

基于 LCA 的干法湿法 SBS 改性沥青工艺 技术评估分析

李世华¹, 白玉铎², 唐国奇^{3*}

(1.山东高速科技发展集团有限公司, 山东 济南 250100; 2.山东高速路用新材料技术有限公司, 山东 济南 250100;
3. 国路高科(北京)工程技术研究院有限公司, 北京市 100089)

摘要:为了给沥青改性技术发展提供建议,通过热量平衡关系建立了沥青高温储存过程能耗及排放量计算模型,参考生命周期评价(LCA)方法,对比干法、湿法改性工艺在改性沥青的生产、运输、储存环节的能源消耗及污染物排放情况。结果显示:采用干法工艺可节约能源消耗 2.34×10^{10} MJ/年,减少污染物排放 128 万 t/年。与湿法改性工艺相比,干法改性环保优势显著,具有较高的推广价值和广阔的应用前景。

关键词:沥青路面;干法;SBS;改性沥青;LCA

中图分类号: U414

文献标志码: A

1 干法湿法改性工艺介绍

随着社会经济的发展,人们对交通品质的要求日益提高,道路面层作为车辆直接接触的结构层,修筑质量对行车体验有决定性影响。随着交通量和车辆载重的增加,使用基质沥青作为黏结材料修筑的路面面层在服役过程中容易出现车辙、开裂、松散等病害,逐渐被具有更高性能的改性沥青所替代,SBS 改性沥青因其优异且均衡的高低温性能和抗老化性,成为高等级路面的主要黏结材料。

作为重要的沥青改性工艺,干法改性工艺无需制备成品改性沥青,而是将干法改性剂、基质沥青和矿料一同加入拌和楼中,在高温和嵌压作用下达到沥青改性的效果,使用方式简单灵活,具有较强的机动性^[1]。

沥青的干法、湿法改性工艺流程图见图 1、2^[2]。

长期以来,中国 SBS 改性沥青的应用主要依赖于湿法工艺进行,随着技术的发展,干法工艺已经能够达到与湿法类似的技术水平,具有巨大的发展潜力^[3-5]。由于施工工艺不同,不同的改性工艺在环境影响特性方面表现不同,但中国国内尚无相关研究报道。

生命周期评价(LCA)是一种常用的环境影响评价

- *****
- [3] 梁健俊,马玉玮,黄科,等.粉煤灰物理化学性能对碱激发材料的影响[J].硅酸盐通报,2016,35(8):2 497-2 502.
- [4] 黄科,马玉玮,郭奕群,等.碱激发粉煤灰/矿渣复合体系的性能研究[J].硅酸盐通报,2015,34(10):2 769-2 774.
- [5] 杨敬斌,方媛,李东旭.碱胶凝材料水化产物 C—A—S—H 与 N—A—S—H 的研究进展[J].硅酸盐通报,2017,36(10):3 292-3 297.
- [6] 梁健俊.水玻璃模数与矿渣掺量对碱激发粉煤灰/矿渣复合体系的影响[D].广州:广州大学,2017.
- [7] 史才军,张留洋,张健,等.碱激发材料氯离子传输性能测试方法及影响因素研究进展[J].材料导报,2017,31(15): 95-100.
- [8] 张留洋.碱激发材料氯离子传输特性及测试方法研究[D].长沙:湖南大学,2017.
- [9] 赵建伟.碱激发偏高岭土氯离子渗透性研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [10] 邹向农,龙俊贤,陈宇翔,等.腐蚀预应力混凝土桥梁抗力退化预测方法[J].中外公路,2019,39(3):84-88.
- [11] 武越锋,马昆林,黄正华,等.酸性环境对不同材料组成混凝土侵蚀深度的试验研究[J].中外公路,2019,39(4): 224-228.
- [12] 马显东,刘强,褚保镇,等.预制基质客土的强度及渗透性试验研究[J].中外公路,2019,39(4):243-246.

收稿日期:2021-08-11(修改稿)

作者简介:李世华,女,大学本科,研究员.E-mail:lishihua@sdhsg.com

*通信作者:唐国奇,男,博士,教授级高工.E-mail:364725682@qq.com

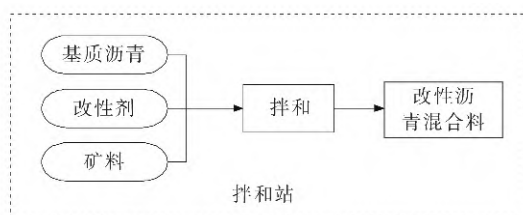


图1 SBS改性沥青干法改性工艺

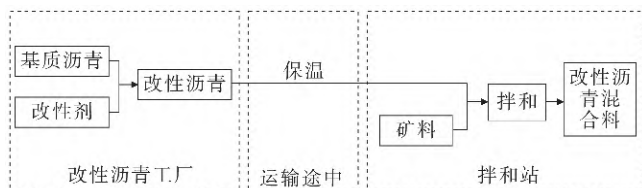


图2 SBS改性沥青湿法改性工艺

方法,它对材料的获取、制造、使用等过程产生的环境影响进行系统分析,综合考虑能源消耗和温室气体排放等环境影响,可以定量评价产品、服务、系统或技术的环境可持续发展特性。LCA 的详细规范由 ISO 14040 和 ISO 14044 进行规定,其技术框架如图 3 所示^[6-8]。

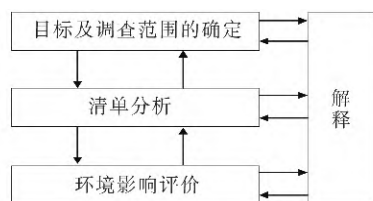


图3 LCA技术框架图

为了给沥青改性工艺的发展提供建议,该文参考生命周期评价(LCA)的方法对比了干法、湿法改性工艺的环境影响特性差异。

2 目标及调查范围的确定

参考 LCA 方法,该文以高等级公路修筑常用的 SBS 改性沥青混合料为研究对象,对采用干法、湿法两种改性工艺生产的沥青混合料分别编制生命周期清单,并进行对比分析。

为方便对比,规定修筑长度为 1 km、宽度为 37.5 m、厚度为 9 cm 的 AC 面层所消耗的沥青的量为 1 个功能单位,其中混合料密度按照 2.35 g/cm^3 、沥青用量按照 5% 计算。进行环境影响测算时,研究对象为 1 个功能单位的能源消耗和污染物排放。

众所周知,无论采用何种沥青改性工艺,所采用的混合料的拌和、运输、摊铺及碾压方法均保持一致,使用和废弃过程也相似,为方便对比,该文将研究范围确

定为从原材料生产、运输到储存为止,不考虑后续环节。图 4、5 分别为干法、湿法 SBS 改性沥青混凝土生命周期评价的边界条件,其中,系统边界内以实线实现标注,系统边界外以虚线标注。

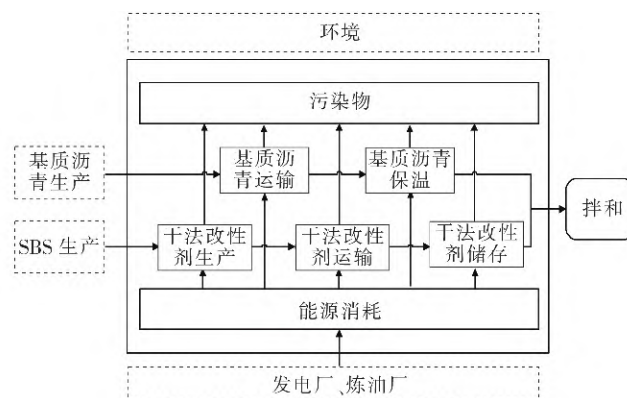


图4 干法改性工艺边界条件

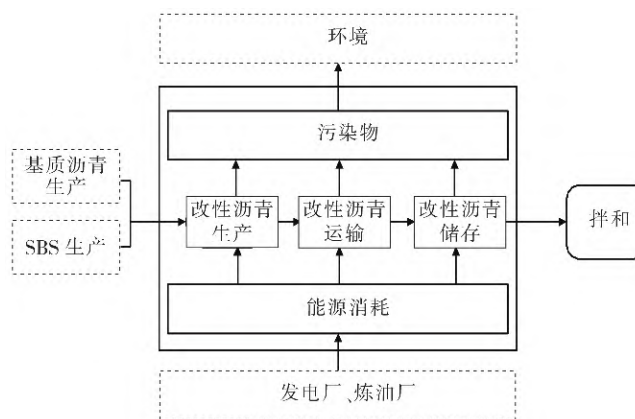


图5 湿法改性工艺边界条件

由于炼油厂、改性沥青工厂分布较为分散,与公路施工地点的距离不一,为了方便对比,作如下假设:沥青及干法改性剂材料的平均运输距离均为 300 km,运输时间为 8 h,沥青材料在施工现场的储存平均时间为 4 d。

3 清单分析

3.1 沥青储罐保温环境影响模型

为了保持流动性以便于拌和操作,沥青自生产出厂后通常以液态形式高温储存,这种高温储存是一个复杂的热传递过程。针对该过程,目前尚无可供参考的能耗及排放计算方法,为了对沥青在运输和储存过程中的环境影响进行评估,该文根据散热量平衡关系建立了沥青储罐保温能耗及排放量计算模型。

假设沥青在高温储存过程中,在输入热量与环境

散热情况保持平衡的情况下,可以维持在一个恒定的温度,根据沥青储罐尺寸、环境温度、沥青储存温度、保温材料及热效率等参数,可计算能耗及排放情况。

沥青储罐按照卧式计算,长度为 D ,半径为 r 。

沥青储罐外敷保温材料,根据保温材料的厚度 d 和材质的热导率 λ 计算得到热阻 $R(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W})$:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1)$$

根据热阻 R 和储罐内外温差可以计算得到单位接触面积的传热速率 $q(\text{W}/\text{m}^2)$ 。

$$q = \frac{t_2 - t_1}{R} \quad (2)$$

式中: t_2 为沥青温度($^\circ\text{C}$); t_1 为环境温度($^\circ\text{C}$)。

根据单位接触面积的热流量 q 和总面积计算得到储罐总传热速率 $Q(\text{W})$ 。

$$Q = q \times (D \times 2 \times \pi \times r + 2 \times \pi \times r^2) \quad (3)$$

假设储罐中装满沥青,平均每吨沥青的散热速率为 $Q_t(\text{W})$ 。

$$Q_t = \frac{Q}{\rho \times D \times \pi \times r^2} \quad (4)$$

式中: ρ 为沥青密度。

计算得到沥青在单位时间内热量损失 $Q_{\text{tperh}}(\text{J})$:

$$Q_{\text{tperh}} = Q_t \times 3\,600 \quad (5)$$

当外界补充的热量与散热量达到平衡时,沥青可实现温度恒定,但通常情况下,热效率难以达到 100%,假设热效率为 γ ,当 γ 为 1 时,热效率为 100%。

得到对每吨沥青保温 1 h 所消耗的能耗 $Q_{\text{input}}(\text{J})$ 。

$$Q_{\text{input}} = \frac{Q_{\text{tperh}}}{\gamma} \quad (6)$$

综合得到:

$$Q_{\text{input}} = \frac{7\,200 \times (t_2 - t_1) \times (D + r) \times \lambda}{\gamma \times \rho \times D \times r \times d} \quad (7)$$

参照实际工程,设沥青储罐使用的保温材料为厚度 1.25 cm 的岩棉板,热导率 λ 为 $0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。沥青储罐的长度 D 为 3.5 m,半径 r 为 1.8 m。

为方便计算,假设所使用的能源为火力发电产生的电能,以此推算得到对每吨沥青保温 1 h 造成的污染物排放量 $P_{\text{out}}(\text{kg})$:

$$P_{\text{out}} = Q_{\text{input}} \times \omega \quad (8)$$

式中: ω 为排放系数,是生产输送每焦耳电能带来的污染物排放量,根据相关资料估算, ω 取 $7.89 \text{ kg}/\text{MJ}$ 。

3.2 基于干法改性工艺的清单分析

(1) 基质沥青运输

基质沥青在运输时,对环境产生的影响主要由车

辆运行、沥青保温两部分组成。

根据 CLCD 基础数据库,中国常见的载重 30 t 柴油车在运输过程中的能源消耗及排放如表 1 所示。

表 1 30 t 柴油货车运行能耗及温室气体排放

能耗/ $[\text{MJ} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$	排放/ $[\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$
0.804	0.075

以表 1 为基础进行计算,得到将 1 t 基质沥青运输 300 km,因为车辆运行而产生的能耗见表 2。

假设环境温度为 20°C ,基质沥青储存温度为 140°C ,参照式(7)、(8),对基质沥青运输过程因保温造成的能耗及温室气体排放计算结果列于表 3。

表 2 基质沥青运输过程车辆运行能耗及温室气体排放

能耗/ $[\text{MJ} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$	排放/ $[\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$
241.2	22.5

表 3 基质沥青运输过程沥青保温能耗及温室气体排放

能耗/ $[\text{MJ} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$	排放/ $[\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$
23.25	2.91

(2) 基质沥青储存

假设施工工地环境温度为 20°C ,基质沥青储存温度为 140°C ,储存时间为 4 d,参照式(7)、(8),基质沥青储存过程的能耗及温室气体排放计算结果见表 4。

表 4 基质沥青储存过程能耗及温室气体排放

能耗/ $[\text{MJ} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$	排放/ $[\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$
279.11	34.89

(3) 干法改性剂的生产、运输及储存

根据实际生产情况统计,并参考 CLCD,得到干法改性剂的生产、运输能耗及排放情况见表 5。

表 5 改性剂生产、运输过程能耗及温室气体排放

过程	能耗/ $[\text{MJ} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$	排放/ $[\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$
干法改性剂生产	256.2	20.83
干法改性剂运输	241.2	22.5

另外,干法改性剂可以在常温下存放,无需进行额外处理,根据 cut-off 原则,该部分能耗很少,对干法改性剂的储存能耗及排放忽略不计。

综合上述计算结果,并根据干法改性剂掺量 6% 计算,使用干法工艺 1 个功能单位的能耗及排放计算结果如表 6 所示。

表 6 干法改性 1 个功能单位能耗及温室气体排放

能耗/[MJ · (t · km) ⁻¹]	排放/[kg · (t · km) ⁻¹]
540.8	59.28

为方便对比各环节环境影响特征,将干法改性工艺各环节能耗及排放情况绘制成饼状图,如图 6 所示。

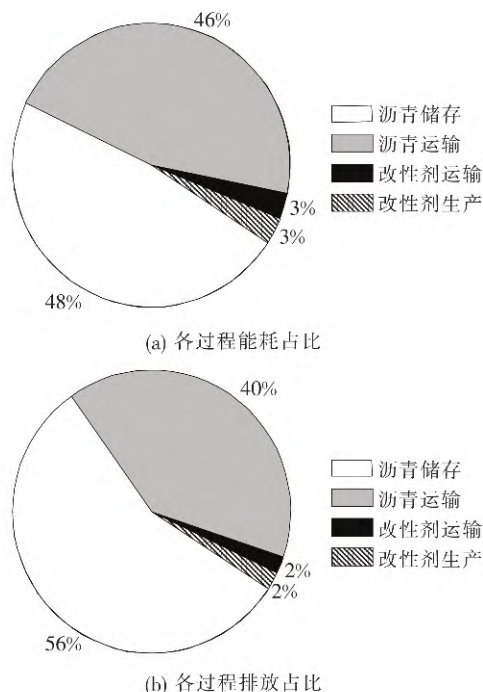


图 6 干法改性工艺各环节环境影响对比

由图 6 可以看到:在干法改性工艺中,各环节能耗及排放影响占比基本一致,对环境影响最为显著的环节是沥青的储存过程,其次是沥青运输过程,而干法改性剂的生产和运输影响较小,基本可以忽略。

3.3 基于湿法改性工艺的清单分析

(1) 改性沥青生产

根据欧洲沥青协会发布的 Life Cycle Inventory: Bitumen 提供的基础数据^[9],以基质沥青为原料加工改性沥青过程的能耗及排放数据如表 7 所示。

表 7 改性沥青加工能耗及温室气体排放

能耗/[MJ · (t · km) ⁻¹]	排放/[kg · (t · km) ⁻¹]
2 581.46	133.92

(2) 改性沥青运输

与干法改性工艺类似,成品改性沥青在运输时,对环境产生的影响主要由车辆运行、改性沥青保温两部分组成。根据 CLCD 数据,计算得到 1 t 改性沥青运输 300 km 过程因车辆运行造成的能耗及温室气体排放量如表 8 所示。

表 8 改性沥青运输过程车辆运行能耗及温室气体排放

能耗/[MJ · (t · km) ⁻¹]	排放/[kg · (t · km) ⁻¹]
241.2	22.5

假设环境温度为 20 ℃,成品改性沥青储存温度为 180 ℃,参照式(7)、(8),对成品改性沥青运输过程因保温造成的能耗及温室气体排放如表 9 所示。

表 9 改性沥青运输过程沥青保温能耗及温室气体排放

能耗/[MJ · (t · km) ⁻¹]	排放/[kg · (t · km) ⁻¹]
23.25	2.91

(3) 改性沥青储存

假设施工工地环境温度为 20 ℃,成品改性沥青储存温度为 180 ℃,储存时间为 4 d,参照式(7)、(8),改性沥青储存过程的能耗及温室气体排放计算结果如表 10 所示。

表 10 改性沥青储存过程能耗及温室气体排放

能耗/[MJ · (t · km) ⁻¹]	排放/[kg · (t · km) ⁻¹]
372.15	46.52

为了方便对比各环节环境影响特征,将湿法改性工艺各环节能耗及排放情况绘制饼状图,如图 7 所示。

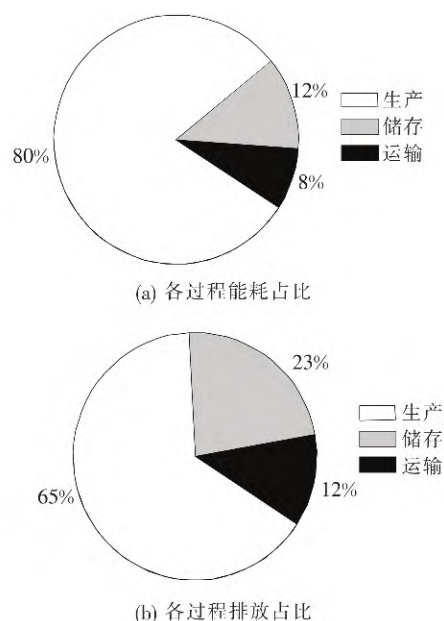


图 7 湿法改性工艺各环节环境影响对比

由图 7 可以看到:当使用湿法改性工艺时,改性沥青的生产环节能耗和排放分别占比 80%和 65%,其次是改性沥青储存和运输环节,说明改性沥青生产环节

对于环境的影响较为显著,是过程优化的关键环节。

4 环境影响评价

以 1 个功能单位为研究对象,分别对干法、湿法改性工艺能耗及温室气体排放情况进行汇总,结果如表 11 所示。

表 11 不同工艺条件下 1 个功能单位能耗及温室气体排放

工艺	能耗/[MJ · (t · km) ⁻¹]	排放/[kg · (t · km) ⁻¹]
湿法	1 279 240.6	82 015.24
干法	214 461.88	23 507.64

由表 11 可以看到:采用干法工艺可以显著降低公路建设过程中的能源消耗和污染物排放,在改性沥青的生产、运输和储存环节,干法工艺可降低能耗 83.2%,减少污染物排放 71.33%。分析其原因主要有:① 干法工艺省略了对环境影响最为显著的改性沥青生产环节;② 干法工艺将运输至施工现场并存放的改性沥青替换为基质沥青,大幅降低了沥青材料在运输和存放过程的储存温度,达到节能减排的作用。

按照中国年增加公路里程 7.3 万 km、其中 30% 路面采用改性沥青修筑来计算,采用干法工艺替代湿法减少的能耗为 23 350 597 421 MJ,减少污染物排放 1 283 071 669 kg。

据此测算,以干法代替湿法每年可节省能耗 23 350 597 421 MJ,按照原油热值为 41.8 MJ/kg 计算,年节约能量约等于原油 55.8 万 t;可减少污染物排放 128 万 t,相当于中国机动车污染物排放量的 3%。由此可见,干法改性工艺环保优势显著,具有较高的推广价值和广阔的应用前景。

5 结论

基于干法、湿法改性工艺差异,借鉴 LCA 方法对

两种工艺的环境影响特征进行对比研究,主要结论如下:

(1) 通过热量平衡关系,结合实际工程应用情况,建立了沥青在高温下储存过程中的能耗及排放定量计算模型。

(2) 采用常规湿法工艺时,改性沥青生产环节对于环境影响最为显著,能耗和排放分别占比 80% 和 65%,是应当重点关注的环节。

(3) 经测算,在改性沥青的生产、运输和储存环节,采用干法工艺代替湿法可降低能耗 83.2%,减少污染物排放 71.33%。可节约能源消耗 23 350 GJ/年,可减少污染物排放 128 万 t/年。

(4) 与湿法改性工艺相比,干法改性环保优势显著,具有较高的推广价值和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 唐国奇.公路干法 SBS 改性沥青路面技术指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [2] 朱荣芳,唐国奇.基于动态力学的直投改性技术机理及应用研究[J].公路与汽运,2017(5):75—78.
- [3] 王静.直投 SBS 改性技术在实体工程中的应用研究[J].中外公路,2017,37(3):253—256.
- [4] 王正同,刘长革,赵亚男,等.直投式 SBS 改性剂路用性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2016(11):97—99.
- [5] 王伟国,朱东,唐国奇.干法聚合物改性技术对不同油源沥青的适用性研究[J].公路,2019,64(1):242—247.
- [6] 李多奇,符锌砂.两种高速公路运营期能耗评价方法比较[J].中外公路,2017,37(6):310—316.
- [7] 邓南圣,王小兵.生命周期评价[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [8] 张倩,徐剑,张金喜.路面工程生命周期评价(LCA)方法应用研究[J].中外公路,2015,35(5):346—350.
- [9] European Bitumen Association,Life Cycle Inventory:Bitumen [M].Brussels:The European Bitumen Association,2011.