

文章编号:1671-2579(2014)05-0332-06

生命周期评价(LCA)在美国公路工程中的应用

马峰¹, 秦钜泽², 傅珍², 彭丹丹², 孙国强²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 材料科学与工程学院)

摘要: 生命周期评价方法已成为一种评估路面建设和使用过程中能源消耗和温室气体排放的有效手段。该文介绍生命周期评价方法的理论体系,以生命周期评价方法在公路工程中的研究范围拓展为主线,综述了该方法在美国公路工程中的相关应用研究,并借助美国公路工程中的具体应用研究模型,评估了连续配筋混凝土路面与热拌沥青混合料路面的施工过程中能源消耗情况,明确了减少路面生命周期原材料生产阶段等早期能源消耗数量有利于促进公路工程领域的可持续性发展。研究结果表明:生命周期评价方法是一个对路面工程产品或系统进行环境影响评估的有效工具,为生命周期评价方法在中国公路工程中的推广应用提供有益参考。

关键词: 公路工程; 生命周期评价; 能耗; 温室气体排放

当前,高速公路网已成为一种主要的交通与经济驱动模式,然而在构建和使用该系统时人们常忽视了其对环境的影响。道路建设、使用和养护过程中不仅消耗大量能源,而且排放的温室气体和有害物质对环境造成了严重影响。如何实现该过程对环境的影响最小化、可持续发展越来越被重视。在追求经济效益的同时,尽可能减少能源消耗对自然环境的影响是当前相关技术人员所面临的难题。因此,有待研究一种可

用于定量评估路面节能减排效果的方法,以便为路面设计与建设提供有效的参考依据,实现路面技术的可持续性发展。公路工程对环境的影响在美国受到了较多的关注和重视,生命周期评价(Life Cycle Assessment, 简称 LCA)作为一种有效的评估公路工程中能源消耗与排放的方法而得以广泛研究和应用。同时,国外研究表明 LCA 在公路工程中发挥着越来越重要的作用,而中国对于生命周期评价在公路工程中的应

BOT 项目初步评估中,从而使多指标评价归结为单目标决策。应用该方法可以通过计算定量数值,直观反映出项目的综合评价结果,并且能够减少定性分析中人为因素影响,提高投资评估的科学性、合理性及工作效率。该文以公路 BOT 项目为例进行研究,该研究思路和方法也可以推广到桥梁、轨道等其他基础设施的 BT、BOT 项目初步评估中,以实现快速评估,科学决策的目的。

参考文献:

- [1] 杨春燕,蔡文. 可拓工程[M]. 北京:科学出版社,2007.
[2] 蔡文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报,1999(7).

- [3] 蔡文,石勇. 可拓学的科学意义与未来发展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006(7).
[4] 蔡国梁,张柄汉,廖靖宇,等. 可拓学及其经济应用[J]. 河南科学,1998(3).
[5] 王作雷,蔡国梁,李玉秀,等. 基于可拓数学的城市商用土地等级综合评价[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2003(4).
[6] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.
[7] 蔡文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践,1998(1).
[8] 李志林. 可拓综合评价方法及其应用特色[J]. 广东工业大学学报,2000(2).
[9] 刘娜. 可拓法在业绩评价中的应用研究[M]. 西安:西安建筑科技大学出版社,2005.

收稿日期:2014-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51108038,51108039);国家国际科技合作专项项目(编号:2013DFA81910);陕西省科技项目(编号:2013KW24,2013kjxx-94)

作者简介:马峰,男,博士,副教授. E-mail:mafeng524@163.com

用研究相对较少。因此,该文在介绍 LCA 理论体系的基础上,重点综述了 LCA 在美国公路工程中的应用研究,并借助美国公路工程中的应用研究实例介绍了连续配筋混凝土路面与沥青路面的施工能耗,为 LCA 在中国公路工程中的应用提供参考。

1 LCA 理论体系

生命周期评价是评估工艺和产品在其生命周期内的环境负荷的一种方法。当前,环境管理—生命周期评价—原则和框架标准(ISO 14040)确定的生命周期评价步骤如图 1 所示。

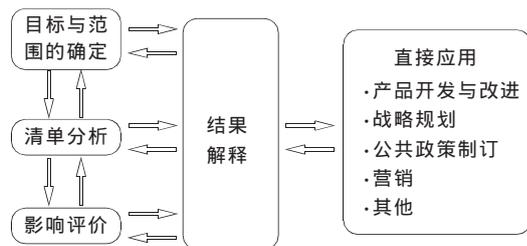


图 1 ISO 生命周期评价的技术框架

首先确定目标与范围,包括系统边界、假设和限制条件等,其中对范围的定义在必要时可以适当修改。然后进行清单分析,即通过采集研究对象在生命周期内的能耗及环境影响的数据,建立产品的输入和输出模型,定性和定量地分析评价各个要素对能耗和环境的影响。第三阶段的生命周期影响评价是政策制订者做出正确决策的主要依据,此阶段需要对潜在的环境影响进行评估,并估算出模型系统中所使用的资源,其中分类、特征化、权重和额外的生命周期评价数据质量分析是选择性步骤。最后阶段是 ISO 14000 的解释,该阶段识别重大问题,评估结果,得出结论,解释存在的局限性,并提出改进方法与改进方向,通常要形成研究报告。

2 美国 LCA 在公路工程中的应用研究

2.1 LCA 理论发展

20 世纪 60 年代末,生命周期评价在美国首次出现,并被用于产品包装的分析与评价,其标志是可口可乐饮料瓶能耗与环境影响评估研究的开展。由于环保意识的不断加强及可持续性的政策支持,该理论不断发展和完善,如 1990 年荷兰首次提出了面向产品的环境政策。1991 年国际环境毒理学会与化学学会第一

次主持召开了有关生命周期评价的国际研讨会,并首次提出生命周期评价的概念。1993 年国际标准化组织将生命周期评价纳入 ISO 14000 国际标准。此外,美国国家环境保护局出版的一系列有关生命周期评价指南,有力地推进了生命周期评价在各个领域的广泛应用,同时也促进了生命周期评价方法的研究不断深入。

2.2 美国 LCA 在公路工程中的应用研究

LCA 最早应用于公路是 1996 年 Häkkinen 等对芬兰沥青玛蹄脂路面和水泥路面进行环境影响的对比研究。1998 年美国 Horvath 和 Hendrickson 采用经济投入—产出寿命周期评价模型,对美国热拌沥青混合料路面和连续配筋混凝土路面的能耗与排放进行了比较,发现沥青路面的能耗比水泥混凝土路面多约 30%。而瑞典环境研究所采用国际环境毒理与环境化学学会和美国环境保护署开发 SETAC—EPA 模型对不同类型路面结构形式进行了生命周期评价,指出混凝土路面的能耗比沥青路面多 37%。针对 Horvath 等人与 Stripple 的研究差异,Zapata 和 Gambatese 提出一个简化了的生命周期清单评价模型,研究了连续配筋混凝土路面和沥青路面从原材料提取与加工到施工现场铺筑过程的能耗,认为连续配筋混凝土路面的能源主要消耗于水泥与钢筋的生产过程,而沥青路面的能源消耗主要源于沥青的生产、沥青拌和与集料的干燥过程,当使用寿命相同时,道路生命周期的前 3 个阶段(原材料提取、加工和路面材料的铺筑)中,普通水泥混凝土路面需要消耗更多的能源。

随着 LCA 理论的不完善与引入,其局限性逐渐显现出来。Berthiaume 和 Bouchard 认识到不能在同一水平上对生命周期评价(能耗计算和污染排放清单)的很多数据进行比较,因此提出利用排放潜能分析来比较不同路面的能耗,并通过比较水泥混凝土路面(干法)、水泥混凝土路面(湿法)、夏季沥青路面施工和秋季沥青路面施工 4 种不同情况下的排放与能源消耗。发现在这 4 种情况中,夏季施工时沥青路面对环境的影响较低,即净排放潜能消耗最低,普通水泥混凝土路面材料的生产采用湿法的净排放潜能消耗最高。Tatari Omer 等在 Berthiaume 和 Bouchard 的基础上,对连续配筋水泥混凝土路面和热拌沥青混凝土路面对生态系统的影响进行了分析,对生命周期评价的内容进行了补充。

2.3 LCA 理论在公路工程中的深入应用研究

随着 LCA 理论在公路工程中的应用不断深入,

逐渐涉及到材料与结构、公路施工、修复、养护以及再生等多个方面。Nisbet 等通过生命清单分析比较了美国沥青混凝土路面和水泥路面的环境影响,结果表明:水泥混凝土路面的能耗较低,且温室气体排放总量较少。此外该项研究的独特之处是加入了对使用寿命、养护方式、路面结构与配合比设计等 10 种因素的敏感性分析,并对其计算结果进行了评价,发现沥青路面中沥青原料的能耗是能量计算的主导因素,而原料运输阶段则可以忽略不计。Chappat 和 Bilal 通过对路面材料从生产到销售与使用过程中所需能耗及温室气体排放进行了深入分析,发现波特兰水泥混凝土路面消耗的能源最多,而热拌沥青混合料路面的能源消耗较少。Jim Chehovits 利用 Chappat 和 Bilal 的研究信息对不同道路养护处理方式的能耗与温室气体排放进行了细致的评估,通过对热拌沥青混合料路面在施工、修复和养护工程中的能耗与温室气体排放量的计算和比较,发现新建、大修、热拌沥青混合料薄层罩面和就地热再生技术能耗最多,碎石封层、稀浆封层、微表处和裂缝填充延长路面一年寿命所消耗的能源较少,裂缝修补和雾封层延长路面一年寿命所消耗的能源最少。密歇根州运输部的 Chan 通过生命周期分析,对新建、重建和再生路面的能耗与温室气体排放进行了分析,这是首次将生命周期分析与生命周期成本分析相结合的研究,为今后路面生命周期评价提供了一个新思路。Carpenter 等利用 LCA 对高炉底灰作为集料的环境影响进行评价,发现采用高炉底灰可显著降低能耗与温室气体排放。Dorchies 利用一种软件,对由不同性质和种类的材料所组成的不同路面结构进行比较发现,产生相同结构性能时路面结构的能耗与温室气体排放量的变化高达 80%。Chowdhury Raja 等利用 LCA 分析方法对新集料、再生料、粉煤灰和高炉底灰在公路工程中的环境影响进行评估,发现再生料在节能减排方面优势明显。

3 LCA 应用实例分析

近年来,由国际环境毒理与环境化学学会和美国环境保护署共同开发的 SETAC-EPA 模型在美国以及许多欧洲国家被广泛使用,已被国际标准化组织列入标准程序。借助 SETAC-EPA 模型能够对材料生命周期能耗的清单进行评估,它将评估系统分成几个独立的过程或方法,从而独立地进行分析,而且能够借助一个流程图概括得出结果。

基于此,Zapata 和 Gambatese 选用 SETAC-EPA 模型评估普通水泥混凝土路面与热拌沥青混合料路面的能源消耗情况,并且研究开发了路面生命周期的流程,包括原材料提取、加工、铺筑、养护和拆卸、回收与处置等内容。此项研究中,在未考虑两种路面材料在生产和铺筑过程中温室气体排放的前提下,确定和量化评估了两种不同类型路面生命周期不同阶段的能耗。

3.1 目标与范围的确定

生命周期评价方法第一步选择用于评估的道路类型与特征以及研究中需要考虑的假设。考虑到交通量以及道路本身对环境的影响,选取美国某州际公路 1 km 高交通流量的典型双车道作为评估道路。

根据 AASHTO 指南所列方法进行路面结构设计,根据 10 年或更长时间的州际高速公路交通评估的结果,路面结构设计轴载为 80 kN,等效于单轴加载。双车道路面宽 7.20 m,假定基层选取 150 mm 的优质水泥土基层($E=6.9$ GPa)。因此仅需比较主要材料的加工与铺筑环节的能源消耗。连续配筋混凝土路面的厚度为 220 mm,其配合比设计为:水泥 12%、粗骨料 43%、细骨料 28%和 17%的水;沥青路面设计厚度为 300 mm,沥青与骨料的重量百分比分别为 5%和 95%。

3.2 清单分析

生命周期清单分析描述了能源从系统中流入和流出的过程,如表 1、2 所示,包括 5 个子阶段:1) 原材料的提取与预处理;2) 加工;3) 路面材料的铺筑;4) 养护;5) 拆卸、回收与处置。

当所需的材料数量与路面结构类型确定后,就可以通过生命周期清单对路面能耗进行评价。能耗信息的采集有两种方式:第一种是通过已有相关研究和涉及两种路面材料的加工与施工工艺的行业进行文献资料调查和分析;第二种信息来源于施工企业单位的现场调查。材料使用和能耗数据的收集都是从美国两个大型民用建筑的承包商处获得。

3.3 影响评价

连续配筋混凝土路面和沥青路面的生命周期清单评估结果见表 3、4,其中包括原材料提取与预处理,沥青、普通混凝土、钢筋和集料的加工以及混合料铺筑的能耗值。借助使用生命周期清单的 5 个子系统划分方法,连续配筋混凝土结构在生命周期模型的前 3 个子系统(原材料提取、加工和材料铺筑)中能耗为 4.58×10^6 MJ,约为沥青路面能耗的 21%。

表1 连续配筋混凝土路面生命周期

原材料提取与预处理	加工	铺筑	使用与养护	拆卸、回收与处置
水泥:石灰石,页岩,石膏的提取与破碎	窑处理,研磨	道路处理:挖掘,路基夯实	交通:每年的车辆数	路面回收利用
骨料:提取(采石场或河流)	破碎、筛分(粗骨料和细骨料)	铺筑:钢筋与混凝土的强化	养护	磁选
钢筋:铁,石灰石,煤的开采	破碎,加热(爆炸,吹氧炼钢)铸造,制冷,制造	表面修整	—	废旧钢材,钢材再加工
其他:添加剂,水和其他	混凝土:水泥,水,骨料和添加剂的拌和	—	—	矿物废料,粉碎,再利用

表2 沥青路面生命周期

原材料提取与预处理	加工	铺筑	使用与养护	拆卸、回收与处置
石油:萃取,钻孔和泵送	加热,蒸馏,沥青的储存	道路处理:挖掘,路基夯实	交通:每年的车辆数	路面回收利用:沥青再加工,破碎和再利用
集料:提取(采石场或河流)	破碎、筛分(粗骨料和细骨料)	铺筑:沥青混凝土	养护	—
其他:添加剂,水和其他	沥青:集料的干燥,沥青、集料、水和添加剂的拌和	表面修整	—	—

表3 连续配筋混凝土路面生命周期清单结果

子阶段	材料或工序	材料能源消耗/ ($J \cdot t^{-1}$)	总能耗/ MJ	子阶段能耗 百分比/%	总能耗/ %
原材料提取 与预处理	波特兰水泥	0	0	0	3
	粗集料	5.30×10^7	8.38×10^4	58	
	细集料	5.30×10^7	5.46×10^4	38	
	混凝土加固用钢筋	5.30×10^7	6.61×10^4	4	
	子阶段总计		1.45×10^5	100	
加工	波特兰水泥	6.33×10^9	2.80×10^6	65	94
	粗集料	0	0	0	
	细集料	0	0	0	
	预应力钢筋	1.90×10^{10}	1.48×10^6	34	
	混凝土搅拌(搅拌设备)	6.88×10^6	2.53×10^4	1	
子阶段总计		4.31×10^6	100		
铺筑	混凝土	3.40×10^7	1.25×10^5	100	3
	钢筋	0	0	0	
	子阶段总计		1.25×10^5	100	
共计			4.58×10^6		100

表 4 沥青路面生命周期清单结果

子阶段	材料或工序	材料能源消耗/ ($J \cdot t^{-1}$)	总能耗/ MJ	子阶段能耗 百分比/%	总能耗/ %
原材料提取 与预处理	沥青	0	0	0	6.69
	集料	5.30×10^7	2.53×10^5	100	
	子阶段小计		2.53×10^5	100	
加工	沥青的生产	6.00×10^9	1.51×10^6	43	91.54
	沥青的储存	5.43×10^8	1.36×10^5	4	
	沥青的拌和与集料的干燥	3.62×10^8	1.82×10^6	53	
	集料	0	0	0	
	子阶段小计		3.46×10^6	100	
铺筑	沥青	1.34×10^7	6.70×10^4	100	1.77
	子阶段小计		6.70×10^4	100	
共计			3.78×10^6		100

与水泥混凝土和沥青材料生产的能耗相比,两种路面结构形式原材料提取和铺筑过程的能耗可以忽略。表 3 表明:原材料提取和混凝土的铺筑仅占连续配筋混凝土路面总能耗的 6%。剩下 94% 的能源用于制造过程中,水泥生产占能耗的 65%,而钢铁生产和混凝土拌和过程分别占 34%、1%。

对于连续配筋混凝土路面,钢铁的生产占施工过程能耗的 34%。如果将钢筋从连续配筋混凝土结构中移除,能耗将会降低到 3.09×10^6 MJ。此时,沥青路面的能耗(3.78×10^6 MJ)比无筋普通混凝土路面的能耗多 18%。然而,从连续配筋混凝土路面移除钢筋需要改进路面设计,或缩短使用寿命,这都很可能增加普通混凝土路面的能耗。

数据分析表明:沥青路面在生命周期模型的前 3 个子阶段中耗能 3.78×10^6 MJ,从表 4 中得出:原材料的提取和沥青路面的铺筑占总能耗的 8.46%,剩余部分 91.54% 的能源消耗在加工过程中,沥青拌和和集料的干燥占能耗的 53%,而沥青的生产和储存分别占 43% 和 4%。在评估中假设沥青生产的能耗为 6.0×10^9 J/t,这是该过程在文献综述中获得的极大值。此外,沥青混合料拌和过程中沥青用量对于沥青路面的能耗而言是一个主导因素。如果沥青用量略有改变,总能耗将会受到很大影响。重量百分比为 10% 的沥青用量需要 5.42×10^6 MJ,而 1% 的沥青用量需要 2.26×10^6 MJ。

如前所述,考虑到两种路面宽泛的养护策略和不

确定的使用寿命,对路面工程系统的养护和拆卸、回收与处置两个子阶段,由于其过程分析的复杂性,两个子阶段的能耗没有进行估计。

3.4 结果解释

生命周期评价使得明确连续配筋混凝土路面和热拌沥青混合料路面从原材料提取到将其铺筑于施工地点的能耗成为可能,清单分析有助于建立两种不同类型路面生命周期评价模型。清单分析的结果表明:假设使用寿命相同,普通混凝土路面生命周期的原材料提取、加工和铺筑 3 个阶段消耗的能源多于热拌沥青混合料路面。路面生命期的能耗将完全取决于当地环境条件、路面的使用与养护。同时,部分研究表明:普通混凝土路面的平均寿命比沥青路面长,而另外一些研究却有不同观点:与使用寿命较长的路面相比,重建路面的使用寿命短,导致需要投入额外的能耗。此外,水泥混凝土和钢筋不能像沥青一样被回收利用,这也进一步解释了两种材料生产的能耗差异。

沥青加工所需的能源比水泥的生产要少。水泥生产的能耗约为钢筋混凝土生产与铺筑能耗的 61%,而沥青的提取与生产的能耗约为沥青路面加工与铺筑的 40%。沥青路面的主要能耗集中在沥青混合料的拌和与集料的干燥过程,而不是原油的提取和沥青的蒸馏。因此,改进集料的储存和干燥过程能够显著降低沥青路面的总能耗。同样,水泥生产阶段是普通混凝土路面能源消耗最多的部分,如果用诸如粉煤灰之类的工业废料取代一定比例的水泥,就可以显著降低水泥混

凝土路面生产的能耗。

4 结语

公路工程中路面生命周期是一个复杂的、有较多变量和联系的体系。该文综述了 LCA 理论在美国公路工程中的应用研究情况。分析表明:由于选取的模型不同可能导致能耗的结果存在较大差异。同时,针对 LCA 理论的局限性,已有研究提出排放潜能用于评价路面能耗。此外,LCA 理论已深入到路面的施工、修复和养护等方面,不同的施工方式、修复、养护技术所消耗的能源及其产生的温室气体相差较大,而且选用再生材料在节能减排方面具有显著的优势。同时借助 LCA 应用实例,通过计算独立工序和子阶段的能源消耗,定量估算了连续配筋混凝土和热拌沥青混合料两种路面结构的全寿命周期总能耗,发现减少路面生命周期原材料生产和加工等早期阶段的能耗有利于实现可持续性发展。

生命周期评价方法是一个针对路面工程领域产品和系统进行环境影响评估的有效工具。然而,由于信息缺乏、不完备或是存在矛盾,制约了该理论的进一步应用。同时,在应用生命周期评价方法过程中要尽量综合分析并采用所有可能对环境产生重要影响的流程和活动的数据。

参考文献:

- [1] Chappat, M. & Bilal, J. The Environmental Road of the Future: Life Cycle Analysis, Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions. ColasGroup, 2003.
- [2] Pablo Zapata, John A., Gambatese, P. E., et al. Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(1): 9-20.
- [3] Murat Kucukvar, Omer Tatari. Ecologically Based Hybrid Life Cycle Analysis of Continuously Reinforced Concrete and Hot-Mix Asphalt Pavements[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(1): 86-90.
- [4] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2011.
- [5] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2012.
- [6] Vigon B. W., Tolle D. A., Cornaby B. W., et al. Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles[M]. CRC Press, 1993.
- [7] Oscar, O., Castells, F., Sonnemann G. Sustainability in the Construction Industry: A Review of Recent Developments Based on LCA[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 28-39.
- [8] Jodi S. Bakst, Lynda Wynn, Eugene Lee, et al. Guidelines for Assessing the Quality of Life Cycle Inventory Analysis[M]. United States Environmental Protection Agency, 1995.
- [9] Tarja Häkkinen, Kari Mäkelä. Environmental Adaptation of Concrete Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements[R]. Espoo: T R C o Finland, 1996.
- [10] H. Stripple. Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis[R]. Stockholm: SNR Administration, 2001.
- [11] Omer Tatari, Munir Nazzal, Murat Kucukvar. Comparative Sustainability Assessment of Warm-Mix Asphalts: A Thermodynamic Based Hybrid Life Cycle Analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 58: 18-24.
- [12] Chehovits J, Galehouse L. Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements[C]. The First International Conference on Pavement Preservation, 2010: 27-41.
- [13] Chan, Arthur Wai-Cheun. Economic and Environmental Evaluations of Life Cycle Cost Analysis Practice: A Case Study of Michigan DOT Pavement Projects [D]. University of Michigan, 2007.
- [14] Carpenter A. C, Gardner K. H, Fopiano J, et al. Life Cycle Based Risk Assessment of Recycled Materials in Roadway Construction[J]. Waste Management, 2007, 27(10): 1458-1464.
- [15] Dorchie, P. T. The Environmental Road of the Future: Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions[C]. 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2008.
- [16] Raja Chowdhury, Defne Apul, Tim Fry. A Life Cycle Based Environmental Impacts Assessment of Construction Materials Used in Road Construction [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(4): 250-255.