



基于 LCA 的扭王字块物化阶段 碳排放核算及减排措施*

蒋跃楠

(金陵科技学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 扭王字块作为量大面广的护堤结构, 其碳排放的量化计算对于节能减排具有重要意义。基于 LCA 理论, 将扭王字块物化阶段划分为原材料生产、原材料运输、构件制作、构件转运和现场施工 5 个阶段, 采用碳排放系数法构建扭王字块物化阶段的碳排放测算模型, 并以某大型护堤工程为例, 演示计量扭王字块物化阶段碳排放的具体流程。结果表明: 扭王字块物化阶段的碳排放主要来自原材料生产和运输; 通过对比砂石材料不同运距和运输方式的碳排放量, 得出就近取材和长距离采用铁路或水路运输可有效降低碳排放; 对比公路运输不同燃料车辆的碳排放, 汽油车和 LNG 车的碳排放低于柴油车。

关键词: 扭王字块; 碳排放; 核算模型; 减排

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0042-08

Carbon emission accounting and reduction measures of twist-king block in materialization stage based on LCA

JIANG Yuenan

(Architectural Engineering Institute, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: As a large-scale embankment structure, the quantitative calculation of the carbon emission of twisted-king block is of great significance for energy saving. Based on the LCA theory, this paper divides the materialization stage of twisted-king block into five stages, material production, material transportation, component manufacture, component transportation and site construction. The carbon emission measurement model is constructed to calculate the carbon emission in the materialization stage. Taking a large embankment as an example, the steps of measuring carbon emission is demonstrated. The results show that the carbon emissions during the materialization stage mainly come from the materials production and transportation. By comparing the carbon emissions of different transportation distances and patterns of sand and gravel, it is concluded that the carbon emissions can be effectively reduced by using nearby materials or waterway and railway transportation for long distance transportation. By comparing the carbon emissions of different fuel vehicles, the carbon emissions of gasoline vehicles and LNG vehicles are lower than that of diesel vehicles.

Keywords: twisted-king block; carbon emission; accounting model; reduce emission

收稿日期: 2023-08-04

*基金项目: 中建股份科技研发课题项目 (CSCES-2022-Z-22)

作者简介: 蒋跃楠 (1969—), 女, 博士, 副教授, 从事土木工程施工及基础工程的研究。

在江河湖海的岸边，为防止波浪侵袭或水流淘刷，需要修筑护岸。目前，扭王字块是较为常用的一种护岸块体。扭王字块具有结构简单、整体稳定性好等特点，对降低风浪爬高、减少越浪方面效果显著，但扭王字块所处的环境比较恶劣，需经受水流冲刷、水浪侵袭和日晒雨淋等作用，若这些作用导致扭王字块的混凝土大面积风化和剥落时，必须更换。因此，扭王字块要经历物化、使用和拆除等阶段，在这些阶段中，物化阶段对碳排放的影响最大。近年来，随着温室效应的加剧，一部分国家和组织率先采用“碳足迹”来计量某项产品、服务或某个区域的温室气体排放量，我国于2014年颁布了《建筑碳排放计量标准》，用于计量新建、改建和扩建建筑以及既有建筑全生命周期的碳排放量^[1]。通过量化碳排放量，明确碳排放的关键环节，进行环境治理。

生命周期一般理解为一件产品从产生到消亡的整个过程，此过程构成了一个完整的产品生命循环。生命周期分析(life cycle analysis, LCA)是一项量化产品从原材料开采、运输、生产、使用到废弃全过程、各环节对环境的影响的方法^[2]。LCA中一项重要的环境评价指标是碳排放量，即温室气体排放的总和。

基于LCA理论，很多学者进行了碳排放方面的研究。高宇等^[3]根据预制构件生产、运输、安装等阶段的资源和能源消耗数据，构建装配式建筑的生命周期评价模型，并利用该模型核算一栋装配式建筑的总碳排放量；齐亚楠等^[4]通过LCA理论对高速公路施工期碳排放边界进行界定，揭示施工期碳排放的全过程；邹安全等^[5]分析了钢铁产品生命周期系统的边界，运用EIO-LCA模型，核算生命周期各阶段的直接、间接碳排放及碳排放抵扣量；徐伟涛^[6]基于生命周期分析法，研究木结构建筑在使用过程中影响其碳排放的主要因素和量化方法，并在此基础上提出了减少碳排放的措施。

1 扭王字块物化阶段的碳排放分析

扭王字块是一种大型混凝土预制构件，在生命周期内将经历物化、使用和废弃3个阶段。物化阶段是构件生产、运输、施工在内的建造阶段，扭王字块物化阶段对碳排放的影响较大。因为物化阶段碳排放的来源丰富，包含原材料生产/运输产生的碳排放、预制构件制作过程中资源消耗以及投入设备产生的碳排放、预制构件运输过程中产生的碳排放、预制构件施工机械能源消耗所产生的碳排放等。因此，必须对扭王字块物化阶段的碳排放进行量化分析，以明确关键问题，找到关键方法降低扭王字块对环境的负面影响。

目前，碳排放量化的方法主要有实测法、物料平衡法和碳排放系数法3种，其中碳排放系数法是国际上最为常用的碳排放测算方法，该方法将碳排放因子乘以碳排放源的活动数据得到产品或服务的碳排放量。本文选择碳排放系数法进行扭王字块物化阶段的碳排放核算。

1.1 碳排放因子的选取

1.1.1 能源类碳排放因子

能源类碳排放因子对于碳排放测算至关重要。扭王字块物化阶段消耗大量柴油和电力，柴油属于化石类能源，其燃烧产生的碳排放因子 P 为：

$$P = \frac{44}{12} COQ \quad (1)$$

式中： C 为单位热值含碳量，即单位热值燃料所含碳元素的质量； O 为碳氧化率，即转化为二氧化碳的碳占燃料中的百分率； Q 为平均低位发热量，即单位质量的燃料在完全燃烧时，扣除烟气中水蒸气的汽化潜热所发出的热量。

电力碳排放因子是生产每单位电力所产生的碳排放量。中国地域辽阔，不同省市的电力碳排放因子不同，根据表1选择中国区域电网平均碳排放因子。

表 1 中国区域电网平均碳排放因子

电网名称	华北区域电网	东北区域电网	华东区域电网	华中区域电网	西北区域电网	南方区域电网
排放因子/($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.884 3	0.776 9	0.703 5	0.525 7	0.667 1	0.527 1

1.1.2 材料类碳排放因子

制作扭王字块需要的原材料有水泥、砂石、钢模板及配件等。水泥生产经过生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨 3 个工序,水泥行业碳排放量巨大;砂

石需经过开采、破碎和筛分,砂石生产也会产生一定量的碳排放;钢模板及配件在制造过程中因消耗能源而产生碳排放,但钢模板及配件可回收利用,扭王字块原材料生产的碳排放因子见表 2^[7]。

表 2 原材料生产的碳排放因子

材料名称	普通硅酸盐水泥(市场平均)	黄砂($f=1.6 \sim 3.0$)	碎石($d=10 \sim 30 \text{ mm}$)	钢模板及配件(考虑回收率)	自来水
排放因子/($\text{kgCO}_2 \cdot \text{e} \cdot \text{t}^{-1}$)	735	2.51	2.18	1 381	0.168

注:原材料生产排放的温室气体包括各种气体,其排放强度通常使用二氧化碳当量($\text{kgCO}_2 \text{ e}$)表示。 f 为细度模数。

1.1.3 运输类碳排放因子

扭王字块物化阶段的运输包括 3 方面:1)将砂石、水泥等原材料运输至预制场;2)将预制件转运至堆场;3)将预制件运输至施工现场。运输方式包括公路、铁路和水路,材料运输的碳

排放因子与运载工具的能源类型、运距等因素有关,根据《全国公路运输企业国家级能耗等级标准》综合考虑能源的碳排放因子,公路运输车一般为载质量 18 t 的货车。运输类碳排放因子见表 3^[8]。

表 3 运输工具的碳排放因子

运输方式	汽油货车 18 t	柴油货车 18 t	铁路运输(市场平均)	水路
排放因子/($\text{kgCO}_2 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.104	0.129	0.010	0.013

1.1.4 人工碳排放因子

在扭王字块制作、运输和施工过程中,人工必不可少,如果不考虑各工种和劳动强度的差异,我国人均碳排放量为 2 268 kg/a,折算后约为 2.07 $\text{kgCO}_2/(\text{人} \cdot \text{d})$ ^[9]。

1.2 碳排放计算模型

扭王字块物化阶段的碳排放量 C_z 等于原材料生产、原材料运输、预制件制作、转运和施工 5 个阶段的碳排放之和。

$$C_z = C_{z1} + C_{z2} + C_{z3} + C_{z4} + C_{z5} \quad (2)$$

式中: C_{z1} 、 C_{z2} 、 C_{z3} 、 C_{z4} 、 C_{z5} 分别为原材料生产、原材料运输、预制件制作、预制件转运和预制件施工的碳排放量。

1.2.1 原材料生产阶段的碳排放核算

扭王字块用到的原材料有水泥、砂石、钢模板及配件、自来水等,原材料生产阶段的碳排放等于材料消耗量与相应碳排放因子的乘积,即:

$$C_{z1} = \sum_{i=1}^n F_i P_i \quad (3)$$

式中: F_i 为原材料消耗量, P_i 为原材料相应的碳排放因子。

1.2.2 原材料运输阶段的碳排放核算

原材料运输碳排放是水泥、砂石等材料从工厂或加工场运至预制场过程中,运输工具消耗能源所产生的碳排放。扭王字块原材料在运输过程产生的碳排放与材料质量、运输距离等因素有关,但运输工具从预制场返回时一般为空荷运输,根据文献[10],空载环境负荷是满载时的 0.67 倍。因此,为考虑空载返回的碳排放,需采用空车返回系数进行修正。

$$C_{z2} = \sum_{i=1}^n G_i D_i T_i \quad (4)$$

式中: G_i 为材料质量, D_i 为材料运输距离, T_i 为运输单位质量材料的碳排放因子。

1.2.3 构件制作阶段的碳排放核算

扭王字块制作阶段的碳排放主要来源于预制件生产过程中的机械设备能源消耗和人工劳作,测算公式如下:

$$C_{z3} = C_{31} + C_{32} \quad (5)$$

$$\text{其中: } C_{31} = \sum_{j=1}^n V_j E_j EF_j \quad (6)$$

$$C_{32} = Q_{r1} P_{r1} \quad (7)$$

式中： C_{31} 为机械设备的能源碳排放； C_{32} 为人工碳排放， V_j 为制作扭王字块的机械设备台班， E_j 为单位台班的能源消耗量^[11]， EF_j 为能源碳排放因子， Q_{r1} 为人工消耗量， P_{r1} 为人工碳排放因子。

1.2.4 构件转运阶段的碳排放核算

扭王字块转运阶段的碳排放来源于构件从预制场运输到堆放场过程中的能源消耗和人工劳作，测算公式如下：

$$C_{z4} = C_{41} + C_{42} \quad (8)$$

$$\text{其中: } C_{41} = \sum_{y=1}^n F_y E_y EF_y \quad (9)$$

$$C_{42} = Q_{r2} P_{r2} \quad (10)$$

式中： C_{41} 为能源碳排放， C_{42} 为人工碳排放， F_y 为转运预制件的机械设备台班， E_y 为单位台班的能源消耗量， EF_y 为能源碳排放因子， Q_{r2} 为人工消耗量， P_{r2} 为人工碳排放因子。

1.2.5 构件施工阶段的碳排放核算

扭王字块施工阶段碳排放包括预制件运送及安装过程中机械设备运行和人员劳作产生的碳排放，测算公式如下：

$$C_{z5} = C_{51} + C_{52} \quad (11)$$

$$\text{其中: } C_{51} = \sum_{y=1}^n F_s E_s EF_s \quad (12)$$

$$C_{52} = Q_{r3} P_{r3} \quad (13)$$

式中： C_{51} 为能源碳排放， C_{52} 为人工碳排放， F_s 为

运送和安装预制件的机械台班数量， E_s 为单位台班的能源消耗量， EF_s 为能源碳排放因子， Q_{r3} 为人工消耗量， P_{r3} 为人工碳排放因子。

2 实例分析

某华北城市的人工岛工程，围堤长约 22 km，采用 C35、F300 混凝土扭王字块作为护面块体，其中 5 t 扭王字块约 33.13 万 m³，合 15.57 万块，每块体积为 2.13 m³；2 t 扭王字块约 19.08 万 m³，合 22.42 万块，每块体积为 0.851 m³。扭王字块为素混凝土构件，配合比为 0.44（水）：1（水泥）：1.225（黄砂）：2.485（碎石）。

该工程扭王字块在预制场搅拌站浇筑，预制场占地面积 1 万 m²，距离施工现场的平均距离约 5 km。当 5 t 扭王字块的混凝土强度达到设计强度的 70% 时，转运至堆放场地继续养护，堆放区距离预制区 1 km、距离施工区平均距离约 4 km；当混凝土达到设计强度后，运至施工现场进行安装。

整个护堤工程的工期为 16 个月，前 8 个月将完成工程总量的 85%，扭王字块的平均日浇筑量约 2 000 m³；后 8 个月完成工程总量的 15%，扭王字块的平均日浇筑量约 500 m³。

2.1 扭王字块的定额消耗量

根据 JTS/T 276-1—2019《沿海港口水工建筑工程定额》^[12]，两种规格的扭王字块在预制、转运和安装过程中消耗的人工、材料及机械台班数量见表 4~6。

表 4 扭王字块预制的定额消耗量

单件 体积/m ³	人工/ 工日	C35 混凝土/ m ³	钢模板及 配件/kg	120 m ³ /h 混凝土 搅拌站/台班	3 m ³ 轮胎式 装载机/台班	70 m ³ /h 混凝土 输送泵车/台班	8 m ³ 混凝土搅拌 运输车/台班	30 t 履带式 起重机/台班
1	13.84	10.15	119.54	0.041	0.041	0.068	0.136	0.387
2	12.89	10.15	109.14	0.041	0.041	0.068	0.136	0.306

注：定额按 10 m³ 计量。

表 5 扭王字块转运的定额消耗量

单件 质量/t	人工/ 工日	30 t 履带式起重机/ 台班	20 t 载质量 汽车/台班
4.0	1.33	0.333	0.333
6.0	1.67	0.417	0.417

注：定额按 10 件，1 km 以内计量。

表 6 扭王字块施工（包括运送）的定额消耗量

单件 质量/t	人工/ 工日	70 t 履带式起重机/ 台班	20 t 载质量汽车 (超过 1 km)/台班
2.5	2.73	0.303	0.606(0.049)
5.0	3.41	0.379	0.758(0.066)

注：定额按 10 件计量。

2.2 扭王字块的碳排放核算

2.2.1 原材料生产阶段的碳排放量

水泥、黄砂、碎石、钢模板及配件、自来水等材料均纳入原材料生产阶段的碳排放测算范围，其中钢模板及配件按高峰期混凝土的日浇筑量确定并考虑周转利用，按 4 000 m³ 混凝土用量核算。根据上述配合比，每立方混凝土的材料用量为：水 205 kg/m³、水泥 466 kg/m³，黄砂 571 kg/m³，碎石 1 158 kg/m³。各类原材料的总消耗量相应的碳排放因子以及碳排放量见表 7。

表 7 原材料生产阶段的碳排放量

构件名称	材料名称	材料消耗量/t	材料碳排放因子/(kgCO ₂ ·t ⁻¹)	碳排放量/kgCO ₂
5 t 扭王字块	自来水	6.79×10 ⁴	0.168	1.14×10 ⁴
	硅酸盐水泥	1.54×10 ⁵	735	1.13×10 ⁸
	黄砂	1.89×10 ⁵	2.51	4.74×10 ⁵
	碎石	3.84×10 ⁵	2.18	8.37×10 ⁵
	钢模板及配件	43.66	1 381	6.03×10 ⁴
2 t 扭王字块	自来水	3.91×10 ⁴	0.168	0.66×10 ⁴
	硅酸盐水泥	8.89×10 ⁴	735	6.53×10 ⁷
	黄砂	1.09×10 ⁵	2.18	2.38×10 ⁵
	碎石	2.21×10 ⁵	2.51	5.55×10 ⁵
	钢模板及配件	47.82	1 381	6.60×10 ⁴

由表 7 可知，原材料生产阶段的碳排放总量为 1.805×10⁸ kgCO₂。其中，硅酸盐水泥的碳排放

最多，为 1.783×10⁸ kgCO₂，其次是碎石和黄砂，分别为 1.392×10⁶ 和 7.12×10⁵ kgCO₂，钢模板及配件的碳排放为 1.263×10⁵ kgCO₂。自来水的碳排放较少，为 1.8×10⁴ kgCO₂。因此，在原材料生产阶段，水泥生产是碳排放的主要贡献者，其占比约 98.78%，应把减排降碳的重点放在水泥生产过程中。

2.2.2 原材料运输阶段的碳排放量

根据工程实际情况，材料全部采用公路运输，运输车辆为载质量 18 t 的柴油货车。水泥采用同城运输，运距约 30 km；砂石及钢模板为异地运输，运距约 150 km，运输车辆考虑空载环境负荷，将材料的单程运距乘以往返系数 1.67。根据公式(4)计算得到原材料运输阶段的碳排放量见表 8。

根据表 8，原材料运输过程中的碳排放总量约 3.074×10⁷ kgCO₂，其中碎石运输的碳排放为 1.954×10⁷ kgCO₂、占比约 63.57%；黄砂和水泥的碳排放分别为 9.63×10⁶ 和 1.566×10⁶ kgCO₂，占比约 31.33%和 5.1%；钢模板及配件由于用量少，运输过程的碳排放较少，约 2.955×10³ kgCO₂。因此，在扭王字块原材料运输阶段，砂石运输是碳排放的主要来源，两者约占总排放的 95%。因此，应制定砂石运输的节能减排措施。

表 8 原材料运输阶段的碳排放量

构件名称	材料名称	材料质量/t	运输距离/km	运输碳排放因子/(kgCO ₂ ·t ⁻¹ ·km ⁻¹)	碳排放量/kgCO ₂
5 t 扭王字块	硅酸盐水泥	1.54×10 ⁵	50.0	0.129	9.93×10 ⁵
	黄砂	1.89×10 ⁵	250.5	0.129	6.11×10 ⁶
	碎石	3.84×10 ⁵	250.5	0.129	1.24×10 ⁷
	钢模板及配件	43.656	250.5	0.129	1.41×10 ³
2 t 扭王字块	硅酸盐水泥	8.89×10 ⁴	50.0	0.129	5.73×10 ⁵
	黄砂	1.09×10 ⁵	250.5	0.129	3.52×10 ⁶
	碎石	2.21×10 ⁵	250.5	0.129	7.14×10 ⁶
	钢模板及配件	47.816	250.5	0.129	1.545×10 ³

2.2.3 预制构件阶段的碳排放量

扭王字块制作阶段的碳排放主要是构件浇筑过程中施工机械运行和场内运输车辆所产生的碳

排放以及人工碳排放，根据公式(5)计算得到表 9 的机械碳排放结果。

表 9 扭王字块预制阶段的机械碳排放量

构件名称	施工机械名称	台班消耗量/台班	单位台班能源消耗量/(kg·台班 ⁻¹)或(kW·h·台班 ⁻¹)	能源碳排放因子/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)或(kgCO ₂ ·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	碳排放量/kgCO ₂
5 t 扭王字块	混凝土搅拌 120 m ³ /h	2 716.66	735.00	0.884 3	1.77×10 ⁶
	轮胎式装载机 3 m ³	1 358.33	83.44	3.1	3.51×10 ⁵
	混凝土泵车 70 m ³ /h	2 252.84	76.27	3.1	5.33×10 ⁵
	混凝土运输车 8 m ³	4 505.68	60.00	3.1	8.38×10 ⁵
	履带式起重机 30 t	10 137.80	52.76	3.1	1.66×10 ⁶
2 t 扭王字块	混凝土搅拌 120 m ³ /h	1 564.56	735.00	0.884 3	1.017×10 ⁶
	轮胎式装载机 3 m ³	782.28	83.44	3.1	2.02×10 ⁵
	混凝土泵车 70 m ³ /h	1 297.44	76.27	3.1	3.07×10 ⁵
	混凝土运输车 8 m ³	2 594.88	60.00	3.1	4.82×10 ⁵
	履带式起重机 30 t	7 383.96	52.76	3.1	1.21×10 ⁶

经计算，5 t 扭王字块在制作过程中的人工碳排放量为 8.84×10⁵ kgCO₂；2 t 扭王字块的人工碳排放量为 5.47×10⁵ kgCO₂，根据表 9，5 t 和 2 t 扭王字块的机械碳排放量分别为 5.152×10⁶ 和 3.218×10⁶ kgCO₂，总的碳排放量为 9.80×

10⁶ kgCO₂。
2.2.4 转运构件阶段的碳排放量
当 5 t 扭王字块强度达到设计强度的 70%时，将被转运到堆场继续养护，转运距离为 1 km。转运设备及人工产生的碳排放量见表 10。

表 10 扭王字块转运阶段的机械碳排放量

施工机械名称	台班消耗量/台班	单位台班能源消耗量/(kg·台班 ⁻¹)	能源碳排放因子/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	碳排放量/kgCO ₂
履带式起重机 30 t	5 838.75	52.76	3.1	9.55×10 ⁵
载重汽车 20 t	5 838.75	62.56	3.1	1.13×10 ⁶

根据公式(10)计算得到 5 t 扭王字块在转运过程中的人工碳排放量为 4.89×10⁴ kgCO₂。因此，总的碳排放量 2.134×10⁶ kgCO₂。

2.2.5 施工构件阶段的碳排放量

扭王字块施工包括运送和安装两个阶段，碳排放来源于运输车辆和施工机械的能源及人工消

耗，根据公式(11)，计算得到施工阶段的机械碳排放量见表 11。

经计算，扭王字块施工阶段的人工碳排放量为 2.37×10⁵ kgCO₂，而机械碳排放 8.445×10⁶ kgCO₂，总的碳排放量为 8.682×10⁶ kgCO₂。

表 11 扭王字块施工阶段的机械碳排放量

构件名称	施工机械名称	台班消耗量/台班	单位台班能源消耗/(kg·台班 ⁻¹)	碳排放因子/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	碳排放量/kgCO ₂
5 t 扭王字块	履带式起重机 70 t	5 901.03	52.76	3.1	9.65×10 ⁵
	载重汽车 20 t	11 802.06	62.56	3.1	2.29×10 ⁶
	运距超出 3 km	3 082.86	62.56	3.1	5.98×10 ⁵
2 t 扭王字块	履带式起重机 70 t	6 793.26	52.76	3.1	1.11×10 ⁶
	载重汽车 20 t	13 586.52	62.56	3.1	2.63×10 ⁶
	运距超出 4 km	4 394.32	62.56	3.1	8.52×10 ⁵

2.3 扭王字块物化阶段的碳排放分析

根据以上计算分析，该工程扭王字块在物化阶段的碳排放总量达到 2.318×10⁸ kgCO₂，其中原

材料生产和原材料运输两个阶段的碳排放总量为 2.11×10⁸ kgCO₂；扭王字块制作和转运两个阶段的碳排放总量为 1.193×10⁷ kgCO₂；施工阶段的碳排

放总量为 $8.682 \times 10^6 \text{ kgCO}_2$ ，各阶段碳排放的占比见图 1。

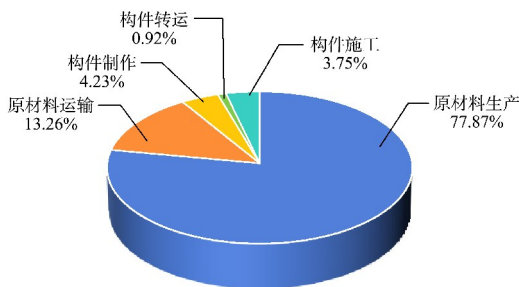


图 1 扭王字块物化过程中各个阶段的碳排放百分比

由图 1 可知，扭王字块物化过程中，各阶段的碳排放数量十分悬殊，其中原材料生产阶段的碳排放最大，占比超过 75%；其次是原材料运输，占比接近 15%；扭王字块预制和施工阶段的碳排放不大，两者的占比均为 5% 以下；转运阶段的碳排放更少，不到 1%。因此，扭王字块的原材料生产和运输是重点减排对象，应针对这两个阶段制定相应的减排策略。

3 扭王字块物化阶段的减排策略

3.1 原材料生产的减排策略

扭王字块原材料中的水泥生产是碳排放的主要来源。因为水泥的主要原料是石灰石、砂岩、铝铁质矿料等，这些材料在高温分解时将产生大量 CO_2 。因此，原料替代是水泥生产最有效的减排方法，如采用电石渣、粉煤灰、钢渣、硅钙渣等材料替代石灰石，电石渣主要由 70% 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 组成，相比于石灰石更易分解；而钢渣是 Ca 、 Mg 、 Fe 、 Si 、 Al 等元素的氧化物，可以直接替代水泥生料中的石灰质原料，大幅度减少 CO_2 的排放。原料替代不仅降低了碳排放，还协同处置固体废弃物和垃圾，开展工业固废替代研究和规模化应用是实现水泥绿色生产的重要途径；另外，优化生产工艺，改进或引用先进的生产设备，淘汰高耗能生产方式也是降低水泥及砂石生产碳排放的有效方法，如采用天然气、核能和水能等原料进行电能转换，可以提高资源和能源利用率，大幅度减少废弃物排放。

3.2 原材料运输的减排策略

扭王字块物化阶段的碳排放主要来自原材料

生产和运输，两者的总占比超过 90%，而对于具体工程，原材料生产的碳排放难以控制，原材料运输则是减排重点。由式(4)可知，原材料运输的碳排放主要与材料质量、运距及碳排放因子有关，而原材料质量取决于混凝土配合比，基本为定值。因此，要降低原材料运输的碳排放只能从运距和运输方式两方面入手。

3.2.1 改变原材料运距的碳排放分析

砂石是扭王字块原材料运输阶段碳排放的主要贡献者，应针对砂石运输制定减碳措施。该护堤工程的水泥为同城运输，运距在 30 km 以内；砂石为异地采购，运距在 150 km 以内，经过计算得到的原材料运输的碳排放总量为 $3.074 \times 10^7 \text{ kgCO}_2$ ，砂石运输的碳排放量为 $2.917 \times 10^7 \text{ kgCO}_2$ 。如果砂石就近采购，运距与水泥一样控制在 30 km 以内，采用同样方法计算可得原材料运输的碳排放总量为 $0.74 \times 10^7 \text{ kgCO}_2$ ，砂石运输的碳排放量为 $0.583 \times 10^7 \text{ kgCO}_2$ ，即砂石运距缩短至原来的 1/5 时，原材料运输的碳排放总量降低 3/4、砂石运输的碳排放量降低 4/5。因此，对于砂石等用量多、质量大的材料应就地取材，减少运距的降排效果显著。

3.2.2 改变原材料运输方式的碳排放分析

如果砂石材料运距不变、改变运输方式，则不同方式的碳排放计算结果见表 12。

表 12 不同运输方式的碳排放结果

运输方式	砂石碳排放量/ kgCO_2	原材料碳排放 总量/ kgCO_2	砂石碳排放 占比/%
柴油货车 18 t	2.917×10^7	3.074×10^7	94.89
水路运输	2.941×10^6	4.51×10^6	65.21
铁路运输	2.262×10^6	3.832×10^6	59.03

由表 12 可知，同样运距的砂石材料采用不同的运输方式，碳排放结果完全不同，在公路、铁路和水路 3 种运输方式中，公路运输砂石的碳排放量最大、水路次之、铁路最小，水路运输的碳排放约为公路的 1/10，铁路运输的碳排放约为公路的 1/13，而且不同运输方式的砂石碳排放占比也不同，公路运输占比 94.89%、水路运输占比 65.21%、铁路运输占比 59.03%，表明长距离、大批量的原材料运输适合采用铁路或水路，因此，

应提高铁路的辐射能力, 推广使用电气化铁路运输; 另外, 还应充分发挥水路能耗低、运输量大、碳排放少的优势。

由于短距离运送材料基本采用公路运输, 而运输货车的碳排放主要来自油料燃烧。目前, 减少重型货车碳排放的思路: 1) 改善车辆的运行工况, 提高热效率; 2) 改变车辆动力系统。一般来说, 发动机的运行工况十分复杂, 不易改善, 而改变动力系统则较为可行, 如采用天然气(CNG 或 LNG)、甲醇和氢气等低碳燃料为车辆提供动力。根据资料, 柴油车的 CO₂ 排放量平均为 1 255.02 g/km, LNG 车的 CO₂ 排放量平均为 1 030.51 g/km, 即柴油车的碳排放是 LNG 车的 1.22 倍, 如果将上述工程中的重型货车更换为 LNG 车, 则砂石运输的碳排放总量将减少约 18%。在表 3 中, 同样载质量的柴油货车碳排放因子是汽油货车的 1.24 倍, 如果将工程实例的砂石运输改为汽油货车, 则原材料运输的碳排放将减少约 20%, 但选择公路运输车辆时不仅要考虑减排效益, 还要分析经济效益。

除此以外, 减少运输荷载, 如原材料采用轻质材料或用轻质材料替代部分水泥、砂石等高消耗原料, 也能达到节能减排的目的。

4 结语

1) 在扭王字块物化阶段, 原材料生产的碳排放量最多、其次是原材料运输, 两者的占比超过总排放量的 90%, 而扭王字块预制、转堆及施工过程中碳排放较少, 占比不到 10%, 应针对原材料生产和运输制定减排策略。

2) 在原材料生产阶段, 水泥是碳排放的重要贡献者, 占比接近 99%, 可采用原料替代或优化生产工艺降低水泥生产的碳排放; 在原材料运输阶段, 砂石运输的碳排放数量巨大, 占比达 95%, 而砂石运输的碳排放主要与运距和运输方式有关。

3) 在原材料的运输数量及运输方式不变的前提下, 将砂石运距缩短至原来的 1/5, 则原材料运输阶段的碳排放总量降低 3/4、砂石材料的运输碳排放量降低 4/5, 对于砂石等用量多、质量大的原材料应就近取材以降低排放量。

4) 在原材料的运输数量及运输距离不变的前提下, 采用不同的运输方式则碳排放数量相差悬殊; 水路运输的碳排放约为公路的 1/10, 铁路运输的碳排放约为公路的 1/13。不同运输方式的砂石碳排放与总排放的占比也不同, 公路运输占比最大、水路次之、铁路最少; 长距离运送砂石等原材料应选择铁路或水路。

5) 公路运输车辆的燃料不同, 碳排放数量也不同, 如果将柴油货车改为 LNG 车, 则砂石材料运输的碳排放总量将减少约 18%; 如果将柴油货车改为同样载质量的汽油货车, 则砂石材料运输的碳排放总量将减少约 20%; 但公路运输车辆的选择不仅要考虑减排效益, 还要分析经济效益。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院有限公司, 中国建筑标准设计研究院有限公司. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [2] 温日琨, 祁神军. 不同结构住宅建筑碳排放流的模拟研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(6): 26-34.
- [3] 高宇, 李政道, 张慧, 等. 基于 LCA 的装配式建筑建造全过程的碳排放分析[J]. 工程管理学报, 2018, 32(2): 30-34.
- [4] 齐亚楠, 邓万军. 基于 LCA 的高速公路施工期碳排放量化边界界定[J]. 中国公路, 2023(5): 88-92.
- [5] 邹安全, 罗杏玲, 全春光. 基于 EIO-LCA 的钢铁产品生命周期碳排放研究[J]. 管理世界, 2013(12): 178-179.
- [6] 徐伟涛. 基于 LCA 法的木结构建筑使用阶段碳排放探讨[J]. 林产工业, 2021, 58(2): 36-38.
- [7] 燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和 CO₂ 排放评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [8] 陈金潮. 在用重型柴油车碳排放特征及减排分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- [9] 顾鹏, 马晓明. 基于居民合理生活消费的人均碳排放计算[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8): 1509-1517.
- [10] 王霞. 住宅建筑生命周期碳排放研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [11] 河南省建筑工程标准定额站. 河南省统一施工机械台班费用定额: HA JX-31-2017[S]. 郑州: 河南省住房和城乡建设厅, 2017.
- [12] 交通运输水运工程造价定额中心, 原交通部水运工程定额站. 沿海港口水工建筑工程定额: JTS/T 276-1—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.

(本文编辑 赵娟)