

基于生命周期评价的UHPC碳排放控制潜力评估

丁超^{1,2}, 贾子杰¹, 王振华^{1,2}, 丁玉贤^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 包头 014010; 2. 内蒙古自治区高校智能建造与运维工程研究中心, 包头 014010)

摘要:近年来,超高性能混凝土(UHPC)得到了推广应用,但在UHPC生产过程中超量水泥消耗以及UHPC自身耐久性强、寿命长的特点,对UHPC的碳排放水平认识尚不清楚。因此,研究采用生命周期评价(LCA)方法构建了UHPC碳排放定量分析模型,对比分析钢-UHPC桥面板与常规钢-混桥面板结构在全生命周期内的碳排放。结果表明:虽然生产阶段UHPC的碳排放量约1 245.84 kg CO₂eq/m³,是普通混凝土的1.58倍,但从性能上来说,UHPC碳强度是普通混凝土的62.25%,是一种更绿色的建材;在整个生命周期内,与常规钢-混桥面板相比,钢-UHPC桥面板的年均碳排放量下降了35.76%,具有巨大的碳减排潜力,有助于基础设施的可持续发展;钢-UHPC桥面板方案具有工程比选优势,经济性合理,同时其单位产值碳排放为0.89 t CO₂eq/万元,是常规钢-混桥面板的86.41%,具有更好的减碳效果。研究对结果的可靠性和碳减排措施进行了讨论,最后提出了有待进一步研究的内容。

关键词:超高性能混凝土; 钢筋混凝土; 生命周期评价; 碳排放; 成本分析; 桥面板

中图分类号: X322; F426

文献标志码: A

文章编号: 1001-1625(2023)04-1242-10

DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2023.04.016

UHPC Carbon Emission Control Potential Based on Life Cycle Assessment

DING Chao^{1,2}, JIA Zijie¹, WANG Zhenhua^{1,2}, DING Yuxian^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Intelligent Construction and Operation Engineering Research Center at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China)

Abstract: In recent years, ultra-high performance concrete (UHPC) has been widely used. However, due to excessive cement consumption in the production process of UHPC, the solid durability and long life of UHPC, the level of carbon emission from UHPC is not yet well understood. Therefore, the life cycle assessment (LCA) method was used to build a quantitative UHPC emission analysis model to compare and analyze the carbon emissions in the whole life cycle between steel-UHPC bridge deck and conventional steel-concrete bridge deck structure. The results show that although the carbon emission of UHPC in the production stage is about 1 245.84 kg CO₂eq/m³, which is 1.58 times that of the ordinary concrete, in terms of performance, the carbon strength of UHPC is 62.25% of the ordinary concrete, so UHPC is a greener building material. Over the entire life cycle, the average annual carbon emissions of steel-UHPC bridge decks decrease by 35.76% than conventional steel-mixed bridge deck, offering significant carbon reduction potential and contributing to the sustainability of infrastructure development. The steel-UHPC bridge deck scheme has engineering comparison advantages and excellent economy, and its carbon emission per unit output value is 0.89 t CO₂eq/10³ yuan, which is 86.41% of that of the conventional steel-mixed bridge deck and has a better carbon reduction effect. The reliability of the results and further emission reduction measures are discussed, and finally, the contents to be further studied are put forward.

Key words: ultra-high performance concrete; reinforced concrete; life cycle assessment; carbon emission; cost analysis; bridge deck

0 引 言

建筑业碳排放量占全球温室气体排放量的近1/3,占全球能源消耗的近40%^[1],在节能降碳的大背景

收稿日期:2022-11-28;修订日期:2022-12-26

作者简介:丁超(1984—),男,博士,副教授。主要从事资源与环境经济、绿色及可持续发展的研究。E-mail:dckinger@imust.edu.cn

通信作者:王振华,讲师。E-mail:lanseman@imust.edu.cn

下,降低建筑行业碳排放显得尤为重要。而混凝土作为最主要的建筑工程材料,全球混凝土生产造成的碳排放量约占全球碳排放总量的5%^[2],混凝土行业蕴含着巨大的碳减排潜力。目前,减少混凝土碳排放的方法主要采用低碳材料替代水泥或者使用新型材料^[3],如水泥窑的改进、替代燃料的使用等,已将水泥行业产生的CO₂排放量降低至原来的一半^[4]。然而低碳材料随混凝土用量的增加往往供不应求,导致其费用不断提高。因此,亟需开发新型混凝土材料应对建筑业高碳排放所造成的不良后果。

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)作为近三十年来最具有创新性的水泥基胶凝材料,以超高强度、极低的孔隙率和优异的耐久性而闻名^[5],是一种极具潜力的新型材料。UHPC具有其他混凝土所不具备的许多优异性能,其抗压强度大于120 MPa,持续开裂后抗拉强度大于5 MPa,平均孔径小于5 nm,颗粒堆积密实,抗冻融循环性能远超钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)^[6]。目前,对UHPC的研究集中在探索材料的物理性能方面,如:王德辉等^[7]介绍了UHPC基本力学性能、微观结构、耐久性以及在我国的研究与应用;Ding等^[8]研究生产超低水泥量UHPC的可能性和优势;贺耀北等^[9]研究表明UHPC蒸汽养护48 h即可达到与自然养护24 d相当的强度,有助于加快施工进度。UHPC在结构层面应用上的研究主要有:Almansour等^[10]介绍了UHPC主梁的初步设计和施工方法并说明UHPC可以在结构效率、耐久性和长期成本效益方面大大改善传统混凝土桥梁;周立兵等^[11]对钢-UHPC组合桥面铺装改造,表明钢-UHPC组合桥面铺装明显改善该桥钢桥面板的疲劳应力;赵秋等^[12]发现UHPC能大幅度增加钢桥面板的刚度,减少发生疲劳开裂的概率。但是,目前对UHPC环境效益的研究甚少。以碳排放评估来说,因为UHPC具有极低的水灰比和最紧密的微观结构,在制备过程中剔除了粗骨料,因此每生产1 m³ UHPC需要800~1 100 kg水泥,是普通混凝土水泥用量的3~4倍,而水泥是高能耗和高碳排放的建筑材料,因此就UHPC的生产过程来说,其碳排放水平很可能高于RC,这是推广UHPC需要解决的一个问题。但是,UHPC的高性能可以减少特定施工工程所需要的混凝土体积,降低混凝土结构自重,补偿了由于强度提高而产生的部分CO₂增量^[13]。同时,UHPC具有寿命长、使用期维护少的特点,对建筑运营期的碳排放产生影响,这部分碳排放的变化应该核算到UHPC中去。因此在建筑业中,UHPC可能成为一种低碳材料的选择,在减少原材料消耗、降低能耗和CO₂排放方面具有潜力,也可能成为更加环保的替代方案,但需要对其碳排放水平进行准确核算。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)法是一种可以对产品的输入和输出以及潜在的环境影响因素进行汇算和评估的方法。基于此,研究采用LCA法,以UHPC为研究对象,RC作为参照,系统地评估其全生命周期碳排放量,并以本地大桥的桥面结构为例,评估UHPC的碳排放控制潜力,为今后UHPC材料的选择与评估提供支撑。

1 UHPC碳排放定量分析模型

1.1 研究范围的确定

本文依据ISO 14040和ISO 14044中规定的LCA法细则建立UHPC定量分析模型。LCA涉及的范围广泛,时间、空间范围的跨度较大,因此,不同的研究会选择不同的系统边界来对产品进行环境影响分析。一般LCA的系统边界大致可分为四类^[14],以建筑为例,分别是:“从摇篮到坟墓”“从摇篮到大门”“从大门到坟墓”“从摇篮到摇篮”。生命周期系统边界如图1所示。

“从摇篮到坟墓”的LCA主要用于评估建筑物全过程的环境影响,包括原材料生产、运输、建设、维护和处置;“从摇篮到大门”的LCA分析时只考虑产品制造完成前的环境影响,例如混凝土出厂、运输、楼房建设;“从大门到坟墓”的LCA只考虑建筑投入使用及最终处置阶段的环境影响;“从摇篮到摇篮”的LCA除了评估建筑物全过程的环境影响外,还包括了对建筑废弃物的再生利用和形成新的材料。

本文主要对UHPC和RC进行全过程的碳排放量化分析,采用“从摇篮到坟墓”的LCA作为评价的系统边界,包括建材生产阶段、运输阶段、施工阶段、运营维护阶段和最终废弃阶段。UHPC和RC的全生命周期碳排放框架如图2所示。

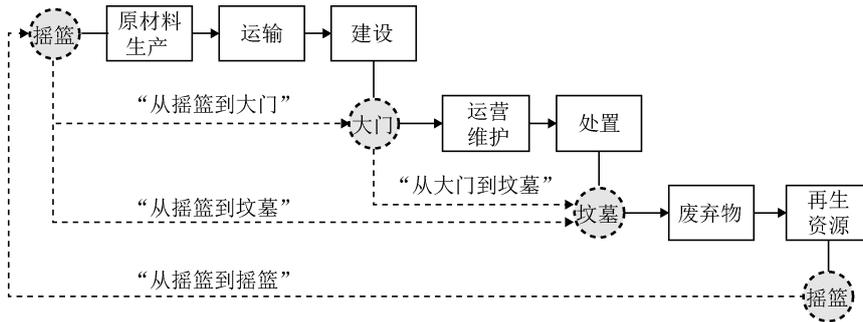
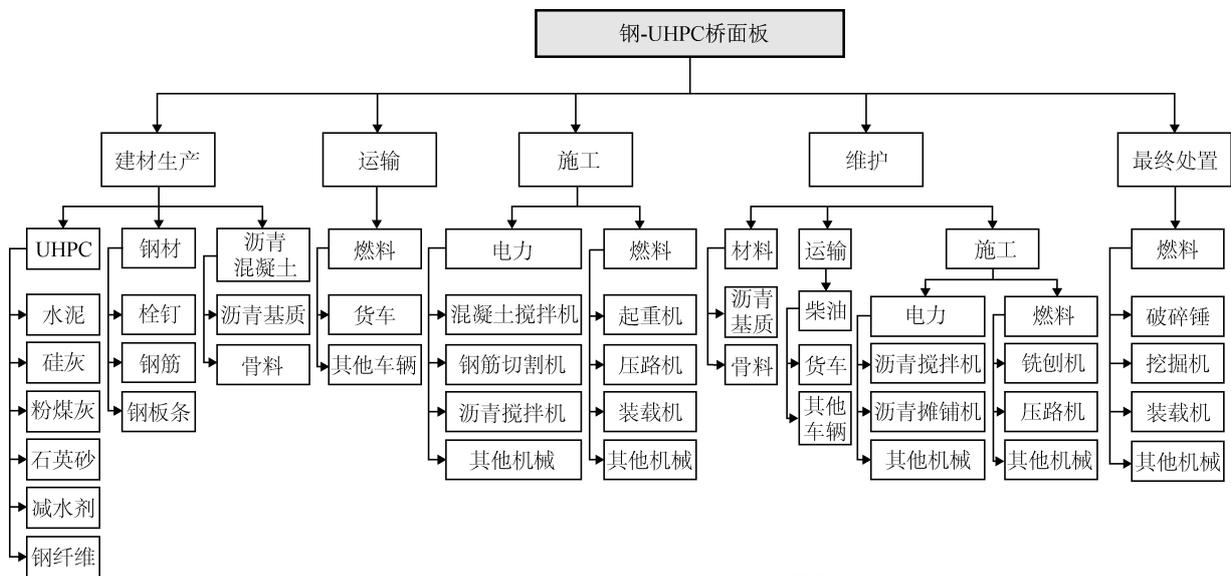
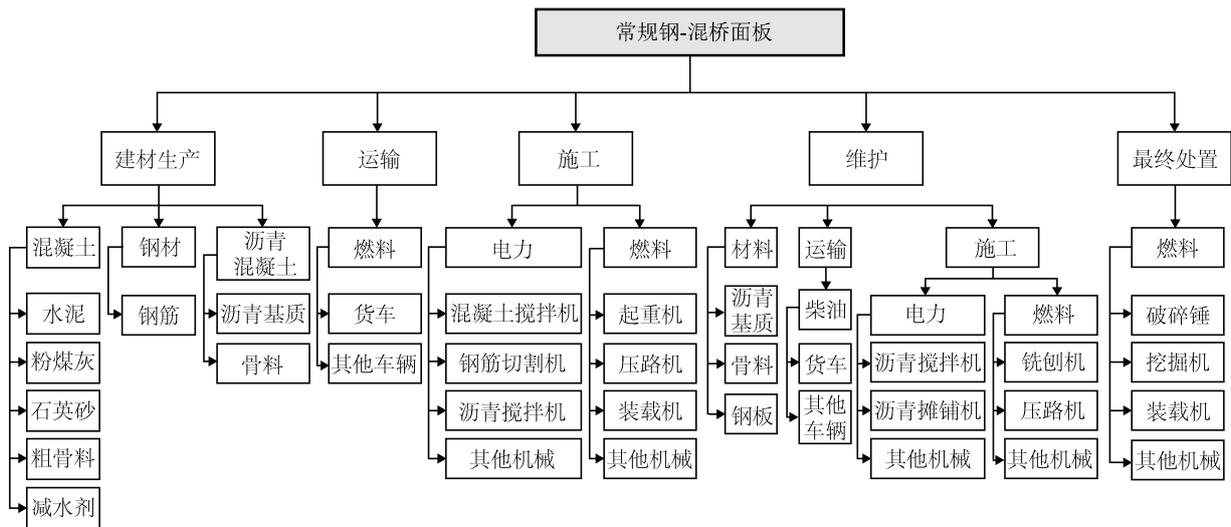


图1 生命周期系统边界

Fig. 1 Life cycle system boundary



(a) Life cycle carbon emission framework of steel-UHPC bridge deck



(b) Life cycle carbon emission framework of steel-concrete bridge deck

图2 两类结构全生命周期碳排放框架

Fig. 2 Life cycle carbon emission framework of two types of structures

1.2 功能单位与评价指标

在LCA研究中,确定研究范围还需进一步确定功能单位。功能单位是产品系统提供功能(使用价值)的度量单位,为比较两类产品功能上的差异,他们的功能单元必须相同,也就是要有统一的比较基础。本文采用 1 m^3 混凝土和生产单位强度的混凝土作为功能单位。

本研究主要测算了采用UHPC和不采用UHPC的两种桥面结构的碳排放量,这两类桥面结构在承载能力、桥梁面积和交通能力方面具有相同的功能和同等的性能。但是,参考各类文献资料和《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019),钢-UHPC桥面板使用年限设为 $120\text{ a}^{[15-17]}$,钢-混桥面板使用年限为 80 a 。因此,在使用年限不同的情况下,不能仅计算生命周期碳排放绝对量,在此将所计算的碳排放量均计算为单位碳排放量。如UHPC和RC的碳排放比较指标为 1 m^3 的碳排放量($\text{t CO}_2\text{eq}/\text{m}^3$),UHPC和RC的单位强度碳排放量($\text{t CO}_2\text{eq}/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$)以及两种结构的年均碳排放量($\text{t CO}_2\text{eq}/\text{a}$)。

1.3 碳排放因子

温室气体主要由 CO_2 、 CH_4 、 NO_2 、 SF_6 等组成。二氧化碳当量(CO_2eq)是衡量碳排放量的国际标准。联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)建议使用 100 a 的全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)清单指南(见表1)作为碳排放影响评估的环境影响指标,以单位 CO_2 排放量作为基准值,其他温室气体依次换算成 CO_2eq 。本文主要计算的 CO_2eq 元素是 CO_2 、 CH_4 和 NO_2 ,其他的温室气体输出含量过少,忽略不会影响结果准确性。

表1 GWP 100 a 当量系数
Table 1 100 a equivalent coefficient of GWP

Environment type	Equivalent unit	Greenhouse gas	Characterization factor
GWP	CO_2eq	CO_2	1
		CH_4	25
		NO_2	320
		CCl_4	1 400
		CFCl_3	4 000
		CF_4	6 300

由于我国尚未建立统一标准,本文的碳排放因子采用GaBi education database 2020版数据库。能源和设备的数据采用《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51336—2019)。

1.4 碳排放计算模型

根据排放因子法精准评估UHPC与RC结构的碳排放水平,单位年限全生命周期碳排放总量可按式(1)计算。

$$C_n = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5)}{n} \quad (1)$$

式中: C_n 是全生命周期年均碳排放总量, $\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{a}$, n 是使用年限; C_1 是建材生产阶段碳排放总量, $\text{kg CO}_2\text{eq}$; C_2 是建材运输阶段碳排放总量, $\text{kg CO}_2\text{eq}$; C_3 是施工阶段碳排放总量, $\text{kg CO}_2\text{eq}$; C_4 是维护阶段碳排放总量, $\text{kg CO}_2\text{eq}$; C_5 是最终处置阶段碳排放总量, $\text{kg CO}_2\text{eq}$ 。

1.4.1 建材生产碳排放计算模型

建材生产阶段计算边界即从建筑材料上游的原材料开采、能源生产开始一直到建筑材料出厂完成为止所产生的碳排放。建材生产阶段碳排放总量 C_1 可按式(2)计算。

$$C_1 = \sum_{i=1}^t Q_i \times \text{EF}_i^{(1)} \quad (2)$$

式中: Q_i 是第 i 种主要建筑材料的消耗量; $\text{EF}_i^{(1)}$ 是第 i 类主要建筑材料生产的碳排放因子; t 是材料种类数量。

1.4.2 建材运输碳排放计算模型

运输阶段的碳排放是将建材运输到施工现场所产生的碳排放。运输过程中产生的碳排放总量 C_2 可按式(3)计算。

$$C_2 = \sum_{i=1}^t Q_i \times S_i \times T_i \quad (3)$$

式中: Q_i 是第 i 种主要建筑材料的消耗量; S_i 是第 i 类主要建材的运输距离; T_i 是第 i 种运输设备下,单位质量、运输距离的碳排放因子。

1.4.3 施工碳排放计算模型

施工阶段的碳排放主要来源于大型机械使用过程中柴油、电力等能源的消耗,该过程碳排放的排放量与各工序工程量有关。施工阶段的碳排放总量 C_3 可按式(4)计算。

$$C_3 = \sum_{i=1}^m P_i \times EF_i^{(3)} \quad (4)$$

式中: P_i 是使用机械设备所消耗第 i 种能源总用量; $EF_i^{(3)}$ 是第 i 种能源的碳排放因子; m 是能源种类数量。

1.4.4 维护碳排放计算模型

维护阶段碳排放是维持结构正常使用所产生的碳排放。结构维护的碳排放总量 C_4 可按式(5)计算。

$$C_4 = C_{4,1} + C_{4,2} + C_{4,3} \quad (5)$$

式中: $C_{4,1}$ 是维修过程中与维修材料生产相关的碳排放量; $C_{4,2}$ 是维修过程中与维修材料运输相关的碳排放量; $C_{4,3}$ 是维修过程中施工产生的碳排放量。

1.4.5 最终处置碳排放计算模型

最终处置阶段是混凝土结构达到使用年限后对该构件进行处置所产生的碳排放。该阶段的碳排放主要来自施工机械的柴油等能源的消耗。混凝土、钢筋、沥青和其他拆除材料可运输至二次加工厂进行回收再利用。最终废弃阶段的碳排放总量 C_5 可按式(6)计算。

$$C_5 = \sum_{i=1}^m K_i \times EF_i^{(5)} \quad (6)$$

式中: k_i 是拆除过程消耗第 i 种能源总用量; $EF_i^{(5)}$ 是第 i 种燃料能源的碳排放因子。

2 工程实例计算结果分析

2.1 工程实例简介

钢-UHPC 桥面,即将钢梁与超薄层超高性能混凝土进行组合,形成新型组合桥面结构。本研究采用当地双塔五跨自锚式悬索桥为例,主桥长为 600 m,宽为 34.5 m。桥塔采用双柱式门形框架结构,塔高为 90 m。大桥设计双向 6 车道,行车速度为 80 km/h,设计荷载为城-A 级、双向 4 车道,抗震设防类别为 A 类,抗震措施设防烈度为 7 度,基本风速为 24.1 m/s。UHPC 层厚度为 210 mm,下部设置 10 mm 厚钢板条和 12 mm 厚钢面板,以栓钉相连,上部布置 50 mm 厚沥青玛蹄脂碎石混合物(stone mastic asphalt, SMA)混凝土作为磨耗层,两类桥面板横截面如图 3 所示。

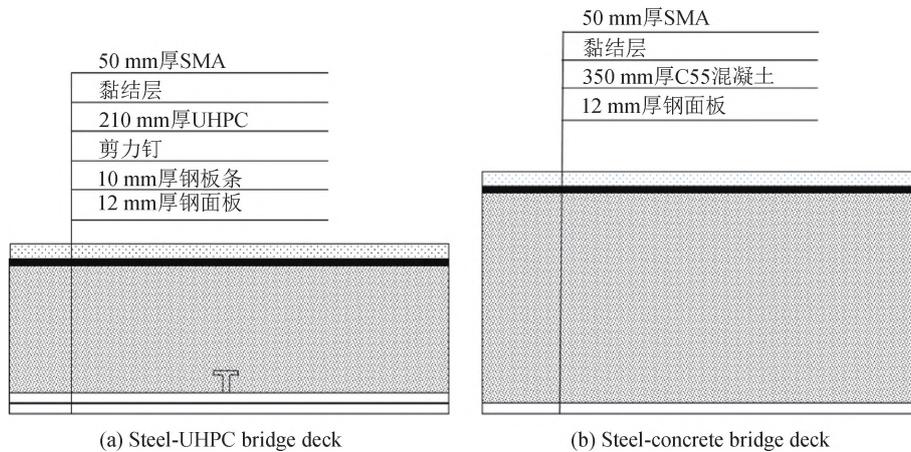


图3 两类桥面板横截面

Fig. 3 Two types of bridge deck cross section

钢-UHPC 桥面板的生产在预制混凝土厂进行,共 14 个尺寸结构,合计 500 多块,用卡车运至工地。当将材料运输到施工场地时,需要对运输距离做出假设。由于骨料需要去郊区开采,运输距离相对较长,设为

300 km,其他材料的运输距离均设为100 km。然后用两台移动式起重机将预制混凝土板定位并固定在桥台上完成拼装。假设桥面结构采用50 mm厚的SMA作磨耗层,以保护混凝土结构免受破坏。UHPC能改善桥面铺装的工作条件,降低桥面铺装出现车辙开裂、滑移脱层等病害的风险,大幅度提高了桥面局部刚度^[18],桥面铺装层受力均匀且降低沥青混凝土开裂风险,将有效减小局部车轮荷载作用下箱梁钢桥面的应力,从而大幅降低钢结构疲劳破坏的可能性^[19]。因此,两类桥面板维护时间频率做出以下基本假设。根据生命周期模型假设,钢-UHPC桥面板不均匀沉降、路面缝隙、孔洞塌陷等工程影响每隔20年时间维修一次(常规钢-混桥面板每8年一次),工程量相当于整个磨耗层的换装。

由于大桥长期处于恶劣环境影响(夏季高温、车辆超载、支撑条件)的作用下,桥面结构会逐渐出现开裂、混凝土剥落、大挠度变形等不同程度的危害,严重影响了结构的正常使用和承载性能。常规钢-混桥面需要对结构进行加固,修复损坏结构和提升结构性能,保证结构正常使用。假设常规钢混桥面采用粘贴钢板加固法进行结构加固。钢-UHPC桥面结构由于UHPC的高性能优势,其承载能力、刚度、稳定性等性能在使用年限内不会发生破坏,因此,在使用过程中无须加固。

混凝土的混合比例选用相似类型混凝土的代表配合比设计^[20],UHPC的抗压强度标准值为140 MPa,RC抗压强度标准值为55 MPa组成(见表2)。

表2 混凝土的混合比例及碳排放因子
Table 2 Mix ratio and carbon emission factor of concrete

Component	Mix ratio/(kg · m ⁻³)		Carbon emission factor/(kg CO ₂ eq · kg ⁻¹)
	UHPC	RC	
Portland cement(42.5R)	771.2	412	0.928
Silica fume	154.2	—	0.482
Fly ash	77.1	78	0.477
Quartz sand	848.4	709	0.003 4
Quartz powder	154.2	—	0.003 9
Plasticizer (1.5% volume fraction)	20.1	5.39	0.75
Steel fiber (2% volume fraction)	274.8	—	2.67
Water	180.5	151	0
Crushed stone	—	1 110	0.002 8
Steel reinforcement	—	179.78	1.98

基于生命周期碳排放计算模型,通过工程量清单(见表3)和碳排放因子分别计算钢-UHPC桥面板和常规钢-混桥面板在各个阶段产生的碳排放量,计算结果见表4。

表3 两种方案主要工程量对比
Table 3 Comparison of main quantities of two schemes

Type	Concrete content/m ³		Stud	Steel content/t		Modified asphalt content/t	Crushed stone content/t
	UHPC	C55		Steel reinforcement	Steel lathing		
Steel-UHPC bridge deck	3 660	—	150	335	812	900	12 552
Steel-concrete bridge deck	—	5 796	—	1 042	975	1 500	20 920

表4 两类桥面板全生命周期碳排放分析及占比
Table 4 Analysis and proportion of carbon emission in whole life cycle of two types of bridge deck

Main phase	Steel-UHPC carbon emission/(t CO ₂ eq)	Proportion of carbon emission/%	Steel-concrete carbon emission/(t CO ₂ eq)	Proportion of carbon emission/%	Carbon difference/(t CO ₂ eq)
Materials production	7 337.03	83.57	4 728.76	51.91	-2 608.27
Materials transportation	267.41	3.04	343.35	3.77	75.94
Construction	118.55	1.35	180.48	1.98	61.93
Maintenance	841.35	9.58	3 561.93	39.09	2 720.58
Final disposal	214.33	2.46	295.77	3.25	81.44
Total carbon emission	8 778.7	—	9 110.29	—	331.59
Carbon emissions per unit year	73.16	—	113.88	—	40.68

2.2 结果分析

2.2.1 两种结构下主要材料的碳排放对比分析

在两种结构下,主要材料的不同主要表现为混凝土的不同,因此首先单纯从混凝土材料碳排放水平进行分析。根据式(2)和表2混凝土配合比可得UHPC与RC 1 m³的碳排放量(见图4)。UHPC的单位碳排放约为1 245.84 kg CO₂eq/m³,RC的单位碳排放约为786.25 kg CO₂eq/m³,其每立方的碳排放是RC的1.58倍。其中,水泥和钢纤维在生产阶段中的碳排放分别约为715.67和400.5 kg CO₂eq/m³。这表明仅水泥和钢纤维生产造成的碳排放约为UHPC生产的90%,因此UHPC多耗水泥的生产方式使其在材料碳排放方面处于绝对劣势。

通过碳强度的指标作为衡量混凝土强度与碳排放之间的关系,即获得1 MPa的抗压强度所排放的CO₂量即为碳强度 C_i ,如式(7)所示。

$$C_i = C' / f_c \quad (7)$$

式中: C_i 是碳强度,kg CO₂eq/(m³·MPa); C' 是生产1 m³混凝土产生的碳排放,kg CO₂eq/m³; f_c 是混凝土28 d的抗压强度,MPa。

数据对比分析,尽管UHPC每立方米碳排放很高,但其碳强度为8.899 kg CO₂eq/(m³·MPa),仅是RC碳强度(14.295 kg CO₂eq/(m³·MPa))的62.25%,这表明每兆帕下UHPC产生的碳排放显著降低,与RC相比,UHPC是一种更绿色的建材。

2.2.2 全生命周期碳排放分析

通过表4和图5数据对比分析中得出在钢-UHPC桥面板的全生命周期中建材生产阶段是高碳排放的主要占比,其中UHPC碳排放贡献最多,而其他建材、机械设备、运输碳排放显著降低。与常规钢-混桥面板相比,钢-UHPC桥面板无论是总碳排放量(3.6%)还是年均碳排放(35.76%)均有所下降,其碳减排能力显著。

研究发现采用钢-UHPC桥面板,除建材生产阶段外,其余各阶段的碳排放总量和年均碳排放量均低于常规钢-混桥面板。尽管UHPC能够减少混凝土的使用量(36.9%),减轻自重,使用起重机消耗较少的能耗,但钢-UHPC桥面板在建材生产阶段的碳排放仍达到常规钢-混桥面板碳排放的1.55倍。造成建材生产阶段碳排放高的另一个原因是在建设过程中使用较多的钢材,钢材能够大幅度提高结构稳定性,从而将钢-UHPC桥面板使用寿命延长到100 a以上,但是在碳排放方面不占优势。

与常规钢-混桥面板相比,维护阶段具有巨大的碳减排潜力,与常规结构相比碳排放降低76.38%,足以抵消因UHPC生产而产生的大量碳排放。UHPC高性能带来的效益优势,例如:超长的使用年限以及较低的维护频率;此外,使用过程中不会因各种荷载影响而需要结构加固。从整个生命期排放总量上看,其碳排放水平比常规结构下降了3.6%,优势不大,但是从年均碳排放量来看,其碳排放水平比常规结构下降了35.76%,具有较大的碳排放优势。未来通过改善UHPC原材料选取,优化颗粒级配,减少材料内部空隙与微裂缝,提高耐久性,延长UHPC桥面板的使用年限,可进一步降低全生命周期碳排放影响。总的来说,考虑到长时间间隔的影响,UHPC的应用有助于基础设施的可持续

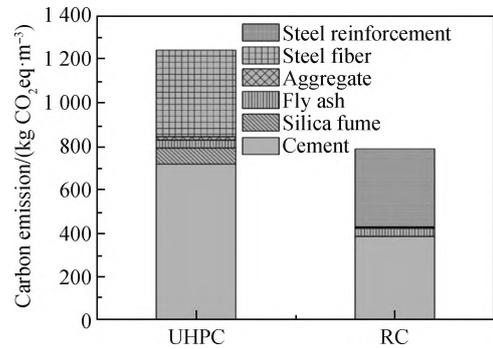


图4 两类混凝土碳排放测算

Fig. 4 Carbon emission measurement of two types of concrete

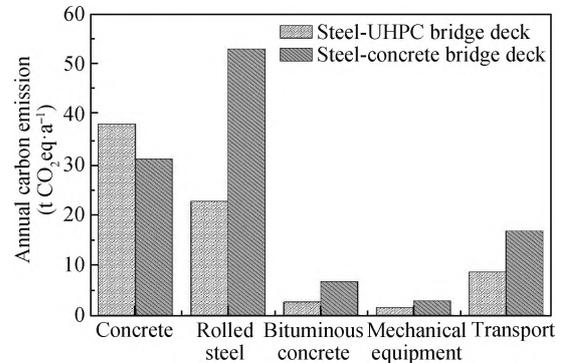


图5 两类桥面板单位年限碳排放对比分析

Fig. 5 Comparative analysis of annual carbon emissions of two types of bridge deck

性发展。

2.2.3 成本分析

根据相关厂家调查数据,采用常用的综合单价法对钢-UHPC桥面板、常规钢-混桥面板方案造价进行估算,结果如表5所示。

表5 两种方案主要成本对比

Table 5 Comparison of main construction costs of two schemes

Phase	Item	Comprehensive unit price ^[9]	Unit	Steel-UHPC			Steel-concrete		
				Work amount	Unit	Cost/million yuan	Work amount	Unit	Cost/million yuan
Construction	Steel	1.65	Million yuan/t	1 297	t	2 140.05	2 017	t	3 328.05
	UHPC	1.58	Million yuan/m ³	3 660	m ³	5 782.80	—	—	—
	C55	0.38	Million yuan/m ³	—	—	—	5 796	m ³	2 202.48
	SMA	0.321 4	Million yuan/m ³	1 035	m ³	332.65	1 035	m ³	332.65
	Sum					8 255.50			5 863.18
Operation and maintenance	SMA	332.65	time	5	time	1 663.25	9	time	2 993.84
Total						9 918.74	8 857.02		

Note: Quantities are given in Table 3.

根据计算得到钢-UHPC桥面板的建设造价约为8 255.5万元,常规钢-混桥面板的总造价约为5 863.18万元。由此可见,从工程造价上来说,钢-UHPC桥面板不占优势。但是,考虑到运营维护阶段的成本支出,钢-UHPC桥面板的总成本为9 918.74万元,常规钢-混桥面板的总成本为8 857.02万元,两种方案的差距已经缩小。按照两种结构寿命120 a和80 a分别计算年均成本,钢-UHPC桥面板为82.66万元/a,常规钢-混桥面板为110.71万元/a。由此可以看出,钢-UHPC桥面板方案具有工程比选价值,经济性合理。

根据表4和表5计算单位碳排放成本可以发现,常规钢-混桥面板为1.03 t CO₂eq/万元,钢-UHPC桥面板为0.89 t CO₂eq/万元,为常规钢-混桥面板的86.41%,单位产值碳排放量降低约13.95%。由此可见,使用UHPC的钢-UHPC桥面板结构具有更好的减碳效果。

3 讨论

3.1 本研究与已有研究结果的异同

根据已有研究成果,如对某大桥钢-UHPC桥面板和传统正交异性板的分析^[21],从原材料制备、运输和施工阶段建立了“从摇篮到大门”的LCA模型。其研究表明,尽管钢-UHPC桥面板的UHPC、钢纤维和钢材都属于环境影响密度较高的材料,但“从摇篮到大门”阶段,钢-UHPC桥面结构的碳排放与能耗均低于传统正交异性板。但是,本研究进一步拓展了LCA的测算范围,将其拓展到“从摇篮到坟墓”阶段,可以发现,单“从摇篮到大门”阶段来说,钢-UHPC桥面板的碳排放对于常规钢-混桥面板是不占优势的,甚至还高于常规钢-混桥面板,主要原因是高碳排的水泥材料用量很大,节省的混凝土量不足以弥补碳排放的增加,因此仅“从摇篮到大门”阶段进行碳排放测算未必能准确估算应用UHPC结构的碳排放水平。但是,如果将测算周期拓展到“从摇篮到坟墓”阶段,具有UHPC高性能优势的钢-UHPC桥面结构的碳排放水平大幅降低。

3.2 基于碳排放视角的UHPC应用建议

钢-UHPC桥面板的碳排放总量略低于常规钢-混桥面板,尽管在建材生产阶段产生的碳排放略高于常规钢-混桥面板,其他几个阶段的碳排放均低于常规钢-混桥面板,并考虑到其超长的使用寿命,钢-UHPC桥面板的单位年限碳排放以及单位造价单位年限碳排放均低于常规钢-混桥面板。整体来看,UHPC的环境效益优于RC。UHPC的超高性能不仅在使用年限中不需要额外的结构加固,而且还能够延长沥青混凝土使用寿命,减少维护频率,降低自重。但是,尽管对UHPC进行了诸多研究,但对UHPC的耐久性还未完全了解,在以后的研究中可以通过设置恶劣环境条件突出UHPC的材料性能,UHPC在减少环境影响方面的效益可能将进一步加强。综合考虑,在碳排放视角下UHPC是值得推广的。

3.3 进一步降低碳排放水平的措施

UHPC 中水泥是造成高碳排放的主要原因,一方面可以通过掺加低碳材料替代水泥(如粉煤灰、高炉矿渣等)减少水泥的使用量来降低 UHPC 的碳排放,另一方面使用低 C_3S 和高 C_2S 的低碳水泥来节省石灰石原料从而实现碳减排。值得注意的是,要在降低碳排放的同时要保证 UHPC 超高的强度和优异的耐久性,综合评价 UHPC 混合料的环境影响与性能优势。在运输方面,除了选择材料的品质还要做最优的运输规划,将运输产生的碳排放降至最低。利用好 UHPC 废弃物,运输到二次加工厂中,将其作为再生混凝土的原材料,来减少对天然骨料的需求量。合理利用 UHPC 超高的机械性能,通过设计可持续性的结构尺度,极大地减少了混凝土使用量,从而能够有效地降低碳排放量。设计方最大限度地利用好 UHPC 的超高强度,通过设计可持续性建筑结构(减少冗余的结构尺寸),可以极大地节省混凝土量,从而实现碳减排。

4 结 论

本研究基于 LCA 方法分析 UHPC 碳减排能力和减碳效果,对钢-UHPC 桥面板和常规钢-混桥面板结构进行了碳排放量化分析,主要结论如下:

1) UHPC 的碳排放约 $1\ 245.84\ \text{kg}\ \text{CO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,是 RC 的 1.58 倍,其中水泥和钢纤维是造成碳排放的主要原因。而 UHPC 碳强度仅为 RC 的 62.25%。因此,从材料碳排量上来说,UHPC 多耗水泥的生产方式决定了它碳排的极大劣势,但是从性能上来说,每兆帕下 UHPC 产生的碳排放显著降低,UHPC 是一种绿色建材。

2) 在建材生产阶段,钢-UHPC 桥面板的碳排放是常规钢-混桥面板碳排放的 1.55 倍,在维护阶段降低了 76.38%。虽然从整个生命期排放总量上看,钢-UHPC 桥面板的碳排放总量下降不大,但是年均碳排放量下降了 35.76%,具有巨大的碳减排潜力,UHPC 的应用有助于基础设施的可持续性发展。

3) 按照两种结构的使用寿命计算年均成本,钢-UHPC 桥面板为 82.66 万元/a,常规钢-混桥面板为 110.71 万元/a,钢-UHPC 桥面板方案具有工程比选价值,经济性合理。同时,钢-UHPC 桥面板结构的单位产值碳排为 $0.89\ \text{t}\ \text{CO}_2\text{eq}/\text{万元}$,是常规钢-混桥面板的 86.41%,具有更好的减碳效果。

4) 从性能上来说,UHPC 是一种更为绿色的建材,从碳排放视角下综合考虑,UHPC 值得大力推广。

除以上结论外,还存在有待进一步研究解决的内容。如在建筑层面,可以考虑对不同掺合料的 UHPC 与 RC 在全生命周期范围内进行碳排放评估,综合评价各类掺加低碳材料的 UHPC 结构的环境影响。

参 考 文 献

- [1] GAN V J L, CHENG J C P, LO I M C. A comprehensive approach to mitigation of embodied carbon in reinforced concrete buildings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 582-597.
- [2] 章玉容. 粉煤灰混凝土生命周期环境影响综合评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
ZHANG Y R. Integrated life cycle environmental impact assessment of fly ash concrete[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016 (in Chinese).
- [3] WANG J J, WANG Y F, SUN Y W, et al. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1162-1174.
- [4] RANDL N, STEINER T, OFNER S, et al. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 67: 373-378.
- [5] 张吉松. 低水泥用量超高性能混凝土性能和可持续结构设计研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
ZHANG J S. Research on the properties assessment and sustainable structural design of ultra-high performance concrete with low cement content[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018 (in Chinese).
- [6] 谢瑞峰, 陆林军, 乔丕忠. 冻融循环作用下超高性能混凝土界面过渡区微观力学性能劣化研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(10): 1092-1102.
XIE R F, LU L J, QIAO P Z. Investigation on degradation of micromechanical properties of interfacial transition zone of ultra-high performance concrete under freeze-thaw cycles[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2018, 48(10): 1092-1102 (in Chinese).
- [7] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(1): 141-149.
WANG D H, SHI C J, WU L M. Research and applications of ultra-high performance concrete (UHPC) in China[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(1): 141-149 (in Chinese).
- [8] DING M X, YU R, FENG Y, et al. Possibility and advantages of producing an ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-low cement

- content[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 122023.
- [9] 贺耀北, 邵旭东, 张欣, 等. 钢-UHPC组合梁自锚式悬索桥力学性能与经济分析[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(1): 51-57.
HE Y B, SHAO X D, ZHANG X, et al. Mechanical performance and economic analysis of self-anchored suspension bridge with steel-UHPC composite girder[J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(1): 51-57 (in Chinese).
- [10] ALMANSOUR H, LOUNIS Z. Innovative design approach of precast-prestressed girder bridges using ultra high performance concrete[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2010, 37(4): 511-521.
- [11] 周立兵, 张刚, 王敏. 军山长江大桥钢-UHPC组合桥面改造效果研究[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(2): 49-54.
ZHOU L B, ZHANG G, WANG M. Study of implementation effect of steel-UHPC composite bridge deck on Junshan Changjiang River Bridge[J]. *Bridge Construction*, 2020, 50(2): 49-54 (in Chinese).
- [12] 赵秋, 郭杨斌, 陈孔生, 等. 超高性能混凝土铺装层对钢桥面板疲劳性能影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2019, 35(6): 961-969.
ZHAO Q, GUO Y B, CHEN K S, et al. Influence of ultra-high performance concrete pavement on fatigue performance of steel bridge deck[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2019, 35(6): 961-969 (in Chinese).
- [13] AL PACHECO-TORGAL F C L F. *Eco-efficient construction and building materials*[M]. London: Woodhead Publishing, 2018.
- [14] 方恺. 环境足迹的核算与整合框架——基于生命周期评价的视角[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7228-7234.
FANG K. A framework for quantification and integration of environmental footprints: from the perspective of life cycle assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7228-7234 (in Chinese).
- [15] 叶仲韬, 罗纯坤, 郭翠翠. 基于实测应变监测的斜拉桥钢桥面板加固性能评估[J]. *桥梁建设*, 2022, 52(1): 64-71.
YE Z T, LUO C K, GUO C C. Strengthening effect assessment of steel deck of cable-stayed bridge based on measured strain[J]. *Bridge Construction*, 2022, 52(1): 64-71 (in Chinese).
- [16] 邓露, 鲜亚兰, 邵旭东. 轻型钢-UHPC组合桥面板的疲劳可靠性评估[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(3): 711-717.
DENG L, XIAN Y L, SHAO X D. Fatigue reliability assessment of light-weighted steel-UHPC composite bridge deck[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(3): 711-717 (in Chinese).
- [17] 秦世强, 黄春雷, 张佳斌, 等. 基于应力监测的钢-UHPC组合桥面和环氧沥青钢桥面板疲劳性能对比[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(1): 61-70.
QIN S Q, HUANG C L, ZHANG J B, et al. Comparison of fatigue performance between steel-UHPC composite deck and epoxy asphalt steel deck based on stress monitoring[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(1): 61-70 (in Chinese).
- [18] 邵旭东, 李玉祺, 廖子南, 等. UHPC华夫桥面板抗弯性能试验及有限元分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(3): 52-63.
SHAO X D, LI Y Q, LIAO Z N, et al. Test and finite element analysis on bending performance of UHPC Waffle deck panel[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(3): 52-63 (in Chinese).
- [19] 曹君辉, 樊伟, 李立峰, 等. 基于UHPC的高性能桥梁结构研究与应用[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(11): 1-32.
CAO J H, FAN W, LI L F, et al. Research and application of UHPC-based high performance bridge structures[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(11): 1-32 (in Chinese).
- [20] ZHANG Y, ZHU Y P, YESETA M, et al. Flexural behaviors and capacity prediction on damaged reinforcement concrete (RC) bridge deck strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215: 347-359.
- [21] 谭健. 钢-UHPC轻型组合桥面结构生命周期环境影响评价[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
TAN J. Life cycle assessment on environmental performance of the steel-UHPC lightweight composite bridge structures[D]. Changsha: Hunan University, 2017 (in Chinese).