

灌入式复合路面的经济和环境效益综合评价研究

陈胜¹, 陈亚东², 沈晓红³, 祁红⁴, 李子阳¹

(1. 淮安市博彦土木工程科学研究院有限公司, 江苏 淮安 223003; 2. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223003, 3. 江苏工程职业技术学院 后勤与基建处, 江苏 南通 226006; 4. 淮安市鹏腾建筑工程有限公司, 江苏 淮安 223003)

摘要: 灌入式复合路面作为一种新型路面养护技术,其经济与环境效益尚不明确。本研究基于实际工程,采用生命周期评价和生命周期成本分析,量化评估了灌入式复合路面的经济成本 and 环境影响,并与传统铣刨重铺进行了比较。采用热图可视化方法进一步探究了路面使用寿命对评价结果的影响,明确了其实现经济和环境优势所要达到的使用寿命要求。结果表明,灌入式复合路面相比铣刨重铺在材料生产和施工阶段的能耗、碳排放和综合造价分别高5.16%、58.10%和136%。考虑路面使用寿命后,灌入式复合路面只要能比铣刨重铺多服役一年以上,就具有能耗优势。若其使用寿命能进一步达到铣刨重铺的1.58倍以上,就能实现减碳作用。经济效益方面,由于灌入式复合路面的初期投入成本较高,仅当其使用寿命远高于铣刨重铺时,如灌入式复合路面服役14年,铣刨重铺仅服役5年,才能具有经济优势。

关键词: 灌入式复合路面; 生命周期分析; 经济环境效益; 碳排放

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7961(2024)02-0087-09

Economic and Environmental Benefits Assessment of Permeable Composite Pavement for Urban Intersection Roads

CHEN Sheng¹, CHEN Yadong², SHEN Xiaohong³, QI Hong⁴, LI Ziyang¹

(1. Huai'an Boyan Research Institute of Civil Engineering Co., Ltd., Huai'an Jiangsu 223003, China; 2. Faculty of Architectural Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an Jiangsu 223003, China; 3. Logistics and Infrastructure Division, Jiangsu College of Engineering and Technology, Nantong Jiangsu 226006, China; 4. Huai'an Pengteng Construction & Engineering Co., Ltd., Huai'an Jiangsu 223003, China)

Abstract: As a new pavement maintenance technology, the economic and environmental benefits of the permeable composite pavement are not yet clear. Based on a practical maintenance project, this study carried out a quantitative evaluation of the economic costs and environmental impacts of permeable composite pavements using life cycle assessment and life cycle cost analysis, and compared it with traditional mill and fill. The results show that the energy consumption, carbon emissions, and overall cost of the permeable composite pavement compared to mill and fill were 5.16%, 58.10%, and 136% higher in the material production and construction phases, respectively. After considering the pavement service life, as long as the permeable composite pavement can serve more than one year more than mill and fill, it will have an energy consumption advantage. If its service life can further reach more than 1.58 times that of mill and fill, carbon reduction can also be achieved. In terms of economic benefits, advantages can only be achieved when the service life of the permeable composite pavement is significantly longer than that of the mill and fill. For example, the permeable composite pavement has a service life of 14 years and the mill and fill only serves 5 years.

Key words: permeable composite pavement; life cycle analysis; economic and environmental benefits; carbon emissions

收稿日期: 2023-08-03

基金项目: 江苏省建设系统科技项目“基于多序列动态加载的沥青路面交叉口车辙评估及防治研究”(2020ZD84)

作者简介: 陈胜(1976-),男,江苏淮安人,研究员级高级工程师,学士,主要从事城市道路工程技术研究。

交叉口是城市道路中使用频率最高的区域之一,也是道路安全事故的高发地带。在交通渠化和交通拥堵等因素的共同影响下,交叉口路面通常存在严重的结构破坏,车辙病害频繁发生^[1]。灌入式复合路面作为一种新型路面养护技术,在应对交叉口路面结构破坏和改善交通状况方面具有良好的潜力和应用前景^[2-3]。

灌入式复合路面采用空隙率在 20%~28%的基体沥青混合料作为路面基本骨架,再向其中灌入以水泥为主要成分的特殊胶浆,其材料强度主要由矿物骨料间的相互嵌挤以及水泥胶浆共同提供^[4]。Bharath 等^[5]和 Karami 等^[6]通过室内试验发现,灌入式复合路面的高温抗车辙性能与抗滑性能均优于传统沥青混合料,但其低温抗裂性有所不足。黎侃^[7]基于灌入式复合路面材料特性,提出将其作为抗车辙功能层应用于沥青路面。国外对灌入式复合路面的研究较多、应用较广,日本与丹麦等国家已将灌入式复合路面大规模应用于公交站台、收费站和交叉口等特殊路段,其工程优越性十分显著^[8]。而国内外对灌入式复合路面的研究多集中在技术性能与施工工艺等方面,对其经济效益与环境影响的研究较为缺乏,而经济和经济效益是评价养护技术可持续性的重要指标。因此,有必要对灌入式复合路面的经济效益与环境效益做出评价。

因此,本研究采用生命周期分析(LCA)方法,结合实际工程应用,系统地评价灌入式复合路面的经济成本和环境影响,以年均能耗和碳排放以及等额费用年金(EUAC)考虑使用寿命的影响,并通过热力图的形式将其与传统铣刨重铺方案进行对比,探究其在城市道路交叉口应用的全生命周期效益。

1 生命周期分析

1.1 分析目标与范围

本研究依托某城市交叉口灌入式复合路面养

护工程,该工程采用 12 cm GRAC-20 灌入式复合路面,并以传统铣刨重铺技术(4cm SMA-13 上面层+8 cm SUP-25 下面层)作为对比,旨在评价灌入式复合路面在城市道路交叉口的经济与环境效益。参照 ISO 14040^[9]以及 ISO 14044^[10]相关标准,结合美国联邦公路管理局(FHWA)所提出的路面生命周期分析框架^[11],对灌入式复合路面进行生命周期分析。分析目标是量化灌入式复合路面的经济效益与环境影响,包括其材料成本、能耗以及碳排放,并将其与传统铣刨重铺上面层技术相比较。生命周期分析主要包括原材料生产、材料运输、养护施工、后期使用等主要阶段,本研究从养护管理单位的角度出发,主要分析灌入式复合路面在材料生产、运输以及施工过程中的经济效益、能耗以及碳排放情况。

根据依托工程,灌入式复合路面与铣刨重铺均存在相同的路面铣刨流程,故后续分析中去除了相同的铣刨流程,着重分析二者不同的重铺流程,基于此,本研究的生命周期分析系统边界如图 1 所示。

灌入式复合路面所需原材料包括沥青、水泥、集料、矿粉、水等,基体沥青混合料由拌和站进行拌和,拌和完成后再运送到施工现场进行摊铺和碾压。灌入材料采用现场制作的方式,由搅拌机在现场拌和,在基体沥青路面准备完成后,将灌入材料摊铺到其表面,采用人工振捣的方式辅助其渗透进入基体沥青路面。复合式灌入路面必须进行养生,以保证水泥材料的水化作用形成强度,通常情况下需养生 2~3 天,之后可开放交通。而铣刨重铺混合料的原材料主要为沥青和集料,混合料同样采用厂拌的方式拌和,拌和完成后运送至施工现场进行摊铺和碾压,无需养生,待路面冷却后即可开放交通。

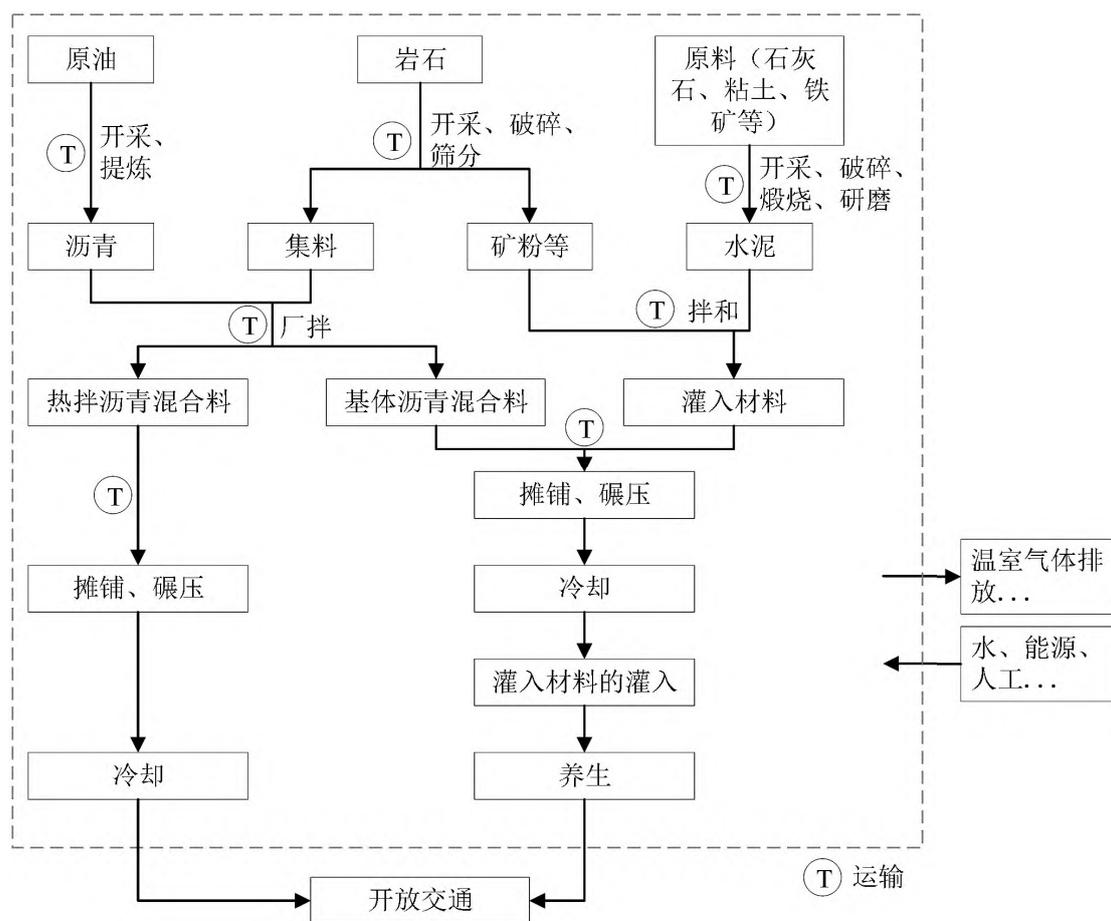


图1 系统边界

1.2 功能单元

功能单元是生命周期分析的最小分析单位,也是经济与环境效益分析的基准,通过引入功能单元,使得不同的路面养护措施能够在相同的路面条件下进行比较,从而消除原始路面状况不同对养护措施工程量等的影响。基于依托工程的实际路面状况与施工组织等相关信息,本研究的功能单元叙述为:原路面上1公里半幅单向单车道路面,基层状态良好。

1.3 生命周期清单分析

生命周期清单分析是生命周期分析的重要阶段,它是对产品、过程或活动等研究系统的整个生命周期阶段,资源和能源的使用及向环境排放的废物进行量化的技术过程,为后续分析提供重要的数据支撑。根据清单的具体内容,本研究将生命周期清单进一步细分为环境效益清单与成本效益清单。

1.3.1 环境效益清单

基于国家规范、公开数据库以及文献等资源,

本研究收集了大量基于过程的生命周期清单数据,结合依托工程的项目报告,选用如表1所示的沥青、集料等原材料生产过程中的能耗及碳排放数据。其中,沥青生产的相关数据来源于文献中广泛使用的欧洲沥青协会(Eurobitume)数据库^[12];集料生产过程中的能耗与碳排放根据相关文献^[13],选自四川大学与成都亿科环境科技有限公司(IKE)联合开发的中国LCA数据库(CLCD);工程所用的灌入胶浆以水泥为主要成分,水泥生产的相关数据选自权威行业报告^[14]。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的方法,以CO₂为基本单位,根据不同温室气体对地球温室效应的贡献程度,通过相应的温室效应的指数进行换算,由此即可得到二氧化碳当量(CO_{2e})排放。该方法所用的指数又称全球变暖潜能值(GWP),本研究采用IPCC第五次评估报告中每种温室气体的100年GWP进行计算。

表 1 原材料生产过程能耗及碳排放

原材料	能耗/(MJ/t)	碳排放/(kg CO ₂ e/t)
沥青	5 206.23	190.90
粗集料	31.82	2.43
细集料	58.56	8.69
矿粉	207.36	47.21
水泥	4 889	928.11

除了材料生产,材料运输也是路面养护技术生命周期分析中不可或缺的一部分,本研究所涉及的两种养护技术均包括沥青从提炼厂运输至拌和站、热拌沥青混合料从拌和站运输至施工现场这两个步骤。二者的不同点在于,灌入式复合路面还包括了水泥从水泥厂运输至施工现场这一步骤。运输过程中所涉及的运输距离、运输车辆及

其相关信息(包括油耗和载重)根据工程所在区域的普遍情况设定,具体运输过程与数值信息如图2与表2所示。需要指出的是,对于不同区域的工程实践相关数据的提取框架可参考本研究的方法,但具体的参数数值需根据实际情况进行本地修正。

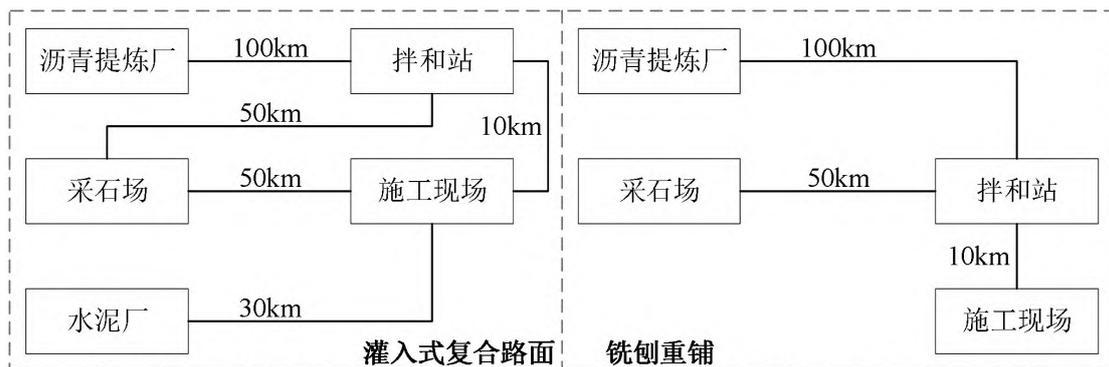


图 2 材料运输过程图示

表 2 材料运输信息

材料	运输距离/km	百公里油耗/(L/100km)	载重/t	能源类型
水泥	50	40	20	柴油
沥青	100	40	20	
集料	50	35	25	
混合料	10	35	25	

根据实际工程所在区域的普遍情况以及我国《公路工程预算定额(JTG/T 3832-2018)》^[15]和《公路工程机械台班费用定额(JTG/T 3833-2018)》^[16],

灌入式复合路面和铣刨重铺两种养护技术在混合料拌合及施工过程中用到的主要机械设备的基本信息如表3所示。

表3 两种养护技术原材料生产与施工过程中的主要施工机械信息

名称	型号	功能	工作效率	能耗	能源类型
灌入式复合路面					
沥青混合料拌和设备	LB3000	拌和	1.84 台班/(1000m ³)	10340.35 kg/台班 1618.42 kW·h/台班	重油 电
铣刨机	LX200	铣刨	0.30 台班/(1000m ² ×5cm)	190.46 kg/台班	柴油
摊铺机	S2000	摊铺	1.84 台班/(1000m ³)	136.23 kg/台班	
压路机	YZC-15	碾压	5.16 台班/(1000m ³)	80.80 kg/台班	
灰浆搅拌机	UJ200	拌和	0.84 台班/(10m ³)	17.20 kW·h/台班	电
铣刨重铺					
沥青混合料拌和设备	LB3000	拌和	1.84 台班/(1000m ³)	10340.35 kg/台班 1618.42 kW·h/台班	重油 电
铣刨机	LX200	铣刨	0.30 台班/(1000m ² ×5cm)	190.46 kg/台班	柴油
摊铺机	S2000	摊铺	1.92 台班/(1000m ³)	190.46 kg/台班	
压路机	YZC-15	压实	5.38 台班/(1000m ³)	80.80 kg/台班	
	YL20		2.68 台班/(1000m ³)	42.40 kg/台班	
	YL27		2.58 台班/(1000m ³)	50.40 kg/台班	

表3中仅记录了施工机械的能源消耗情况,不同能源的热值与碳排放仍需进一步换算,根据相关文献建议^[17],本研究采用《省级温室气体清单编

制指南》^[18]给出的能源排放系数以及《中国能源统计年鉴》^[19]中的低位发热量来进行计算,其数值如表4所示:

表4 能源排放系数与低位发热量

能源	排放系数	平均低位发热量
柴油	3.096 kg CO ₂ /kg	42.652 MJ/kg
重油	3.171 kg CO ₂ /kg	41.816 MJ/kg
电力(当量)	0.928 kg CO ₂ /(kW·h)	3.6 MJ/(kW·h)

1.3.2 成本效益清单

路面养护技术的生命周期成本一般是指养护技术的全寿命周期成本,其包括不同阶段的初始成本和折扣的未来成本,这些成本还可根据计算对象分为管理成本和用户成本。本研究从路面养护管理单位的角度出发,着重分析灌入式复合路

面及铣刨重铺的管理成本。管理成本主要由原材料成本、机械费用、人工费用等成分组成,本研究计算所使用的数据由路面养护管理单位给出,其为养护方案的单位综合造价,具体数值如表5所示。

表5 两种养护技术的单位综合造价

养护技术	综合造价	单位
铣刨重铺	SMA-13	1 900
	SUP-25	1 400
灌入式复合路面	GRAC-20	3 700

1.4 寿命分析期

灌入式复合路面作为一种新型路面养护技术,目前针对其使用寿命的研究较少,故其长期服役寿命难以准确预测。路面养护工程的生命周期分析不仅要求计算养护技术的初期效益,还需考虑初期效益基于使用寿命的年均效益。针对灌入式复合路面使用寿命较难预测这一问题,本研究采用使用寿命组合的方式,将两种养护技术的使用寿命纳入考量,其具体为:假设两者的使用寿命都在5~20年,考虑其在该假设前提下的所有寿命组合,则共有 $16 \times 16 = 256$ 种组合;针对每一组合,分别计算两种养护技术的年均环境效益与经济效益,年均环境效益直接采用年均能耗与年均碳排放,年均经济效益采用等额费用年金(EUAC),其计算公式如式(1)所示;在此基础上,计算铣刨重铺与灌入式复合路面在年均能耗、碳排放、EUAC上的差值,并采用热力图对其进行可视化,差值为正则表明灌入式复合路面的能耗、碳排放和成本相对更低,即在相应的使用寿命假设前提下更具优势。

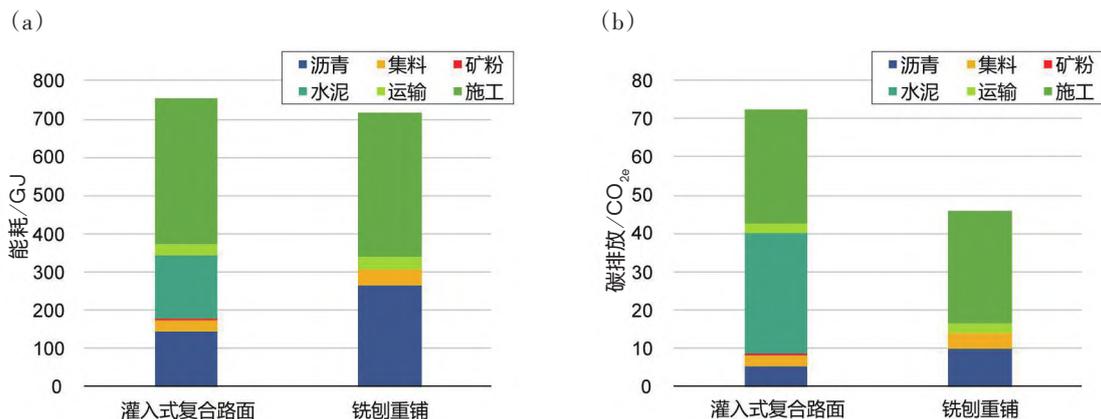
$$EUAC = P \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1)$$

其中, $EUAC$ —— 等额费用年金;

P —— 费用现值;

i —— 贴现率,取4%;

n —— 使用寿命。



(a): 能耗; (b): 碳排放。

图3 两种养护技术的环境影响

2.2 经济效益

图4展示了两种养护技术的单车道每公里的综合成本。根据路面养护管理提供的造价数据,该综合成本已包含原材料生产、拌和、运输以及施工阶段的各项费用。分析可知,灌入式复合路面

2 评价结果与讨论

2.1 环境效益

本研究首先开展了从摇篮到大门(cradle-to-gate)的生命周期评价,即仅考虑材料生产、拌合、运输和施工阶段。图3展示了灌入式复合路面与铣刨重铺两种养护技术的能耗与碳排放情况。分析能耗数据可知,灌入式复合路面的总能耗比铣刨重铺高5.16%,二者施工阶段的能耗均占比超50%,原材料生产阶段的占比超40%;由碳排放数据可知,灌入式复合路面的碳排放比铣刨重铺高58.10%,且其施工阶段的碳排放为41.35%,小于原材料生产阶段的55.58%,而铣刨重铺施工阶段的碳排放占比达64.05%,大于其原材料生产阶段的30.59%。对环境效益数据进行更进一步的分析可知,灌入式复合路面基体沥青混合料生产的能耗与碳排放均低于铣刨重铺所用的传统改性沥青混合料,但由于其引入了水泥基灌浆材料,且水泥用量较高,结合环境效益清单,水泥的能耗与沥青相近,其单位质量碳排放接近沥青的5倍,这就导致灌入式复合路面的总环境效益要略差于铣刨重铺技术。

的综合成本约为铣刨重铺的2.36倍,其造价较高,初期投入成本较高。因此,灌入式复合路面需较长的使用年限和较好的性能来弥补初期投入带来的成本劣势。

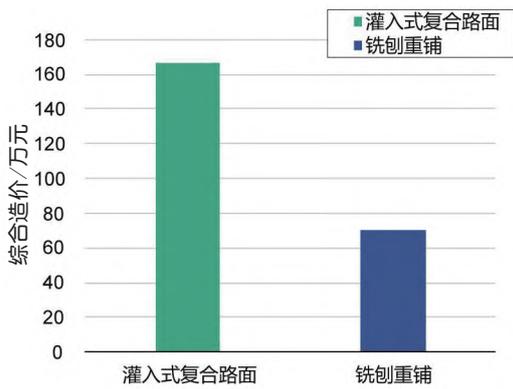


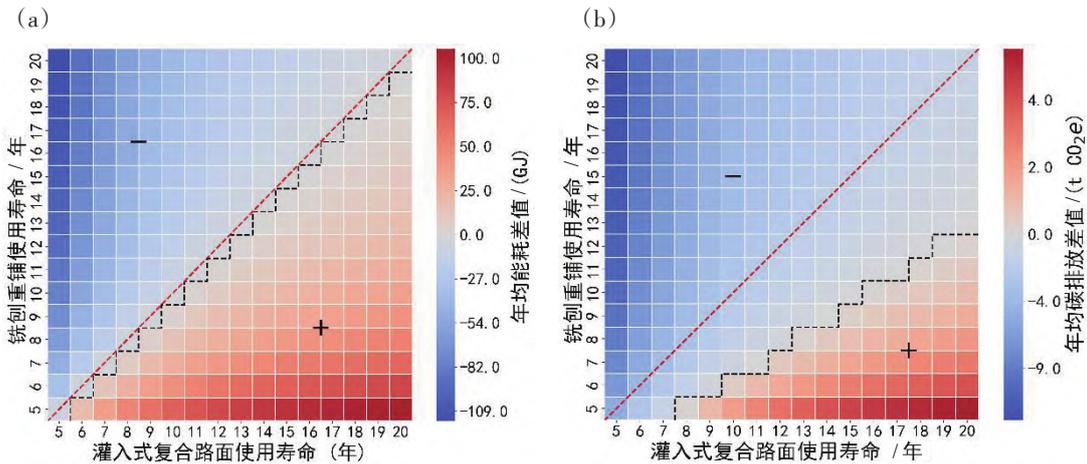
图 4 两种养护技术的费用比较

2.3 使用寿命影响

养护技术的使用寿命会对生命周期评价结果产生显著影响,使用寿命较短会增加养护次数,从而有可能产生更大的生命周期环境影响和经济成本。图 5 和图 6 为使用寿命影响下,灌入式复合路面与铣刨重铺两种养护技术的环境效益与经济对比结果。热力图中,横坐标代表灌入式复合路面的使用寿命,纵坐标则为铣刨重铺的使用寿命,每一个方格表示在对应的使用寿命组合条件下,铣刨重铺与灌入式复合路面的评价价值之差,并通过不同的颜色对差值大小进行区分。方格的颜色越偏向红色,则对应的差值越大,即灌入式复合

路面相对于铣刨重铺的优势越大;反之,方格的颜色越偏向蓝色,则表明差值越小,即灌入式复合路面在环境与经济效益上的优势越小甚至失去优势。图中的红色虚线为两种养护技术的使用寿命等值线,在这条线上,两种养护技术的使用寿命相等;黑色虚折线为正负差值区域的分界线,该分界线以下对应使用寿命组合使灌入式复合路面的效益占优,其上的寿命组合则使铣刨重铺占优。

分析图 5(a)可知,年均可耗差值的正负分界线接近二者的使用寿命等值线,表明当灌入式复合路面的使用寿命比铣刨重铺大 1 年以上时,其相应的能耗情况就优于铣刨重铺技术;根据图 5(b),当灌入式复合路面的使用寿命是铣刨重铺使用寿命的 1.58 倍以上时,其才能在碳排放上取得一定的优势,因此当铣刨重铺的使用寿命为 10 年时,灌入式复合路面的使用寿命需要达到 16 年左右时才具有减碳优势。由表 6 和图 6 可知,当灌入式复合路面的使用寿命小于 13 年时,则只要铣刨重铺技术的使用寿命不小于 5 年,灌入式复合路面的经济效益均逊色于铣刨重铺技术,仅当灌入式复合路面的使用寿命与铣刨重铺相差悬殊时(如灌入式复合路面 14 年,铣刨重铺 5 年),灌入式复合路面才能具有一定的经济优势。



(a): 能耗; (b): 碳排放。

图 5 两种养护技术的年均可耗与年均碳排放差值

表 6 两种养护技术在不同寿命组合下的 EUAC

使用寿命/年	铣刨重铺 EUAC /万元	灌入式复合路面 EUAC/万元
5	15.95	37.64
6	13.54	31.96
7	11.83	27.92

续表6

使用寿命/年	铣刨重铺 EUAC /万元	灌入式复合路面 EUAC/万元
8	10.55	24.89
9	9.55	22.54
10	8.75	20.66
11	8.10	19.13
12	7.57	17.85
13	7.11	16.78
14	6.72	15.86
15	6.39	15.07
16	6.09	14.38
17	5.84	13.77
18	5.61	13.24
19	5.41	12.76
20	5.22	12.33

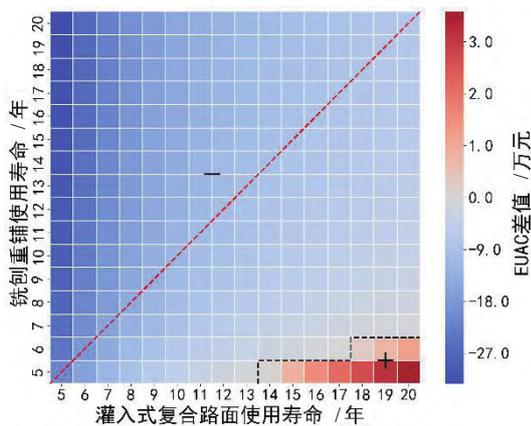


图6 两种技术的EUAC差值

3 结语

本研究基于某城市交叉口养护工程,运用生命周期分析方法,对灌入式复合路面技术的环境效益和经济效益进行了量化评估,并与传统的铣刨重铺技术进行了比较分析。通过考虑寿命组合,研究了使用寿命对这两种养护技术的环境效益和经济效益的影响,同时采用热力图对其年均能耗、年均碳排放和EUAC进行了可视化分析。本研究的主要结论如下:

(1)灌入式复合路面和铣刨重铺在环境影响的组成和占比上基本相同,其原材料生产阶段与施工阶段均占主导地位。但由于水泥基灌浆材料的引入,灌入式复合路面原材料生产阶段的碳排放占比为55.58%,明显高于铣刨重铺的30.59%。

总体而言,灌入式复合路面的环境效益略逊于铣刨重铺技术,其能耗增加了5.16%,碳排放增加了58.10%;灌入式复合路面的综合成本约为铣刨重铺技术的2.36倍,其初期投入成本较高,不具有经济性优势。

(2)考虑使用寿命的影响时,灌入式复合路面的能耗情况能够相对容易地取得优势,只要灌入式复合路面的使用寿命比铣刨重铺长一年以上就能起到节能作用,其碳排放则需要在使用寿命是铣刨重铺的1.58倍以上时才可以取得较为明显的优势。

(3)对于经济效益,仅当两者使用寿命相差悬殊时,如灌入式复合路面服役14年,铣刨重铺仅服役5年,灌入式复合路面才能取得一定的经济优势。因此,灌入式复合路面更适用于交通流量、轴载高的路面交叉口路段,其经济效益只有在充分发挥其耐久性特点的情况下才可以得到较好的彰显。

需要指出的是,本研究通过生命周期分析,对灌入式复合路面和传统的铣刨重铺技术的环境效益和经济效益进行了评估,旨在为城市道路交叉路口的路面养护决策提供指导,并为灌入式复合路面施工工艺的改进提供可能的参考。

参考文献:

- [1] 刘圣保. 城市道路交叉路口沥青路面车辙原因分析及预防措施[J]. 工程与建设,2010,24(1):16-18.
- [2] 卢新兵. 灌入式复合路面在平交路口抗车辙中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,16(2):141-142.
- [3] 王鹏,李华. 灌入式复合路面在交叉口路段养护工程中的应用[J]. 交通世界(建养机械),2015,(11)34-35,55.
- [4] 徐业庄. 灌入式复合路面应用技术研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [5] BHARATH G, SHUKLA M, NAGABUSHANA M, et al. Laboratory and field evaluation of cement grouted bituminous mixes[J]. Road Materials and Pavement Design,2020,21(6):1694-1712.
- [6] KARAMI M. Application of the cementitious grouts on stability and durability of semi flexible bituminous mixtures[C]//AIP Conference Proceedings.2017:020012.
- [7] 黎侃. 半柔性材料作为沥青路面抗车辙功能层的适用性研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [8] 徐寅善. 半柔性复合材料性能强化机制及关键技术研

- 究[D]. 西安:长安大学,2022.
- [9] ISO. ISO International Standard 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework [S]. International Organization for Standardization Geneva, Switzerland:2006.
- [10] ISO. ISO International Standard 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines [S]. International Organization for Standardization Geneva, Switzerland:2006.
- [11] HARVEY J, MEIJER J, OZER H, et al. Pavement life cycle assessment framework [R]: United States. Federal Highway Administration, 2016.
- [12] EUROBITUME. Life Cycle Inventory: Bitumen [R]. Brussels: European Bitumen Association, 2011.
- [13] MA F, DONG W, FU Z, et al. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance: A case study in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125595.
- [14] MARCEAU M, NISBET M A, VAN GEEM M G. Life cycle inventory of portland cement manufacture [R]: Portland Cement Association Skokie, IL, USA, 2006.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程预算定额 JTG/T 3832-2018 [S/OL] 2018. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202103/t20210331_3547339.html.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程机械台班费用定额 JTG/T 3833-2018 [S/OL] 2018. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202103/t20210331_3547339.html.
- [17] 黄梦雨. 基于LCA-LCCA的高速公路沥青路面绿色养护效益评估研究[D]. 南京:东南大学, 2022.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南[Z] 2011. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>.
- [19] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2020) [M]. 北京:中国统计出版社, 2021.

(责任编辑:周晓芬)

(上接第67页)

- and multi attribute decision making for influence maximization [J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 120: 234-250.
- [2] ZHANG Y, BAI Y, CHEN L, et al. Influence maximization in messenger-based social networks [C]//2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2016.
- [3] CENTOLA D. The spread of behavior in an online social network experiment [J]. Science, 2010, 329 (5996): 1194-1197.
- [4] ZHAO X, LIU F, WANG J, et al. Evaluating influential nodes in social networks by local centrality with a coefficient [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(2): 35.
- [5] LI X, CHENG X, SU S, et al. Community-based seeds selection algorithm for location aware influence maximization [J]. Neurocomputing, 2018, 275: 1601-1613.
- [6] XU G Q, MENG L, TU D Q, et al. LCH: A local clustering H-index centrality measure for identifying and ranking influential nodes in complex networks [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(8): 088901.
- [7] KITSACK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identifying influential spreaders in complex networks [J]. Nature Physics, 2010, 6(11): 888-893.
- [8] ZENG A, ZHANG C J. Ranking spreaders by decomposing complex networks [J]. Physics Letters A, 2013, 377(14): 1031-1035.
- [9] BAE J, KIM S. Identifying and ranking influential spreaders in complex networks by neighborhood coreness [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 395: 549-559.
- [10] ZAREIE A, SHEIKHAHMADI A. A hierarchical approach for influential node ranking in complex social networks [J]. Expert Systems with Applications, 2018, 93: 200-211.
- [11] LI J, CAI T, DENG K, et al. Community-diversified influence maximization in social networks [J]. Information Systems, 2020, 92: 101522.
- [12] CHEN Y C, ZHU W Y, PENG W C, et al. CIM: community-based influence maximization in social networks [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2014, 5(2): 1-31.
- [13] ZHAO Z. Identification of vital nodes in the fake news propagation [J]. EPL (Europhysics Letters), 2020, 131(1): 16001.
- [14] SHANG J X, ZHOU S B, LI X, et al. CoFIM: A community-based framework for influence maximization on large-scale networks [J]. Knowledge-Based Systems, 2017(117): 88-100.
- [15] CHEN Y C, PENG W C, LEE S Y. Efficient algorithms for influence maximization in social networks [J]. Knowledge and Information Systems, 2012, 33 (3): 577-601.
- [16] 王笑颜, 陈伯伦, 许雪, 等. 基于GN-PR的重要节点挖掘算法研究 [J]. 淮阴工学院报, 2023, 32(5): 43-49.
- [17] QIU L, ZHANG J, TIAN X. Ranking influential nodes in complex networks based on local and global structures [J]. Applied Intelligence, 2021, 51: 4394-4407.
- [18] 王安, 顾益军. 基于社区划分的节点重要性评估方法 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(8): 42-48.

(责任编辑:王萍)