

钢渣集料沥青路面 LCA 环境负荷研究

万友明¹⁾ 汪福松²⁾ 吴少鹏²⁾ 谢 君²⁾

(广东省南粤交通揭惠高速公路管理中心¹⁾ 揭阳 522000)
(武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室²⁾ 武汉 430070)

摘要:文中基于我国高速公路沥青路面的典型结构确定了 LCA 功能单位,按照环境负荷核算规律和 LCA 框架原理将沥青路面施工划分为五个关键阶段,借助 eFootprint 数据库核算了各个阶段的 12 个环境指标,分析了钢渣作为沥青路面粗集料的能源消耗和温室气体排放特点.结果表明:整个钢渣沥青路面在功能单位内造成了 1.12 TJ 能耗和 20.30 t 当量 CO₂ 排放,其中原材料生产造成了最大的环境负荷.

关键词:沥青路面;钢渣;绿色公路;LCA;环境负荷

中图分类号:U414

doi:10.3963/j.issn.2095-3844.2022.05.028

0 引言

钢渣作为典型工业固体废弃物在基础设施建设领域得到了广泛应用,特别是公路交通行业中,常被循环利用作为水泥和沥青混凝土中的关键助剂或原材料^[1-2].钢渣集料的应用缓解了天然矿料紧缺的现状,也促进了低碳环保沥青道路的发展^[3].

钢渣集料在沥青混合料中的研究和应用日益成熟,但是钢渣沥青路面在环境影响方面的优势缺少清晰的量化分析^[4].文中借助 eFootprint 工具,采用生命周期评价(LCA)方法构建了钢渣沥青混合料的研究框架和系统边界,量化分析了钢渣沥青道路的资源消耗和环境负荷,提出了材料工艺和施工管理方面的改善策略.

1 研究框架与核算方法

1.1 沥青路面结构

参考《沥青路面设计规范》和《公路路线设计规范》中施工参数,本研究设定符合高速公路施工要求的沥青面层厚度为 18 cm,由上、中、下面层

三层沥青混合料摊铺压实组成,单个机动车道宽度设计为 3.75 m.各个结构层的厚度根据设计车流量、荷载要求和服役环境等条件确定,其中上面层厚度一般是 4 cm.本研究以上面层施工工艺为参考,选取 SBS 改性沥青作为沥青粘结料,以钢渣替代粒径大于 4.75 mm 的天然粗集料,细集料和矿粉则按照普通热拌沥青混合料中的规格使用.基于实验室前期对钢渣沥青混凝土的级配优化设计和基本性能测试,确定了钢渣沥青混合料 AC-16 级配曲线,见图 1.

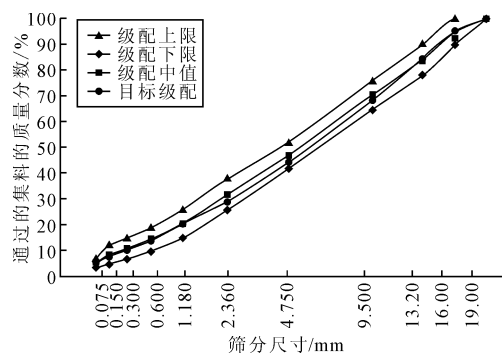


图 1 钢渣沥青混合料 AC-16 级配曲线
沥青混合料拌制的油石比为 4.31%,测得马

收稿日期:2022-05-16

第一作者:万友明(1971—),男,高级工程师,主要研究领域为高速公路建设及运营管理

* 通信作者:汪福松(1971—),男,博士生,主要研究领域为沥青路面绿色施工技术

基金项目:国家自然科学基金委国际合作重点基金项目(71961137010)、内蒙古自治区科技重大专项(zdzz2018029)

歇尔试件最大理论密度为 2.869 g/cm^3 。除了材料用量,确定原材料的运输方案也是项目施工管理的重要环节。常见的材料运输方式有三种,即水路运输、铁路运输和公路运输,为了方便计算,本研究选用公路运输作为参考,计算自卸汽车在原材料运输阶段产生的燃料消耗量。表 1 为钢渣沥青混合料的原材料规格信息。

表 1 钢渣沥青混合料原材料信息

材料	成分	规格参数
粗集料	钢渣	粒径大于 4.75 mm
细集料	玄武岩	粒径不大于 4.75 mm
沥青粘结料	SBS 改性沥青	油石比 4.31%
矿粉	石灰石	粒径小于 0.075 mm

1.2 钢渣集料生产加工

钢渣堆场的材料加工包括:①自然陈化;②初级破碎;③磁选;④二次破碎;⑤筛分。新生成的钢渣中含有一定浓度的活性氧化钙成分,极易与水反应导致钢渣表面局部粉化,降低了材料的强度和稳定性^[5]。因此在雨水和空气等自然条件下经过一定时间的陈化处理,保证钢渣颗粒中活性氧化钙充分反应,提升钢渣集料在沥青混合料中的服役稳定性。初级破碎和磁选是提取钢渣颗粒中残留的含铁成分,二级破碎和筛分是将物化性质稳定的钢渣颗粒按照需要的粒径加工为钢渣集料。图 2 为钢渣集料从废料堆场的自然陈化到最终筛分成品的整个生产流程,可以看出主要的环境负荷由各个机械设备消耗的电能产生。

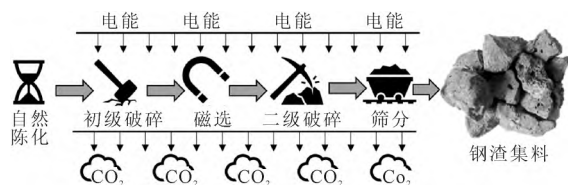


图 2 钢渣集料生产加工流程

将钢渣集料生产物化过程中对应的环境负荷,等效于相关机械加工的电能消耗所造成的环境影响。基于对钢渣的工艺流程调研^[6],总结了主要的加工机械设备及其单位电耗,见表 2。由表 2 可知:加工 1 kg 钢渣集料约消耗 $4.97 \times 10^{-3} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电能,其中带式输送机是耗能最大的设备,其次是破碎机,振动筛运转的单位电耗最小 ($5.10 \times 10^{-5} \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$)。

1.3 LCA 研究框架

图 3 为研究分析的五个关键施工过程,即材料生产、材料运输、混合料拌和、混合料运输、摊铺压实。可以看出钢渣沥青路面 LCA 过程中,涉及到的能源消耗主要包括运输车的燃料消耗、拌和

表 2 钢渣集料生产加工机械

单位: $\text{kW} \cdot \text{h/kg}$

机械设备	能源形式	工序	单位电耗	总电耗
带式输送机	电能	传输运送	3.60×10^{-3}	
冲击式破碎机	电能	初级破碎	5.70×10^{-4}	
电磁除铁器	电能	磁选	3.20×10^{-4}	4.97×10^{-3}
锤式破碎机	电能	二次破碎	4.30×10^{-4}	
振动筛	电能	筛分	5.10×10^{-5}	

站的电耗和化石燃料,以及施工现场大型机械的燃料消耗。根据《公路工程预算定额》和《公路工程机械台班费用定额》,选取高速公路沥青面层施工过程中所需的主要机械,见表 3。

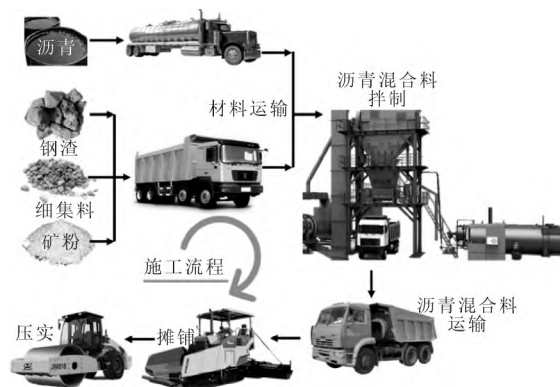


图 3 钢渣沥青路面关键施工过程

表 3 钢渣沥青路面主要机械及耗能效率

机械	工序	规格	耗能效率/(台·班)
自卸汽车	集料运输	$\leq 10 \text{ t}$	55.32 kg 柴油
液态沥青运输车	沥青运输	$\leq 7\,000 \text{ L}$	90.97 kg 柴油
轮胎式装载机		3 m^3	92.86 kg 柴油
混合料拌和设备	拌制混合料	$\leq 240 \text{ t/h}$	764.82 kg 重油 + 288.10 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 电
自卸汽车	沥青混合料运输	$\leq 10 \text{ t}$	41.91 kg 汽油
摊铺机	沥青混合料摊铺	12.5 m	136.23 kg 柴油
钢轮压路机	沥青混合料压实	10 t	80.8 kg 柴油
轮胎压路机		$16 \sim 20 \text{ t}$	42.4 kg 柴油

1.4 环境负荷核算方法

借助 eFootprint 工具评价钢渣沥青路面的能源消耗和温室气体排放,是基于流程的 LCA 建立计算模型,然后确定环境影响结果。因此用户需要自行建立研究产品的生命周期模型,然后调研归纳模型中必要的输入数据,通过工具内部的基础算法得到环境指标输出结果。沥青道路生命周期内产生环境影响主要包括原材料的生产和各项机械运转造成的燃料消耗。原材料生产过程环境负荷的核算方法为

$$E_m = \sum_{i=1}^n (m_{im} \times e_{im}) \quad (1)$$

式中: E_m 为原材料生产过程的环境负荷; m_{im} 为第 i 种原材料在研究功能单位内所需总量;而 e_{im} 为单位质量材料的生产造成的环境负荷。

施工机械的燃料消耗一般包括化石能源和电能两种,由于沥青混合料施工过程需要对材料加热,因此化石燃料除了提供一些燃油引擎机械的驱动力,也是材料加热的主要能量来源。电能主要是提供沥青混合料拌和设备、传送带等大型机械的运转动力,将钢渣集料的加工电耗也等效为材料生产阶段的环境负荷。施工机械的参数、施工环境等条件不同会导致能源效率发生改变,所以此阶段的环境负荷量化结果会因项目的实际施工方式而存在部分差异。能源消耗过程中产生的环境负荷核算方法为

$$E_i = \sum_1^n (m_{if} \times e_{if}) \quad (2)$$

式中: E_i 为燃料消耗过程的环境负荷; m_{if} 为第 i 种机械消耗的燃料量;而 e_{if} 为第 i 种燃料单位质量造成的环境影响。

2 分析与讨论

2.1 典型资源消耗

对采石场天然集料爆破过程的数据分析,以铵梯炸药为参考,爆破石灰岩的炸药需求量为 0.18 kg/t ,玄武岩的需求量为 $0.27 \text{ kg/t}^{[7]}$ 。而铵梯炸药主要成分是硝酸铵和梯恩梯,爆炸时会产生氮氧化物等有毒气体,因此资源化循环利用固体废弃物在节约资源消耗的同时,也减少了生态污染。

计算各个原材料的质量配比和实际消耗量,见表4。由表4可知,铺建 1 km 长、 4 cm 厚的单个机动车道,耗费的原材料总质量为 430.05 t ,其中粗集料和细集料总质量为 400.14 t ,并且粗集料的质量超过细集料质量的2倍。同等配比下使用玄武岩作为粗集料,仅爆破过程中就需要炸药近 75 kg 。

表4 原材料的质量配比和实际消耗量

材料	沥青黏结料	钢渣粗集料	细集料	矿粉
配比/%	4.13	64.15	28.83	2.89
质量/t	17.77	276.07	124.07	12.44

2.2 环境负荷量化分析

eFootprint 工具默认输出的环境负荷量化指标有12种,包括了初级能源消耗、非物质资源消耗、气候变化等常见的环境影响,也包含了水资源消耗、人体毒性、生态毒性等讨论的较少的指标。表5为工具中量化的环境指标信息和对应的单位,并用小写字母 a~l 作为标签简化对应的指标。

输出的环境指标选取的量化标准与当前国际标准一致,例如气候变化用当量 CO_2 衡量,酸化用当量 SO_2 衡量,可吸入无机物则用当量 $\text{PM}_{2.5}$ 表示。

表5 eFootprint 工具默认输出的环境负荷量化指标有12种

编号	环境指标
a	初级能源消耗/MJ
b	非生物资源消耗潜值/kg Sb eq
c	水资源消耗/kg
d	气候变化/kg CO_2 eq
e	臭氧层消耗/kg CFC-11 eq
f	酸化/kg SO_2 eq
g	可吸入无机物/kg $\text{PM}_{2.5}$ eq
h	光化学臭氧合成/kg NMVOC eq
i	富营养化潜值/kg PO_4^{3-} eq
j	生态毒性/CTUe
k	人体毒性-致癌/CTUh
l	人体毒性-非致癌/CTUh

为了简化关键施工过程,将十类施工步骤用1~10顺序编号,依次为各项原材料的生产到最后摊铺压实的施工,见表6。结合表5和表6中的编号标签,eFootprint 的量化结果见表7。可以看出整个钢渣沥青道路的施工过程中,环境负荷量化结果数量级较大的四类分别是 a、c、d 和 j,而环境负荷量化值较小的有四类,分别是 b、e、k 和 l。由于此处量化结果缺少同类对比,且量化数量级大小与标准单位相关,因此只能作为定性解释和对比参考。对比表7中不同施工阶段的环境量化结果可知:原材料生产造成了极为显著的环境负荷,特别是沥青的生产过程在12项环境指标中有9项是最大值,仅 e、k 和 l 不是最大值。另外,沥青混合料的运输过程是10项施工过程中造成环境负荷相对较小的。

表6 钢渣沥青路面生命周期内关键施工步骤

工序编号	施工过程	能源消耗形式	工作内容
1	原材料生产	电能	沥青生产
2			矿粉生产
3			细集料生产
4	原材料运输	电能	钢渣集料生产加工
5		柴油	自卸汽车运输
6	沥青混合料拌和	电能	驱动拌和机械运转
7		重油	集料和沥青预热
8	沥青混合料运输	汽油	自卸汽车运输
9	沥青混合料摊铺	柴油	摊铺机运转
10	沥青路面压实	柴油	压路机运转

为了获得直观可视化的对比数据结果,选取钢渣沥青路面施工过程中的能源消耗量和温室气体排放量作为重点参考指标,图4为两个环境指标的量化结果和对应的比例分布。由图4可知:整个钢渣沥青道路的施工消耗了 1.12 TJ ,其中沥青生产造成了 995 GJ 的能耗,占总初始能耗的 88.62% ,其次在混合料拌和阶段,沥青和集料的

表 7 关键施工步骤的 12 项环境指标量化结果

环境指标	工序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a	9.95×10^5	8.59×10^2	8.57×10^3	2.09×10^4	1.51×10^4	1.43×10^4	6.17×10^4	6.87×10^2	1.85×10^3	3.88×10^3
b	4.91×10^{-2}	1.79×10^{-4}	1.78×10^{-3}	8.87×10^{-4}	5.32×10^{-3}	6.08×10^{-4}	2.16×10^{-2}	2.41×10^{-4}	6.52×10^{-4}	1.37×10^{-3}
c	9.24×10^4	2.10×10^2	2.09×10^3	5.01×10^3	1.95×10^3	3.43×10^3	8.29×10^3	9.06×10^1	2.39×10^2	5.02×10^2
d	1.53×10^4	6.74×10^1	6.72×10^2	1.65×10^3	2.53×10^2	1.13×10^3	1.11×10^3	1.26×10^1	3.11×10^1	6.51×10^1
e	8.98×10^{-5}	2.34×10^{-6}	2.33×10^{-5}	1.52×10^{-6}	1.35×10^{-4}	1.04×10^{-6}	5.47×10^{-4}	6.10×10^{-6}	1.65×10^{-5}	3.46×10^{-5}
f	7.38×10^1	1.40	1.39×10^1	8.47	1.22	5.81	6.14	6.41×10^{-2}	1.50×10^{-1}	3.14×10^{-1}
g	1.79×10^1	3.71×10^{-1}	3.70	2.45	1.92×10^{-1}	1.68	9.08×10^{-1}	9.68×10^{-3}	2.35×10^{-2}	4.93×10^{-2}
h	1.45×10^1	1.05	1.04×10^1	6.12×10^{-1}	9.92×10^{-1}	4.20×10^{-1}	4.13	4.57×10^{-2}	1.22×10^{-1}	2.55×10^{-1}
i	5.89	2.32×10^{-1}	2.31	5.67×10^{-1}	1.84×10^{-1}	3.89×10^{-1}	9.50×10^{-1}	9.76×10^{-3}	2.25×10^{-2}	4.72×10^{-2}
j	5.41×10^2	5.67	5.66×10^1	1.63	4.24×10^1	1.12	2.25×10^2	2.28	5.20	1.09×10^1
k	3.94×10^{-6}	6.34×10^{-7}	6.33×10^{-6}	6.37×10^{-8}	2.68×10^{-6}	4.37×10^{-8}	1.09×10^{-5}	1.22×10^{-7}	3.28×10^{-7}	6.89×10^{-7}
l	5.51×10^{-6}	4.58×10^{-7}	4.57×10^{-6}	8.34×10^{-8}	4.38×10^{-6}	5.72×10^{-8}	1.78×10^{-5}	1.99×10^{-7}	5.37×10^{-7}	1.13×10^{-6}

预热消耗了 61.7 GJ, 占了整体的 5.49%, 剩下的钢渣生产、原材料运输油耗、钢渣沥青混合料拌和电耗分别占总体的 1.86%、1.34% 和 1.27%。同时, 气候变化的量化结果显示类似的趋势, 整个道路施工产生的当量 CO_2 为 20.30 t, 沥青生产导致 15.30 t, 占总温室气体排放的 75.37%, 其次钢渣集料生产所用的电耗排放了 1.65 t, 占总排放量的 8.14%, 剩余混合料拌和阶段产生的油耗和电耗分别占比总排放的 5.47% 和 5.58%。

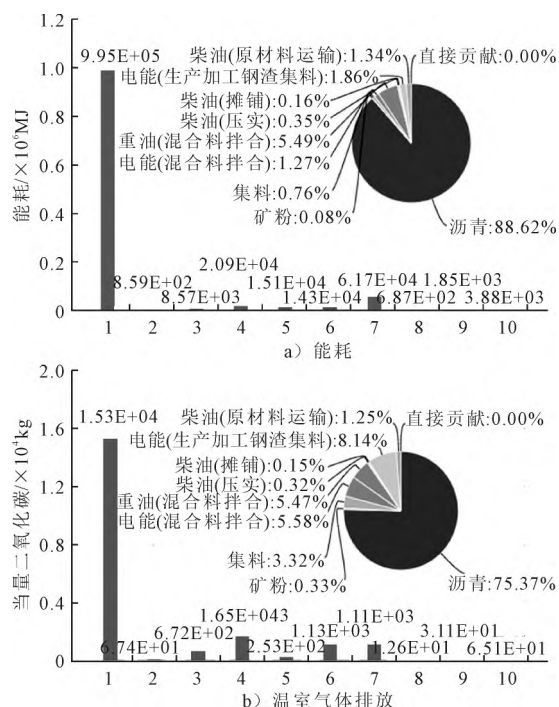


图 4 关键施工阶段的能耗与温室气体排放

2.3 改善策略

在钢渣沥青道路施工周期内, 环境负荷最显著的过程是原材料的生产, 说明加大固体废弃物的资源化利用是必要的节能减排道路措施。同时对比各个原材料可知, 沥青黏结料虽然掺加量较小, 但造成的环境影响却超过其他的原材料, 说明优化如沥青生产等重型化工行业的生产技术、提升

相关行业低碳发展极为重要。其次沥青混合料的拌和过程也造成了较大的环境负荷, 特别是在原材料预热阶段消耗的重油和电能。说明对清洁能源的开发和应用是加快道路可持续化的有效途径。

3 结 论

1) 钢渣沥青道路在施工周期内对初级能源消耗、水资源消耗、气候变化、生态毒性四项环境负荷影响最大, 同时原材料生产是最大环境负荷的施工步骤, 其中沥青生产过程的环境负荷明显超过其他原材料。

2) 整个钢渣沥青路面的建设施工在功能单位内造成了 1.12 TJ 能耗和 20.30 t 当量 CO_2 排放。其中, 沥青生产过程的初始能耗和温室气体排放分别占总体 88.62% 和 75.37%。

3) 根据不同施工步骤环境负荷的对比量化结果发现: 加大废弃物资源化利用、优化沥青原材料生产技术、开发应用清洁能源是生态化道路建设的有效策略。

参 考 文 献

- [1] 国务院. 国务院关于加强建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[R]. 北京: 国务院, 2021.
- [2] 梁铎, 温永钢, 杨超, 等. 钢渣在水泥稳定碎石基层中的工程应用研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(2): 250-254.
- [3] 宋贵才, 胡锐, 谢君, 等. 钢渣及其沥青混凝土中重金属污染风险评估[J]. 建材世界, 2020, 41(2): 25-27.
- [4] WANG F. Life cycle energy consumption by roads and associated interpretative analysis of sustainable policies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021(1): 118-126.

(下转第 911 页)

Study on Internal Damage Law of Asphalt Pavement in Super Long Service Period

ZHANG Yuping¹⁾ **ZENG** Siqing¹⁾ **WANG** Duanyi²⁾ **LUO** Chuanxi²⁾

(Guangzhou-shenzhen Expressway Reconstruction and Expansion)

Management Office, Guangzhou 510000, China)¹⁾

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)²⁾

Abstract: In order to study the correlation between internal damage development of asphalt pavement structure and road structure form, 3D ground penetrating radar (GPR) was used to detect the internal damage of combined base asphalt pavement structure with long service life. The main types of pavement internal damage were analyzed, and the correlation between internal damage of asphalt pavement structure and filling and excavation forms, subgrade characteristics and protection characteristics were studied. The development law of internal damage of asphalt pavement structure with long service life was clarified. The results show that the internal cracks of the combined base pavement structure can't be reflected to the pavement surface even in the long service. Hard shoulder will also produce crack disease without traffic load. Setting retaining wall can reduce the risk of hard shoulder cracking, but it will increase the risk of lane cracking.

Key words: super long service period; internal damage; crack rate; semi rigid base

(上接第 906 页)

- [5] WANG F. Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(1):126-135.
- [6] XIE J. The life cycle energy consumption and emissions of asphalt pavement incorporating basic oxygen furnace slag by comparative study[J]. *Sustainability*, 2021,13(8):4540-4546.
- [7] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]. 西安:长安大学,2014.

Study on LCA Environmental Load of Steel Slag Aggregate Asphalt Pavement

WAN Youming¹⁾ WANG Fusong²⁾ WU Shaopeng²⁾ XIE Jun²⁾

(Guangdong Nanyue Transportation Jiehui Expressway Management Center, Jieyang 522000, China)¹⁾

(State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)²⁾

Abstract: Based on the typical structure of China's expressway asphalt pavement, the LCA function unit was determined, and the asphalt pavement construction was divided into five key stages according to the environmental load accounting law and LCA framework principle. With the help of eFootprint database, 12 environmental indicators in each stage were calculated, and the characteristics of energy consumption and greenhouse gas emission of steel slag as coarse aggregate of asphalt pavement were deeply analyzed. The results show that the whole steel slag asphalt pavement causes 1.12 TJ energy consumption and 20.30 t equivalent CO₂ emission in the functional unit, among which the production of raw materials causes the biggest environmental load.

Key words: asphalt pavement; steel slag; sustainable road; LCA; environmental loads