-PPF,其 GWP 分别只占 ECC-REF 的 60.6% 和 51.5%。终点损害评价结果表现出和 GWP 结果相似规律。

2) 在生命周期内(40 年使用寿命),由于 ECC 路面具有维护率低的优点,各 ECC 面层的 GWP 和终点损害都远小于 C-REF。其中,ECC-REF 面层的 GWP 只占 C-REF 的 60.6%,人类健康、生态系统和资源损害分别只占 C-REF 的 62.1%、61.9%、58.0%。在成本方面,虽然 ECC 面层在短期内不占优势,但在后期由于其超长的使用寿命而体现出明显的成本优势,各 ECC 面层在生命周期内的成本只占 C-REF 的 9.6% ~ 63.1%。

3) 从长期来看,在路面面层领域 ECC 材料是一种比普通混凝土更绿色和经济的材料。在双碳政策的背景下,ECC 材料值得大力推广。

### 参 考 文 献

- [1] SUN Y, ZHANG X B, REN G Y, et al. Contribution of urbanization to warming in China[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(7): 706-709.
- [2] AO Z W, FEI R L, JIANG H W, et al. How can China achieve its goal of peaking carbon emissions at minimal cost? A research perspective from shadow price and optimal allocation of carbon emissions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325: 116458.
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[J]. *中国统计*, 2023(3): 12-29.  
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of the People's Republic of China 2022 [J]. *China Statistics*, 2023(3): 12-29 (in Chinese).
- [4] KHAKSAR E, ABBASNEJAD T, ESMAEILI A, et al. The effect of green supply chain management practices on environmental performance and competitive advantage: a case study of the cement industry[J]. *Technological and Economic Development of Economy*, 2015, 22(2): 293-308.
- [5] SAMAD S, SHAH A. Role of binary cement including supplementary cementitious material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: a critical review[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017, 6(2): 663-674.
- [6] LI V C. Advances in ECC research[J]. *ACI Special Publications*, 2002, 206: 373-400.
- [7] ŞAHMARAN M, LI V C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(11): 1033-1043.
- [8] ZHANG J, JU X C. Investigation on stress-crack opening relationship of engineered cementitious composites using inverse approach[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(8): 903-912.
- [9] WANG S, LI V C. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash[J]. *ACI Materials Journal*, 2007, 104(3): 233.
- [10] SAID S H, RAZAK H A. The effect of synthetic polyethylene fiber on the strain hardening behavior of engineered cementitious composite (ECC) [J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 447-457.
- [11] CHEN Z T, YANG Y Z, YAO Y. Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag[J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 500-508.
- [12] ÖZKAN Ş, DEMİR F. The hybrid effects of PVA fiber and basalt fiber on mechanical performance of cost effective hybrid cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120564.
- [13] TAN G J, ZHU Z Q, WANG W S, et al. A fractal-based approach for cracking characterization and whole process prediction exploration of PP fiber reinforced ECC containing sustainable ingredients[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 126015.
- [14] WANG Q N, BANTHIA N, SUN W, et al. Water permeability of eco-friendly ductile cementitious composites (EDCC) under an applied compressive stress[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 107: 103500.
- [15] LIU H Z, ZHANG Q, GU C S, et al. Influence of micro-cracking on the permeability of engineered cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 72: 104-113.
- [16] QIAN S Z, LI V C, ZHANG H, et al. Life cycle analysis of pavement overlays made with engineered cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1): 78-88.
- [17] PRANAV S, LAHOTI M, SHAN X, et al. Economic input-output LCA of precast corundum-blended ECC overlay pavement[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 184: 106385.
- [18] VAN DEN HEEDE P, DE BELIE N, PITTAU F, et al. Life cycle assessment of self-healing engineered cementitious composite (SH-ECC) used for the rehabilitation of bridges[C]. *CRC Press*, 2019.
- [19] VAN DEN HEEDE P, MIGNON A, HABERT G, et al. Cradle-to-gate life cycle assessment of self-healing engineered cementitious composite with in-house developed (semi-) synthetic superabsorbent polymers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 94: 166-180.

- [20] SMITH K D , YU H T , PESHKIN D G. Portland cement concrete overlays: state of the technology synthesis [R]. United States. Federal Highway Administration. Office of Acquisition Management , 2002.
- [21] AKBAR A , LIEW K M. Multicriteria performance evaluation of fiber-reinforced cement composites: an environmental perspective [J]. Composites Part B: Engineering , 2021 , 218: 108937.
- [22] JUNGBLUTH N , BAUER C , DONES R , et al. Life cycle assessment for emerging technologies: case studies for photovoltaic and wind power [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment , 2005 , 10( 1) : 24-34.
- [23] 毛朝国. 水泥砼路面加铺方法对比分析 [J]. 交通标准化 , 2011 , 39( 1) : 128-132.  
MAO C G. Comparison analysis of overlaying method for cement concrete pavement [J]. Communications Standardization , 2011 , 39( 1) : 128-132 ( in Chinese) .
- [24] 李肖燕. 基于 LCA 的水泥路面与沥青路面环境影响评价 [D]. 南京: 东南大学 , 2015.  
LI X Y. Environmental impact assessment of cement pavement and asphalt pavement based on LCA [D]. Nanjing: Southeast University , 2015 ( in Chinese) .
- [25] 查蓉昕. 国产 ECC 路面材料耐久性研究及环境影响评价 [D]. 南京: 东南大学 , 2016.  
ZHA R X. Durability study and environmental impact assessment of domestic ECC pavement materials [D]. Nanjing: Southeast University , 2016 ( in Chinese) .
- [26] HUIJBREGTS M A , STEINMANN Z J , ELSHOUT P M , et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment , 2017 , 22: 138-147.
- [27] 张智慧, 王媛, 柴立和, 等. 城市垃圾与污水污泥能源化处置方案对比: 基于两种生命周期影响评价方法 [J]. 资源科学 , 2022 , 44( 4) : 860-870.  
ZHANG Z H , WANG Y , CHAI L H , et al. Comparison of energy-based disposal schemes for municipal solid waste and sewage sludge: based on two life cycle assessment methods [J]. Resources Science , 2022 , 44( 4) : 860-870 ( in Chinese) .
- [28] RADWAN M K H , ONN C C , MO K H , et al. Sustainable ternary cement blends with high-volume ground granulated blast furnace slag-fly ash [J]. Environment , Development and Sustainability , 2022 , 24( 4) : 4751-4785.