

道路沥青碳足迹研究

鲁 娇*, 方向晨, 黎元生, 张喜文, 尹泽群

(中国石化抚顺石油化工研究院, 辽宁 大连 113001)

摘要:本文在道路沥青碳足迹研究概述的基础上,分析了道路沥青碳足迹研究的过程,最后以EBA数据为准,通过摇篮-大门生命周期评价方法,调查研究了直馏沥青、聚合物改性沥青和乳化沥青3种道路沥青的碳足迹。结果表明,3种道路沥青中,直馏沥青的温室气体排放最低,乳化沥青次之,聚合物改性沥青的排放最高。从减少碳排放的角度考虑,建议优选直馏沥青和乳化沥青产品。

关键词:道路沥青;碳足迹;碳排放;生命周期

中图分类号:TE09

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)01-0012-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.01.003

Carbon footprint of paving asphalt

LU Jiao*, FANG Xiang-chen, LI Yuan-sheng, ZHANG Xi-wen, YIN Ze-qun

(Fushun Research Institute of Petroleum & Petrochemicals, Sinopec, Dalian 116023, China)

Abstract: Carbon footprint of paving asphalts, including straight-run asphalt, polymer modified asphalt and emulsified asphalt, are investigated by cradle-to-gate life cycle assessment. The results show that straight-run asphalt has the lowest greenhouse emission (584.52 kg(CO₂)-e/t), which is followed by emulsified asphalt (636.49 kg(CO₂)-e/t). Polymer modified asphalt has the highest one (895.05 kg(CO₂)-e/t). In view of carbon emission, straight-run asphalt and emulsified asphalt are proposed in this study.

Key words: paving asphalt; carbon footprint; carbon emission; life cycle

道路沥青作为石油沥青产品系列中用量最大的一类产[1],在公路建设方面得到应用。道路沥青碳足迹[2-3]是指沥青从摇篮到大门的生命周期中所产生的CO₂排放量(或CO₂当量排放量)。通过对道路沥青产品生命周期内的温室气体(GHG)排放的量化,计算道路沥青产品对全球变暖的潜在贡献,表述为CO₂e。本文在道路沥青碳足迹研究概述的基础上,分析了道路沥青碳足迹研究的过程,最后以EBA(欧洲沥青协会)数据为准,对直馏沥青、聚合物改性沥青和乳化沥青3种道路沥青产品的碳足迹进行了评估。

1 沥青碳足迹研究概述

沥青碳足迹的研究有助于了解沥青产品对气候变化的影响,寻找在沥青生产和供应等过程中降低温室气体排放的机会,最终开发出碳足迹较小的沥青新产品和沥青使用新途径,以能有目的地采取减少排放和提高价值创造链效率的方法。一些学者对沥青碳足迹进行了研究。

Kuang-Yi Wei^[4]基于产品种类规则(PCR),通

过摇篮-大门的生命周期评价(LCA)方法调查研究了沥青混凝土和水泥混凝土的碳足迹。结果表明,基于国外生命周期评价的沥青混凝土碳排放值为170~550 kg(CO₂-e)/t;沥青混凝土在英国的生命周期评价是最为完整的,其单元碳排放值为430~550 kg(CO₂-e)/t。澳大利亚数据库RMIT中沥青的排放因子为666 kg(CO₂-e)/t,Whyte(2011)中热拌沥青中沥青组分的排放因子为280 kg(CO₂-e)/t。

Yue Huang^[5]等采用PAS2050对道路生命周期评价和碳足迹评价相关方法学选择进行了验证,回顾了路面LCA的分配方法。通过英国道路建设的案例研究,说明了产品间分配的影响,模拟了英国典型沥青生产(摇篮-大门)来表明分配对于EOL回收的影响。结果表明,基于质量的分配导致了建筑材料所有影响类别中的高数字。从工业上选择的分配方法到100%质量或经济分配的转变导致了结果的变化。敏感度分析能够帮助理解所选择的分配方法和边界设定对于LCA结果的影响。对于用作副产品的二次铺路材料来说,经济分配比质量分配更为合适。

Wahidul K. Biswas^[6]采用流线型的生命周期评价方法测定了100 m路基段相关的碳足迹和内涵能。结果表明,与100 m路段建设相关的GHG排放和内涵能分别为180.6 t(CO₂-e)(初始建设阶段28.0,建设阶段9.2,使用阶段143.4)和10.7 TJ。

2 沥青碳足迹研究过程

道路沥青碳足迹的研究主要为图1中框图部分所示。其中框图1由相关装置能耗数据得到,框图2由拌合厂的相关数据得到,框图3是施工过程中产生的排放。通过相关资料^[2-3]可知,道路沥青在混合料生产、铺筑以及使用过程中的碳排放极少,这里仅考虑原油萃取、运输及在炼厂内产生的排放。

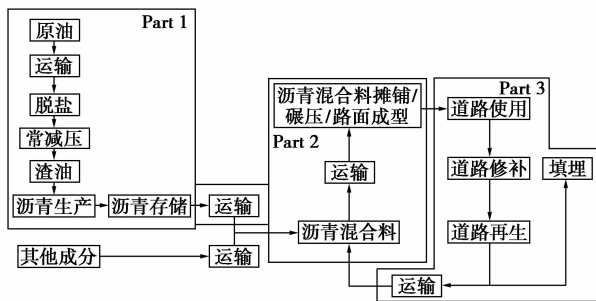


图1 道路沥青生命周期示意图

在本PCFP(摇篮-大门)中,所要评估的是1 t道路沥青产品在其生产阶段的CO₂排放或CO₂当量排放,计算原油萃取、原油运输、沥青生产及储存

4个生命周期阶段^[7-8]的温室气体排放。

2.1 原油萃取

油井生产的产物,经集中并初步分离为油气水3种流体。含油污水经水处理后,由注水井回注地层,以保持地层的能量。原油经脱盐降低盐含量后,进行稳定或拔顶(从塔器顶部抽出轻质油蒸汽),稳定后的原油作为油田产品送往炼厂。我国所产原油盐含量很少,在矿场一般不进行脱盐,脱盐工作放在炼厂。可由国际油气生产商协会(OGP)^[9]获取原油萃取分离数据。

对于原油萃取过程,基于原油类型及地点的不同,能源消耗值不同。OGP报告中给出的能源消耗范围为490~1580 MJ/t。多数能源是在当地产生的。汽柴油的分配比例取决于原油的类型,并已在相关数据库中给出。报道的能源值转变成质量,用卡值表示为柴油40.0 MJ/kg、汽油49.4 MJ/kg。

气体排放主要来源于燃烧、泄露和处理。原油萃取中,排放量最大的气体是CO₂。CO₂排放来源于用于产生能量的燃料的燃烧过程。甲烷排放主要来源于上述过程和排气孔。非甲烷挥发性有机物(NM VOC)的主要释放源是燃烧和泄露。NM VOCs主要是C₂~C₆的烃类。SO₂排放源于含S烃类燃料和天然气的燃烧氧化过程。氮氧化物的排放,主要是一氧化氮和二氧化氮,表述为NO_x,几乎都来源于燃料的燃烧。通过所用燃料及其排放因子可计算原油萃取阶段的温室气体排放。

(上接第11页)

参考文献

- [1] 国家环境保护总局. GB 8978—1996 污水综合排放标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996:1-21.
- [2] 国家环境保护总局. GB 16297—1996 大气污染物综合排放标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996:1-21.
- [3] JPEC 石油エネルギー技術センター. 環境保護の最前線へと押し出される中国の製油所[DB/OL]. http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H26_2014/2014-011.pdf.
- [4] 林本宽. 减少炼油厂酸性水量保护环境[J]. 炼油设计,1998,28(3):62-65.
- [5] 张明会,廖家祺,唐昭峥. 炼油厂酸性水和酸性气的集中处理[J]. 炼油设计,2002,32(4):47-51.
- [6] 刘永斌,程俊梅,程彬彬. 催化燃烧技术在炼油污水处理场恶臭治理中的应用[J]. 炼油技术与工程,2011,41(11):54-57.
- [7] 徐传海,魏新,酆和生,等. 生物活性炭工艺处理炼油厂反渗透浓缩水[J]. 化工环保,2011,31(2):148-151.

- [8] 牟彤,白冰,崔毓利. 高效生物处理技术在炼油厂碱渣废水处理中的应用[J]. 油气田环境保护,2007,17(1):23-26.
- [9] 张迪翀,刘延昭,张博,等. 我国油泥污染及处理工艺发展现状[J]. 化工管理,2014,(23):247-247.
- [10] 马恒亮,唐战胜,朱自新. 炼油厂酸性水罐恶臭治理探讨[J]. 炼油技术与工程,2013,43(8):52-55.
- [11] 邓德刚,周彤,秦丽姣. 高温湿式空气氧化工艺处理炼油废碱渣试验研究[J]. 炼油技术与工程,2015,45(1):15-19.
- [12] 国家环境保护总局. GB 18484—2001 危险废物焚烧污染控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,2001:1-5.
- [13] 国家环境保护总局. GB 18597—2001 危险废物贮存污染控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,2001:1-9.
- [14] 国家环境保护总局. GB 18599—2001 一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,2001:1-6.
- [15] JX 日鉱石エネルギー. 世界の一次エネルギー消費の推移[EB/OL]. [2011-05-28]. <http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/data/pdf/1.pdf>.
- [16] 潘玉英,全纪龙,袁九毅. 石油炼制项目环境影响评价中的清洁生产评价[J]. 环境科学与技术,2009,32(10):185-189. ■

2.2 原油运输

原油运输存在 2 种方式:一是管道运输^[10-12],通过管道运输用电量及电力排放因子可计算温室气体排放;二是船运^[13],通过所耗燃料量及燃料的温室气体排放因子可计算此过程温室气体排放。

2.3 沥青生产

以直馏沥青的生产为例,分析此过程的温室气体排放。直馏沥青的生产过程见图 2。在上述过程中,经常压蒸馏的减压渣油在真空塔中进一步蒸馏,实现道路等级沥青的生产。对于铺路等级的沥青和直馏沥青的生产工艺,不加入任何化合物。在复杂的炼油厂内,能够生产出很多石油产品,与更具价值的燃烧产品相比,沥青仅是一小部分,如从欧洲沥青原油混合物中得到的沥青产量为 22.3% (质量分数)。采用减压渣油作为原料,通过其他过程也可以生产沥青,如半氧化法、丙烷脱沥青和减粘裂化法。

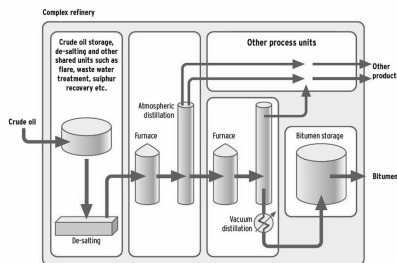


图 2 炼油厂内直馏沥青生产过程

根据欧洲内部问卷调查,对直馏过程的能耗^[14]进行估计。基于直馏过程产品产量和它们的相对值[2002—2008 西北欧 (NEW) 获取地平均标准炼厂值]进行直馏沥青生产的能源分配。直馏沥青生产所需要的能量值为 510 MJ/t。详见表 1。

表 1 直馏沥青生产的能源分配

直馏沥青生产的能量分配	原油蒸馏单元	减压蒸馏单元
能量/(MJ·t ⁻¹)	581	477
残渣产量占原料质量分数/%	49.5	45.1
价值分配,残渣馏分	0.63	0.61
沥青馏分占原料质量分数/%	22.3	45.1
能量/(MJ·t ⁻¹)	221	289
沥青生产能量/(MJ·t ⁻¹)	510	

生产中所需 98.3% 的能量(蒸汽热/内部电)由炼厂内的炼厂气(79.2%)和重燃油(19.1%)产生,

剩余的 1.7% 由电网用电产生。详见表 2。

表 2 沥青生产的能源分配

	所占比例/%	能耗/(MJ·t ⁻¹)
重燃油	19.1	97.0
炼厂气	79.2	404.0
电	1.7	8.7
总计	100.0	509.7

通过重燃油(40.0 MJ/kg)和炼厂气(49.4 MJ/kg)的卡值可计算出直馏沥青生产的能量消耗。详见表 3。

表 3 炼厂内沥青生产的能耗

	重燃油	炼厂气	电
	2.44	8.18	2.41

2.4 沥青存储

在炼油厂直接生产后,通过管道将沥青转移到热储罐中,并维持在所需要的温度。在下一步转移前,沥青均储存在这些储罐中。储罐的平均大小为 6 200 m³,典型的储存温度为 175℃。在生产过程中,沥青也以这个温度转移。使用电力马达泵使储罐内的沥青不断循环,沥青转移装货也采用此泵。一个储罐的沥青年生产能力固定在 40 000 t。

沥青存储的能源消耗主要在 3 个方面^[16]:维持储罐内的温度,维持管道内的温度,循环和装载沥青;采用炼厂燃料加热储罐和管道;炼厂气和重燃油的分配与炼油厂内一致。循环转载泵使用来自电网用电。通过用电量及燃料量同样可计算出沥青存储阶段的碳排放。

由原油萃取、原油运输、沥青生产及存储四阶段可知,道路沥青的实效清单分析需考虑沥青生命周期过程能耗和少量的温室气体排放。

3 各种沥青碳足迹计算

3.1 直馏沥青生命周期清单

表 4 列出了直馏沥青的生命周期清单^[15]。运用表 4 数据,计算道路沥青各阶段的温室气体排放,见表 5。可以看出,道路沥青在原油萃取阶段的排放量最大,为 324.804 kg(CO₂-e)/t,其次是运输阶段、生产阶段以及储存阶段,分别为 178.57 kg(CO₂-e)/t、53.88 kg(CO₂-e)/t、11.27 kg(CO₂-e)/t。上述过程排放合计为 586.52 kg(CO₂-e)/t。

表4 1 t 铺路等级直馏沥青的生命周期清单

生产 1 t 沥青	原油萃取	运输	炼厂	储存	总计
原料					
原油/kg	1000				
能源消耗					
天然气/kg	21.00	0.66	0.59	0.19	22.44
原油/kg	26.2	10.2	12.0	2.2	50.6
煤/kg	8.2	1.8	0.6	0.3	10.9
铈/kg	0.00018	0.00003	0.00003	0.00002	0.00026
排放物					
CO ₂ /g	144563	36352	37422	7831	226167
SO ₂ /g	395	346	131	27	899
NO _x /g	604	474	53	11	1142
CO/g	887	132	18	3	1040
CH ₄ /g	659	28	25	6	719
烃/g	4.8	5.4	3.5	38.7	52.4
NM VOC/g	364	22	16	3	404
颗粒/g	249.0	34.0	13.6	3.4	300.0

表5 道路沥青各阶段温室气体排放

阶段	原油萃取	运输	沥青生产	储存	总计
CO ₂ e/[kg(CO ₂ -e)·t ⁻¹]	342.80	178.57	53.88	11.27	586.52

3.2 聚合物改性沥青生命周期清单

在道路建设和工业应用领域,聚合物改性沥青(PMB)被广泛使用^[17]。沥青中聚合物类型和聚合物含量的范围随应用对技术的需求而有所不同,这里仅考虑一种聚合物类型和含量。目前,使用最为普遍的聚合物类型是颗粒状的SBS。铺路等级的沥青用作基层沥青。欧洲一份聚合物改性产品工业综述^[17]认为,最终产品中,典型SBS聚合物质量分数大约为3.5%。本研究中PMB厂设在炼厂内,生产过程所需的所有热能都来自175℃的热沥青和高剪切工厂的摩擦热。表6列出了聚合物改性沥青的生命周期清单^[15]。

运用表6数据,计算聚合物改性沥青各阶段的温室气体排放,见表7。可以看出,聚合物改性沥青在沥青生产阶段的排放量最大,为566.01 kg(CO₂-e)/t;其次是SBS的生产和运输产生的排放,为313.17 kg(CO₂-e)/t;最后是在PMB研磨厂产生的排放,为15.87 kg(CO₂-e)/t。上述过程排放合计为895.05 kg(CO₂-e)/t。

表6 聚合物改性沥青生命周期清单

生产 1 t PMB 沥青	SBS(生产 & 运输)	PMB 研磨	总计	
原料				
原油/kg	965.0	22.6		987.6
能源消耗				
天然气/kg	21.70	29.80	0.78	52.28
原油/kg	48.7	20.1	0.3	69.1
煤/kg	10.5	5.4	2.1	18.0
铈/kg	0.00025	0.00000	0.00015	0.00040
排放物				
CO ₂ /g	218252	117719	10046	346016
SO ₂ /g	867	842	34	1744
NO _x /g	1102	614	18	1734
CO/g	1004	76	3	1083
CH ₄ /g	694	493	18	1205
烃/g	50.5	1017.0	1.0	1068.5
NM VOC/g	390	10	1	401
颗粒/g	290.1	99.8	9.9	399.8

表7 道路沥青各阶段温室气体排放

阶段	沥青	SBS(生产 & 运输)	PMB 研磨	总计
CO ₂ e/[kg(CO ₂ -e)·t ⁻¹]	566.01	313.17	15.87	895.05

3.3 乳化沥青生命周期清单

表8列出了乳化沥青(EB)过程和设施的生命周期清单,它包括生产、运输、原油精制所需设施建设相关的流程^[15]。运用上述数据,计算乳化沥青各阶段的温室气体排放,见表9。可以看出,乳化沥青在沥青生产阶段的排放量最大,为586.54 kg(CO₂-e)/t;与上述过程相比,乳化沥青在乳化剂的生产及运输、HCl的生产及运输、使用的水及乳化沥青研磨厂产生的排放很小,分别为10.72、7.17、7.85、24.21 kg(CO₂-e)/t。上述过程排放合计为636.49 kg(CO₂-e)/t。

表8 1 t 乳化沥青生命周期清单

1 t EB 生产	乳化剂 沥青	HCl (生产 & 运输)	热水 (水 & 能量)	乳状液 研磨	总计
原料					
原油/kg	1000.0	1.1			1001.1
能源消耗					
天然气/kg	22.50	0.22	0.34	0.08	24.35
原油/kg	50.5	1.4	0.4	1.8	54.5
煤/kg	10.92	0.30	0.67	0.07	15.21
铈/kg	0.00026	0.00002	0.00004	0.00000	0.00032

续表

1 t EB 生产	乳化剂 沥青 (生产 & 运输)	HCl (生产 & 运输)	热水 (水 & 能量)	乳状液 研磨	总计	
排放物						
CO ₂ /g	226167	4602	3985	5459	15455	255669
SO ₂ /g	899.0	7.1	16.0	19.0	53.0	994.1
NO _x /g	1142.0	20.0	10.0	7.7	27.0	1206.7
CO/g	1040.0	4.9	4.1	2.9	5.0	1056.9
CH ₄ /g	719.0	6.0	7.7	3.7	28.0	764.4
烃/g	52.4	14.0	0.3	0.5	1.0	68.2
NM VOC/g	404	0.9	1.4	2.3	2.1	410.7
颗粒/g	300.6	3.0	4.2	1.9	15.2	324.9

表 9 道路沥青各阶段温室气体排放

阶段	乳化剂 沥青 (生产 & 运输)	HCl (生产 & 运输)	热水 (水 & 能量)	乳状液 研磨	总计	
CO ₂ e/[kg(CO ₂ -e)·t ⁻¹]	586.54	10.72	7.17	7.85	24.21	636.49

3.4 沥青碳足迹对比分析

通过表 4 ~ 表 9 数据,计算直馏道路沥青、聚合物改性沥青、乳化沥青在生产阶段的温室气体排放,详见表 10。可以看出,对于 3 种道路沥青,直馏沥青的温室气体排放最低,为 586.52 kg(CO₂-e)/t,乳化沥青次之,为 895.05 kg(CO₂-e)/t,聚合物改性沥青的排放最高,为 636.49 kg(CO₂-e)/t。

表 10 3 种道路沥青生产阶段温室气体排放

	直馏沥青	聚合物改性沥青	乳化沥青
CO ₂ e/[kg(CO ₂ -e)·t ⁻¹]	586.52	895.05	636.49

4 结论

(1)道路沥青的实效清单分析需考虑沥青生命周期过程能耗和少量的温室气体排放。

(2)直馏道路沥青在原油萃取阶段的温室气体排放为 342.80 kg(CO₂-e)/t;运输阶段的温室气体排放为 178.57 kg(CO₂-e)/t;在炼厂内的温室气体排放为 53.88 kg(CO₂-e)/t;储存阶段的温室气体排放为 11.27 kg(CO₂-e)/t,共计总排放 586.52 kg(CO₂-e)/t。

(3)聚合物改性沥青在原油萃取、运输、生产、储存阶段的排放合计为 895.05 kg(CO₂-e)/t;乳化沥青

在上述过程的排放合计为 636.49 kg(CO₂-e)/t。

(4)对于直馏沥青、聚合物改性沥青、乳化沥青,直馏沥青的温室气体排放最低,乳化沥青次之,聚合物改性沥青的排放最高。从减少碳排放的角度考虑,建议优选直馏沥青和乳化沥青产品。

(5)可在道路沥青生产及供应等过程中寻求减少温室气体排放的机会;可采用相关分析方法开展并实施碳中和项目。

参考文献

- [1] Vicroads. <http://www.vicroads.vic.gov.au/Home/NewsRoom/New+Archive/Jan-Mar+2008/MicklehamRoad.htm>.
- [2] Brown, Alexander. Carbon footprint of HMA and PCC pavements [C]. International Conference on Perpetual Pavements, Columbus, Ohio, 2009.
- [3] Asphalt Pavement Alliance. Carbon footprint: How does asphalt stack up? Maryland, 2010.
- [4] Kuang-Yi Wei, Jyh-Dong Lin, I-hung Yu. Assessment of CO₂ emission reduction in road construction using recycled concrete materials [J]. Int J Pavement Res Technol, 2013, 6(4): 423-430.
- [5] Yue Huang, Alan Spray, Tony Parry. Sensitivity analysis of methodological choices in road pavement LCA [J]. Int J Cycle Assess, 2013, 18: 93-101.
- [6] Wahidul K Biswas. Carbon footprint and embodied energy assessment of a civil works program in a residential estate of Western Australia [J]. Int J Life Cycle Assess, 2014, 19: 732-744.
- [7] Partial Life Cycle Inventory or "Eco-Profile" for Paving Grade Bitumen, Eurobitume Report 99/007, May 1999.
- [8] EN 12591: Bitumen and bituminous binders-Specifications for paving grade bitumens, 2009.
- [9] International Association of Oil & Gas Producers, Environmental Performance in the Exploration & Production industry, Report No. 429, November 2009.
- [10] Mineralölversorgung mit Pipelines, www.MWV.de. www.MWV.de.
- [11] Mastera crude oil carrier. www.nesteoil.com.
- [12] port to port distances. www.searates.com.
- [13] U. S. Environmental Protection Agency, Analysis of Commercial Marine Vessels, Emissions and Fuel Consumption Data, EPA420-R-00-002, February 2000.
- [14] Ecofys (Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post) 2012 Sector report for the refinery industry, 2009.
- [15] The world's most consistent & transparent life cycle inventory database. www.ecoinvent.org
- [16] Deygout, F. Volatile emissions from hot bitumen storage tanks [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2011, 30(1): 102-112.
- [17] Eco-profile of SBS, The International Institute of Synthetic Rubber Producers, I. Boustead & D. L. Cooper, July 1998. ■