

研究论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i04.15-22

亮点:

- 证实 LC³ 水泥综合潜力最优, 镁质水泥具备碳负效应但受成本性能制约
- 明确水泥是混凝土碳排放核心, 为双碳下混凝土行业低碳转型提供参考
- 构建多指标层次分析评价体系, 综合碳排放、成本、性能筛选最优技术方案

*通讯作者邮箱:

man200177@163.com

英文引用: Gao Liye et al., 2026. Research on technical paths of low-carbon concrete and its multi-criteria optimization under dual-carbon goals. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (04), 15-22.

中文引用: 高立业等., 2026. 双碳背景下低碳混凝土技术路径及其多指标综合优选研究. 2 (04), 15-22.

稿件处理节点:

接收	2026 年 10 月 16 日
修订	2026 年 10 月 22 日
接受	2026 年 10 月 22 日
发表	2026 年 10 月 23 日

基金资助:

国家自然科学基金资助项 (5210090341)

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

双碳背景下低碳混凝土技术路径及其多指标综合优选研究

高立业¹, 于松聆², 申校源³, 陈守开^{3*}

¹ 广东粤海粤西供水有限公司, 广东湛江, 524000

² 中国水利水电第四工程局有限公司, 青海西宁, 810007

³ 华北水利水电大学水利学院, 河南郑州, 450046

摘要 分析国内外有关低碳混凝土的研究现状与发展动态, 为“双碳”背景下高能耗、高碳排放的混凝土行业向绿色环保方向转型提供建议。从混凝土的碳排放量与经济关系的角度, 依据直接减碳技术和间接减碳技术, 利用层次分析法, 设计了九种类型的低碳混凝土技术, 以混凝土碳排放量、成本、性能、应用前景、原材料来源及技术水平为指标, 分析各类混凝土的减碳降本能力, 并确定最优方案。LC³ 水泥碳减排潜力最大, 其次是镁质水泥, 且通过混凝土优化设计也能达到不错的减碳效果。本研究可为后续低碳混凝土领域的深入研究提供方向。

关键词: 低碳混凝土; CO₂ 排放量; 减碳降本; 层次分析法

Research on technical paths of low-carbon concrete and its multi-criteria optimization under dual-carbon goals

Gao Liye¹, Yu Songling², Shen Xiaoyuan³, Chen Shoukai^{3*}

¹ Guangdong Yuehai Yuexi Water Supply Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

² China Water Conservancy and Hydropower Fourth Engineering Bureau Co., Ltd., Xining, Qinghai 810007

³ School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046;

Abstract To analyze the research status and development trends of low-carbon concrete at home and abroad, and provide suggestions for the transformation of the concrete industry with high energy consumption and high carbon emission to the direction of green environmental protection under the background of "double carbon". From the perspective of the relationship between carbon emission and economy of concrete, nine types of low-carbon concrete technologies were designed based on direct carbon reduction technology and indirect carbon reduction technology, using analytic hierarchy process (AHP). Carbon emission, cost, performance, application prospect, source of raw materials and technical level of concrete were taken as indicators to evaluate the carbon mitigation and cost-effectiveness of various concrete technologies and identify the optimal solution. LC³ cement has the highest carbon emission reduction potential, followed by magnesium cement, and it can also achieve good carbon emission reduction effect through concrete optimization design. This study can provide a direction for further research in the field of low-carbon concrete.

Keywords: Low-carbon concrete; CO₂ emissions; carbon mitigation and cost-effectiveness; Analytic hierarchy process

1. 引言

近代以来,随着人类工业规模空前扩大,大量温室气体排出,地球碳排放量已严重超标,其所带来的直接影响便是全球气候变暖。于2009年12月召开的哥本哈根气候大会使得低碳迅速进入大众视野并引起全球各地广泛关注^[1]。2020年9月,我国向全世界庄严承诺,力争2030年前实现“碳达峰”,并在2060年前实现“碳中和”^[2]。自改革开放以来,我国经济高速发展的同时碳排放量也在快速增长,以建筑行业为例,中国建筑全寿命周期碳排放呈现增长趋势,据不完全统计,从2000年至2018年期间,我国CO₂排放量增长了27.58亿t。在全球节能、降耗、减排的大趋势下,作为当前应用规模最大的建筑材料品类之一,混凝土行业正朝着“绿色化、低碳化、资源化”的方向深度转型^[3],低碳混凝土的开发势在必行。一般认为,低碳混凝土是相较传统混凝土实现碳排放量显著降低的混凝土^[4]。

从生产环节看,混凝土碳排放主要来源于原材料生产、拌合生产及物料运输过程^[5],据此可将低碳混凝土技术演化划分为三个阶段。第一阶段为生产工艺与装备升级阶段:通过淘汰高能耗老旧窑炉,推广新型干法生产工艺与节能装备,依靠工艺革新实现能耗与碳排放下降^[6-7]。第二阶段为辅助胶凝材料替代阶段:混凝土超过90%碳排放源自水泥原料,利用粉煤灰、矿渣、石灰石等低碳排放辅助胶凝材料部分替代水泥熟料,成为减碳重要手段。第三阶段为新型低碳胶凝材料开发阶段:传统工业固废掺配已难以满足深度减碳需求,研发碳负水泥等新型绿色胶凝材料是未来重要发展方向^[8]。

2. 低碳混凝土

2.1. 混凝土行业碳排放现状

混凝土是仅次于水消耗最多的材料,也是世界上消耗最多的人造材料。我国是全球最大二氧化碳排放国,建筑业是我国二氧化碳排放大户。《中国建筑能耗研究报告(2020)》指出,2018年我国建筑全过程碳排放总量49.3亿吨,占全国碳排放的比例为51.3%。建筑材料生产阶段碳排放占全国碳排放的比例为28.3%,约27.2亿吨^[9],来源主要包括钢材、水泥、铝材,其中水泥碳排放量超10亿吨。混凝土的大量使用对建筑业的碳排放量贡献巨大。因此,混凝土行业降碳减排对降低建筑业乃至全行业碳排放量将具有重要作用。

2.2. 混凝土减碳技术

混凝土低碳技术路径:直接减碳技术、间接减碳技术和低碳新型替代材料。混凝土直接减碳技术是在混凝土的原材料生产和生产工艺等过程减少CO₂的排放量;混凝土的间接减碳技术是通过提高混凝土的耐久性,来减少混凝土的生产量。本文依据这些技术,综合分析了国内外碳排放量低于普通混凝土的主要成效,并进行分类比较。

(1) 直接减碳技术

水泥是混凝土的胶凝材料,水泥遇水后水化为混凝土提供强度。水泥行业是高污染、高碳的能源密集型产业,同时也是碳排放重点行业。2020年,我国水泥行业CO₂排放量约占全国排放总量的13%。而在混凝土生产的过程中,水泥是主要的碳排放因素。以建筑业常用的C30混凝土(生产配合比见表1)为例,其单方混凝土各成分碳排放量如图1所示。

由图可知,C30混凝土中水泥的碳排放约201kg,占比接近90%,其他如骨料、外加剂等碳排放约23kg,占比仅约10%。可见,减少生产水泥的CO₂排放量是混凝土减碳的关键。

表1 C30混凝土配合比

Table 1 Concrete mix proportion

胶凝材料总量 (kg/m ³)	水 泥 /%	粉 煤 灰 /%	矿 粉 /%	砂 率 /%	水 胶 比 /%	外 加 剂 /%
360	58	27	15	52	0.44	1.1

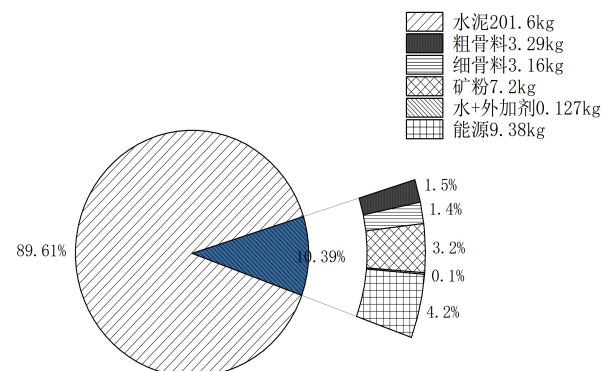


图1 C30混凝土各成分碳排放量

Fig 1 Carbon emission of C30 concrete components

(1) LC³胶凝体系。国际能源署在水泥行业碳减排路径研究中明确提出,熟料替代技术是破解行业碳排放难题的核心方向。熟料生产过程中产生的二

氧化碳约占水泥生产碳排放的 85%^[10]。Karen Scrivener^[11]等提出了石灰石煅烧黏土水泥 (Limestone calcined clay cement 简称 LC³)，该技术的核心在于利用煅烧黏土与石灰石的协同作用，以替代混合水泥中的部分熟料，使熟料替代率超过 50%。该水泥的力学性能与部分耐久性能仍然能达到甚至优于普通硅酸盐水泥，且可减少 30%~40% 的二氧化碳排放^[9]和节省水泥生产中 15%~20% 的能耗^[12]。黄振宇^[13]制备的 LC³ 混凝土的抗折性能和劈裂性能优于相同抗压强度的普通混凝土。陈杰^[14]针对淮北煤矸石原料进行了理化特性的研究，设计了新型煤矸石基 LC³ 胶凝材料，确定了活化煤矸石替代硅酸盐水泥熟料的最佳用量为 30%。刘小瑞^[15]研究的低碳胶凝材料大大降低了所用熟料的比例，相较于传统胶凝材料体系，低碳胶凝材料在混凝土配制中展现出“低水胶比—高工作性—外加剂省耗”的协同优势。

(2) 水化硅酸镁胶凝体系。水化硅酸镁 (MgO-SiO₂-H₂O) 胶凝体系作为当前低碳胶凝材料领域的前沿研究方向，其核心在于通过活性硅质材料与轻烧氧化镁的可控水化反应，构建具有胶凝性能的 M-S-H (Magnesium-Silicate-Hydrate) 凝胶网络。曹兴伟^[3]在此研究基础上，设计了一种新型低碳水化硅酸镁砂浆。该水泥以硅酸镁为成分，在 650℃ 的低温生产过程中 CO₂ 排放显著降低，平均可减少 35% 以上的碳排放。英国帝国理工学院 Chris.R.Cheeseman 教授团队研制出“Novacem”水泥。这种水化硅酸镁基材料具有碳负性特性，并因使用镁硅酸盐（而非传统石灰岩或碳酸钙）作为原料，被归类为“镁基水泥”^[9]。镁质水泥的生产工艺展现出显著的低碳能耗优势，其核心生产环节在 650℃ 左右的低温区间运行（传统硅酸盐水泥需 1400℃ 以上煅烧），这一温度落差带来了生产能耗与碳排放的突破性降低。刘姚君等^[16]经过对比镁制水泥与普通水泥发现，镁硅酸盐基镁水泥浆体硬化后，在空气中会发生碳酸化反应，通过物理吸附与化学结合双重机制大量捕获 CO₂，形成多元水合碳酸盐产物。与普通硅酸盐水泥相比，每吨镁基碳负性水泥在生产和使用过程中排放的 CO₂ 气体约减少 1159 kg，即 CO₂ 排放量为负值。但该体系现阶段几乎无大型实体工程应用案例，现有研究以实验室小试样试验为主。其工程应用受限主要体现在：体系碱度偏低，对钢筋防锈保护能力不足，直接用于钢筋混凝土构件存在风险；原材料成本偏高，水化产物长期野外服役耐久性、体积稳定性仍

缺少长期现场实测数据；目前仅有望优先应用于非承重砌块、步道砖等薄型无筋预制制品，难以直接用于主体承重结构。

(3) Solidia 水泥^[8]。简称 SC 水泥，其主要组成成分是低石灰含量的假灰硅钙石 (CaO·SiO₂) 和硅钙石 (3CaO·2SiO₂) 等硅酸盐矿物，配料中石灰石：硅质材料=11：9，生产 1 吨 SC 水泥熟料二氧化碳排放量约 565kg，1 吨 SC 水泥可吸收 0.24 吨二氧化碳，比普通水泥混凝土减排 70%。但是该水泥强度低、需要在高浓度 CO₂ 中养护、碳化时需要空气进入到水泥内部、碱性低导致耐久性差等特性使得 SC 水泥应用前景受到了较大的限制。

(4) 辅助胶凝材料。当前广泛应用的辅助胶凝材料主要由具有潜在胶凝性或火山灰活性的矿物粉末构成，涵盖硅质、铝硅质及钙铝硅质等多元体系^[17]。粉煤灰、高炉矿渣等作为常见工业固废，具备低碳排放优势。这类材料在工业领域应用广泛，其碳排放量显著低于传统建材原料，在绿色建材发展中具有重要价值。杭美艳^[18]等以较低水泥用量、大掺量矿渣粉和粉煤灰研制的 C50 高强高性能自密实混凝土。与普通自密实混凝土相比，水泥用量减少了 51.35%，碳排放量减少 50.48%，节约成本 68.4 元/m³。此种低碳低水泥制备的自密实混凝土和易性好、流动性好，与普通高水泥自密实混凝土力学性能相当。张平^[19]等针对新疆低品质粉煤灰与矿粉的资源化利用难题，通过“机械球磨—化学激发”协同活化技术，制备高性能绿色低碳复合矿物掺合料。并且掺加该掺合料制备 C40、C50、C60 混凝土碳排放量较相同强度等级单掺粉煤灰分别下降 20%、16%、18%。同时，其他性能如抗渗、抗硫酸盐侵蚀等也有所提高。

此外，再生骨料的应用也有利于降低混凝土的碳排放量。由再生骨料制备的混凝土称为再生骨料混凝土^[20]。相对于天然骨料，利用由废弃混凝土生产的再生骨料能降低能源消耗和温室气体排放。再生骨料混凝土节约天然骨料和减少建筑垃圾的环境破坏^[21]，体现了建筑行业低碳环保的发展趋势，现已被广泛应用于建筑行业^[22]。陈润飞^[23]利用生命周期评价法 (LCA)，计算了 C30 再生骨料混凝土从生产到拆除的 CO₂ 排放量。1 吨取代率为 30% 的 C30 再生混凝土生命周期碳排放量 147.383 kgCO₂，约为普通混凝土的 96.70%。

(2) 间接减碳技术

通过科学调配水泥、骨料、水、外加剂及矿物掺合料的配比参数,可在保障材料性能的前提下实现碳排放的系统性降低。王健^[24]构建以混凝土材料 CO₂ 排放最小化为目标函数的组分数学模型,并利用 Matlab 软件进行优化求解。该方法在混凝土生产过程中 CO₂ 排放量明显降低,仅占传统设计方法 CO₂ 排放量的 41%。

另一种减碳方法是植生混凝土技术,该混凝土也称植被混凝土或绿化混凝土。植物与混凝土通过孔隙内的生长基有机结合形成新型混凝土。这种材料利用混凝土孔隙结构,将植物生长基嵌入其中,实现植物与混凝土的协同共生,为生态混凝土领域提供了新的发展方向。^[25]其构造形式可分为孔洞型、孔洞型多层结构和多孔连续型等 3 种形式^[26]。其中多孔连续型结构可以为混凝土表面绿植提供根部生长条件,是真正意义上的新型植生混凝土。植生混凝土是生态混凝土的一种,除具有一定强度和原有防护功能外,还能改善生态环境、防止水土流失和吸收二氧化碳等功能。植生混凝土应用的关键在于其构件制备方法、孔隙内降碱措施、种植基质和物种选择。完善的植生混凝土结合“吸碳”能力强的植物能有效提高城市碳汇能力。

此外,改进混凝土施工工艺也能起到一定的减碳效果。如沈卫国^[27]等发明了一种“骨料嵌锁型混凝土”:在混凝土浇筑过程中,用到了抛填骨料施工工艺,具体操作是分层均匀撒布体积分数为 10%~30% (以成品混凝土体积为基准) 的骨料。在高性能混凝土中,可以减少水泥用量 20% 以上;在干硬性混凝土中,可以减少水泥用量 8%~15%。该方法可以节省混凝土中成本高的砂、水泥和外加剂的用量,每立方米混凝土的材料成本可减少 20~60 元,由于显著减少了混凝土中水泥的用量,因此每立方米混凝土的 CO₂ 排放量可以减少 20~100 kg。

2.3. 现有减碳技术的不足

现有减碳技术能在一定程度上可以减少混凝土生产碳排放,但是仍存在不足。例如徐永模^[28]提出 SC 水泥在很多方面都存在很大缺陷,如该水泥强度低、需要在高浓度 CO₂ 中养护、碳化时需要空气进入到水泥内部、碱性低导致耐久性差等,因此 SC 水泥应用前景受到了较大的限制。而水化硅酸镁胶凝体系,由其制备的混凝土相关性质尚未得到测试。

应用新型煤矸石基 LC³ 胶凝材料制备混凝土需水量比普通水泥大幅增加,同时还需要掺加适当的减水剂等弥补相关性能,从而增加混凝土的生产成本^[22]。

3. 计算模型与结果

我国建筑材料 CO₂ 排放计算方法主要包括实测法、质量平衡法、碳排放因子法和生命周期评价法 (Life Cycle Assessment, LCA)^[29]。其中碳排放因子法应用最为广泛^[30,31],但存在不同来源数据差异较大的局限^[32,33];实测法与质量平衡法精度高,但实施所需设备和技术门槛较高。

目前,大多数混凝土减碳技术重点关注混凝土的组成材料所生产的碳排放量,鲜少有人从混凝土成本的角度考虑。依据“碳足迹”理论,低成本意味着材料从生产到应用过程中所有活动产生的二氧化碳排放要比高成本的更少。

常用的碳排放测算方法有 3 种,即实测法、投入产出法、过程分析法^[34]。但是关于碳排放量的计算方法尚未形成一致意见,受参数选择、实测值缺失等影响,难以客观评价不同碳减排手段的减碳效果。考虑到材料成本是一种较为实际的指标,本文选择基于成本的碳排放量计算方法,并由此确定不同减碳混凝土或水泥胶砂碳排放量。计算模型如下:

a. 成本计算模型 (只考虑材料成本,见表 2)

$$P = \sum_i a_i m_i \quad (1)$$

式中, P 为混凝土或胶凝材料成本; a_i 为 1t 第 i 类材料的成本; m_i 为第 i 类材料的用量。

表 2 材料价格表

Table 2 Material Price List

材料	水泥	粗骨料	细骨料	粉煤灰	矿渣	水
材料价格 / (元/t)	260	83	80	120	110	5

b. 碳排放量计算方法 (只考虑原材料引入、制备及运输,见表 3)

$$CE = \sum_j b_j m_j \quad (2)$$

式中, CE 为混凝土或胶凝材料碳排放量; b_j 为 1t 第 j 类材料的碳排放量; m_j 为第 j 类材料的用量。

表 3 材料碳排放量表
Table 3 Material Carbon Emission Table

材料	水泥	粗骨料	细骨料	粉煤灰	矿渣	水	聚羧酸高性能减水剂
材料碳排放量/ (kg/t)	800 ^[35]	3.12 ^[29]	3.66 ^[29]	0	133.34 ^[29]	0.194 ^[35]	28.5 ^[29]

利用公式 (1)、(2)，结合表 2、表 3，以相同质量和强度的普通混凝土或水泥为基准，计算各类型混凝土低碳技术的减碳降本水平，计算结果如表 4 所示，由表可以看出，减碳效果最好的是镁质水泥，

具有吸碳效果，但其成本最高。其他的均有不同程度的碳排放量，但往往碳排放量越少，其生产成本也有所提高。因此需要综合成本、减碳效果以及实际工程的技术可行性等方面，综合评价其应用前景。

表 4 各类型混凝土低碳技术的减碳降本能力
Table 4 Carbon and cost reduction capacity of low carbon technologies for various types of concrete

类别	数据来源	碳排放量 (kg)	减碳水平	成本(元)	降本水平
类型一	镁质水泥 (1t) ^[9]	-1159	244.86%	约 400	-53.8%
类型二	SC 水泥 (1t) ^[8]	550	31.25%	极高	-
类型三	LC ³ 水泥 (1t) ^[9,12]	560	30%	190	27%
类型四	刘小瑞低熟料胶凝材料 (370kg) ^[15]	约 160	41.10%	71.716	25.50%
类型五	硅酸镁水泥 (1t) ^[16]	500	37.50%	高	-
类型六	低碳低水泥用量自密实混凝土 (1m ³ C50) ^[18]	88.136	51.48%	272.412	14.60%
类型七	绿色低碳型复合矿物混凝土(1m ³ C40) ^[19]	185.25	20%	约 280	3.5%
类型八	混凝土优化设计 (1m ³ C25) ^[24]	129.16	59.38%	218	12.32%
类型九	再生混凝土 (1tC30) ^[23]	147.38	3.30%	98.57	10.24%

4. 低碳混凝土评价原理

为探讨“双碳”背景下混凝土行业的发展方向，选择生产混凝土的碳排放量、成本、工作性能、应用前景、原材料来源情况和技术水平为具体指标，选用层次分析法对现阶段低碳混凝土的研究成果进行优选。

(1) 建立层次结构模型

为进行低碳混凝土方案优选，将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等要件，建立如图 2 所示的阶梯层次结构。

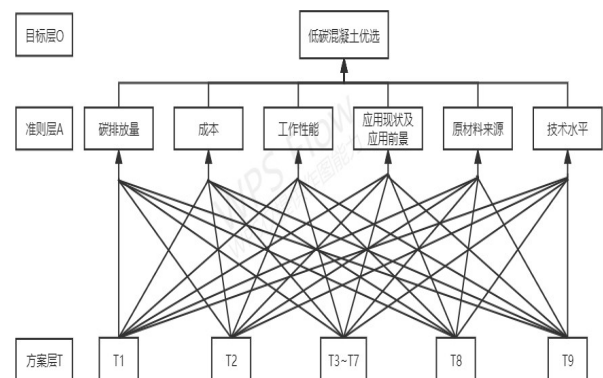


图 2 阶梯结构示意图

Fig 2 Schematic diagram of ladder structure

(2) 建立判断矩阵

判断矩阵就是将处于同一层次各指标两两比较，根据其相对重要程度打分，构成矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times n}$ 。通过对选中指标体系里因素 i 和 j 对 Z 重要性影响程度打分确定 a_{ij} 。标度含义为： $a_{ij}=1$ 表 i 与 j 同等重要；3 是 i 比 j 稍微重要；5 为明显重要；7 是强烈重要；9 代表极端重要；2、4、6、8 介于相邻判断间； $1/a_{ij}$ 则体现 j 与 i 重要性关系。

对准则层两两指标之间的重要程度做出判断比较，可以建立判断矩阵，结果如表 5 所示。由表可知，在准则层 6 个指标中，重要程度：A2 成本=A5 碳排放量>A1 性能>A6 应用前景>A4 原材料来源>A3 技术水平。

表 5 准则层 A 对上一层目标层 O 的判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of criterion layer A to upper target layer O

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1	1/2	3	2	1/2	2
A2	2	1	5	4	1	3
A3	1/3	1/5	1	1	1/5	1/2
A4	1/2	1/4	1	1	1/4	1
A5	2	1	5	4	1	3
A6	1/2	1/3	2	1	1/3	1

表 6 RI 随机一致性指标表

Table 6 RI Random Consistency Index Table

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

经上述步骤 a、b、c、d 计算可得各评价指标的权重值，结果如图 3 所示。由图可知，准则层权重值：A2 成本=A5 碳排放量>A1 性能>A6 应用前景>A4 原材料来源>A3 技术水平。

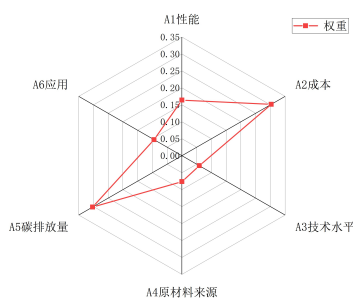


图 3 准则层各指标权重

Fig 3 Weights of indicators at the criterion level

(4) 确定最优方案

建立方案层 T 对上一层准则层 A 各个指标的判断矩阵（共 6 个），在相应矩阵内对各个方案的重要程度进行确定后，重复步骤 a、b、c、d 可得对应指标

注：A1 性能、A2 成本、A3 技术水平、A4 原材料来源 A5、碳排放量、A6 应用前景

(3) 确定评价指标的权重

a. 几何平均法（方根法）确定权重： $\omega_i =$

$$\frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{kj})^{\frac{1}{n}}} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

b. 将判断矩阵 A 按列归一化，得到权重向量：

$$w_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

c. 计算矩阵的最大特征值： $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{nw_i}$
($i=1, 2, \dots, n$)

d. 一致性检验： $CR = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)RI}$

CR 值小于 0.1 是通过随机一致性检验的标准。若计算结果 $CR \geq 0.1$ ，则需要修正判断矩阵并重复验证过程，直到 CR 值达标（小于 0.1）。指标值如表 6 所示。

下各方案的权重值，对通过一致性检验的权重结构进行分析，进行方案层的组合权重计算，从而得出最优方案，方案层最终权重值如图 4 所示。由图 4 可知，以减碳降本为主要目标，其余指标为次要目标，当以相同质量和强度的普通混凝土或水泥为基准时，类型三为最优方案，其次是类型一、四、八、六，最后是类型五、二、七。其中，胶凝材料碳减排最具潜力，降低水泥中熟料含量是实现胶凝材料碳减排的重要途径；低碳水泥的减碳力度最大，但是在成本、强度等方面都存在较大缺陷；再生骨料在避免废弃混凝土填埋方面具有碳减排潜力。

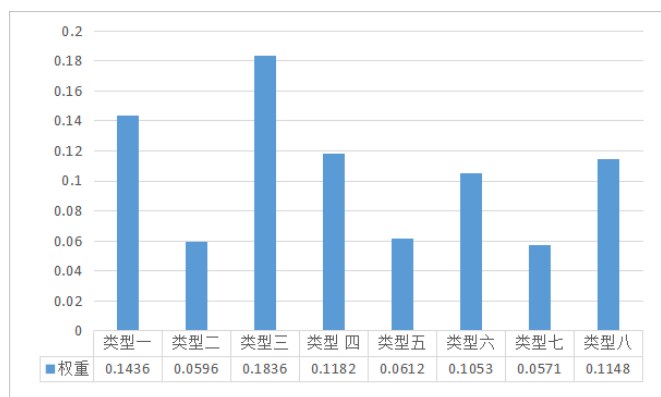


图4 方案层最终权重

Fig 4 Final weight of scheme layer

5. 结论

本文综合分析九类当前低碳技术的碳减排潜力,建立了基于碳排放-经济联合目标的评价方法,得出结论如下:

(1) 混凝土碳排放量的90%是来自胶凝材料中的水泥,降低生产水泥的碳排放量和减少水泥用量是混凝土减碳的重要途径。经综合评价认为,LC³水泥碳减排潜力最大,应用LC³水泥每年可减少碳排放量约5亿吨,降低成本约1500亿元。

(2) 混凝土的生产成本和工作性能制约了低碳混凝土的应用,如镁质水泥,具有“碳负性”,但是成本较高、性能不佳,应用前景受限。未来需要在降低生产成本和提高性能方面进一步加强。

(3) 要实现建筑运行碳排放达峰、碳中和,应大力开发绿色“吸碳”建筑材料、大幅延长建筑物使用寿命、推广可再生能源建筑应用和全面提升城市建筑碳汇能力。此外,国内外目前关于低碳混凝土的力学性能、耐久性、应用等方面的研究还不成熟,同时还需结合混凝土的经济成本进一步开展相关方面研究。

参考文献

- [1] 潘科,徐海涛,冯祥奕.“双碳”目标下我国新材料重点方向发展研究[J]. 信息通信技术与政策, 2022, No. 333(03): 74- 81.
- [2] 马焕章,杨晓飞. 三创新驱动绿色转型迈出新步伐[J]. 当代电力文化, 2021, (09): 26- 27.
- [3] 曹兴伟. 基于水化硅酸镁系胶凝材料的低碳混凝土发展研究[D]. 大连理工大学, 2016.
- [4] 冯洋,陈恩义. 低碳混凝土及其碳足迹评测[J]. 混凝土世界, 2011, No. 21(03): 61- 64.

- [5] 陶璐璐. 混凝土碳减排技术路径[N]. 中国建材报, 2022-03-21(003).
- [6] 费豪文. 我国水泥生产工艺与设备的发展分析[J]. 科技资讯, 2011, No. 278(29): 139.
- [7] 姚燕. 全力推进节能减排引领中国建材工业发展低碳经济[J]. 建材发展导向, 2011, 9(02): 4- 8.
- [8] 陈友德. Solidia 气硬性水泥混凝土的性能和商品化[J]. 水泥技术, 2016, No. 189(03): 89- 90.
- [9] 王峥,郭振伟. 双碳目标下减碳固碳建筑材料展望[J]. 建设科技, 2021(19): 53-56.
- [10] 张元庆,刘烁,齐平. 数字产业协同创新发展对碳排放强度影响研究[J]. 西南大学学报(社会科学版), 2023, 49(03): 114- 128.
- [11] Karen Scrivener, Fernando Martirena, Shashank Bishnoi, Soumen Maity. Calcined clay limestone cements (LC 3)[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 114.
- [12] 付立娟. 新型低碳水泥 LC-3 的应用前景(上)[J]. 中国水泥, 2020(09): 98- 102.
- [13] Zhen-yu HUANG, You-shuo HUANG, Wen-yu LIAO, Ning-xu HAN, Ying-wu ZHOU, Feng XING, Tong-bo SUI, Bin WANG, Hong-yan MA. 华南地区煅烧粘土-石灰石复合水泥 (LC-3) 混凝土的研发及其与钢筋的粘结性能 (英文) [J]. Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering), 2020, 21(11): 892- 907.
- [14] 陈杰. 新型煤矸石基低碳 LC3 胶凝材料的制备与水化机理研究[D]. 武汉理工大学, 2019.
- [15] 刘小端. 低碳胶凝材料研究[D]. 北京建筑大学, 2019.
- [16] 刘姚君,汪澜. 碳负性镁基水泥的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(01): 155- 159+ 166.
- [17] 周伟. 天然火山灰和粉煤灰对混凝土中钢筋腐蚀性的影响研究[J]. 房地产世界, 2023(01): 10- 15.
- [18] 杭美艳,兰英静,高萌,孙成晓. 低碳低水泥用量自密实混凝土的研究[J]. 建材世界, 2013, 34(01): 24- 26.
- [19] 张平,陈旭,李绍纯,岳彩虹,艾洪祥,李凯. 绿色低碳型高性能混凝土的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(09): 155- 158.
- [20] 肖建庄,李佳彬,兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10): 17- 20+ 57.
- [21] 杨震,李奕方,周汝光. 再生混凝土配合比设计方法现状分析[J]. 河南科技, 2021, 40(03): 72- 75.
- [22] 徐金俊,乌忱昊,王浩,陈杰. 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(03): 396- 403.
- [23] 陈润飞,谢与东,王德辉,蒋羽超,严丽虹. 建筑废弃物资源化利用生命周期能耗及碳排放评价研究[J]. 福建建筑, 2022(02): 22- 27.

- [24] 王健, 陆春华, 袁思奇. 基于碳排放量的混凝土组分优化设计方法研究[J]. 建筑节能, 2018, 46(12): 105- 109.
- [25] 王桂玲, 王龙志, 张海霞, 崔鑫, 宋生辉. 植生混凝土的含义、技术指标及研究重点[J]. 混凝土, 2013(01): 105- 109+ 113.
- [26] 谢喆敏, 李志刚, 芦敬迪, 等. 绿色混凝土的研究现状及发展建议[J]. 再生资源与循环经济, 2019, 12(02): 36- 39+ 44.
- [27] 沈卫国, 姜舰, 潘洪祥, 孟宪利, 李涛, 张郭俊. 抛填骨料砼是实现水泥砼低碳排放的途径之一[J]. 新世纪水泥导报, 2009, 15(03): 30- 34.
- [28] 徐永模, 陈玉. 低碳环保要求下的水泥混凝土创新[J]. 混凝土世界, 2019(03): 32- 37.
- [29] 岑晓倩, 张亚庆. 混凝土 CO₂ 排放计算和评价的研究进展[J]. 绿色科技, 2022, 24(20): 136- 141.
- [30] 邹蓓, 张晨悦, 房涛, 王崇杰. 基于碳平衡核算的寒冷地区高校校园低碳建设策略研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(04): 144- 150.
- [31] 张雁飞, 王晓菲, 于斐, 崔兆杰. 工业园区碳排放核算方法及实证研究[J]. 生态经济, 2013(09): 155- 157.
- [32] 王思博. 水泥行业温室气体排放核算方法研究[D]. 中国社会科学院研究生院, 2012.
- [33] 王乐, 苏娇健, 于晓霞. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[J]. 建筑与预算, 2023(03): 73- 75.
- [34] 白蕾. “双碳”目标下河南省建筑碳排放量化分析及减排对策研究[J]. 河南科技, 2022, 41(11): 129- 132.
- [35] 高育欣, 王军, 徐芬莲, 林喜华, 陈景. 预拌混凝土绿色生产碳排放评估[J]. 混凝土, 2011(01): 110- 112.