

# 利用废料制备再生沥青混合料全生命周期的环境效益评价

雷斌,周健英,余林杰,晏育松

(南昌大学 工程建设学院,江西 南昌 330031)

**摘要:** 分别以钢渣、铜渣作为再生粗、细骨料,并添加不同掺量的铣刨料(RAP)制备新型再生沥青混合料。基于生命周期分析理论对新型再生沥青混合料的原材料生产、沥青混合料加热拌合、摊铺及碾压4个阶段能耗与碳排放进行评估,并对其环境效益进行分析。结果表明:原材料生产阶段的能耗及碳排放在整个生命周期中影响显著;随着RAP掺量增加,新型再生沥青混合料整个生命周期内的能耗和碳排放呈降低趋势,RAP掺量每增加10%,材料阶段能耗平均降低61.97 MJ/m<sup>3</sup>,碳排放平均降低3.85 kg/m<sup>3</sup>,具有良好的环境效益。

**关键词:** 环境效益;碳排放;生命周期分析(LCA)理论;新型再生沥青混合料

中图分类号: TU528.42

文献标识码: A

文章编号: 1001-702X(2023)05-0056-05

## Environmental benefit evaluation of new recycled asphalt mixture prepared from waste in whole life cycle

LEI Bin, ZHOU Jianying, YU Linjie, YAN Yusong

(School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** In this paper, steel slag and copper slag are used as recycled coarse aggregate and recycled fine aggregate respectively, and milling materials (RAP) with different replacement rates are added to prepare new recycled asphalt mixtures. Based on the life cycle analysis (LCA) theory, the four stages of raw material production, asphalt mixture heating mixing, paving and rolling of new recycled asphalt mixtures are evaluated and the environmental benefit is analyzed. The results show that the energy consumption and carbon emissions in the production stage of materials have a significant impact on the whole life cycle. With the increase of RAP content, the energy consumption and carbon emissions of the new recycled asphalt mixture in the whole life cycle show a downward trend. For every 10% increase in RAP dosage, the average energy consumption in the material stage decreases by 61.97 MJ/m<sup>3</sup>, and the average carbon emissions decrease by 3.85 kg/m<sup>3</sup>, which has good environmental benefits.

**Key words:** environmental benefit, carbon emission, life cycle analysis (LCA) theory, new recycled asphalt mixture

## 0 引言

目前,国内外学者对废弃物作为替代材料制备沥青混合料的再生技术进行了大量研究。Shahinaz等<sup>[1]</sup>和Mroueh等<sup>[2]</sup>研究表明,将工业副产高炉渣替代天然骨料,对于降低能源消耗及碳排放效果显著。Maslehuiddin等<sup>[3]</sup>和Juan等<sup>[4]</sup>研究证明,使用钢渣作为粗骨料可以提高沥青混合料的力学性能。Pundhir等<sup>[5]</sup>研究发现,铜渣作为细骨料可以在沥青混合料中提供嵌挤

力以提高混合料的力学性能。Geert等<sup>[6]</sup>研究得出,铣刨料(RAP)具有良好的经济和环境效益。将RAP回收利用到新的沥青路面中可以降低碳排放<sup>[7]</sup>。由于RAP在使用期间会损失部分功能,掺入再生剂后RAP的各项性能(刚度、开裂、车辙和湿气敏感性)均满足使用要求<sup>[8-9]</sup>。Qiao等<sup>[10]</sup>研究发现,在新沥青混合料中掺加40%RAP可将整个路面生命周期的总成本降低20%。江峰<sup>[11]</sup>的研究表明,掺加60%RAP的厂拌热再生沥青混合料各项性能满足沥青路面的面层使用要求。Martins等<sup>[12]</sup>将100%RAP再生沥青混合料与普通沥青混合料对比分析,实验表明,在适宜的配合比设计下,二者性能相同,从原材料生产到铺砌路面整个生命周期中可降低35%碳排放,降低50%材料成本。

本文以钢渣、铜渣作为再生粗、细骨料,以再生微粉为填充料,添加适量RAP制备新型再生沥青混合料。基于生命周期分析(LCA)理论,研究RAP掺量对生产新型再生沥青混合

基金项目:国家自然科学基金项目(51968046);

江西省主要学科学术和技术带头人培养计划——领军人才项目(20204BCJ22003)

收稿日期:2022-12-08;修订日期:2023-02-14

作者简介:雷斌,男,1980年生,博士,教授,博导,主要从事再生混凝土方向研究,E-mail:blei@ncu.edu.cn。

料的能耗及碳排放的影响,基于与普通沥青混合料的对比,分析新型再生沥青混合料的环境效益以及节能减排效果。

## 1 量化分析方法

### 1.1 研究目标与范围

LCA 理论是针对任何产品或系统进行环境评估的全球标准化方法,有助于规划和决策过程<sup>[13]</sup>。首先,LCA 理论需要明确研究目标并对其范围进行界定<sup>[14]</sup>。本文研究目标是新型再生沥青混合料从原材料生产到道路建设整个生命周期中的碳排放和能耗。为比较固体废弃物及不同 RAP 掺量情况下生产沥青混合料对环境的影响,沥青混合料选用 AC-13 级配,并控制沥青混合料配合比以满足其功能要求和技术性能。将新型再生沥青混合料从原材料生产到道路建设过程细分为原材料生产、沥青混合料加热拌合、摊铺及碾压 4 个阶段。

### 1.2 生命周期清单

#### 1.2.1 原材料生产阶段

沥青混合料主要由沥青、粗骨料、细骨料和矿粉等 4 种组成。取沥青、粗骨料、细骨料和微粉 4 种组分为系统边界进行计算。

##### (1) 骨料

分别选用钢渣和铜渣作为再生粗、细骨料,并将回收过程分为生产阶段和运输阶段。

生产阶段,钢渣预处理的燃料消耗数据来源于钢渣制造商<sup>[15]</sup>,处理步骤包括磁选、洗涤、破碎、筛选等过程。该阶段中,钢渣放入破碎机到加工得到符合道路规范要求的粒径尺寸,生产设备的能耗均以电能形式计算。基于对钢渣工艺流程调研<sup>[16]</sup>,总结主要加工机械设备单位能耗,计算出加工 1 t 钢渣骨料消耗电能 2.75 kW·h,符合级配的粗骨料约占处理钢渣总量的 65%<sup>[17]</sup>,电能的发热量及碳排放系数分别是 3.6 MJ/(kW·h)、0.5257 kg/(kW·h),故生产单位质量钢渣能耗 15.23 MJ/t,碳排放 2.23 kg/t。

因铜渣细骨料有近似天然砂的颗粒组成,可以满足混凝土中细骨料的级配要求<sup>[18]</sup>。但仍然需要筛分不合格尺寸铜渣,可得到符合细骨料级配要求的占 70%,计算可得,生产单位质量铜渣细骨料所需能耗和碳排放分别为 0.26 MJ/t、0.08 kg/t。

天然骨料的能耗及碳排放数据来源于我国本地化 LCA 基础数据 CLCD。天然粗骨料的能耗和碳排放分别为 31.82 MJ/t、2.43 kg/t;天然细骨料的能耗和碳排放分别为 58.56 MJ/t、8.69 kg/t。

运输阶段,根据 JT/T 719—2016《营运货车燃料消耗量限值及测量方法》规定,运输车辆采用柴油货车运输,确定了单位运距的能耗和碳排放。需要注意的是,一个运输循环是满载

前行和空载返回,卡车的油耗因满载和空载行驶而异。运送至沥青混合料加工厂,假定距离 30 km,可计算运送单位质量材料的能耗 7.59 MJ/t,碳排放 1.31 kg/t。

##### (2) 旧沥青路面再生利用

沥青路面再生技术采用专用铣刨设备铣刨原沥青路面,将旧料运至拌合站后进行破碎和筛分,掺入适当比例的新骨料、改性沥青、再生剂、矿粉及水等材料重新拌合,实现旧沥青路面的再生利用。虽然添加旧料的主要作用为取代天然骨料,但因旧料含有部分沥青,因此除了可节省天然骨料的使用外,也可节省新沥青用量。在已知新旧沥青混合料油石比的前提下,再生沥青混合料所需添加的新沥青量会比普通沥青混合料少<sup>[19]</sup>。

将制备 RAP 分为铣刨和运输 2 个阶段。假设路面铣刨至下面层顶部,铣刨深度 10 cm,机型采用维特根 W2000 铣刨机,同时根据工程实际将平均运距定为 5 km。满荷载下工作,油耗 100 L/h;可计算铣刨单位旧料能耗 1.46 MJ/t,碳排放 0.11 kg/t。运输至沥青加工拌合厂距离 30 km,可计算出生产单位质量 RAP 能耗 9.05 MJ/t,碳排放 1.41 kg/t。

##### (3) 再生微粉

废弃混凝土、废弃黏土砖等建筑垃圾在破碎、筛分过程中产生的粒径小于 0.16 mm 的粉尘被称为再生微粉<sup>[20-21]</sup>。微粉制备方法存在多种,本文中再生微粉是通过制备再生骨料过程中以微细粉末副产品的方式得到微粉<sup>[22]</sup>。这种方式不需要专门研磨过程,仅需要利用鼓风机将骨料与微粉分离,故能耗比较低。生产单位质量再生微粉所需能耗和碳排放分别为 0.51 MJ/t、0.12 kg/t。

结合上述结果及我国本地化 LCA 基础数据库 CLCD,可得各种原材料生产的能耗及排放,如表 1 所示。沥青混合料采用 AC-13 级配,其中:10~15 mm 碎石为 27%,5~10 mm 碎石为 33%,0~5 mm 碎石为 13%,砂 20%,矿粉 7%,油石比 4.8%。

表 1 沥青、再生微粉和 RAP 生产阶段的能耗及碳排放

原材料	新沥青	再生微粉	RAP
能耗/(MJ/t)	5412.22	0.51	9.05
碳排放/(kg/t)	323.035	0.12	1.41

假设新旧沥青混合料的油石比相同,新沥青混合料的用量可以随着 RAP 掺量增加成比例减少。部分 RAP 因使用后变得坚硬且加工性较差<sup>[23]</sup>,添加适量的再生剂可改善性能<sup>[24]</sup>。由于目前技术限制,RAP 的掺量太大时,添加再生剂后沥青混合物性能也很难满足要求,故本文中 RAP 掺量不超过 60%。再生剂的添加量很小,故文中未考虑再生剂的能耗及碳排放。因钢渣、铜渣及 RAP 等再生材料的密度均大于普通沥青混合料,但完成一特定工程所需的沥青混合料体积为一定

值,本文各项材料的预设密度:天然粗、细骨料 2700 kg/m<sup>3</sup>、沥青 1100 kg/m<sup>3</sup>、钢渣 3300 kg/m<sup>3</sup>、铜渣 3900 kg/m<sup>3</sup>、RAP 2540 kg/m<sup>3</sup>、再生微粉和矿粉均为 2600 kg/m<sup>3</sup>。结合 AC-13 沥青混合料的质量配比换算成体积配比(见表 2),推算出单位体积(1 m<sup>3</sup>)不同 RAP 掺量下新型再生沥青混合料的能耗及碳排放如表 3 所示。

表 2 新型沥青混合料的配比

编号	RAP 体积掺量/%	材料用量/(kg/m <sup>3</sup> )				
		RAP	新沥青	天然粗骨料或钢渣	天然细骨料或铜渣	矿粉或再生微粉
AC-13	0	0	115.5	1445.8	795.2	169.0
RAP-0	0	0	115.5	1767.1	1148.6	169.0
RAP-10	10	260	104.5	1590.6	1033.5	150.8
RAP-20	20	520	92.4	1412.4	920.4	135.2
RAP-30	30	780	81.4	1237.5	803.4	117.0
RAP-40	40	1040	69.3	1059.3	690.3	101.4
RAP-50	50	1300	58.3	884.4	573.3	83.2
RAP-60	60	1560	46.2	706.2	460.2	67.6

注:AC-13 采用天然粗、细骨料及矿粉;RAP 系列采用钢渣、铜渣及再生微粉。

表 3 不同 RAP 再生沥青混合料生产阶段的能耗及碳排放

编号	能耗/(MJ/m <sup>3</sup> )	碳排放/(kg/m <sup>3</sup> )	编号	能耗/(MJ/m <sup>3</sup> )	碳排放/(kg/m <sup>3</sup> )
AC-13	661.23	54.25	RAP-30	481.64	30.50
RAP-0	655.56	42.94	RAP-40	415.66	26.35
RAP-10	613.58	38.79	RAP-50	349.69	22.21
RAP-20	547.61	34.64	RAP-60	283.72	19.86

由表 3 可知,在原材料生产阶段,当 RAP 掺量为 0 时,新型再生沥青混合料的能耗及碳排放量均低于普通沥青混合料。随 RAP 掺量增加,生产单位体积再生沥青混合料的能耗及碳排放明显降低。当 RAP 掺量达到 60%时,能耗及碳排放降幅分别为 56.72%、53.75%。可知,RAP 掺量每增加 10%,材料阶段能耗平均降低 61.97 MJ/m<sup>3</sup>,碳排放平均降低 3.85 kg/m<sup>3</sup>。

表 5 整个生命周期内新型再生沥青混合料的能耗及碳排放

编号	RAP 掺量/%	能耗/(MJ/m <sup>3</sup> )					碳排放/(kg/m <sup>3</sup> )				
		生产阶段	拌合阶段	摊铺阶段	碾压阶段	合计	生产阶段	拌合阶段	摊铺阶段	碾压阶段	合计
AC-13	0	661.23	239.47	34.57	67.54	1002.81	54.25	42.46	3.43	7.22	107.36
RAP-0	0	655.56	239.47	34.57	67.54	997.14	42.94	42.46	3.43	7.22	96.05
RAP-10	10	613.58	239.47	34.57	67.54	955.16	38.79	42.46	3.43	7.22	91.90
RAP-20	20	547.61	239.47	34.57	67.54	889.19	34.64	42.46	3.43	7.22	87.75
RAP-30	30	481.64	239.47	34.57	67.54	823.22	30.50	42.46	3.43	7.22	83.61
RAP-40	40	415.66	239.47	34.57	67.54	757.24	26.35	42.46	3.43	7.22	79.46
RAP-50	50	349.69	239.47	34.57	67.54	691.27	22.21	42.46	3.43	7.22	75.32
RAP-60	60	283.72	239.47	34.57	67.54	625.29	19.86	42.46	3.43	7.22	72.97

### 1.2.2 沥青混合料加热拌合阶段

沥青混合料生产包括骨料堆放、骨料供应、骨料加热、沥青加热和混合料搅拌等过程。参考 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》,高速公路和一级公路宜采用间歇式拌合机拌合,当料源或质量不稳定时,不得采用连续式拌合机,故本文以间接式拌合设备为研究对象研究再生沥青混合料的能耗和碳排放情况。间接式拌合设备生产沥青混合料的工艺流程主要包括骨料干燥加热、沥青加热、沥青混合料拌合 3 个过程。统计沥青混合料生产阶段各过程的能源消耗类型和数量<sup>[25]</sup>,并结合柴油、重油、煤、电力等各能源发热系数和碳排放系数<sup>[26]</sup>分别计算发热量和碳排放,得到沥青混合料加热拌合过程的能耗和碳排放如表 4 所示。

表 4 沥青混合料加热拌合过程的能耗和碳排放

施工环节	骨料干燥加热	沥青脱桶加热	沥青拌合站拌合
能耗/(MJ/m <sup>3</sup> )	11.35	188.92	39.20
碳排放/(kg/m <sup>3</sup> )	9.43	21.06	11.97

### 1.2.3 沥青混合料摊铺和碾压阶段

在沥青混合料摊铺阶段中,能耗及碳排放主要来自内燃机中柴油的燃烧,排放出 CO<sub>2</sub> 等温室气体。在碾压阶段中使用的施工机械是压路机,产生机械能耗。同时采用钢轮压路机静压、振压,轮胎式压路机组合的方式使路面得到最佳压实效果,碾压过程中碳排放主要来自压路机燃油消耗。根据陈云等<sup>[27]</sup>给出的计算公式,得出单位沥青混合料摊铺阶段的能耗及碳排放分别为 34.57 MJ/m<sup>3</sup> 和 3.43 kg/m<sup>3</sup>,碾压阶段的能耗及碳排放分别为 67.54 MJ/m<sup>3</sup> 和 7.22 kg/m<sup>3</sup>。

## 2 混合料全生命周期的能耗及碳排放

假定不同 RAP 掺量的新型再生沥青混合料施工工艺基本相同,即拌合、摊铺及碾压阶段下不同 RAP 掺量的新型再生沥青混合料能耗及碳排放相同,得到其在原材料生产、拌合、摊铺及碾压阶段整个生命周期内的能耗及碳排放见表 5。

由表 5 可知:

(1) 随着 RAP 掺量增加,整个生命周期的能耗及碳排放明显下降。RAP 掺量由 0 增加到 60%,原材料生产阶段能耗从 997.14 MJ/m<sup>3</sup> 下降到 625.29 MJ/m<sup>3</sup>,降低了 37.29%,总碳排放从 96.05 kg/m<sup>3</sup> 下降到 72.97 kg/m<sup>3</sup>,降低了 24.03%。

(2) 新型再生沥青混合料生产阶段的能耗和碳排放在整个生命周期的能耗和碳排放的占比也随着 RAP 掺量增加而降低,RAP 掺量由 0 增加到 60%,能耗占比从 65.74%降低到 45.37%,碳排放占比从 44.71%降低到27.22%。这说明材料生产阶段的能耗及碳排放在整个生命周期中影响显著。

### 3 环境效益分析

将钢渣、铜渣作沥青混合料骨料时可以提高沥青混凝土的性能。将旧沥青回收利用不仅降低原材料生产能耗,而且符合可持续发展的战略。为了描述环境影响,从酸化(AP)、富营养化(EuP)、全球变暖(GWP)、臭氧层损耗(ODP)、光化学氧化物生成(POCP)等 5 个环境影响因素指标进行分析<sup>[28-30]</sup>。由文献[31]给出各过程的数据,根据 LCA 方法计算得到单位体积(1 m<sup>3</sup>)沥青混合料的环境影响因素指标值。假定普通沥青混合料的 5 个因素对环境的影响作用设置为 1,不同 RAP 掺量的新型再生沥青混合料与普通沥青混合料对比分析结果如图 1 所示。

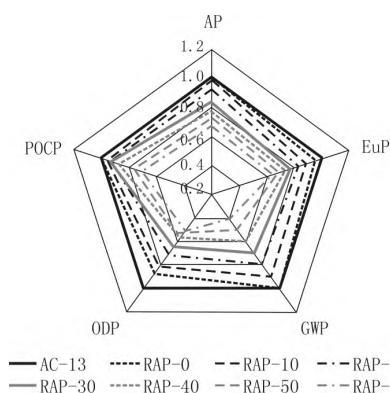


图 1 新型沥青混合料与普通沥青混合料的对比分析

由图 1 可知,新型再生沥青混合料对研究的所有环境影响因素指标与普通沥青混合料对比都存在优势。随着 RAP 掺量增加,新型再生沥青混合料的 5 个环境影响因素值均明显减小,GWP 影响因素指标的减小趋势最明显,表明新型再生沥青混合料的环境效应显著。当 RAP 掺量为 0 时,新型再生沥青混合料的 5 个环境影响因素指标均小于普通沥青混合料。当 RAP 掺量达到 60% 时,新型再生沥青混合料的 GWP 环境影响因素指标仅是普通沥青混合料的 0.4,其余 4 个指标在 0.4~0.7 范围之内。其原因是废弃物回收利用可以减少天然材料的开采和对土地的占用面积,降低重金属的环境污染。由于

天然沥青的碳排放放在材料生产阶段占比较大,单位体积混合料中使用的天然沥青用量减少,使得 GWP 环境影响因素指标降低的趋势最明显。虽然骨料在单位体积沥青混合料中占比高达 83%,但钢渣、铜渣作为再生骨料等体积替代天然骨料所产生的碳排放相当,所以其对降低 GWP 环境影响因素指标的作用比较少。

考虑回收利用的附加效益,假设将原所占土地面积规划为绿化带。据估计,1 m<sup>2</sup> 绿化面积年吸收 CO<sub>2</sub> 4.29 kg,1 棵树年吸收 CO<sub>2</sub> 18.3 kg。可得,生产 1 m<sup>3</sup> 的普通沥青混合料产生的碳排放分别相当于 25.03 m<sup>2</sup> 绿化面积和 5.87 棵树木一年所吸收的 CO<sub>2</sub>。如采用 RAP 掺量为 60% 的新型再生沥青混合料时,可较 RAP 掺量为 0 时减少 5.38 m<sup>2</sup> 绿化面积,1.26 棵树木。

### 4 结论

(1) 生产未添加 RAP 的新型再生沥青混合料的能耗及碳排放均小于普通沥青混合料。随着 RAP 掺量的增加,新型再生沥青混合料在整个生命周期内的能耗及碳排放明显降低。RAP 掺量每增加 10%,材料阶段能耗平均降低 61.97 MJ/m<sup>3</sup>,碳排放平均降低 3.85 kg/m<sup>3</sup>。

(2) 当 RAP 掺量从 0 增加到 60%,原材料阶段在整个生命周期中能耗占比从 65.74%降低到 45.37%,碳排放占比从 44.71%降低到 27.22%。原材料生产阶段的能耗及碳排放在整个生命周期中影响显著。

(3) RAP 掺量为 0 的新型再生沥青混合料的 GWP、AP、EuP、ODP、POCP 等 5 个环境影响因素指标均小于普通沥青混合料。随着 RAP 掺量增加,新型再生沥青混合料的 5 个环境影响因素指标均减小,GWP 环境影响因素指标的减小趋势最明显。

### 参考文献:

- [1] Shahinaz Sayagh, Anne Ventura, Tung Hoang, *et al.* Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures. [J]. Conservation and Recycling, 2010, 54 (6) : 348-358.
- [2] Mroueh Ulla-Maija, Paula Eskola, Jutta Laine-Ylijoki. Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction [J]. Waste Management, 2001 (21) : 271-277.
- [3] Maslehuddin M, Alfarabi M Sharif, Shameem M, *et al.* Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17 (2) : 105-112.
- [4] Juan M Manso, Juan A Polanco, Milagros Losañez, *et al.* Durability of concrete made with EAF slag as aggregate [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28 (6) : 528-534.
- [5] Pundhir N K S, Kamaraj C, Nanda P K. Use of copper slag as-

- construction material in bituminous pavements[J], *J.Sci.Ind.Res.*, 2005, 64: 997–1002.
- [6] Geert Jacobs, Alexandros Margaritis, David Hernando, *et al.* Influence of soft binder and rejuvenator on the mechanical and chemical properties of bituminous binders [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 287: 125596.
- [7] Fawaz Kaseer, Amy Epps Martin, Edith Arúmbula–Mercado. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211: 974–987.
- [8] Walaa Mogawer, Thomas Bennert, Jo Sias Daniel, *et al.* Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2012 (1): 183–208.
- [9] Hisham Qasrawi. The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 54: 298–304.
- [10] Qiao Yaning, Eshan Dave, Tony Parry, *et al.* Life cycle costs analysis of reclaimed asphalt pavement (RAP) under future climate[J]. *Sustainability*, 2019, 11 (19): 5414.
- [11] 江锋. 60%RAP 掺量厂拌热再生沥青混合料性能研究[J]. *交通科技*, 2020 (6): 130–134.
- [12] Martins Zaumanis, Rajib B Mallick, Robert Frank. 100% Hot mix asphalt recycling: Challenges and benefits[J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14: 3493–3502.
- [13] Devaki H, Shanmugapriya S. LCA on construction and demolition waste management approaches: A review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 65: 764–770.
- [14] Khasreen, MM Khasreen, Banfill P F, *et al.* Menzies life–cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review[J]. *Sustainability*, 2009 (3): 674–701.
- [15] Li Lufan, Ling Tung–Chai, Pan Shu–Yuan. Environmental benefit assessment of steel slag utilization and carbonation: A systematic review[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 806 (1): 150280.
- [16] J Xie, Z Wang, F Wang, *et al.* The life cycle energy consumption and emissions of asphalt pavement incorporating basic oxygen furnace slag by comparative study [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (8): 4540.
- [17] 陈奠东, 武旭, 张富奎, 等. 钢渣作为集料在道路工程中的均质性应用研究[J]. *公路*, 2021, 66 (1): 82–86.
- [18] 阿迈, 侯佳伟, 李生虎, 等. 不同粒度水冷铜渣组织结构及热性能分析[J]. *冶金工程*, 2019, 6 (2): 116–122.
- [19] 刘利军. 再生沥青混合料节能与减碳效益研究[J]. *公路工程*, 2014 (4): 10–16.
- [20] 毛新奇, 屈文俊, 朱鹏. 建筑垃圾再生微粉的研究现状[J]. *混凝土与水泥制品*, 2015 (8): 89–93.
- [21] 李述俊, 赵青龙, 李秋义, 等. 再生微粉基本性能及活性试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38 (10): 3314–3319.
- [22] 万惠文, 水中和, 林宗寿, 等. 再生混凝土的环境评价[J]. *武汉理工大学学报*, 2003 (4): 17–20, 23.
- [23] Hamid Jahanbakhsh, Mohammad M. Karimi, Hamed Naseri, *et al.* Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118837.
- [24] Ben Moins, David Hernando, Matthias Buyle, *et al.* On the road again! An economic and environmental break–even and hotspot analysis of reclaimed asphalt pavement and rejuvenators[J]. *Conservation and Recycling*, 2022, 177: 106014.
- [25] Peng Bo, Cai Chunli, Yin Guangkai, *et al.* Evaluation system for CO<sub>2</sub> emission of hot asphalt mixture [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2015, 2 (2): 116–124.
- [26] Ahmed Sabab Sharek, Kalim U Shah. Tracking the quality of scientific knowledge inputs in reports generated by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [J]. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 2021, 11 (4): 586–594.
- [27] 陈云, 纪小平, 周泽洪. 沥青路面施工能耗与碳排放评价[J]. *公路*, 2019, 64 (6): 260–265.
- [28] Janez Turk, Zvonko Cotič, Ana Mladenović, *et al.* Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA[J]. *Waste Management*, 2015 (45): 194–205.
- [29] Ahmed Abdalla, Ahmed F Faheem, Evelyn Walters. Life cycle assessment of eco–friendly asphalt pavement involving multi–recycled materials: A comparative study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132471.
- [30] Hauschild, M Z, Goedkoop, *et al.* Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2013, 18: 683–697.
- [31] Lizasoain–Arteaga Esther, Lastra–González Pedro, Indacochea–Vega Irune, *et al.* Comprehensive analysis of the environmental impact of electric arc furnace steel slag on asphalt mixtures [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 123–121. ▲