

# 基于全生命周期评价的掺石灰石粉再生混凝土环境影响研究

李 刚, 郭晓潞, 佘安明\*

(同济大学 材料科学与工程学院 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘 要:** 用石灰石粉部分取代水泥制备了再生混凝土(LP-RAC), 并基于生命周期评价(LCA)方法, 通过计算 LP-RAC 全生命周期(生产阶段、使用阶段、废弃阶段)产生的 9 种污染气体量(CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>、PM10、NMVOC)及其对 6 种环境影响类型[气候变化潜值(GWP)、环境酸化潜值(AP)、非生物资源消耗潜值(ADP)、富营养化潜值(EP)、可吸入无机物(RI)、光化学臭氧合成潜值(POFP)]的“贡献率”, 评价了 LP-RAC 全生命周期的环境影响。结果表明: LP-RAC 的生产阶段对 6 种环境影响类型的“贡献率”均最大; 在 LP-RAC 的生产阶段, 水泥生产环节对 GWP 和 RI 的“贡献率”最大, 直接排放环节对 AP、EP 和 POFP 的“贡献率”最大, 河砂开采环节对 ADP 的“贡献率”最大。

**关键词:** 石灰石粉; 再生混凝土; 生命周期评价; 环境影响

中图分类号: TU528.01 文献标识码: A doi:10.19761/j.1000-4637.2023.12.079.05

## Study on environmental impact of recycled concrete with limestone powder based on whole life cycle assessment

LI Gang, GUO Xiaolu, SHE Anming\*

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The recycled concrete(LP-RAC) was prepared by replacing some cement with limestone powder. Based on the life cycle assessment (LCA) method, the environmental impact of the whole life cycle (production stage, utilization stage, disposal stage) of LP-RAC was evaluated by calculating the amount of 9 types of polluting gases (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, PM10, NMVOC) and their "contribution rate" to 6 types of environmental impact [global warming potential(GWP), acidification potential(AP), abiotic depletion potential(ADP), eutrophication potential(EP), respirable inorganic material(RI), photochemical ozone formation potential (POFP)]. The results show that the production stage of LP-RAC has the highest "contribution rate" to the 6 types of environmental impact. In the production stage of LP-RAC, the cement production process has the highest "contribution rate" to GWP and RI, the direct emission process has the highest "contribution rate" to AP, EP and POFP, and the river sand mining process has the highest "contribution rate" to ADP.

**Keywords:** Limestone powder; Recycled concrete; Life cycle assessment(LCA); Environmental impact

## 0 引言

随着经济建设的快速发展, 石材的年开采量不断增大, 随之也产生了大量的石材副产物、废弃物。石灰石粉是石材开采过程中产生的主要废弃物之一<sup>[1]</sup>, 其颗粒较细, 粒径大多小于 75 μm, 适量掺入混凝土中可填充胶凝材料颗粒间的空隙, 从而起到优化胶凝体系颗粒级配, 提高混凝土基体和界面过

渡区强度的作用<sup>[2-4]</sup>。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, 以下简称 LCA)是一种环境管理和分析的有力工具, 能够从产品生命周期整个过程(从“摇篮”到“坟墓”)的角度来量化其资源消耗和环境排放, 同时对这些消耗和排放给自然资源、生态环境带来的影响做出客观评价<sup>[5-6]</sup>。近年来, 随着低碳环保意识的不断深入, LCA 已被广泛应用到了纺织、化工、建筑等领域<sup>[6-9]</sup>。

本文以废弃石灰石粉部分取代水泥制得的再

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3802001)。

生混凝土(以下简称 LP-RAC)为研究对象,借助相关数据库、环境排放标准等<sup>[10]</sup>确定 LP-RAC 全生命周期中的 9 种污染气体排放清单和 6 种环境影响类型参数,从而对 LP-RAC 的环境影响做出综合、系统的分析评价,获得定量结果,以便为 LP-RAC 节能减排措施的选取提供理论依据。

### 1 LP-RAC 的 LCA 方法

LCA 能够对产品全生命周期(原材料的获取、运输、生产、使用、废弃)的环境影响进行定量评估,同时对产品生命周期评价过程中输入、输出及其潜在的环境影响进行汇编和评价,形成 4 个相互联系、不断重复的步骤,分别是:目标与范围的确定、清单分析、环境影响评价、结果解释。

#### 1.1 目标与范围的确定

本文以 LP-RAC 为研究对象,根据前期研究成果<sup>[11]</sup>,确定了 LP-RAC 的配合比,见表 1。其中,再生粗骨料由上海某再生骨料厂提供,来源于废旧梁柱拆除,粒径为 5.0~31.5 mm,连续级配;胶凝材料为 P·II 52.5 级水泥(表观密度为 3 100 kg/m<sup>3</sup>)和硅灰;石灰石粉来源于某矿山石材加工厂的粉尘废弃物;细骨料为天然河砂;减水剂为粉末聚羧酸系高性能减水剂,减水率≥21%;水为自来水。为保证研究过程中计算结果的可比性和便捷性,研究中的功能单元取为 1 m<sup>3</sup> 的 LP-RAC。

表 1 LP-RAC 的配合比<sup>[11]</sup>

Table 1 Mix proportion of LP-RAC kg/m<sup>3</sup>

水泥	硅灰	石灰石粉	再生粗骨料	河砂	水	减水剂
485	49	186	884	755	128	3.15

本文以 LP-RAC 为评价目标,调研了其生产过程中的资源、能源消耗以及污染物排放,遵循从“摇篮”到“坟墓”的思路<sup>[12]</sup>,以原材料的获取为起点,LP-RAC 的废弃为终点,建立了如图 1 所示的系统边界,将 LP-RAC 的全生命周期分为了生产、使用和废弃 3 个阶段。

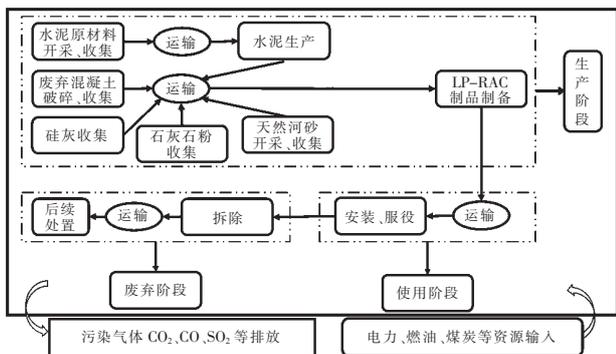


图 1 LP-RAC 的系统边界图

Figure 1 System boundary diagram of LP-RAC

### 1.2 清单创建与分析

根据 LCA 原理,清单内容包括计算 LP-RAC 全生命周期中污染气体的排放,如水泥、河砂、再生粗骨料生产过程中的污染气体排放、所有原材料运输至搅拌站所导致的污染气体排放等<sup>[13]</sup>,具体可根据原材料的运输距离、运输方式等进行计算。

本文 LP-RAC 的生产阶段包括原材料运输、水泥生产和 LP-RAC 制备,使用阶段包括 LP-RAC 制品的运输(从搅拌站运输至使用场地)、安装和服役,废弃阶段包括 LP-RAC 制品的拆除和废弃物运输(运往填埋场或再生骨料厂)<sup>[14]</sup>。表 2 为 LP-RAC 不同阶段的相关运输数据(根据本文所用原材料的实际来源以及上海地区混凝土生产、使用、废弃的运输距离近似估算)。在此基础上,选用中国生命周期基础数据库(以下简称 CLCD)和 Ecoinvent 数据库中的数据<sup>[8]</sup>,利用 eFootprint 软件计算得到 1 m<sup>3</sup> 的 LP-RAC 全生命周期中产生的 9 种污染气体(CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>、PM10、NMVOC)的排放量,见表 3。

表 2 LP-RAC 全生命周期中的相关运输数据

Table 2 Relevant transportation datas throughout the whole life cycle of LP-RAC

项目	运输起点	运输终点	运输距离/km	运输方式
生产阶段	水泥原材料开采地	水泥制造厂	100	
	水泥制造厂	搅拌站	300	
	河砂开采地	搅拌站	100	
	再生骨料厂	搅拌站	50	10 t
	石粉生产地	搅拌站	500	汽油
	硅灰生产地	搅拌站	500	货车
使用阶段	搅拌站	使用场地	50	
废弃阶段	使用场地	再生骨料厂或填埋场	50	

表 3 LP-RAC 全生命周期中的污染气体排放量

Table 3 Pollutant gas emissions during the whole life cycle of LP-RAC kg/m<sup>3</sup>

污染气体	生产阶段		使用阶段	废弃阶段
	水泥生产	运输和制备		
CO <sub>2</sub>	3.86×10 <sup>2</sup>	1.86×10 <sup>2</sup>	1.88×10 <sup>1</sup>	1.20×10 <sup>1</sup>
CO	2.74×10 <sup>-1</sup>	1.11	7.64×10 <sup>-2</sup>	7.36×10 <sup>-2</sup>
NO <sub>x</sub>	1.41×10 <sup>1</sup>	3.01	4.63×10 <sup>-1</sup>	1.97×10 <sup>-1</sup>
SO <sub>2</sub>	1.58	1.54×10 <sup>-1</sup>	1.54	9.18×10 <sup>-3</sup>
CH <sub>4</sub>	1.69×10 <sup>-1</sup>	5.81×10 <sup>-1</sup>	3.06×10 <sup>-2</sup>	3.84×10 <sup>-2</sup>
N <sub>2</sub> O	4.06×10 <sup>-3</sup>	7.70×10 <sup>-3</sup>	1.20×10 <sup>-3</sup>	5.02×10 <sup>-4</sup>
NH <sub>3</sub>	1.45×10 <sup>-2</sup>	2.71×10 <sup>-4</sup>	7.80×10 <sup>-5</sup>	1.68×10 <sup>-5</sup>
PM10	8.99×10 <sup>-2</sup>	7.92×10 <sup>-2</sup>	7.91×10 <sup>-3</sup>	5.23×10 <sup>-3</sup>
NMVOC	1.94×10 <sup>-1</sup>	9.64×10 <sup>-1</sup>	4.50×10 <sup>-1</sup>	4.85×10 <sup>-2</sup>

### 1.3 环境影响评价

环境影响评价指将清单数据分类特征化<sup>[15]</sup>,并采用不同环境影响类型来解释清单分析结果。本文采用 CML2001 的分类方法及当量评价模型<sup>[16-17]</sup>,选取如表 4 所示的 6 种环境影响类型参数来评价 LP-RAC 的环境影响<sup>[18]</sup>。

表 4 6 种环境影响类型

Table 4 6 types of environmental impact

环境影响类型	简称	单位
气候变化潜值	GWP	kg CO <sub>2</sub> eq
环境酸化潜值	AP	kg SO <sub>2</sub> eq
非生物资源消耗潜值	ADP	kg antimony eq
富营养化潜值	EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq
可吸入无机物	RI	kg PM <sub>2.5</sub> eq
光化学臭氧合成潜值	POFP	kg NMVOC eq

## 2 环境影响评价结果分析

用 eFootprint 软件完成 LP-RAC 全生命周期模型的搭建,并输入污染气体排放量数据,计算得到 LP-RAC 的 6 种环境影响类型参数,见表 5。

表 5 LP-RAC 的 LCA 计算结果

Table 5 LCA calculation results of LP-RAC

环境影响类型	计算结果	质量评估/‰
GWP	1.22×10 <sup>3</sup> kg CO <sub>2</sub> eq	12.51
AP	9.58 kg SO <sub>2</sub> eq	6.98
ADP	1.78×10 <sup>-3</sup> kg antimony eq	8.08
EP	8.22×10 <sup>-1</sup> kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	8.60
RI	1.66 kg PM <sub>2.5</sub> eq	6.71
POFP	2.73 kg NMVOC eq	11.36

图 2 为 LP-RAC 的生产、使用和废弃阶段对 6 种环境影响类型的“贡献率”(由 eFootprint 软件直接计算所得)。

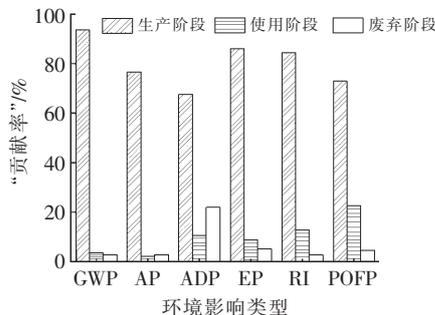


图 2 LP-RAC 不同阶段对环境影响类型的“贡献率”

Figure 2 "Contribution rate" of different stages of LP-RAC to environmental impact types

由图 2 可知,与 LP-RAC 的使用阶段和废弃阶段相比,LP-RAC 生产阶段所造成的环境排放对 GWP、AP、ADP、EP、RI、POFP 的“贡献率”均最大,分

别为 93.67%、76.66%、67.63%、86.15%、84.45%、72.96%,且在 6 种环境影响类型中,生产阶段对 GWP 的“贡献率”最大。与 LP-RAC 的生产阶段相比,LP-RAC 使用阶段和废弃阶段对 6 种环境影响类型的“贡献率”小很多,在 6 种环境影响类型中,使用阶段对 POFP 的“贡献率”最大,为 22.52%,废弃阶段对 ADP 的“贡献率”最大,为 21.91%。

表 6 为 LP-RAC 生产、使用和废弃阶段中的各环节对 6 种环境影响类型的“贡献率”。

表 6 不同环节对环境影响类型的“贡献率”

Table 6 "Contribution rate" of different links to environmental impact types

项目	GWP	AP	ADP	EP	RI	POFP
直接排放	16.75	38.08	—	47.84	32.85	39.94
水泥生产	60.62	31.85	5.28	27.76	37.52	20.99
生产阶段	4.48	3.05	57.82	4.74	3.15	8.34
再生粗骨料生产	11.70	3.59	4.48	5.75	10.79	3.65
电力使用	0.12	0.08	0.05	0.06	0.14	0.02
使用阶段	1.64	19.39	—	7.31	11.00	21.07
电力使用	1.17	0.84	0.50	0.60	1.45	0.22
燃油消耗	0.76	0.49	9.96	0.88	0.43	1.24
废弃阶段	1.08	1.54	—	3.13	1.72	1.81
燃油消耗	1.68	1.09	21.91	1.93	0.95	2.72

GWP 主要与 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等温室气体的排放量有关,温室气体排放量越多,GWP 值越大。由表 6 可知,在 LP-RAC 生产阶段的各环节中,对 GWP 产生主要贡献的是直接排放、水泥生产、再生粗骨料生产这 3 个环节,其中,水泥生产环节对 GWP 的“贡献率”最大,为 60.62%,这是由于水泥生料与熟料在粉磨时投入了大量电力而间接排放了 CO<sub>2</sub>,且生料煅烧时煤炭的燃烧以及碳酸钙的高温也会排放出 CO<sub>2</sub>,从而使水泥生产环节对 GWP 的“贡献率”较高。在 LP-RAC 使用阶段的各环节中,直接排放环节对 GWP 的“贡献率”最大,为 1.64%。在 LP-RAC 废弃阶段的各环节中,燃油消耗环节对 GWP 的“贡献率”最大,为 1.68%。综上,与使用阶段和废弃阶段相比,LP-RAC 生产阶段的各环节所造成的温室气体排放明显更多。

AP 主要与 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等气体的排放量有关,且二者成正比关系。由表 6 可知,LP-RAC 生产阶段和使用阶段的直接排放环节对 AP 的“贡献率”均较高,分别为 38.08%和 19.39%,且生产阶段的直接排放环节对 AP 的“贡献率”更高,这是因为生产阶段各种原材料的加工、运输均需消耗大量燃油资源,故

造成的直接排放更显著,而使用阶段的直接排放主要来自制品的装卸和运输消耗燃油,故其对AP的“贡献率”相对较小。此外,生产阶段的水泥生产环节对AP的“贡献率”也较大,为31.85%,一方面,这是由水泥熟料燃烧所致,另一方面,水泥生料和熟料的粉磨需投入电力,从而间接造成了酸性气体排放。与生产阶段和使用阶段相比,LP-RAC废弃阶段的各环节对环境酸化的影响明显小得多。

ADP主要与大气、水、土地、能源、矿产等非生物资源的消耗有关,非生物资源消耗越多,ADP值越大。由表6可知,LP-RAC生产阶段的河砂开采环节对ADP的“贡献率”最大,为57.82%,这是因为河砂在LP-RAC中的占比较大,从而造成了对非生物资源的大量消耗。相比而言,再生粗骨料生产环节对ADP的“贡献率”小得多,仅为4.48%。此外,LP-RAC使用阶段和废弃阶段的燃油消耗环节对ADP的“贡献率”也较大,二者的总“贡献率”为31.87%,仅次于生产阶段的河砂开采环节。

EP主要与 $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 等含氮气体的排放量有关。由表6可知,LP-RAC生产阶段的直接排放环节和水泥生产环节对EP的“贡献率”较高,分别为47.84%和27.76%,这主要是由于:①生产阶段各种原材料的运输造成了含氮气体的排放;②原材料生产时伴有一定量的工业废水排放,这也会在一定程度上影响EP值;③水泥生产环节的“两磨一烧”工艺对能源和电力的需求较大,间接导致了含氮气体的排放。

RI主要与可吸入颗粒物、 $\text{NO}_x$ 等气体的排放量相关。由表6可知,对RI“贡献率”较大的是LP-RAC生产阶段的直接排放环节和水泥生产环节。其中,水泥生产环节对RI的“贡献率”最大,其次是直接排放环节,二者的“贡献率”分别为37.52%、32.85%。水泥生产时的粉尘释放、煤炭和电力的消耗会造成颗粒物和燃料型 $\text{NO}_x$ 排放,原材料运输时的燃油消耗也会造成颗粒物排放,从而导致生产阶段的直接排放环节和水泥生产环节对RI的“贡献率”较高。另外,再生粗骨料生产环节对RI的“贡献率”为10.79%,这可能是由于废弃混凝土在破碎、筛分时造成了一定量的颗粒物排放。

POFP主要与 $\text{NO}_x$ 气体有关,而 $\text{NO}_x$ 可以作为 $\text{O}_3$ 的前体物质,并在特定条件下对大气层产生不利影响。由表6可知,LP-RAC生产阶段和使用阶段的直接排放环节对POFP的影响显著,“贡献率”分别为39.94%和21.07%,这主要与原材料的运输距离和运输量有关。此外,水泥生产环节对POFP的影响也较大,“贡献率”为20.99%,这主要与原材料运

输的燃油消耗和水泥煅烧有关。

### 3 结论

(1)基于LCA计算得到的LP-RAC的GWP、AP、ADP、EP、RI、POFP值分别为 $1.22 \times 10^3$  kg  $\text{CO}_2$  eq、9.58 kg  $\text{SO}_2$  eq、 $1.78 \times 10^{-3}$  kg antimony eq、 $8.22 \times 10^{-1}$  kg  $\text{PO}_4^{3-}$  eq、1.66 kg  $\text{PM}_{2.5}$  eq、2.73 kg NMVOC eq。

(2)与LP-RAC的使用阶段和废弃阶段相比,LP-RAC的生产阶段对GWP、AP、ADP、EP、RI、POFP的“贡献率”均最大,分别为93.67%、76.66%、67.63%、86.15%、84.45%、72.96%。在生产阶段中,水泥生产环节对GWP和RI的“贡献率”最大,直接排放环节对AP、EP和POFP“贡献率”最大,河砂开采环节对ADP的“贡献率”最大。

(3)LP-RAC全生命周期中的直接排放不容忽视,通过缩短原材料运输距离、多采用废弃物、精进生产工艺等措施均可以有效减少直接排放。另外,在满足相关工程要求的前提下,可用辅助胶凝材料取代部分水泥,以减少水泥用量,从而降低环境排放。

#### 参考文献:

- [1] 张小丹,张彦栋.对低品位石灰石的开采利用[J].建材技术与应用,2011(8):22-23.
- [2] 何彦琪,蒋震,陈凯,等.石灰石粉对水泥水化及C-S-H成核的动力学影响[J].硅酸盐通报,2018,37(8):2531-2535.
- [3] 李涛,金磊,申瑞娟,等.低品位石灰石粉与粉煤灰复掺效应对C50海工混凝土抗Cl<sup>-</sup>迁移的影响[J].混凝土与水泥制品,2020(1):21-23.
- [4] 赵凯月,董振平,张金团,等.石灰石粉在混凝土中的应用现状[J].混凝土,2018(10):143-147.
- [5] JIAN S M, WU B, HU N. Environmental impacts of three waste concrete recycling strategies for prefabricated components through comparative life cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328: 129463.
- [6] ABED M, FORT J, RASHID K. Multicriterial life cycle assessment of eco-efficient self-compacting concrete modified by waste perlite powder and/or recycled concrete aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2022, 348: 128696.
- [7] XING W Q, TAM V W Y, LE K N, et al. Effects of mix design and functional unit on life cycle assessment of recycled aggregate concrete: Evidence from  $\text{CO}_2$  concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 348: 128712.
- [8] 李承明,孔祥坤,熊宇强,等.基于生命周期理论的再生混凝土空心砌块环境性能评价[J].新型建筑材料,2021,48(1):112-115.
- [9] SANDANAYAKE M, BOURAS Y, VRCELJ Z. A feasibility study of using coffee cup waste as a building material - Life cycle assessment and multi-objective optimisation [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 339: 130498.

(下转第88页)

主要原因之一。

参考文献:

[1] 盛蕾,武雷.3D 打印混凝土技术研究综述[J].混凝土与水泥制品,2021(10):1-5.

[2] 朱艳青,史继富,王雷雷,等.3D 打印技术发展现状[J].制造技术与机床,2015(12):50-57.

[3] ROUSSEL N.Rheological requirements for printable concretes[J].Cement and Concrete Research,2018,112:7685.

[4] 夏雨欣.3D 打印碱激发胶凝材料的制备及性能研究[D].重庆:重庆大学,2019.

[5] 焦登武,安晓鹏,史才军,等.骨料裹浆厚度对混凝土流变性能的影响[J].硅酸盐学报,2017,45(9):1360-1366.

[6] 沈卫国,刘焱,閻海峰,等.激发剂对钢渣碳化的影响研究[J].新世纪水泥导报,2020,26(1):69-74.

[7] 冯春花,李东旭.钢渣作为铁质校正原料对水泥熟料性能的影响[J].硅酸盐学报,2010,38(9):1688-1692.

[8] 唐咸远,郭彬,马杰灵,等.钢渣微粉对超高性能混凝土(UHPC)性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2021(11):82-84,89.

[9] 张方.碱激发和复合激发下废弃混凝土再生微粉活性分析[J].墙材革新与建筑节能,2019(3):58-61.

[10] 刘栋,张鹏宇,刘彤,等.建筑垃圾中再生微粉材性表征及潜在活性的激发[J].硅酸盐通报,2016,35(8):2635-2641.

[11] 赵颖,刘维胜,王欢,等.石灰石粉对 3D 打印水泥基材料性能的影响[J].材料导报,2020,34(增刊):1217-1220.

[12] 侯泽宇.3D 打印纤维增强混凝土的制备与性能研究[D].南京:东南大学,2020.

[13] PANDA B,SINGH G B,UULUER C,et al.Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing [J].Journal of Cleaner Production,2019,220:

610-619.

[14] 杨宁,王崇革,赵美霞.再生骨料强化技术研究[J].新型建筑材料,2011,38(3):45-47.

[15] 黎宝山,姚一鸣,鲁聪.挤出型 3D 打印混凝土力学性能研究进展[J].混凝土与水泥制品,2021(3):1-6.

[16] 马国伟,王里.水泥基材料 3D 打印关键技术[M].北京:中国建材工业出版社,2020.

[17] 邢家瑞,于淇,全世涛,等.废石粉对 3D 打印水泥砂浆性能的影响研究[J].混凝土与水泥制品,2022(1):84-88.

[18] ZHANG C,HOU Z Y,CHEN C,et al.Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content [J].Cement and Concrete Composites,2019,104:103406.

[19] LE T T,AUSTIN S A,LIM S,et al.Hardened properties of high-performance printing concrete [J].Cement and Concrete Research,2012,42(3):558-566.

[20] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.

[21] WOLFS R J M,BOS F P,SALET T A M.Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion [J].Cement and Concrete Research,2019,119:132-140.

收稿日期:2023-10-16

第一作者:刘成(1973—),男,高级经济师。

E-mail:Liucheng73@163.com

通信作者:张立力(1994—),男,工程师。

通信地址:江苏省苏州市姑苏区三香路 718 号

E-mail:zhanglili0811@126.com

(上接第 82 页)

[10] 徐金俊,乌忱昊,王浩,等.再生混凝土绿色建筑碳排放评价及灰色参数敏感性分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(3):396-403.

[11] 郝亚利,丁扬飞,姚武,等.废弃石粉制备高强再生混凝土的研究[J].新型建筑材料,2023(1):8-11,40

[12] SHI X J,MUKHOPADHYAY A,ZOLLINGER D,et al. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate [J].Journal of Cleaner Production,2019,225:414-425.

[13] VASCO S R,JORGE D B,KUMAR D R.Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete [J].Journal of Cleaner Production,2016,112:2171-2186.

[14] 肖建庄,黎鹭,丁陶.再生混凝土生命周期 CO<sub>2</sub> 排放评价[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(5):1088-1092.

[15] VISINTIN P,DADD L,UL-ALAM M,et al.Flexural performance and life-cycle assessment of multi-generation recycled aggregate concrete beams [J].Journal of Cleaner - 88 -

Production,2022,360:132214.

[16] GUO Z G,TU A,CHEN C,et al.Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates[J].Journal of Cleaner Production,2018,199:136-149.

[17] AKHTAR A,SARMAH A K.Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective[J].Journal of Cleaner Production,2018,186: 262-281.

[18] 章玉容,徐雅琴,姚泽阳,等.配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响[J].浙江工业大学学报,2020,48(6):648-653.

收稿日期:2022-10-24

第一作者:李刚(1999—),男,硕士研究生。

E-mail:2132873@tongji.edu.cn

通信作者:余安明(1982—),博士,副教授。

通信地址:上海市嘉定区曹安路 4800 号

E-mail:sheanming@tongji.edu.cn