

# 道路基础设施建设中的节能减排问题及技术综述

张金喜, 苏词, 王超, 荆鹏, 侯越  
(北京工业大学交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 道路设施是庞大的基础设施之一,其体量庞大、分布广泛,在国民经济建设和人民日常生活中发挥重要作用. 在道路基础设施的建设、运营、修复和拆除过程中,不仅需要大量新的建筑材料,也会产生大量的废旧材料. 在此过程中,需要大量的能源用于建筑材料的生产、运输及施工中各种施工设备的运行,同时会产生大量的 CO<sub>2</sub> 和其他有害气体. 因此,在道路基础设施领域开展节能减排技术的研究和应用对于实现“双碳”目标具有重要意义. 首先,对我国道路基础设施建设中存在的碳排放问题进行了介绍;其次,对目前国内外较为成熟的道路基础设施建设的节能减排技术特征及其应用情况进行了介绍;最后,对道路基础设施领域今后的节能减排技术发展方向和趋势进行了分析. 分析结果表明,道路基础设施建设和运营管理中的新技术在节能减排中可发挥重要作用,应在今后强化创新性技术的研发和成熟技术的推广应用工作.

**关键词:** 道路; 基础设施; 碳排放; 碳达峰; 碳中和; 节能减排

中图分类号: U 416; X 322

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2022)03 - 0243 - 18

doi: 10.11936/bjutxb2021100002

## Review of Energy-saving and Emission-reduction Issues and Technologies in the Construction of Road Infrastructure

ZHANG Jinxi, SU Ci, WANG Chao, JING Peng, HOU Yue

(Beijing Key Laboratory of Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Road facilities are one of the huge infrastructures, which are huge in size and wide in distribution, and play an important role in the national economic development and the daily lives of the people. In the process of construction, operation, maintenance and demolition of road infrastructure, not only are a large number of new building materials needed, but also a lot of waste materials are produced. In this process, a large amount of energy is needed for the production and transportation of building materials and the operation of various construction equipment during construction. At the same time, a large amount of CO<sub>2</sub> and other harmful gases are generated. Therefore, the research and application of energy-saving and emission-reduction technologies in the field of road infrastructure are of great significance for achieving the dual carbon target. First, the carbon emission problems existing in China's road infrastructure construction were introduced. Second, the characteristics and application of energy-saving and emission-reduction technologies of more mature road infrastructure construction at domestic and overseas were introduced. Third, the development direction and trend of future energy saving and emission reduction technologies were analyzed. The analysis shows that new technologies in road infrastructure construction and operation management can play an important role in energy conservation

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600302)

作者简介: 张金喜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事道路工程材料、道路路面性能和维修管理、道路工程再生资源利用、道路结构物耐久性方面的研究, E-mail: zhangjinxi@bjut.edu.cn

and emission reduction. The research and development of innovative technologies and the promotion and application of mature technologies should be strengthened in the future.

**Key words:** road; infrastructure; carbon emission; carbon peak; carbon neutral; energy-saving and emission-reduction

在全球气候变暖的严峻背景下,低碳经济已成为当今社会可持续发展的重要趋势.控制和减少CO<sub>2</sub>排放是每个国家都需要面对的重大问题.近年来,我国对环境保护也愈加重视,在第75届联合国大会上提出了CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和的“双碳”目标,并于2021年将“双碳”目标写进《政府工作报告》和“十四五”规划<sup>[1]</sup>,强调了“双碳”的意义和重要性.

我国是世界上CO<sub>2</sub>排放量最大的国家<sup>[2]</sup>,碳排放集中在工业、交通和建筑三大重点领域,其中交通运输是国民经济中基础性、先导性、战略性产业和重要的服务性行业,交通领域的CO<sub>2</sub>排放量约占全国碳排放总量的10%,是社会碳控排的重点领域之一<sup>[3]</sup>.《国家综合立体交通网规划纲要》中明确指出,要加快推进绿色低碳发展,交通领域CO<sub>2</sub>排放尽早达峰<sup>[4]</sup>.由于交通运输行业的巨大需求,近10年来交通运输的碳排放量仍在不断增长.面对我国的“双碳”目标,在工业、建筑等领域减排逐步取得成效的背景下,交通运输行业面临的减排压力更为巨大.

道路基础设施是交通运输领域的重要组成部分,是社会发展不可缺少的物质条件.一方面道路基础设施占用了大量的土地资源,另一方面在其建设、养护和运营的过程中伴随着大量建筑材料和能源的消耗,产生了大量的碳排放,对环境产生了巨大的破坏作用<sup>[5-6]</sup>.目前,我国交通运输行业仍处于道路基础设施的快速发展时期,如何处理好道路基础设施快速发展与严格控制甚至减少碳排放量要求之间的关系,是交通发展面临的一个关键问题.为解决该问题,应在道路基础设施领域开展节能减排技术的研究和应用,减少碳排放,实现低碳交通与道路基础设施的和谐发展,从而进一步推动“双碳”目标的实现.

本文从我国道路基础设施建设和养护中存在的碳排放问题出发,对道路基础设施领域的节能减排技术及应用进行了综述,并对该领域节能减排技术的发展趋势进行了分析与展望,为今后道路基础设

施中节能减排技术的研究提供参考.

## 1 道路基础设施领域的节能减排现状

### 1.1 我国道路交通基础设施发展现状和成就

经过30多年的快速建设,我国的道路交通基础设施建设取得了举世瞩目的成就.根据我国交通运输部的统计<sup>[7]</sup>,截至2020年底,全国公路总里程达519.81万km(其中国家高速公路16.1万km),公路密度达54.15 km/(100 km<sup>2</sup>),公路养护里程514.4万km,占公路总里程99%,全年完成道路基础设施建设投资2.4万亿元.2016—2020年全国公路总里程及公路密度变化如图1所示.规模庞大的公路和城市道路网络,不仅为广大居民提供了方便、快捷、安全、舒适的出行条件,同时也为我国社会和经济的快速发展提供了有效的保障.

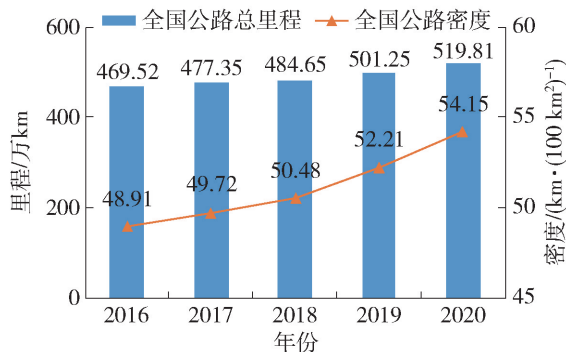


图1 2016—2020年全国公路总里程及公路密度

Fig. 1 Total mileage and density of highways nationwide (2016—2020)

道路设施以其重要性和庞大的体量,在成为基础设施建设的重要组成部分之一的同时也消耗了大量的资源.一方面,道路基础设施占用了大量的土地资源,土地资源是城市建设和发展的最基本的资源,是不可再生的宝贵资源.另一方面,道路设施的建设 and 养护需要大量的道路建设材料,包括石油沥青、水泥和石灰等,例如:2020年我国石油沥青的表观需求量为8348.5万t,同比增长50.1%,水泥生产量24亿t,约占世界总产量的60%<sup>[8-9]</sup>.大量高能源、高碳密度原材料的使用造成了资源的逐

渐枯竭和高污染现象的发生,对生态环境造成了巨大的破坏.

### 1.2 道路基础设施建设和运营过程中的碳排放

目前,交通运输行业是能源消耗和温室气体排放的主要行业之一,其中道路交通是交通领域的主要碳排放来源,1990—2008年,全球道路交通的CO<sub>2</sub>排放量增加了47.5%,我国增长了410.3%.全球道路交通CO<sub>2</sub>排放量占交通领域CO<sub>2</sub>排放量的比例保持在70%以上,我国的占比约为80%<sup>[10]</sup>.道路交通行业的碳排放为交通运输工具和道路基础设施在运行过程中产生的CO<sub>2</sub>排放,其中道路基础设施建设和运营生命周期的CO<sub>2</sub>排放达到了道路交通碳排放总量的10%~20%<sup>[2]</sup>,并且目前我国的道路交通基础设施处在战略机遇期,到2035年国家公路网和普通国道网规模将达到约46万km,仍处于快速发展阶段<sup>[2]</sup>.

#### 1.2.1 材料生产阶段的碳排放

道路基础设施的建设需要大量的建筑材料,水泥、沥青、集料等在生产的过程中要耗用大量的能

源,也是道路交通碳排放的主要来源.我国2020年生产水泥的CO<sub>2</sub>排放量约为24亿t,是工业中主要的CO<sub>2</sub>排放源.据不完全统计,我国每年道路新建和大修改造需要半刚性基层材料104亿t,其中需要水泥约5亿t,产生碳排放量约为4.5亿t<sup>[11]</sup>.同样,生产沥青混凝土、道路基层材料等也产生大量的碳排放.表1为某沥青混凝土拌和厂气体排放检测结果<sup>[12]</sup>.

表1 某沥青混凝土拌和厂气体排放检测结果<sup>[12]</sup>

测试项目	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	烟尘
热拌沥青混凝土	2.6	146	13.3 × 10 <sup>4</sup>	49.7

以一条双向四车道的高速公路为例,对不同路面结构的材料物化能耗进行分析<sup>[13]</sup>.表2为该高速公路的5种路面结构,其中,沥青路面结构1和结构2为半刚性基层沥青路面,结构3为全厚式沥青路面.

表2 路面结构<sup>[13]</sup>

Table 2 Pavement structure<sup>[13]</sup>

沥青路面			水泥路面	
结构1	结构2	结构3	结构1	结构2
4 cmSMA	4 cmSMA	4.0 cmSMA	26 cm 水泥混凝土	28 cm 水泥混凝土
6 cmAC20	6 cmAC20	7.5 cmAC20	20 cmCTB	20 cmCTB
8 cmAC25	8 cmAC25	9.0 cmAC25	20 cmCTB	20 cmCTB
20 cmCTB	8 cmLSM25	9.0 cmAC25	20 cmGAB	20 cmGAB
20 cmCTB	20 cmCTB	7.5 cmAC13F		
20 cmCTB	20 cmCTB			

通过对该高速公路1 km半幅路面所消耗的能量进行计算,可得到5种路面结构原材料物化能耗.

5种路面结构原材料物化能耗如表3所示,不同原材料的贡献比例如图2所示.

表3 材料物化能耗<sup>[13]</sup>

Table 3 Embodied energy of materials<sup>[13]</sup>

材料	沥青路面			水泥路面		MJ
	结构1	结构2	结构3	结构1	结构2	
沥青	1 409 471	1 936 454	2 869 766			
水泥	4 028 945	2 680 570		8 421 414	8 900 025	
集料	1 131 322	955 083	530 734	1 192 543	1 223 985	
乳化沥青	60 534.05	81 888.49	81 048.72			
钢材				1 069 364	1 189 313	
总计	6 630 272	5 653 996	3 481 549	10 683 321	11 313 324	

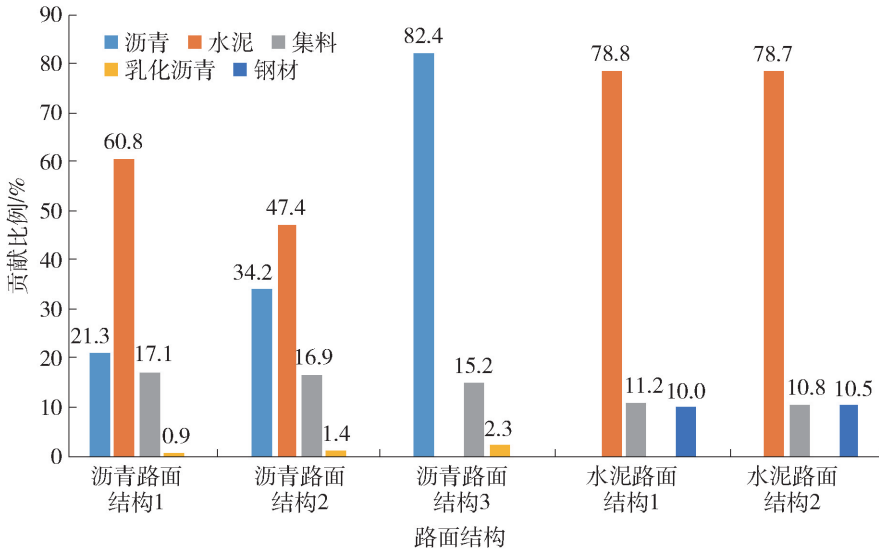


图2 不同原材料的材料物化能耗贡献比例

Fig. 2 Embodied energy contribution ratio of different raw materials

由表3可知,水泥路面2种结构的材料物化能耗均高于沥青路面,沥青路面结构3的材料物化能耗最低且能耗最高的水泥路面结构2的材料物化能耗为沥青路面结构3的3.2倍。从图2中可以看出,半刚性基层沥青路面的材料物化能耗中水泥占比最高,其次是沥青,再者是集料。全厚式沥青路面的材料物化能耗中沥青占比最高。水泥路面的材料物化能耗中贡献比例最高的为水泥,约为80%。

通过对5种不同路面结构的材料物化能耗进行分析可以看出,沥青路面结构和水泥路面结构的材料物化能耗中,集料均占一定的比例,为10%~17%。除全厚式沥青路面之外,半刚性基层沥青路面和水泥路面中水泥的能耗都是最高的,做好水泥

行业的节能减排工作,对实现“双碳”目标具有重要的意义。

### 1.2.2 施工和养护阶段的碳排放

道路基础设施建设中不仅在生产建筑材料时会产生大量的碳排放,道路工程的施工和养护也是碳排放的来源。在施工和养护阶段,建设道路路面的各种混合料的拌和、摊铺、碾压等过程以及机械设备运输等作业过程消耗大量的能源,从而产生CO<sub>2</sub>排放。

本文以日本某实验路40年使用期内每1km的CO<sub>2</sub>排放量为例对道路基础设施施工和养护中的碳排放进行分析。该实验路分为二车道和四车道2种道路结构(如图3所示),路面类型分为沥青路面、水泥混凝土路面、混合式路面3种。

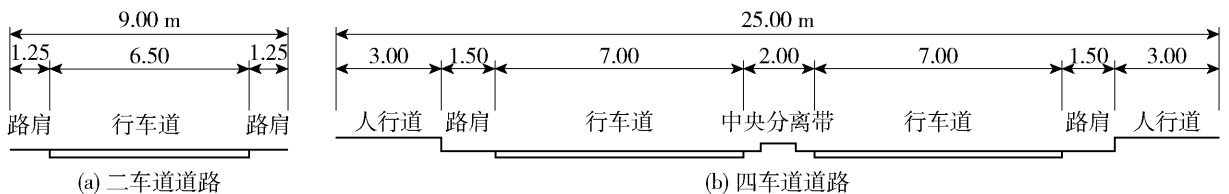


图3 道路横断面

Fig. 3 Road cross-section

通过对道路基础设施建设、运营养护和拆除各阶段的CO<sub>2</sub>排放量进行计算,可得到不同车道、不同路面种类在建设、养护和拆除三阶段的CO<sub>2</sub>排放量,如表4所示。

由表4可知,无论哪种路面种类,四车道道路结构的碳排放量都比二车道多,约为二车道碳排放量的2.5倍。沥青路面在养护阶段的碳排放量占比较

多,达到74.3%;混合路面则在建设阶段的碳排放量较多,水泥混凝土路面在建设和养护阶段的碳排放量几乎相同。另外,在拆除阶段3种路面种类的碳排放量较为接近,占比也较少,为5%~8%。总体来说,3种路面种类中沥青路面和水泥混凝土路面的施工和养护碳排放总量接近,混合路面则碳排放较少,约为前两者的70%。由此可见,路面的材料和

结构不同,则路面建设施工和养护的方法也存在差别,那么路面施工和养护所产生的能耗与排放也不

同.因此,合理选择路面种类和结构,可减少道路基础设施施工和养护的CO<sub>2</sub>排放量.

表4 各路面各阶段CO<sub>2</sub>排放量

Table 4 CO<sub>2</sub> emissions at each stage of each road surface

车道数	路面种类	建设阶段		养护阶段(含翻新)		拆除阶段		合计	
		排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%
4	沥青	324.73	19.9	1 210.65	74.3	93.24	5.7	1 628.62	105.0
	混凝土	720.06	46.4	742.86	47.9	87.83	5.7	1 550.75	100.0
	混合式	759.94	66.5	281.40	25.6	87.83	8.0	1 129.17	72.8
2	沥青	157.86	25.5	432.58	69.8	29.43	4.7	619.87	94.6
	混凝土	308.59	47.1	315.97	48.2	30.79	4.7	655.35	100.0
	混合式	334.60	69.6	115.15	24.0	30.79	6.4	480.51	73.3

注:目前对于道路基础设施领域碳排放的计算,不同研究者的计算方法和边界可能不同,但大部分是基于材料物化阶段至使用寿命范围内进行计算.本文的数据也主要在该范围内计算.

### 1.3 道路交通基础设施领域实现“双碳”目标的途径

由以上分析可以看出,道路基础设施建设、运营、养护中产生大量的碳排放,是进行节能、减碳的重要领域,而在道路基础设施的建设中,不同的建设材料、建设方案、养护措施等均对碳排放产生影响.因此,通过在道路基础设施建设阶段和运营阶段进行科学的规划、采取先进的技术等,可以为我国实现“双碳”目标做出应有的贡献.目前,以下几种途径是实现道路交通基础设施领域“双碳”目标的重点方向.

#### 1.3.1 建设阶段

1) 开发使用节能、绿色的道路建设新材料,例如温拌沥青、常温拌和沥青混凝土等技术.

2) 充分使用再生性好、可循环利用的废旧材料,例如再生水泥混凝土、新型碱激发材料等,减少对自然界的过度开发,从源头实现节能减排.

3) 采用节能环保的替代材料,例如生物沥青、再生集料等,减少对天然材料的依赖.

4) 优化道路设施建设方案,采用寿命周期内碳排放少的设计方案.

#### 1.3.2 运营阶段

1) 推广使用绿色节能交通工具.

2) 优化道路交通基础设施的养护维修、运营管理方式.

3) 对道路设施中产生的可再生能源进行收集和利用.

4) 总体提高道路设施耐久性能,延长道路设施

使用寿命,实现道路基础设施建设总体排放的降低.

## 2 道路基础设施领域的节能减排技术

### 2.1 绿色环保节能降碳的沥青路面建设技术

#### 2.1.1 温拌沥青技术

温拌沥青技术是一种使用特殊添加剂或者制备工艺,通过降低沥青混合料的施工拌和与压实温度以实现节能减排的绿色沥青铺装技术,该技术的开发满足了路面绿色可持续发展的战略需要.根据降温作用机理的差异,温拌沥青技术主要划分为三大技术体系,即表面活性温拌技术、沥青降黏温拌技术和沥青发泡温拌技术<sup>[14]</sup>.相关案例研究表明,温拌沥青混合料与热拌沥青混合料相比,能源利用可节约30%以上,温室气体及烟尘排放量也可分别减少20%和40%以上<sup>[15]</sup>.20世纪90年代,温拌沥青技术由欧洲研究机构联合开发,次年完成了现场试验路段的铺设,但技术成本较高<sup>[16]</sup>.2005年,温拌沥青技术首次在国内北京市的国道建设养护中得到应用,之后陆续在上海等国内其他地区和城市的公路与城市道路建设中得到技术推广,并在2009年长安街沥青路面大修工程中得到进一步优化使用.近年来,国内陆续研究制定了关于不同种类温拌沥青技术的技术指导文件和工程应用指南,有效促进了该项技术在低碳减排沥青路面建设养护中的大范围推广,北京市交通委员会也曾制定全面推广温拌沥青技术的计划,旨在未来所有沥青路面工程中普遍采用温拌沥青技术,力争率先成为温拌沥青技术使用

率达到 100% 的城市<sup>[17]</sup>。纵观截至目前国内外温拌沥青技术的发展,虽然已在诸多实体工程中得到了广泛的应用和推广,但作为一项节能减排的路面新技术仍有很多方面需要完善。首先,目前各国研究开发的温拌沥青技术产品大多成本高昂,一些温拌剂在其制备过程中也伴随着大量的能源和资源消耗,需进一步开发新型高性能、低成本的温拌沥青技术方案;其次,目前尚缺乏针对温拌沥青新材料的材料设计方法、性能评价方法及针对性的技术要求等,大多是参照普通沥青混合料的材料设计和评价技术体系;此外,对于温拌沥青路面生命周期的节能环保综合效益评估较少,未来需结合环保实效与服役耐久性两方面开展深入研究,深化和推动温拌沥青技术的新发展。

### 2.1.2 橡胶沥青技术

汽车轮胎报废后的废旧橡胶是一种极难天然降解的高分子弹性材料,但其具有出色的弹性与黏性性质,因而,将废旧轮胎加工而成的橡胶粉应用于道路沥青改性技术,一方面减少了废轮胎填埋或焚烧所造成的环境污染,同时降低了改性沥青的生产成本,另一方面也提升了沥青路面的路用性能和服役寿命。谭忆秋等<sup>[18]</sup>研究和证明了橡胶沥青具有更好的低温变形和应力松弛能力。肖飞鹏等<sup>[19]</sup>详细综述和比较了胶粉改性沥青路面在平整度和抗滑性能等方面的独特技术优势,并着重强调了橡胶沥青路面在降噪方面未来的应用前景。近年来橡胶沥青技术已在北京长安街大修工程、雄安新区公路网建设等诸多重点建设工程项目中得到了较多的推广和应用。

虽然橡胶沥青技术已经实现了固体废物利用、节约原材料及延长路面服役寿命等绿色高性能的功能目标,但胶粉改性沥青材料的生产制备往往需要高于普通沥青的拌和与摊铺温度,从而增加了工程施工建设期的沥青烟气排放及能源资源投入。张永利<sup>[20]</sup>基于沥青路面全寿命周期方法对橡胶改性沥青混合料和普通苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrenic block copolymers, SBS)改性沥青混合料的原材料生产、改性沥青加工和混合料拌和 3 个阶段的能耗和碳排放进行了测算,发现橡胶沥青混合料生产的能耗相对于 SBS 改性沥青混合料降低了约 15%,但其碳排放提高了约 8%,考虑到可以实现废旧轮胎的再利用,因此,认为橡胶沥青混合料的环境效益优于普通热拌沥青混合料。

近年来,有研究人员开始尝试将橡胶沥青与温拌沥青技术相结合,从而更好地实现环境友好型路

面新材料的设计理念。温拌橡胶沥青技术融合了废胶粉和降黏减阻温拌剂 2 种改性沥青的优点,同时温拌剂的掺入可以明显改善沥青混合料的施工和易性。在温拌橡胶沥青材料的路用性能方面,Oliveira 等<sup>[21]</sup>研究发现某些化学温拌剂对于橡胶沥青混合料的拌和温度降温效果可达到 30 ℃,同时对力学性能的影响可以忽略;Xin 等<sup>[22]</sup>通过试验证明了泡沫橡胶沥青虽然高温性能略差,但其低温性能及抗疲劳性能优于普通橡胶沥青;Wang 等<sup>[23]</sup>研究了多种温拌剂对橡胶沥青流变性能的影响,发现温拌剂对橡胶沥青的降黏效果显著,同时可以改善其存储稳定性。此外,针对温拌橡胶沥青的环境效益,Yang 等<sup>[24]</sup>的研究表明温拌降黏剂可显著降低橡胶沥青材料生产过程中有害物质的排放;Jones 等<sup>[25]</sup>发现温拌沥青技术虽然会使得前期成本投入增加,但可以极大地减少橡胶沥青生产和施工过程中的烟雾和气味,环保效益明显提高;Wang 等<sup>[26]</sup>通过分析目前的橡胶沥青技术研究现状,认为温拌橡胶沥青是一种有望在近期得到快速推广应用的新型环保型沥青铺面材料。

### 2.1.3 生物沥青技术

在目前各种绿色可再生能源中,生物质能源具有可再生、种类多、储量大的特点,因此,近年来也逐步受到国内外道路工程技术领域的广泛关注。生物质作为一种新型绿色的环保材料,其来源和分布非常广泛,诸如植物秸秆、木材树皮、餐饮废油(地沟油)及家畜粪便等,经裂解后的生物质重油与石油沥青具备相近的微观化学特性和相容性<sup>[27]</sup>。因此,为了降低沥青路面建养对不可再生石油资源的依赖和消耗,近 10 年来国内外诸多研究人员广泛开展了生物沥青新材料的开发和研究工作。目前,大多数生物沥青研究将不同生物质来源的生物质重油按照一定比例替代普通石油沥青用于沥青路面材料制备且已针对生物沥青的制备方法、改性机理及路用技术性能开展了大量对比研究,发现不同种类生物沥青材料的路用性能存在明显差异化的技术优势或缺点,需针对性地进行材料设计和性能优化,同时可尝试将生物沥青技术与改性沥青、温拌沥青及再生沥青等新技术融合应用于低碳绿色道路工程建设养护技术领域。

在生物沥青环境效益评价方面,目前已开展的研究工作则相对较少。Hosseinnezhad 等<sup>[28]</sup>采用生命周期评价研究方法,对比了 10% 家畜粪便生物油改性沥青与传统石油沥青的环境效益差异,发现生

物沥青在温室气体排放和能耗两方面都更具有优势;Wang等<sup>[29]</sup>对比了2种不同类型的生物沥青路面新技术,其中还包含了再生沥青路面材料的使用,发现2种生物沥青新材料的应用均能有效减少路面施工建设期对施工人员健康的影响。此外,生物沥青在降低沥青路面施工温度方面的潜力同样开始得到关注,Podolsky等<sup>[30]</sup>发现掺加质量分数为1%的大豆油即可有效降低2~3℃的沥青路面施工拌和温度,同时保证了其低温抗裂性能;Fini等<sup>[31]</sup>发现添加生物沥青改性剂可以显著改善沥青的低温性能且使沥青在相对较低温度下进行拌和压实,从而降低了沥青路面的建设和能耗成本。

#### 2.1.4 再生沥青技术

近30年来,随着我国公路网建设的快速发展,道路基础设施建养先后经历了“以建为主”到“建养并重”再到未来“以养为主”的新发展阶段,早期修筑的沥青路面工程未来面临着繁重的养护工作需求,因此,如何科学有效地回收再利用废旧沥青路面(reclaimed asphalt pavement, RAP)材料已成为路面工程技术领域的前沿研究问题,而沥青再生技术的发展同时也是低碳绿色路面技术体系的重要组成部分<sup>[32]</sup>。但是,目前围绕再生沥青技术的瓶颈技术问题依然较多,例如,为保证再生沥青路面的技术性能,RAP材料的掺量目前普遍仍相对较低(通常低于25%),从而再生循环利用的环境效益并不明显。同时诸多研究表明,掺加RAP材料的再生沥青混合料,其路用性能受到的负面影响相对较多,例如:Zhu等<sup>[33]</sup>发现随着RAP材料掺量的增加,再生沥青混合料的抗疲劳性能和低温性能逐渐降低;West等<sup>[34]</sup>对比了再生沥青混合料与普通热拌沥青混合料的抗断裂性能,发现高RAP材料掺量的再生沥青混合料更容易发生断裂破坏。但同时有报道认为RAP材料的掺入可以提高沥青混合料的抗剥落性能及抵抗塑性变形的能力,例如:Kumari等<sup>[35]</sup>指出掺入RAP材料会使水较难渗透进集料中,因此,高RAP材料掺量的再生沥青混合料水稳定性相对较好;Aurangzeb等<sup>[36]</sup>研究了RAP材料掺量高达50%的再生沥青路面,发现其水稳定性可以满足路面建设的工程技术要求。

除了再生沥青的技术性能外,近期关于再生沥青路面节能减排等环保效益的研究工作也日益增多。Chowdhury等<sup>[37]</sup>将再生沥青路面的生命周期分为原材料生产、路面施工、路面维护及修复4个阶段,发现原材料生产占据了沥青路面生命周期能耗

与排放的大部分,而当RAP材料掺量增至30%~50%时,每千米沥青路面建设的温室气体减排量可达 $3.8114 \times 10^4 \sim 6.3524 \times 10^4$  kg;Chen等<sup>[38]</sup>采用基于过程的生命周期分析方法对比了热拌沥青混合料和再生沥青混合料路面施工建设期的环境影响,也证明了采用再生沥青技术将产生明显的节能减排环保效果。

再生沥青技术通过对沥青混合料的再生,能够很大程度地回收利用废旧混合料并具有显著的环境效益。但从目前的研究来看,随着RAP材料掺量的增加,沥青混合料的低温抗裂性、抗疲劳性能均出现降低的现象。同时,RAP材料中的水分不利于沥青与再生集料的黏结,对混合料后期的耐久性造成一定影响。如何提高RAP材料的掺量并控制含水率等质量还有待进一步研究。

## 2.2 废弃物在道路基础设施建设中的再生利用技术

废弃物在道路基础设施建设中的再生利用技术是指将不能满足使用要求的路面废料、建筑垃圾、固体废物等通过各种措施进行处理后重新利用的技术。近年来,随着国内外建筑废弃物再生技术的不断研发和创新,绿色环保的再生材料及技术在道路基础设施建设中得到了长足的发展和较为广泛的应用,常见的如再生水泥混凝土、建筑垃圾再生利用技术以及新型碱激发胶凝材料等。

### 2.2.1 再生水泥混凝土

水泥混凝土由于其抗压强度高、价格低廉、养护费用低等优点已成为世界上最广泛使用的建筑材料,自20世纪90年代以来一直占据着建筑材料市场<sup>[39]</sup>。在过去20年里,世界水泥产量从11.0亿t增加到32.7亿t。随着交通及土木设施建设的增加,预计水泥产量将在2030年达到48.3亿t<sup>[40]</sup>。生产水泥混凝土不仅需要水泥,还需要大量的细骨料和粗骨料,骨料约占水泥混凝土体积的70%且粗骨料占该体积的大部分<sup>[41]</sup>。水泥混凝土在被广泛使用的同时,也对环境造成了负面影响。一方面,水泥混凝土产生了大量的CO<sub>2</sub>,据统计其碳排放量约占全球CO<sub>2</sub>排放总量的8%<sup>[42]</sup>。另一方面,在大量新水泥混凝土生产的同时,相应产生的废旧水泥混凝土数量也相当巨大,我国每年产生的废旧水泥混凝土占建筑垃圾的50%~60%,露天堆放或填埋的处理方式也对环境造成了严重的污染<sup>[43]</sup>。

废旧水泥混凝土具有一定的强度、硬度、耐磨、抗冲击、抗冻、耐水等优良特性且稳定性好、易加工,具有较强的路用性能。将废旧水泥混凝土破碎、筛

分、分级后按照一定比例和级配混合而成的骨料称为再生水泥混凝土骨料,而在新混凝土制备过程中掺拌了再生骨料的混凝土,称为再生骨料水泥混凝土,简称再生水泥混凝土<sup>[43]</sup>. 使用再生骨料代替天然骨料生产再生水泥混凝土,可以为环境和经济带来好处. 据估计,使用再生水泥混凝土施工可节省10%~20%的材料成本<sup>[44]</sup>. 此外,再生水泥混凝土可节省大量能源,减少骨料生产排放的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和其他空气污染物. Guo等<sup>[45]</sup>研究表明使用再生骨料代替天然骨料有可能减少15%~20%的 $\text{CO}_2$ 排放量. Hossain等<sup>[46]</sup>进行了再生骨料对环境影响的生命周期评价研究,研究结果发现:生产1 t天然骨料会产生23~33 kg的 $\text{CO}_2$ ,而生产1 t再生细骨料混凝土仅产生12 kg  $\text{CO}_2$ ;与生产天然骨料混凝土相比,使用再生粗骨料混凝土可以减少65%的温室气体排放,并节省58%的不可再生能源消耗.

再生水泥混凝土技术既能减轻水泥混凝土生产及废旧混凝土对环境的污染,又能减少对自然资源和能源的消耗,具有显著的社会、经济和环境效益,对“双碳”目标的实现有推动作用. 但再生水泥混凝土的力学性能通常不如天然骨料制备的水泥混凝土,再生水泥混凝土骨料的物理性质对再生水泥混凝土的性能有显著影响. 例如,再生水泥混凝土骨料较高的吸水率会影响混凝土的和易性,较大的孔隙体积会影响混凝土的耐久性、强度和孔隙率等<sup>[42]</sup>. 因此,须对如何强化再生骨料,提高再生骨料性能,从而优化再生混凝土品质做进一步研究.

### 2.2.2 建筑垃圾再生利用

随着我国城市化进程的加快,不仅对天然资源的消耗日益增加,而且也产生了大量的建筑垃圾. 据保守估计,我国每年产生近亿t的废弃混凝土. 在每万 $\text{m}^2$ 建筑的施工过程中,建筑垃圾就会产生500~600 t,而每万 $\text{m}^2$ 拆除的旧建筑将产生7 000~12 000 t建筑垃圾,目前其数量已经占到了城市垃圾总量的1/3左右<sup>[6]</sup>. 建筑垃圾是指各类建筑物、构筑物进行建设、改扩建、拆迁等过程中产生的含有废旧混凝土、砂浆、砖瓦碎屑、渣土和其他废弃物的混合型垃圾. 上海地区某年的建筑垃圾主要组成如图4所示.

建筑垃圾具有数量大、组成成分种类多、性质复杂、污染环境途径多、污染形式复杂等特点<sup>[47]</sup>,而建筑垃圾传统的处理方式大多是统一收集后进行露天堆放或填埋,这一方式不仅占用土地资源,更会造成污染水体、大气和土壤,影响市容和环境卫生,遗留

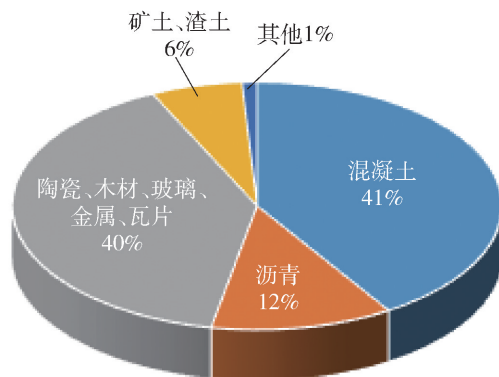


图4 上海地区建筑垃圾主要组成<sup>[6]</sup>

Fig. 4 Main components of construction waste in Shanghai<sup>[6]</sup>

安全隐患等危害,对我国的经济建设和环境造成严重影响<sup>[48]</sup>. 建筑垃圾的妥善处理 and 再生利用,已成为城市发展需要解决的当务之急. 目前,对建筑垃圾再生利用的主要途径是把建筑垃圾分拣、破碎和筛分之后,生产建筑垃圾再生骨料,然后以不同比例替代天然砂石材料来生产水泥混凝土、水泥砂浆、级配碎石、再生砖等. 张金喜课题组联合有关单位开展了建筑垃圾作为道路工程材料再生利用、废旧沥青混凝土和水泥混凝土再生利用的研究,修建了众多实验路和实体工程(如表5所示),有效解决了自然资源的匮乏问题,同时还解决了建筑垃圾的100%再生利用问题,并开发了具有造价低,回填速度快,施工方法简便易行,利用建筑垃圾材料,能够大面积推广应用的环保、低碳的新型流动化回填材料.

由此可见,建筑垃圾中的许多废弃物经过分拣、剔除或粉碎等处理后,大多可作为再生资源重新利用. 综合利用建筑垃圾是节约资源、保护生态的有效途径. 然而,我国的建筑垃圾再生利用中存在再生利用率低等问题,特别是对于城市建筑垃圾,杂质含量高、红砖含量大,只有部分高品质的废旧混凝土可以生产再生粗骨料并在水泥混凝土中得到再生利用,而大部分低品质的细骨料没有合适的消纳途径,成为二次建筑垃圾,从而影响了城市建筑垃圾的综合再生利用.

### 2.2.3 新型碱激发胶凝材料应用

普通硅酸盐水泥长期以来被建筑行业作为胶凝材料广泛应用,但在当今节能减排的背景下,水泥生产的高耗能、高污染缺点日益凸显,迫切需要一种低污染、低能耗且高性能的胶凝材料来替代水泥以满足数十亿人的住房和基础设施的需求<sup>[49]</sup>. 新型碱激发胶凝材料是指利用碱激发剂激发粉煤灰、矿渣



等工业固体废物的有效活性成分,从而减少水泥用量的一种绿色环保型的胶凝材料<sup>[50]</sup>。

表5 建筑垃圾再生在实验路和实体工程中的应用

Table 5 Application of construction waste recycling in experimental roads and projects

序号	重点样板工程	应用形式	应用部位	骨料类别	应用时间
1	门头沟信翔批发市场	水稳无机料	基层	混凝土类	2015-08
2	里坨自来水厂	二灰无机料	基层、底基层	混凝土类	2015-10
3	草桥回迁房小区	二灰无机料	基层	砖混类	2015-10
4	长安街西延工程	水稳无机料	基层、底基层	混凝土类	2016-05
5	北京冬奥广场周边道路	二灰无机料	基层、底基层	混凝土类	2016-06
6	晾水池东路道路工程	水稳无机料	基层、底基层	混凝土类	2016-09
7	丰台大修工程	水稳无机料	基层、底基层	混凝土类	2016-11
8	房山区顾八路大修工程	二灰无机料	基层、底基层	混凝土类、砖混类	2017-06

碱激发胶凝材料的概念自20世纪初就已为人所知,随着近年来CO<sub>2</sub>潜在交易市场及CO<sub>2</sub>减排法规的出台,碱激发胶凝材料受到了更多的关注。Duxson等<sup>[51]</sup>计算了碱激发粉煤灰和偏高岭土掺合料的CO<sub>2</sub>排放量,通过计算发现,与硅酸盐水泥相比,碱激发胶凝材料的CO<sub>2</sub>排放量减少了80%。部分学者对碱激发胶凝材料的生命周期进行了分析,并估算了相较于硅酸盐水泥的CO<sub>2</sub>减排量,由于不同研究的配合比设计和胶凝材料类型不同,得到的结果也各不相同,CO<sub>2</sub>减排量介于80%~30%<sup>[52-56]</sup>。由此可见,碱激发胶凝体系可以直接实现大量CO<sub>2</sub>减排,而对于硅酸盐水泥采取最好的技术手段也仅可以减少来自水泥生产释放的约17%的CO<sub>2</sub>排放量<sup>[57]</sup>。另一方面,工业的迅速发展和制造业的飞速增长使我国每年都产生巨大的工业固体废物,也为碱激发技术的发展提供了机遇。2019年大宗工业固体废物的发生量及综合利用情况如表6所示。

碱激发胶凝材料具有CO<sub>2</sub>排放量低、耐腐蚀、热稳定、快硬高强、抗冻融、抗渗等优异性能,是替代纯硅酸盐水泥胶凝材料的一个不错的选择,但基于多样性和复杂性,碱激发胶凝材料的研究仍面临一些问题。首先,尽管大量的固体废物为碱激发材料的制备提供了基础,但目前尚未形成适合固体废物的处置方法、活性度检测和工业化生产工艺。其次,与硅酸盐水泥价格相比,碱激发胶凝材料的生产成本较高。2009年,硅酸盐水泥的平均价格为300~350元/t,而碱激发高炉矿渣的价格为500元/t<sup>[59]</sup>。虽然粉煤灰、偏高岭土等一些其他的固体废物作为碱激发材料成本较低,但工业化和耐久性的问题仍需

解决。另外,由于碱激发胶凝材料的影响因素多、性能变化复杂、干燥收缩率大等问题,在建筑结构、桥梁等实际工程中大规模应用的案例很少。

表6 2019年我国大宗工业固体废物的发生量及综合利用情况<sup>[58]</sup>

Table 6 Occurrence and comprehensive utilization of bulk industrial solid waste in 2019<sup>[58]</sup> in China

固体废物名称	发生量/亿t	综合利用量/亿t	综合利用率/%
尾矿	10.3	2.80	27.0
粉煤灰	5.4	4.10	74.7
煤矸石	4.8	2.90	58.9
冶炼废渣	4.1	3.60	88.6
炉渣	3.2	2.30	72.7
脱硫石膏	1.3	0.96	71.3
合计	29.1	16.66	57.3

如前所述,我国道路结构中的基层、底基层材料一般为半刚性无机结合料,每年需要大量的水泥和石灰,碱激发固体废物胶凝材料为道路基层材料生产提供了一种新的途径。利用碱激发固体废物胶凝材料不仅可以大幅度减少对水泥、石灰等高耗能、高排放材料的使用,而且使用固体废物材料可使生产的混合料具有早期强度高、耐久性好等特点。目前,碱激发固体废物胶凝材料在道路基层中的研究处于起始阶段,需要在材料设计、材料性能、技术标准等方面加大科研攻关,为道路基础设施领域的节能减排做出贡献。

### 2.3 道路可再生能源的收集和利用技术

道路承受车辆荷载的直接作用,在道路-车辆运行系统中会产生可再生的能源. Zhao<sup>[60]</sup>研究发现 1 km 道路上卡车通过时车辆所产生的能量可达到 150 kW·h. 这些能量导致路面变形、振动和升温,而采取技术措施收集和利用这些能量可以解决交通本身的一些能源需求. 目前,关于道路可再生能源采集和利用的研究比较多,但大多处于研究或设想阶段,压电技术和光伏路面是道路可再生能源采集和利用技术的典型代表,并铺筑了实验道路进行验证.

#### 2.3.1 压电技术

压电技术是利用压电材料将机械能转换为电能的一种绿色能源技术. 经过长时间的发展,压电技术已广泛应用于许多领域,例如,将压电材料嵌入鞋、轮胎中收集能量以及从结构振动中获取能量等<sup>[61-63]</sup>. 由于压电材料能量密度高、结构设计无限制等优点,近些年来也将其应用于道路中.

道路应用压电技术可将行车荷载下路面产生的部分机械振动能量转换为电能<sup>[64-65]</sup>. Roshani 等<sup>[66]</sup>基于有限元分析对压电路面进行了模拟,随着荷载、接触持续时间和通行量的增加,输出电压显著增加. Zhao 等<sup>[67]</sup>研究了压电陶瓷在道路上的应用,每辆车通过时可产生 0.06 J 的势能,但转换效率低于 15%. Moure 等<sup>[68]</sup>将 30 000 个钹式压电装置用于沥青路面,研究表明一条 100 m 长的道路每年可产生超过 65 MW·h 的能量. 以色列的 Innowattech 公司开发的系统可在每小时 600 辆车的交通量下,从 1 km 的路段采集到 250 kW·h 的电能<sup>[69]</sup>. 在国内,谭忆秋等<sup>[70]</sup>开发了沥青与锆钛酸铅的压电复合材料,该材料能够使实验路面输出约 7.2 V 的电压. 孙春华等<sup>[71-73]</sup>将设计的压电换能器置于路面以下 0.5 m,该换能器每经过一次荷载后将获得 139.9 V 的电压. 2016 年,采用了压电技术的云南麻昭高速公路通过考核验收,是国内首个高速路面采用压电发电技术的工程应用.

虽然将压电技术应用于道路交通领域是可行的,但由于缺乏成熟的理论和实际工程的应用,仍处于研究阶段. 压电材料用于道路能量收集时,压电性能会受到受多方面因素的影响. 压电换能器的材料、形状、尺寸和安装的压电元件数量决定了输出的能量且由于路面的复杂性,不同路面的材料、结构也会对压电性能产生影响. 尽管压电材料具有较高的抗压强度,但其抗拉强度较低,容易在弯曲应力下损

坏. 因此,需要仔细考虑其设计及放置位置. 另外, Gholikhani 等<sup>[74]</sup>将美国传统的电力成本与压电技术成本进行比较,发现使用压电技术收集能量的成本过高. 如何提高压电技术的转换效率从而降低成本也是一个需要研究的问题. 由此可见,现在的技术缺陷较大,需要进行系统性的提升才有可能将该技术进行广泛应用.

#### 2.3.2 光伏路面

光伏发电技术是一种利用半导体界面的光生伏特效应对进行发电,以太阳光辐射为能量来源,将光能直接转换为电能的一种发电技术. 光伏发电技术是目前较为高效且成熟的能源转换技术. 随着该技术的不断进步,该技术也逐渐与道路领域相结合. 光伏路面是指采用太阳能路面板替代传统路面或者直接铺设在传统路面表面,既满足普通公路的交通通行要求,又具有将太阳能转换为电能功能的绿色环保路面. 光伏路面由于其绿色无污染、节约能源、不额外占用土地资源等优点,近年来得到了国内外越来越广泛的研究与应用.

在光伏路面的技术研究方面, Northmore 等<sup>[75]</sup>探索了基于现有路面材料开发太阳能路面板的可行性,对太阳能路面板各层的设计、光伏系统的集成和结构完整性等方面进行了研究. Northmore<sup>[76]</sup>对太阳能路面板的设计进行了详细研究,考虑了太阳能路面板的材料选择、复合结构的弯曲响应、各结构层的相互作用等诸多因素,分析了太阳能路面板对路面基础结构的影响. Xiang 等<sup>[77-78]</sup>开发了一种太阳能道路和土壤蓄热器混合的能源系统 (solar-road and soil-regenerator hybrid energy system, SRSRHES),该系统结合了光伏路面和土壤蓄热的概念. 在对比分析中, SRSRHES 的总体发电效率达到了 66.58%,而传统光伏路面的发电效率仅为 10.75%.

在光伏路面的应用方面,世界上第一条光伏路面是于 2014 年在荷兰铺设的一条 70 m 的太阳能自行车道 SolaRoad<sup>[79]</sup>,该路面由钢化玻璃、太阳能电池和混凝土板 3 层组成,经实测 2015 年发电量为 78 kW·h/m<sup>2</sup><sup>[80]</sup>. 随后在 2019 年又铺设了一条 150 m 的公交专用道,但在开放通行 7 d 后出现了面层破损、三层面板分离的现象. 2016 年 Colas 公司在法国 Tourouvre 镇铺设了一段光伏路面,这段光伏路面由 2 800 m<sup>2</sup>的树脂涂层太阳能电池板组成,所产生的电力可为路灯供电<sup>[81]</sup>. 我国于 2017 年在山东省济南市南绕城高速公路 G2001 建成了世界第一

条光伏路面高速公路试验段,也是目前全世界承载能力最高和交通量最大的光伏路面,全长约1 km。光伏路面由透光混凝土路面、光伏板、绝缘层3层结构组成<sup>[82]</sup>。该试验段通车104 d总发电量达9.602万kW·h,日均发电约923 kW·h。但在运行一年后,光伏面板的接缝处均出现了不同程度的损伤,有的甚至已经出现裂痕,部分因破损严重而无法修复只能被新铺设的沥青路面取代且发电量也较刚通车时大幅下降。

光伏路面使普通道路成为了绿色能源的收集平台,不仅为道路沿线设施、人们生产生活提供了用电,同时减少了大量因高温引起的车辙等病害,延长了路面的使用寿命,从而降低了因养护施工带来的碳排放。从目前国内外对光伏路面的研究可以看出,虽然光伏路面在一些实体工程中得到了应用,但仍存在一些问题需要解决。首先路面会经受各种车辆特别是重载货车的不断碾压,易出现破损、断裂等病害。其次是透光问题,光伏路面既要满足抗滑性能要求,也要具有良好的透光性,长时间使用造成积灰及冬天被雪覆盖时会影响组件发电效率,需要定期清洗组件来保证最高发电效率。另外,光伏路面的建设及日常养护成本较高,有必要对其进行全生命周期成本评估。因此,从目前情况来看,光伏路面的技术路线是否科学合理尚值得探讨,无论是在新能源技术的研发还是保持透光性的同时又保证路面的强度及质量方面,都还有很多技术需要突破。

## 2.4 道路设施运营管理的优化技术

### 2.4.1 道路养护维修与运营管理决策优化

道路养护维修与运营管理决策优化是指道路在运营过程中,其使用性能会随着荷载、环境等作用而逐渐衰减,当衰减到一定程度时,则需要对道路进行科学合理的养护维修使其使用性能恢复,实现养护投入最小、路面性能最优的目标。养护管理决策优化最早起源于美国国有公路运输管理员协会(American Association of State Highway Officials, AASHO)的道路试验,多采用路面状况和工程经验判断相结合的决策方法。随着进一步的发展,决策树、排序法和一些数学规划方法也逐渐在路面养护决策中得到了应用。Fwa等<sup>[83]</sup>利用遗传算法建立了路况最优权数据库,并进行神经网络分析和训练,提出了养护次序的优先排序法。何兆益等<sup>[84]</sup>提出了分析沥青路面养护改建对策的系统分析法——层次分析法,通过该方法可以得到基于单一指标和考虑各指标间不同权重分配的路面养护改建决策。

近年来,我国对节能减排和环境保护日益重视,在养护管理决策优化过程中不仅要考虑道路养护维修的建设成本和用户成本,也要考虑不同养护措施对环境污染的影响。陈力维<sup>[85]</sup>建立了沥青路面运营期间“路况-速度-能耗”模型,并提出了沥青路面养护的能耗和排放的量化方法。杨博<sup>[86]</sup>建立了沥青路面节能减排评价指标体系,提出了节能减排综合评价方法及其评价流程,并开发了沥青路面节能减排分析评价系统(energy-saving and emission-reduction evaluation system for asphalt pavement, E3SAP)。孔祥杰<sup>[87]</sup>以北京市某高速公路养护维修工程为例,研究了2种不同养护维修方案对交通影响成本以及废气排放量的影响。其中方案一采用了双车道施工、缩短施工期的方案,方案二则采用了单车道施工、延长施工期的施工方案。研究表明,施工期较短的方案一产生的交通影响成本和废气排放量较低,因此,合理缩短施工时间,选择高效的养护方式有助于减小养护综合成本,并减少环境污染。

目前,我国传统的路面养护维修方案与低碳、环保可持续发展的要求不相适应,一些不科学的养护维修方案在一定程度上加重了环境污染,而道路养护维修与运营管理的决策优化可以有效解决这一问题。对于如何在道路养护维修和运营管理中实现节能减排的研究较少,尾气污染的成本计算在国内外尚未形成成熟的理论和计算方法且存在节能减排量化分析数据的选择尚不规范等问题,还需进一步进行研究。

### 2.4.2 寿命周期管理

寿命周期评价(life cycle assessment, LCA)是指在设计阶段就考虑到产品寿命历程的所有相关环节,对所有相关因素进行综合规划、优化及管理的一种设计理论。LCA思想起源于国外,自20世纪80年代以来,LCA方法被用于分析各种产品能源和资源的消耗以及对环境的影响<sup>[88]</sup>。然而,与其他领域不同,对于道路基础设施领域,LCA方法仍处于早期研究阶段<sup>[89]</sup>。20世纪90年代,Roudebush<sup>[90]</sup>受美国波特兰水泥协会的委托,进行了第一次道路LCA的研究,本研究被认为是与道路基础设施相关的LCA原始出版物之一。随后的20年里,国外学者对道路基础设施进行了大量的LCA研究。Horvath等<sup>[91]</sup>采用卡内基梅隆大学的经济投入产出生命周期评价(economic input-output-based LCA, EIO-LCA)法评价了美国的热拌沥青路面和连续配筋混凝土路面,研究认为沥青路面寿命周期的材料阶段能耗比

水泥路面高 40%, 但该研究仅仅讨论了施工阶段的能耗和寿命结束阶段的再生利用, 忽略了养护和使用运营阶段的能耗. Inyim 等<sup>[92]</sup> 汇总了 16 篇 LCA 方法在路面能耗中应用的文献, 通过研究发现其中有 11 篇文献得到的结论为水泥混凝土路面的能耗较低. 研究结果的差异可能是由于考虑了不同的阶段, 部分文献讨论了材料生产、施工、使用、养护和生命结束 5 个阶段, 而有些文献只讨论了其中个别阶段. 除了能耗和碳排放外, 对于其他空气污染物、废气等也在 LCA 中进行了研究. 在多项研究中考虑了  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ , 因为它们分别占温室气体排放量的 16% 和 6%<sup>[92]</sup>. Weiland 等<sup>[93]</sup> 采用 LCA 方法来评估路面加铺方案, 研究结果表明, 采用热拌沥青混合料比水泥混凝土产生更多的氮氧化合物.

我国在 21 世纪初才将 LCA 理念应用于道路基础设施领域. 郑莉<sup>[94]</sup> 采用 LCA 方法对水泥混凝土、再生水泥混凝土和粉煤灰混凝土的环境污染排放进行了综合比较分析, 研究表明再生水泥混凝土可有效减少  $\text{CO}$ 、 $\text{C}_x\text{H}_y$  以及废弃物的排放, 而掺入粉煤灰可减少  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等各项污染指标, 进一步提高混凝土的绿色度. 程玲等<sup>[95]</sup> 对温拌沥青混合料和热拌沥青混合料的路面摊铺能耗进行了研究, 通过实地测量发现相比于热拌沥青混合料, 温拌沥青混合料摊铺阶段的沥青烟排放量降低了 53.1%,  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  的排放分别降低了 35.4% 和 53.0%, 温拌沥青混合料摊铺路面更环保. 宋庄庄等<sup>[96]</sup> 对沥青路面 3 个不同阶段的能耗进行了 LCA, 结果表明沥青路面使用阶段的能耗与碳排放占全寿命阶段的 90% 以上, 明显高于养护维修和建设施工阶段. 朱浩然等<sup>[97]</sup> 对路面的全寿命周期过程的能耗排放进行研究分析, 考虑了路面设计、施工、运营、维修、拆除废弃等多个阶段, 建立了路面的 LCA 指标和框架, 并开发了路面专业 LCA 软件 (P-LCA), 该软件可对不同路面结构全寿命周期内各阶段的能源消耗和环境排放通过对比分析进行评价.

运用 LCA 方法评价道路基础设施的碳排放, 量化分析路面工程各环节、各阶段的能源消耗情况, 有助于对道路基础设施规划、设计、施工、运营、养护整个寿命周期各个环节的节能减排进行管理, 对实现道路基础设施的绿色化、低碳化具有重要的意义. 但在目前我国的建设管理体系中, 建设、管理、养护体系相对分离, LCA 大部分仅对某一种建筑材料或某个阶段进行了研究, 缺少对道路基础设施整个寿命周期的研究, 缺乏整体性评价. 在 LCA 软件方

面, LCA 软件的开发都需要基于大量的基础数据, 但我国道路工程领域仍缺少完善的基础数据, 还没有开发出成熟、系统、完善且得到广泛应用的 LCA 软件.

## 2.5 既有路面设施延寿及长寿命路面建设技术

为了有效降低道路基础设施设计年限内的碳排放负荷, 实现绿色可持续发展功能目标, 延长和提高路面设施的设计和服役使用寿命, 从而在最大程度上减少路面大修养护工程需求, 是未来道路工程建养实现低碳绿色发展的关键核心问题. 长寿命路面技术即遵循了全寿命周期成本最低的设计理念, 在整个路面服役使用年限内, 路面不产生结构性破坏, 只需开展一定程度的功能性养护即可保持较好的路面使用性能<sup>[98]</sup>. 在我国目前公路网基本建设完成的现实条件下, 不断改进提升路面结构与材料的优化设计水平的同时, 实现路面的长寿命化需破解 2 个关键技术, 即针对既有路面的补强延寿设计技术与面向新建路面的长寿命设计理论与建设技术.

既有路面补强延寿设计方面, 随着各类无损检测技术的不断发展, 对既有道路结构承载力与服役功能的现场评估手段也日益增多, 在此基础上进一步针对性地提出既有路面的补强设计方案, 通过预防性养护或加铺层设计等手段有望将既有路面的使用寿命延长至 30 a 及以上, 从而实现既有道路基础设施服役能力的提升增值. 在此过程中, 如何对既有路面中长期服役耐久性进行科学评估至关重要, 近年来随着落锤式弯沉仪和三维探地雷达的推广应用, 为既有路面承载力精准评价、路面结构层厚度快速检测、路面内部结构无损探测等技术需求提供了丰富解决方案, 支撑了我国未来对现有公路网基础设施的长寿命升级改造<sup>[99-100]</sup>.

在新建路面长寿命设计理论与建设技术方面, 为了达到路面结构长寿命的目标, 未来需建立基于我国交通、环境、材料和施工条件的长寿命路面设计体系. 我国此前多依托不同结构与材料类型组合的足尺试验路进行探索<sup>[101-102]</sup>. 例如, 通过对某长寿命沥青路面试验段服役状态的跟踪观测, 验证了组合式基层沥青路面结构的可行性和可靠性且重载交通条件下使用 7 a 无任何结构破坏, 从而节省了路面结构性养护的费用投入; 另一长寿命路面试验路段自 2007 年通车后仅在 2010 年进行了部分路段病害的小修保养, 截至 2020 年尚未产生路面大中修养护需求, 进一步证明了组合式基层沥青路面结构具有长寿命的特点. 同时, 在长寿命路面建设技术中, 开

发耐久性抗疲劳路面材料是其中的关键技术环节。我国现有山东、河南及雄安新区等不同地区的长寿命路面示范工程中,大多在路面结构设计中采用了抗疲劳层的设计措施,显著提升了路面结构整体的抗疲劳服役寿命。近年来,基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计等新思想的提出<sup>[103]</sup>,将更好地助力我国长寿命沥青路面设计理论与方法的不断发展。

提升道路设施耐久性、延长其使用寿命是从根本上减少道路基础设施建养中碳排放的重要途径,广大研究者分别从道路材料性能、路面结构设计理论、荷载作用下的道路结构响应、环境耦合作用机理等不同方面开展了研究。但目前我国道路路面的设计和使用寿命仍较低,与国外先进设计理论和建设技术相比,我国在新型耐久性材料研发、既有路面的科学评价与延寿设计、长寿命路面设计理论等方面,尚需开展深入的创新性研究。

### 3 结论与展望

1) 道路交通基础设施是交通运输行业重要的碳排放来源之一,在道路交通基础设施的建设和运营阶段利用节能减排技术可有效降低碳排放。

2) 目前,在道路基础设施领域的节能减排技术主要分为绿色环保节能降碳的沥青路面建设技术、废弃物在道路基础设施建设中的再生利用技术、道路可再生能源的收集和利用技术、道路设施运营管理的优化技术和既有路面设施延寿及长寿命路面建设技术5个方面。对于上述道路基础设施领域节能减排技术的研究,有的比较成熟,有的仍处于研究阶段,还未形成系统的理论、成果,还存在各方面的问题和制约。

3) 目前关于道路基础设施建设何时实现碳达峰尚无准确的预测。道路基础设施建设方面的碳达峰总量与时间的预测需要明确测算范围和边界,综合分析各种影响因素变化情况,合理预测各项关键参数的变化趋势,进而预测道路基础设施建设方面的碳达峰总量与时间,关于这一点尚需开展深入研究。

4) 在道路基础设施建设、养护和运营的过程中都会产生碳排放,要实现道路基础设施建设领域的碳中和,要将生态环保理念贯穿交通基础设施规划、建设、运营和维护全过程,推进废旧路面、建筑垃圾、工业固体废物等在交通建设领域的循环利用,建设绿色交通基础设施,通过提升基础

设施的寿命和耐久性从整体上减少基础设施的养护维修从而减少碳排放。另外,做好道路交通基础设施的绿化,能够在一定程度上抵消交通运输的碳排放,为道路交通基础设施尽快实现碳达峰和碳中和做出重要贡献。

5) 为进一步推动我国交通行业实现“双碳”目标,科学量化交通领域CO<sub>2</sub>排放,在道路基础设施领域应结合我国道路基础设施建设阶段性任务,从绿色建造技术创新与应用、工程行业低碳建造与养护运营管理等方面入手开展深入的科研攻关和新技术推广工作,切实降低道路基础设施领域的碳排放。

6) 道路基础设施是交通基础设施的一个组成部分,应在更广泛的交通基础设施建设、运营领域推进绿色、低碳技术。此外,把“双碳”作为约束条件运用于公路、铁路、航空、水运等交通系统的规划和运营过程中,整体提升交通系统的绿色、低碳水平。

### 参考文献:

- [1] 欧阳志远,史作廷,石敏俊,等. “碳达峰碳中和”:挑战与对策[J]. 河北经贸大学学报, 2021, 42(5): 1-11.
- [2] OUYANG Z Y, SHI Z T, SHI M J, et al. Challenges and countermeasures of “carbon peak and carbon neutrality” [J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2021, 42(5): 1-11. (in Chinese)
- [3] 交通运输部科学研究院. 交通运输碳达峰、碳中和知识解读[M]. 北京:人民交通出版社, 2021: 21-39.
- [4] 刘建国,朱跃中,田智宇. “碳中和”目标下我国交通脱碳路径研究[J]. 中国能源, 2021, 43(5): 6-12, 37. LIU J G, ZHU Y Z, TIAN Z Y. Research on the path of transportation decarbonization under the vision of carbon neutrality in China [J]. Energy of China, 2021, 43(5): 6-12, 37. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 国家综合立体交通网规划纲要[R]. 北京:中华人民共和国交通运输部, 2021.
- [6] SANTOS J, FERREIRA A, FLINTSCH G. A life cycle assessment model for pavement management: road pavement construction and management in Portugal [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 16(4): 315-336.
- [7] 徐健. 低碳生态型道路建设技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2012: 1-10.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 2020年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京:中华人民共和国交通运输部, 2021.

- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2020.
- [9] 智研咨询集团. 2021—2027 年中国石油沥青行业市场运行状况及投资方向研究报告[R]. 北京: 智研咨询集团, 2021.
- [10] 蔡博峰, 冯相昭. 中国交通领域的低碳政策与行动[J]. 环境经济, 2011(10): 38-45.  
CAI B F, FENG X Z. Low-carbon policies and actions in China's transportation sector [J]. Environmental Economy, 2011(10): 38-45. (in Chinese)
- [11] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业碳排放报告(2020 年度)[J]. 石材, 2021(5): 3-5, 54.  
CBMF. Report on carbon emissions from China's construction materials industry (2020) [J]. Stone, 2021(5): 3-5, 54. (in Chinese)
- [12] 王晓晨. 温拌沥青混合料在北京地区应用的技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.  
WANG X C. Research on the technology of WMA in Beijing area [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 石小培. 沥青路面全寿命周期能耗研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.  
SHI X P. Research on life cycle energy consumption of asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] 黄文元, 秦永春. 沥青温拌技术在国内外的应用现状[J]. 上海公路, 2008(3): 1-4.  
HUANG W Y, QIN Y C. Application status of bitumen warm mixing technology at China and abroad [J]. Shanghai Highways, 2008(3): 1-4. (in Chinese)
- [15] ZHAO S, HUANG B S, SHU X, et al. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement [J]. Construction and Building Material, 2013, 44(10): 92-100.
- [16] YOUNDALE G P. The Australian asphalt pavement association research and development program-a review [C]// Asphalt Workshop. London: Imperial College of Science and Technology, 1992: 1-5.
- [17] 杨立新. 沥青温拌性能的技术评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
YANG L X. Technical performance evaluation of warm mixing asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [18] 谭亿秋, 符永康, 纪伦, 等. 橡胶沥青低温评价指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 66-70.  
TAN Y Q, FU Y K, JI L, et al. Evaluation index for low temperature of rubber asphalt [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 66-70. (in Chinese)
- [19] 肖飞鹏, 王涛, 王嘉宇, 等. 橡胶沥青路面降噪技术原理与研究进展[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 73-91.  
XIAO F P, WANG T, WANG J Y, et al. Principle and research progress of noise reduction technology for rubber asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 73-91. (in Chinese)
- [20] 张永利. 橡胶沥青技术的节能减排效果研究[J]. 交通世界(中旬刊), 2017(6): 154-156.  
ZHANG Y L. Research on energy saving and emission reduction effect of rubber asphalt technology [J]. Transpo World, 2017(6): 154-156. (in Chinese)
- [21] OLIVEIRA J, SILVA H, ABREU L, et al. Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41: 15-22.
- [22] XIN Y, ZHEN L, YING W, et al. Characterization of the effect of foaming water content on the performance of foamed crumb rubber modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 279-284.
- [23] WANG H, DANG Z, YOU Z, et al. High-temperature viscosity performance of crumb-rubber-modified binder with warm mix asphalt additives [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(5): 687-696.
- [24] YANG X, YOU Z, HASAN M, et al. Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using evotherm [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159(15): 346-358.
- [25] JONES D, FARSHIDI F, HARVEY J T. Warm-mix asphalt study: summary report on rubberized warm-mix asphalt research [R]. California: University of California Pavement Research Center, 2013.
- [26] WANG H P, LIU X Y, APOSTOLIDIS P, et al. Review of warm mix rubberized asphalt concrete: towards a sustainable paving technology [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 302-314.
- [27] 何敏, 曹东伟, 张海燕. 改性生物沥青常规性能研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 8-12.  
HE M, CAO D W, ZHANG H Y. Study on general performance of modified bio-asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(2): 8-12. (in Chinese)
- [28] HOSSEINNEZHAD S, KABIR S F, OLDHAM D, et al. Surface functionalization of rubber particles to reduce

- phase separation in rubberized asphalt for sustainable construction [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225(10): 82-89.
- [29] WANG H, APOSTOLIDIS P, ZHU J, et al. The role of thermodynamics and kinetics in rubber-bitumen systems: a theoretical overview [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 22(14): 1785-1800.
- [30] PODOLSKY J H, BUSS A, WILLIAMS R C, et al. Investigation of performance tests using bio-derived/chemical additives[C]//International Conference on Bio-based Building Materials. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2015: 1-8.
- [31] FINI E H, AL-QADI I L, YOU Z P, et al. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder; characterization and modification [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2012, 13(6): 515-522.
- [32] 任瑞波, 范文森, 冯美军, 等. 沥青混合料再生技术研究进展[J]. *石油沥青*, 2020, 34(4): 9-12, 23.  
REN R B, FAN W M, FENG M J, et al. Recycling technology research progress of asphalt mixtures [J]. *Petroleum Asphalt*, 2020, 34(4): 9-12, 23. (in Chinese)
- [33] ZHU Y, WANG X, QIAO Y, et al. Thermal cracking and fatigue analysis of recycled asphalt mixture using DCT test and S-VECD model[C]//Geoshanghai International Conference. Berlin: Springer, 2018: 483-492.
- [34] WEST R, WILLIS J R, MARASTEANU M. Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content [R]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013.
- [35] KUMARI M, RANSINCHUNG G D R N, SINGH S. A laboratory investigation on Dense Bituminous Macadam containing different fractions of course and fine RAP [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191(10): 655-666.
- [36] AURANGZEB Q, AL-QADI I L, OZER H, et al. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2014, 83: 77-86.
- [37] CHOWDHURY R, APUL D, FRY T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2010, 54(4): 250-255.
- [38] CHEN X, WANG H. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187(20): 148-157.
- [39] WALBERG D. Solid and timber construction in residential buildings/Massivund Holzbau bei Wohngebüden [J]. *Mauerwerk*, 2016, 20(1): 16-31.
- [40] WANG B, YAN L, FU Q, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 171(5): 105565.
- [41] ALMEIDA A, CUNHA J. The implementation of an activity-based costing (ABC) system in a manufacturing company [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 13: 932-939.
- [42] MAKUL N, FEDIUK R, AMRAN M, et al. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: a review [J]. *Crystals*, 2021, 11(3): 232.
- [43] 王馨伟. 废旧混凝土再生骨料道路水泥混凝土路用性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.  
WANG X W. Study on road performance of cement concrete used as recycled aggregate for waste concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [44] ZHENG L, WU H, ZHANG H, et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China [J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 136: 405-413.
- [45] GUO H, SHI C, GUAN X, et al. Durability of recycled aggregate concrete—a review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018: S0958946517310958.
- [46] HOSSAIN M U, POON C S, LO I M C, et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA [J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2016, 109: 67-77.
- [47] KIM J. Construction and demolition waste management in Korea: recycled aggregate and its application [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, 23: 2223-2234.
- [48] WANG Q F, YANG Y, LUAN D, et al. Current situation and comprehensive treatment of construction waste [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2021, 29(10): 8751-8756.
- [49] 刘梦珠. 碱激发胶凝材料的制备及性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.  
LIU M Z. Preparation and properties of alkali-activated cementitious materials [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. (in

- Chinese)
- [50] 沈彬然. 碱激发胶凝材料在油田道路工程及废料固化中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- SHEN B R. Application research of alkali activated coagulation materials to oilfield road engineering and waste solidification [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [51] DUXSON P, PROVIS J L, LUKEY G C, et al. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete' [J]. *Cement & Concrete Research*, 2007, 37(12): 1590-1597.
- [52] POLIMENI J M. Factor five: transforming the global economy through 80% improvements in resource productivity[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(6): 1240-1241.
- [53] TEMPEST B, SANSUI O, GERGELY J, et al. Compressive strength and embodied energy optimization of fly ash based geopolymer concrete [C] // 3rd World of Coal Ash Conference. New Delhi: Indian Journal of Science and Technology, 2009: 1-13.
- [54] WEIL M, DOMBROWSKI K, BUCHWALD A. Life-cycle analysis of geopolymers [J]. *Geopolymers*, 2009: 194-210.
- [55] WEIL M, JESKE U, DOMBROWSKI K, et al. Sustainable design of geopolymers - evaluation of raw materials by the integration of economic and environmental aspects in the early phases of material development[J]. *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, 2007, 49: 279-283.
- [56] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(9/10): 1080-1090.
- [57] DAMTOFT J S, LUKASIK J, HERFORT D, et al. Sustainable development and climate change initiatives [J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 38(2): 115-127.
- [58] 中华人民共和国生态环境部. 2020年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020.
- [59] PROVIS J L. 碱激发材料 [M]. 刘泽云, 彭桂元, 王栋民, 等译. 北京: 中国建材工业出版社, 2019: 22-23.
- [60] ZHAO H. Harvesting energy from asphalt pavement by piezoelectric generator [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science)*, 2014, 29(5): 933-937.
- [61] SHENCK N S, PARADISO J A. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics [J]. *IEEE Micro*, 2001, 21(3): 30-42.
- [62] ENDE D A, WIEL H J, GROEN W A, et al. Direct strain energy harvesting in automobile tires using piezoelectric PZT-polymer composites [J]. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(1): 015011.
- [63] BOISSEAU S, DESPESE G, SEDDIK B A. Nonlinear H-shaped springs to improve efficiency of vibration energy harvesters [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2013, 80(6): 061013.
- [64] 黄如宝, 牛衍亮, 赵鸿铎, 等. 道路压电能量收集技术途径与研究展望[J]. *中国公路报*, 2012, 25(6): 1-8.
- HUANG R B, NIU Y L, ZHAO H D, et al. Technical approach and research prospect of piezoelectric energy harvest from highway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(6): 1-8. (in Chinese)
- [65] 李彦伟, 陈森, 王朝辉, 等. 智能发电路面技术现状及发展[J]. *材料导报*, 2015, 29(7): 100-106.
- LI Y W, CHEN S, WANG Z H, et al. Status and development of intelligent power pavement technology [J]. *Materials Reports*, 2015, 29(7): 100-106. (in Chinese)
- [66] ROSHANI H, DESSOUKY S, MONTOYA A, et al. Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: a feasibility study [J]. *Applied Energy*, 2016, 182(15): 210-218.
- [67] ZHAO H, YU J, LING J. Finite element analysis of cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, 118(1382): 909-915.
- [68] MOURE A, IZQUIERDO R M A, HERNANDEZ R S, et al. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 112: 246-253.
- [69] HILL D, AGARWAL A, TONG N. Assessment of piezoelectric materials for roadway energy harvesting cost of energy and demonstration roadmap [R]. California: California Energy Commission, 2014.
- [70] 谭忆秋, 钟勇, 吕建福, 等. 路面用 PZT 沥青压电复合材料的制备及性能[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(6): 975-980.
- TAN Y Q, ZHONG Y, LÜ J F, et al. Preparation and properties of PZT/ asphalt-based piezoelectric composites used on pavement [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(6): 975-980. (in Chinese)
- [71] 孙春华, 杜建红, 汪红兵, 等. 路面振动压电俘能器



- 的性能分析[J]. 压电与声光, 2013, 35(4): 556-560.
- SUN C H, DU J H, WANG H B, et al. Properties analysis of piezoelectric energy harvesters from pavement vibration [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2013, 35(4): 556-560. (in Chinese)
- [72] 汪红兵, 孙春华, 李志荣. 沥青路面内矩铍形压电俘能器性能仿真分析[J]. 压电与声光, 2015, 37(4): 667-671.
- WANG H B, SUN C H, LI Z R. Performance simulation analysis on a rectangle cymbal shaped piezoelectric energy harvester in asphalt pavement [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2015, 37(4): 667-671. (in Chinese)
- [73] SUN C H, SHANG G Q, ZHANG Y K, et al. Designing piezoelectric harvesting unit from road vibration [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 712/713/714/715(2): 1368-1371.
- [74] GHOLIKHANI M, ROSHANI H, DESSOUKY S, et al. A critical review of roadway energy harvesting technologies [J]. *Applied Energy*, 2019, 261: 114388.
- [75] NORTHMORE A, TIGHE S. Innovative pavement design: are solar roads feasible? [C]//2012 Conference of the Transportation Association of Canada. Ottawa: Transportation Association of Canada, 2012: 1-11.
- [76] NORTHMORE A B. Canadian solar road panel design: a structural and environmental analysis [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2014.
- [77] XIANG B, CAO X, YUAN Y, et al. A novel hybrid energy system combined with solar-road and soil-regenerator: sensitivity analysis and optimization [J]. *Renewable Energy*, 2018, 129: 419-430.
- [78] XIANG B, CAO X, YUAN Y, et al. A novel hybrid energy system combined with solar-road and soil-regenerator: dynamic model and operational performance [J]. *Energy Conversion & Management*, 2018, 156: 376-387.
- [79] 胡恒武, 查旭东, 岑晏青, 等. 太阳能路面研究现状及展望[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 16-29.
- HU H W, ZHA X D, CEN Y Q, et al. Research status and prospect of solar pavement [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(1): 16-29. (in Chinese)
- [80] SHEKHAR A, KUMARAVEL V K, KLERKS S, et al. Harvesting roadway solar energy—performance of the installed infrastructure integrated PV Bike Path [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, 8(4): 1066-1073.
- [81] PULTAROVA T. News briefing: energy-welcome to the world's first solar road [J]. *Engineering & Technology*, 2017, 12(1): 10.
- [82] 张博文. 光伏路面的发展与展望[C/OL]//2019 世界交通运输大会论文集. 北京: 中国学术期刊电子杂志社有限公司, 2019: 226-234 [2021-08-25]. <https://road.cnki.net/download/jtdh/GL0304-014.pdf>.
- ZHANG B W. Development and prospect of photovoltaic pavement [C/OL]//2019 World Transport Convention. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2019: 226-234 [2021-08-25]. <https://road.cnki.net/download/jtdh/GL0304-014.pdf>. (in Chinese)
- [83] FWA T F, TAN C Y, CHAN W T. Road-maintenance planning using genetic algorithms. II: analysis [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1994, 120(5): 710-722.
- [84] 何兆益, 邓学钧. 沥青路面养护改建对策的系统分析方法[J]. 重庆交通学院学报, 1995, 14(1): 32-37.
- HE Z Y, DENG X J. Systematic analysis method for maintenance and reconstruction countermeasures of asphalt pavement [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 1995, 14(1): 32-37. (in Chinese)
- [85] 陈力维. 沥青路面运营期间能量消耗与气体排放量化分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- CHEN L W. Quantitative analysis of energy usage and gas emissions for the use phase of asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [86] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- YANG B. Quantitative method and evaluation system of energy-saving and emission-reduction for asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [87] 孔祥杰. 沥青路面性能衰变预测及养护维修决策方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- KONG X J. Study on prediction method of performance decay and maintenance decision method of asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [88] SANTERO N J, MASANET E, HORVATH A. Life-cycle assessment of pavements. part I: critical review [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2011, 55(9/10): 801-809.
- [89] HARVEY J, MEIJER J, KENDALL A. Life cycle assessment of pavements [C]//Techbrief. Washington: Federal Highway Administration, 2014: 1-10.
- [90] ROUDEBUSH W H. Environmental value engineering (EVE) environmental life cycle assessment of concrete and asphalt highway pavement systems [J]. *Portland*

- Cement Association, 1996, 2088: 1-162.
- [91] HORVATH A, HENDRICKSON C. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements [J]. *Transportation Research Record*, 1998, 1626: 105-113.
- [92] INYIM P, PEREYRA J, BIENVENU M, et al. Environmental assessment of pavement infrastructure: a systematic review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 176: 128-138.
- [93] WEILAND D, MUENCH S T. February 2010 life cycle assessment of Portland cement concrete interstate highway rehabilitation and replacement [R]. Washington: Washington State Department of Transportation, 2010.
- [94] 郑莉. 路面材料 LCA 及其信息化开发[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.  
ZHENG L. The LCA on material performance and its informationization development [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007. (in Chinese)
- [95] 程玲, 闫国杰, 陈德珍, 等. 温拌沥青混合料摊铺节能减排效果的量化研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(9): 2151-2155.  
CHENG L, YAN G J, CHEN D Z, et al. Quantitative investigation on energy conservation and emission reduction related to warm mix asphalt (WMA) [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9): 2151-2155. (in Chinese)
- [96] 宋庄庄, 朱洪洲. 沥青路面全寿命周期节能减排策略案例研究[J]. *中外公路*, 2020, 40(5): 36-42.  
SONG Z Z, ZHU H Z. Case study on energy conservation and emission reduction strategy of asphalt pavement in life cycle [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(5): 36-42. (in Chinese)
- [97] 朱浩然, 温肖博, 卢勇, 等. 路面寿命周期环境影响评价研究及软件开发[J]. *中外公路*, 2016, 36(5): 331-336.  
ZHU H R, WEN X B, LU Y, et al. Research on environmental impact assessment of pavement life cycle and software development [J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2016, 36(5): 331-336. (in Chinese)
- [98] 郑健龙, 吕松涛, 刘超超. 长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J]. *科学通报*, 2020, 65(30): 3219-3227.  
ZHENG J L, LÜ S T, LIU C C. Technical system, key scientific problems and technical frontiers of long-life pavement [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(30): 3219-3227. (in Chinese)
- [99] 宋波. 既有沥青路面结构评价与延寿设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
SONG B. Study on structural evaluation and life extension design method of existing asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [100] 赵为天. 基于三维探地雷达和落锤式弯沉仪的路面结构状况无损评估[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
ZHAO W T. Nondestructive evaluation of pavement structure based on three-dimensional ground penetrating radar and drop weight deflectometer [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [101] 王林, 韦金城, 张晓萌, 等. “四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J]. *科学通报*, 2020, 65(30): 3238-3246.  
WANG L, WEI J C, ZHANG X M, et al. “four integrations” to solve the technical bottleneck of long-life asphalt pavement [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(30): 3238-3246. (in Chinese)
- [102] 王选仓, 侯荣国. 长寿命路面结构设计[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(6): 46-49.  
WANG X C, HOU R G. Structural design of long-life pavement [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(6): 46-49. (in Chinese)
- [103] 郑健龙. 基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(1): 1-7.  
ZHENG J L. New design idea of durable asphalt pavement based on increasing service life of structural layer [J]. *Chinese Journal of Highway*, 2014, 27(1): 1-7. (in Chinese)

(责任编辑 梁洁)