

沥青路面就地热再生技术现状与发展历程

牛文广

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074)

摘要: 就地热再生技术是一种发展前景较好的沥青路面预防性养护技术。该文在全面了解就地热再生研究历程的基础上,从就地热再生技术适用性、再生混合料设计、再生路面结构、以及现有相关专利数量和实体工程应用效果等方面对已有研究进行总结概述。

关键词: 沥青路面; 就地热再生; 混合料设计; 结构设计

随着中国经济的发展和近几年大规模新建公路网的基本完善,“十三五”期公路交通将面临新的发展形势,尤其对公路养护管理工作提出了更高要求。目前中国仅干线公路大中修工程,每年生产1.6亿t沥青路面旧材料。同时,中国道路路面材料的回收利用率还不到30%,远低于发达国家90%以上的利用率。如何有效回收沥青混凝土已成为中国公路交通建设中的一个重要课题。

根据中国的实际情况,JTG F41—2008《公路沥青路面再生技术规范》将沥青路面再生技术分为厂拌热再生、厂拌冷再生、就地冷再生、就地热再生4类,该文基于技术特点及施工设备差异,对4种再生技术进行分析和对比,得出就地热再生技术相对于其他3种再生技术的显著区别与共性。就地热再生技术具有施工简便、施工速度快、可100%利用旧路面材料、对交通的干扰小且节省运输成本等优点。并且与其他养护技术相比,就地热再生技术可完全修复路面龟裂、坑槽及车辙等浅层病害,经过就地热再生处理的路面达到使用年限后,还可以继续通过再生手段重复利用。该技术对中国公路建设及养护具有一定的促进作用,对生态环境保护具有重要意义。

该文着眼当前道路养护技术发展形势,在全面了解就地热再生研究历程的基础上,通过对国内外就地热再生技术研究文献的收集,对就地热再生技术适用性、再生路面结构、再生混合料设计以及现有相关专利数量和实体工程应用效果等方面的研究进行总结。

1 国内外研究历程

国外最早认识到利用再生现有沥青路面材料进行

路面修复的重要方法是1915年从美国开始,但后续研究基本处于停滞状态。直到20世纪70年代爆发了石油危机,才开始了后续大规模的沥青路面技术研究。直到2006—2008年,随着沥青和集料价格上涨,添加高比例RAP的再生路面铺筑技术才得到广泛研究。

从20世纪70年代开始,以德国、加拿大、芬兰和意大利等国家为代表的欧洲许多国家进行了一系列沥青路面的再生试验,并取得了良好效果。其中德国于1978年就已经对全部RAP进行再利用,德国依靠强大的机械制造能力开发了乳化沥青冷再生、就地热再生等大型设备,法国等也广泛进行了RAP回收利用。前苏联分别于1966年、1979年和1984年发布沥青混合料再生的相关指南和准则用以规范指导再生沥青混合料应用。日本从1976年开始研究沥青路面再生技术,至2000年再生沥青混合料生产比例已达道路建设所用全部沥青混合料的30%,至2004年这一比例已达68.8%。

20世纪90年代后期,成套专业的现场热再生设备开始出现,进一步推动了现场热再生技术在公路路面养护工程中的应用。

中国公路沥青路面再生研究起步较晚,曾在20世纪50—70年代不同程度上利用过旧沥青材料,但一般只是用于轻交通道路、人行道或道路的垫层。直到1983年建设部下达了“废旧沥青混合料再生利用”的研究项目。1991年中国颁布了《热拌再生沥青混合料路面及验收规程》,一些大学及科研机构也着手对再生路面混合料路用性能、施工技艺等方面进行研究,并取得了一定的成果。从2002年9月到2003年底中国共引进了国外4个国家的8套就地热再生成套设备。就

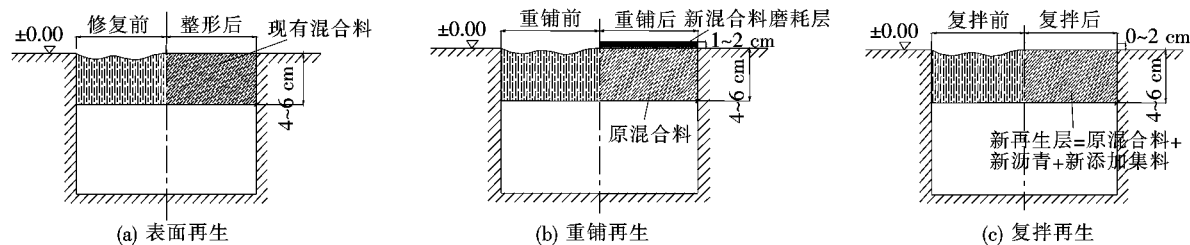
地热再生技术在中国的发展突飞猛进,国产的就地热再生设备也陆续出现。据不完全统计,截至 2009 年,中国就地热再生使用面积超过 700 万 m²。2010 年,湖南省对就地热再生技术进行了全面的推广,并且取得了良好的实施效果。2013 年,就地热再生技术成为福建省重点推广的技术,并对英达就地热再生技术优势进行了论证。

2 就地热再生技术适用性

就地热再生技术凭借其良好的经济、社会、环境效益,在中国预防性养护工程中大量地应用,但是由于其施工工艺的特点,并不能适用于所有的沥青路面病害

处治,存在一定的局限性。就地热再生技术主要是以修复沥青路面表面功能为出发点,通过对沥青路面上面层的再生修复,达到预防性养护的目的,提高路面行驶质量。主要分为 3 类:表面再生、复拌再生和重铺再生。通过文献及实体工程调研,对 3 种就地热再生工艺的适用范围进行总结,列于图 1。

目前中国常用的再生技术主要有 4 种:厂拌热再生、就地热再生、厂拌冷再生、就地冷再生技术,由于其施工工艺的不同,对不同沥青路面病害的再生效果有较大区别。通过文献调研,根据就地热再生技术特点及施工特点,分别对 4 种再生技术进行分析比较,如表 1 所示。



注:(a) 表面再生主要适用于道路损坏小、受损面积小的道路修复,可以消除原路面的裂缝和车辙;(b) 重铺再生主要适用于严重受损道路的修缮改造和旧路改造,采用该方法修复的沥青混合料路面具有更好的抗滑性及路面平整度,改善路面横坡,提高沥青路面的强度;(c) 复拌再生主要适用于中等损坏的路面修复,它可以改善旧沥青路面的材料性能,修复老化和不稳定磨损层,提高路面强度。

图 1 不同就地热再生方式处治目的及工艺过程

表 1 4 种不同再生方式的比较

比较项目	厂拌热再生	就地热再生	厂拌冷再生	就地冷再生
主要修复路面位置	修复沥青路面面层病害,可用于各个等级公路沥青路面的面层及柔性基层	浅层轻微病害的高速公路及一、二级公路沥青路面表面层	高速公路和一、二级公路下面层及基层、底基层,三、四级公路沥青路面面层	高速公路和一、二级公路沥青路面,经论证可用于高速公路
对旧路的铣刨	传统的方式,对路面进行翻挖或铣刨	通过加热软化旧路面,并以机械方式翻松或铣刨	传统的方式,对路面进行翻挖或铣刨	传统的方式,对路面进行翻挖或铣刨
RAP 利用率	RAP 参配比例相对较低,一般为混合料总量的 10%~30%	基本上完全利用旧料	RAP 需要运输,参配比例相对较低	基本上完全利用旧料
对交通的干扰	RAP 需要运输,施工对交通影响较大	可以半幅施工,半幅开放,对交通的干扰较小	RAP 需要运输,施工对交通影响较大	可以半幅施工,半幅开放,对交通的干扰较小
环境保护	旧料不能完全利用,对环境有一定影响	减小了对新材料的开采量,也解决了旧料的堆放、弃置问题,减少了废弃物对环境的污染	旧料不能完全利用,对环境有一定影响	减小了对新材料的开采量,也解决了旧料的堆放、弃置问题,减少了废弃物对环境的污染
经济效益	相对较大	经济效益可观	相对较大	经济效益可观

续表 1

比较项目	厂拌热再生	就地热再生	厂拌冷再生	就地冷再生
对路基损害	较高	较低	较高	较低
骨料加热	需要加热	需要加热	不需要加热	不需要加热
再生机械配置	对施工机械要求较低	对再生机械要求较高,使用专用机械	对施工机械要求较低	专用就地冷再生设备
对气候的依赖	依赖性不大	依赖性大,不适合在寒冷气候施工	依赖性不大	依赖性不大
再生层质量	可用于高等级路面维修	可用于高等级路面维修	一般需要加铺一定厚度的罩面层	不可作为上面层
施工控制	易于控制	不易于控制	易于控制	不易于控制

由表 1 可知:

(1) 就地热再生技术与厂拌热再生技术和厂拌冷再生技术相比,由于其施工工艺不同的影响,导致其在道路养护工程应用中有较大差别,主要体现在修复路面层位置、RAP 利用率、对交通的干扰、环境保护、经济效益、再生机械配置、对路基损害、施工控制等方面;与就地冷再生技术相比,主要区别体现在骨料加热、再生层质量等方面。

(2) 与其他 3 种再生工艺相比,就地热再生技术在施工过程中,对旧路铣刨时需要进行加热,也因此导

致其施工过程对气候的依赖性大,不宜在寒冷环境施工。

由以上分析可知,就地热再生技术以改善已产生裂缝、坑槽、车辙的沥青路面的形状和混合料性质为目的,一般是在路面的损坏程度还没波及到基层时采用这种维修方法,并且就地热再生技术也存在对再生机械要求高、对气候依赖性强、不易于施工控制等缺点。该文在大量文献调研的基础上,通过对实体工程的调查,针对路面产生的不同病害,对就地热再生 3 种工艺进行了适用性分析总结,列于表 2。

表 2 就地热再生对路面病害的适用性

道路破损 类型	可选就地热再生工艺			道路破损 类型	可选就地热再生工艺		
	表面再生	复拌再生	重铺再生		表面再生	表面再生	表面再生
松散	★★★	★★★	★★★	膨胀	★★	★★	★★
坑槽	★★	★★★	★★★	凹陷	★★	★★	★★
泛油	★★	★★★	★★	沉降	★★	★★	★★
抗滑力小	★	★★	★★★	行驶质量差	★★★	★★★	★★★
路肩脱落	★	★	★	强度	★	★	★★
轻度车辙	★★★	★★	★★	微表处脱皮	★★	★★★	★★
重度车辙	★	★★★	★★★	桥头跳车	★★★	★★★	★★
波浪	★★	★★★	★★	沥青层偏薄	★★	★★★	★★★
拥包	★★	★★★	★★	麻面	★★	★★★	★★
疲劳裂缝	★	★★	★★★	纵向裂缝	★★	★★	★★★
边缘裂缝	★	★★	★★★	横向裂缝	★★	★★	★★★
滑移裂缝	★★	★★	★★★	反射裂缝	★★	★★	★★★
块状裂缝	★★	★★	★★★	间断裂缝	★	★	★★

注:★★★表示适用性良好,★★表示适用性一般,★表示适用性差。

3 就地热再生沥青混合料设计

热再生沥青混合料设计是在分析原路面沥青含

量、沥青老化程度以及集料级配的基础上,确定热再生沥青混合料的矿料级配、各档新矿料添加量、最佳新沥青掺量以及各外加剂(主要为再生剂)掺量,使得再生沥青混合料路用性能满足道路使用要求。

3.1 再生剂掺量控制

国内外再生剂用量设计方法包括溶解度参数法、经验估算法、性能设计法等,各有不同的思路和参考意义。

(1) 溶解度参数法。这种再生剂量设计方法在理论上是可行的,但难以推广应用于实际工程应用。该测试需要很长时间,并且需要特殊的测试设备,大规模推广不方便。

(2) 经验预估法。经验估算方法假定新沥青(包括再生剂)的量等于再循环沥青混合物的总沥青含量减去旧沥青混合物的沥青含量。估计再循环混合料中使用的沥青量可以凭经验确定,并且已经提出确定沥青的比重和相应的薄膜厚度。经验估算方法的关键是准确估算再循环混合料所需的沥青用量,并根据新型沥青混合料的经验估算再循环混合料的最佳沥青用量。估计结果的适当性还有待进一步研究。同时,对于相当一部分原位热再生过程,混合物的级配和沥青用量没有变化,但仅通过添加再生剂来恢复沥青性能,很难采用经验估计方法“预估沥青用量—原有沥青用量”的方法确定再生剂用量。

(3) 性能设计法。性能设计的基本思想是:沥青老化表现为黏度增加,渗透性和延展性降低,软化点增加。再生剂用于在规范可接受的范围内改进沥青的技术指标。至于再生剂添加的具体比例以及再生沥青的性能由室内测试确定。

从以上分析可以看出:由于测试方法的复杂性,溶解度参数方法难以推广。经验预估法不适用于就地热再生过程;性能设计方法采用沥青恢复设计的性能来选择再生剂的用量,设计思路清晰合理,可采用常用的性能评价方法。操作更简单,关键在于需要结合沥青老化机理,选择合适的性能指标。

3.2 级配控制

再生沥青混合料的合成级配很大程度上取决于原沥青路面的级配,在长时间行车荷载冲击和加热铣刨过程中,原路面的矿料会发生破碎,导致原级配变细。因此,必须通过掺入一定量的新沥青混合料来改善原沥青路面的级配。具体掺入量随原路面级配情况而定。

3.3 最佳油石比控制

黄晓明等研究发现,再生沥青混合料配合比设计中随着沥青含量的改变,各项性能的变化规律与普通沥青混合料的变化规律大致相同。目前国内外大都采用马歇尔方法对再生沥青混合料进行配合比设计。

新沥青掺量的确定,应以加入新料后矿料总质量为基准,测定在添加不同比例新沥青的情况下,马歇尔稳定度、流值、矿料间隙率、空隙率等马歇尔技术指标,通过对比分析,确定新沥青最佳掺量。

3.4 就地热再生混合料设计调研

通过文献调研,对现有就地热再生混合料相关设计所得参数进行统计,列于表 3。

表 3 就地热再生混合料相关设计所得参数

来源	矿料配比/%		油石 比/%	再生剂 掺量/ %	沥青混合料性能检验结果				
	新料	回收料			稳定 度/kN (次·mm ⁻¹)	动稳定度/ 度/kN (次·mm ⁻¹)	残留稳 定度/%	TSR/ %	破坏应 变/με
马登成,等	15	85	4.70	4.0	12.46	5 481	91.8	93.8	3 056.9
刘占广,等	0	100	5.00	5.0	8.62	1 143	96.0	90.0	2 604.0
巫裕润,等	25	75	4.30	5.0	13.25	6 758	88.4	83.2	2 341.6
	5	95	4.65	1.0	17.58	5 419	70.8	92.3	4 219.2
张清平,等	15	85	4.65	1.0	14.51	4 565	82	94.9	4 531.3
	25	75	4.65	1.0	13.54	4 000	85.8	95.7	5 027.0
	13	87	5.30	5.0	8.1	1 203	79.0	77.0	2 816.0
马君科,等	13	87	5.30	5.0	8.9	1 083	82.0	83.0	2 931.0
	13	87	5.30	3.0	9.3	1 426	84.0	81.0	3 144.0
张娟,等	30	70	4.90	9.0	14.4	7 814	92.3	90.5	2 030.7
	30	70	4.90	9.0	14.2	6 458	89.8	87.6	2 011.5
吕乐宁,等	20	80	4.80	5.0	12.38	3 549	91.0	89.6	3 041.9
张广,等	23	77	5.52	9.0		7 814	86.3	85.6	2 030.7
郭平,等	0	100	5.00	9.0		6 258	83.7	80.3	2 011.5

续表 3

来源	矿料配比/%		油石 比/%	再生剂 掺量/ %	沥青混合料性能检验结果				
	新料	回收料			稳定 度/kN (次·mm ⁻¹)	动稳定度/ 度/kN (次·mm ⁻¹)	残留稳 定度/%	TSR/ %	破坏应 变/μϵ
王礼珍,等	23	77	4.65	9.0		7 814	86.3	85.6	2 030.7
陈舟宇,等	15	85	5.00	5.0	12.92	6 852	90.1	90.3	
郑育新,等	66	34	8.49	10.0	8.65	2 242	83.7	96.1	
	20	80	4.70	5.0	13.8	2 423.1	88.1	77.3	
符适,等	20	80	4.70	5.0	12.9	2 250	83.8	75.6	
	20	80	4.70	5.0	13.3	2 333.3	86.2	76.3	
武鹤,等	15	85	5.40	4.0	8.53	1 089	90.0	82.4	
张军仁,等	15	85	4.90	4.0	13.40	3 452	87.9	84.7	
易忠平,等	15	85	4.55	2.5	14.57	10 353	87.1		

(1) 对表 3 各数值进行离散性分析,各量变异系数列于表 4。在进行数据统计分析时,如果变异系数大于 0.15,则要考虑该数据离散程度过大。由于就地热再生工艺是在原路面的基础上进行的养护工程,各统计量随着原路面不同差别较大,仅有旧料回收配比、油石比、

残留稳定度、TSR 满足变异系数不大于 0.15。

(2) 残留稳定度、TSR 值均表征再生混合料低温稳定性,以残留稳定度、TSR 作为目标量,采用最小二乘法,对旧料配比及油石比进行拟合,得关系式如表 5 所示,可为就地热再生混合料低温性能设计提供参考。

表 4 所统计各量变异系数

项目	矿料配比/%		油石 比/%	再生剂 掺量/ %	沥青混合料性能检验结果				
	新料	回收料			稳定 度/kN (次·mm ⁻¹)	动稳定度/ 度/kN (次·mm ⁻¹)	残留稳 定度/%	TSR/ %	破坏应 变/μϵ
均值	18.957	81.043	5.046	5.239	12.266	4 425.191	86.350	82.296	3 130.571
标准差	12.651	12.651	0.792	2.678	2.577	2 660.210	5.062	6.376	940.781
变异系数	0.66	0.15	0.15	0.51	0.21	0.60	0.05	0.07	0.30

表 5 残留稳定度、TSR 与旧料配比及油石比相互关系

项目	关系式	相关系数 R ²
旧料配比与残留稳定度、TSR	$Y_1=330.045\ 9X_1-2.434\ 8X_2-2.743\ 9X_1X_2+0.025\ 6$	0.929
油石比与残留稳定度、TSR	$Y_2=29.234\ 2X_1-0.319\ 8X_2-0.248\ 8X_1X_2+0.003\ 3$	0.974

注: X₁、X₂ 分别为残留稳定度、TSR; Y₁、Y₂ 分别为旧料配比及油石比。

4 路面结构设计

从当前预防性养护工程实际效果来看,由于不改变路面的标高,再生沥青混合料的设计普遍围绕材料的路用性能进行,没有考虑原路面结构的实际情况,如面层和基层模量,导致即使使用相同的再生层混合料设计,但由于路面结构不同而呈现出不同的力学响应。现有研究对于再生沥青路面结构略有涉及,Imran Hafeez 认为再生后路面的硬度增加是由于再生剂的使用提高了混合料模量值,因此提升了路面的抗车辙

和抗裂缝能力。沙爱民等认为路面单一结构层模量的提高会使结构层层底弯拉应力产生较大波动,影响路面的疲劳寿命。赵延庆等认为基于动态模量的分析与路面黏弹性理论相近,路表弯沉峰值和基层水平应力峰值的相对误差较小,并建议以动态模量为参数进行路面结构的分析与设计。传统沥青路面就地热再生技术,没有考虑路面结构设计问题,对新路面结构下的各层力学响应不甚明朗,往往是按照沥青混合料材料性能进行设计,未涉及路面结构模量组合研究,这样的养护路面在投入使用后,易再度出现不同程度的病害问题,降低路面养护效果。

目前中国对就地热再生结构设计方面的研究较少,实体工程中对就地热再生面层结构的考虑,主要集中在模量反算方面。模量反算是依据模量匹配的设计思想,分阶段考虑再生层模量、中下面层模量和原路表弯沉对沥青路面结构力学响应的影响。基于模量匹配原则,给出各因素影响下沥青路面结构层的力学响应模型,建立相应的疲劳开裂、车辙设计指标和标准,从而形成基于模量匹配的就地热再生沥青路面结构设计方法。其主要研究内容为:

根据试验得到的上中、中下、中心面层回弹模量,计算面层的各层模量。假定路面面层为各向均质的弹性体,面层分为 3 层,忽略各层重量,层间完全连续,原路面钻取的芯样结构层如图 2 所示。各结构层的特性参数见表 6。

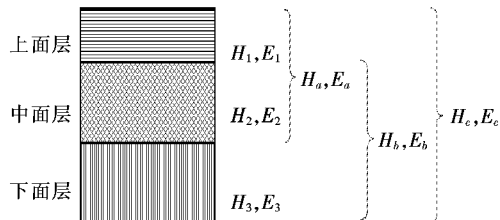


图 2 芯样厚度及模量示意

表 6 各结构层参数示意

层位	应力	应变	竖向变形	高度	弹性模量
上面层	s_1	ϵ_1	ΔH_1	H_1	E_1
中面层	s_2	ϵ_2	ΔH_2	H_2	E_2
下面层	s_3	ϵ_3	ΔH_3	H_3	E_3
上中面层	s_a	ϵ_a	ΔH_a	H_a	E_a
中下面层	s_b	ϵ_b	ΔH_b	H_b	E_b
面层整体	s_c	ϵ_c	ΔH_c	H_c	E_c

表 7 就地热再生沥青路面结构设计指标和标准

沥青路面 结构类型	疲劳开裂		车辙		剪切破坏	
	设计指标	设计标准	设计指标	设计标准	设计指标	设计标准
柔性基层	面层底部 水平拉应变	$N_{f1} \leq N_{e1}$	土基顶面 竖向压应变	$\epsilon \leq [\epsilon]$	沥青面层 最大剪应力	$\tau \leq [\tau]$
半刚性基层	基层 水平拉应力	$N_{f2} \leq N_{e2}$	沥青层 永久变形	$RD \leq [RD]$	沥青面层 最大剪应力	$\tau \leq [\tau]$

5 中国研究方向

以知网专利检索作为参考依据,对中国就地热再生主要研究方向进行探讨。就地热再生相关发明专利

根据线弹性理论可知:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{\Delta H}{H} \tag{3}$$

式中: E 为弹性模量; σ 为应力; ϵ 为应变; F 为竖向作用于结构的力; A 为力的作用面积; ΔH 为结构产生的竖向形变; H 为结构原始高度。

推导出 E_c 与各层高度 H 和模量 E 的关系如下:

$$E_c = \frac{(H_1 + H_2 + H_3)E_1E_2E_3}{H_1E_2E_3 + E_1H_2E_3 + E_1E_2H_3} \tag{4}$$

当 H_1 、 H_3 分别为零时, E_c 表示中下、上中面层芯样的模量,见式(5)、(6)。

$$E_b = \frac{(H_2 + H_3)E_2E_3}{H_2E_3 + H_3E_2}, H_1 = 0 \tag{5}$$

$$E_a = \frac{(H_1 + H_2)E_1E_2}{H_1E_2 + H_2E_1}, H_3 = 0 \tag{6}$$

当各层高度和上中面层、中心面层和中下面层模量已知,可求得上、中、下面层模量。

其构建出的就地热再生沥青路面结构设计方法的设计指标和标准见表 7。

就地热再生设计是在综合考虑原路面材料、原路面结构、病害类型及破损程度的基础上,以提高路面行驶质量为目标,延长道路使用寿命,整体提升道路使用品质的预防性养护技术,在中国尚未出版就地热再生规范的大环境下,在实体工程设计中,以就地热再生混合料设计为基础,引入其结构设计,更好地为预防性养护工程服务。

主要为新型材料开发、施工工艺及方法和设备与装置开发 3 个方面。通过知网检索,2004—2017 年相关专利类型与数量如表 8 所示。

由表 8 可知:

(1) 中国研究者对就地热再生技术进行了大量的

表 8 2004 年—2017 年就地热再生技术相关专利数量统计

项目	不同年份(年)专利数/项														合计/	占比/
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	项	%
新型材料开发	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	4	3
施工工艺及方法	0	0	1	0	1	1	0	2	2	1	1	7	5	4	25	17
设备与装置开发	2	0	0	8	8	3	15	5	9	1	4	17	28	15	115	80
总专利数量	2	0	1	8	9	4	15	7	11	3	5	25	35	19	144	100

研究,从 2004 到 2017 年,就地热再生相关专利数量多达 144 项。其中 2015 年以后 3 年相关专利数目为 79 项,占专利总数量的 55%。即自 2015 年以后,中国对就地热再生技术的研究伴随着其在全国范围内的推广而迅速增加,同时体现出就地热再生技术具有良好的可推广性。

(2) 就地热再生技术在实际工程应用中,需要特有设备和装置进行施工,对设备的依赖性大,因此其相关发明专利中设备与装置开发相关专利较多,为 115 项,占总数的 80%,施工工艺及方法相关专利较少,为 25 项,占专利总数的 17%;新型材料开发的专利很少,为 4 项,占专利总数的 3%,也反映出就地热再生技术对新材料开发依赖性较低,与其他热再生技术所用材料无太大差别。

(3) 就地热再生技术主要是以一种良好的路面功能修复工艺而被道路工作者青睐。其特有的施工设备和装置的研究,对就地热再生技术的发展至关重要。2014 年之前其设备开发的专利数量大致与专利总数量相等,对就地热再生技术的研究主要集中在施工设备及装置方面,而 2014 年之后中国研究者对该技术的研究不再局限于设备。

(4) 就地热再生技术是一种重要的预防性养护技术,随着在实体工程中的应用增多,凭借其良好的经济和环境效益及养护效果,其相关专利数量从 2004 年开始呈现逐年递增趋势,在 2016 年专利数量达到峰值,在 2017 年有所下降也表明:对就地热再生技术的研究趋缓,标志着中国就地热再生技术应用已经日渐成熟。

6 实体工程应用及再生效果

系统梳理中国典型实体工程结构层类型及实际应用效果,对 2002—2015 年中国就地热再生工程进行统计分析,经过大量文献调研,共统计到中国内地 42 个就地热再生实体工程,分别分布于 19 个省份及直辖市,具体结果见表 9。

由表 9 可知:

(1) 据不完全统计,中国除港澳台地区以外 31 个省级地区,已经有 19 个省份采用就地热再生技术,占比高达 61.3%。就地热再生技术因其具有环保性、工期短、费用省、效率高、质量能达到要求等特点,已经在中国大范围内推广使用,具有良好的经济、环境、社会效益。

(2) 从 2002 年京津唐高速公路首次采用了沥青路面就地热再生工艺开始,就地热再生工程呈现逐年增多趋势,2010 年后铺筑的实体工程数量为 33 个,占统计总数的 78.6%。并且应用于各种不同的路面结构中,其中上面层为 AC-13 路面 21 个,占统计总数的 50%。

(3) 就地热再生工艺应用的道路等级从最开始多用于高速公路,随着技术的不断成熟和施工设备的不断完善,路面病害主要集中在上面层的市政道路和二级公路等一些低等级公路,经过综合考虑,也采用就地热再生施工工艺进行路面养护,如陕西省咸阳市迎宾大道、哈尔滨市通港街等,应用效果良好,同时,在江苏省润扬大桥车辙治理工程等桥面车辙养护方面也有较好的应用。

(4) 从就地热再生工艺总体应用效果来看,使用就地热再生后,对原路面的病害进行了充分的治理,路面修复效果良好比例达到 97.5%,主要集中在对沥青路面压实度、平整度、构造深度、摩擦系数、渗水系数等方面的修复,路面的路用性能得到了很大的提高,降低了路面病害反射、复发的概率,延长了道路使用寿命。

(5) 随着就地热再生工艺的不断成熟和中国需要养护的沥青路面剧增,就地热再生技术在未来沥青路面养护工程中,将会有越来越广泛的应用,具有很好的市场前景。

7 结论

(1) 就地热再生技术以改善已产生裂缝、坑槽、车

表 9 中国内地典型就地热再生实体工程及使用效果调查

省市	实体工程名称	施工年份/年	路面结构	再生剂种类	再生效果
北京市	京津唐高速公路	2002			良好
北京市	北京长安街沥青路面	2009	SMA-10 沥青路面		良好
河北省	石太高速公路	2004	表面层 AC-16		良好
河北省	石安高速公路	2010	路面结构为 4 cm A-13+4 cm SAC-16 + 5 cm SAC-20 + 6 cm SAC-25		良好
河北省	石家庄青园街	2010	5 cm AC-13+AC-20		良好
辽宁省	连云港 G310 线港城大道 K18+720~K25+472	2010	6 cm+4 cm +5 cm 的沥青混凝土面层		良好
辽宁省	哈尔滨市通港街	2012			良好
江西省	昌九高速公路 K598+330~K603+700	2013	SBS 改性沥青路面结构	SZS 再生剂	良好
江西省	武吉高速公路	2015	4 cm 改性沥青 AC-13+6 cm 改性沥青 AC-20+8 cm 普通沥青 AC-25+8 cm 普通沥青 ATB-25	鞍山双成科技 SZS 再生剂	良好
广东省	广澳高速公路广珠段	2009	半刚性基层 AK-16 沥青路面		良好
广东省	京珠高速广珠段	2009	路面面层结构为 4 cm 普通沥青 AK16+5 cm 普通沥青 AC-20 I +6 cm 普通沥青 AC-20 II		良好
广东省	机荷高速公路	2011	半刚性基层 AK-16 沥青路面	RA100 沥青再生剂	良好
广东省	珠海迎宾南路	2013	3 cm AC-13 改性沥青混凝土	RAF0020	良好
广东省	东莞市 G9 411 高速公路 GK5+000~GK25+000 段	2015	沥青路面为 AC-13		良好
贵州省	贵州某省道 K114+000~K165+850	2015	半刚性基层 AK-16 沥青路面		良好
广西省	广西高速公路	2014	4 cm AC-13 细粒式沥青混凝土+5 cm AC-13 中粒式沥青混凝土+6 cm AC-13 粗粒式沥青混凝土		良好
江苏省	润扬大桥车辙治理工程	2009	SBS 改性沥青 SMA-13		良好
江苏省	锡澄高速养护工程	2009	路面面层结构为 4 cm AC-13+6 cm AC-16 +6 cm AC-20		良好
江苏省	南京洪武北路	2010	上面层为 3 cm AC-13, 中面层为 5 cm AC-16, 下面层为 5 cm 沥青碎石		良好
江苏省	南京绕城高速公路	2010	5 cm AC-16 改性沥青玄武岩上面层, 7 cm AC-20 中面层		良好
江苏省	汾灌高速公路	2013	4 cm AK-13+6 cm AC-20+7 cm AC-25 I		良好
江苏省	312 国道无锡段	2015	路面面层结构为 4 cm SMA-13+6 cm SUP20+8 cm SUP25	鞍山森远再生剂	良好
安徽省	庐铜高速公路养护工程	2013		SBR 胶乳	良好
山东省	济南玉函高架桥沥青面层	2009	3 cm AC-10 沥青混合料面层		良好
山东省	S323 一级公路	2010	4 cm 普通沥青 AC-13+7 cm 普通沥青 AC-20		良好

续表 9

省市	实体工程名称	施工年份/年	路面结构	再生剂种类	再生效果
内蒙古	G6 京藏高速呼包段高速公路 K451+000	2011	路面结构为 AC-16 沥青混凝土 4 cm 上面层、AC-16 沥青混凝土 5 cm 中面层、AC-20 沥青混凝土 6 cm 下面层		良好
陕西省	咸阳市迎宾大道	2015	表面层:细粒式沥青混凝土 AC-13 4 cm;下面层:粗粒式沥青混凝土 AC-25 5 cm;		良好
新疆省	小草湖至托克逊段	2011	路面结构采用 4 cm 中粒式沥青混凝土 + 6 cm 粗粒式沥青混凝土 + 20(30) cm 水泥稳定砂砾 + 天然砂砾	添加了防车辙剂	良好
新疆省	新疆 S221 塔城—额敏公路	2012	3 cmAC-13 沥青混凝土上面层+4 cmAC-13 下面层		良好
新疆省	新疆某级公路	2014	4 cmAK-13 + 6 cmAC-20		良好
新疆省	土乌大高速	2015			良好
湖南省	湖南临长高速公路	2012	5 cmAC-16 改性沥青玄武岩 + 7 cmAC-20 + 7 cm AC-25		良好
湖南省	湖南潭邵高速公路	2012	4 cmAC-13 + 5 cmAC-16 + 6 cmAC-20 I		良好
湖南省	常张高速公路常德段	2014	半刚性基层改性沥青路面		良好
湖南省	长沙黄花机场滑行道	2014	6 cmSMA + 9 cmAC-20		良好
湖北省	汉十高速公路	2007		ZS 型再生剂	良好
青海省	青海平阿高速公路	2015	4 cmAC-13 + 5 cmAC-16 + 6 cmAC-20		良好
黑龙江省	哈尔滨市红旗大街东至路口至长江路口旧路改建工程	2014	4 cmAC-16 上面层	辽宁鞍山再生剂	一般
海南省	海南东线高速公路府城至琼海段	2011	4 cmAK-16 上面层	再生剂 OP-1100、OP-900、SB-1	良好
陕西省	黄延高速	2017	4 cmAC-13 上面层		良好
重庆市	G318 国道	2015			良好
重庆市	璧山区璧青路	2017			良好

辙的沥青路面的形状和混合料性质为目的,一般是在路面的损坏程度还没波及到基层时采用这种维修方法,并且就地热再生技术也存在着对再生机械要求高,对气候依赖性强,不易于施工控制等缺点。

(2) 就地热再生混合料设计主要包括 3 个方面:再生剂用量控制、级配控制及最佳油石比控制。该文通过对现有研究的分析总结,得出由于就地热再生工艺是在原路面的基础上进行的养护工程,各统计量随着原路面不同差别较大,并用数学统计的方法得到残

留稳定度、TSR 与旧料配比及油石比的关系式,以期就地为就地热再生混合料低温性能设计提供参考。

(3) 就地热再生设计是在综合考虑原路面材料、原路面结构、病害类型及破损程度的基础上,以提高路面行驶质量为目标,延长道路使用寿命,整体提升道路使用品质的预防性养护技术,在中国尚未出版就地热再生规范的大环境下,在实体工程设计中,以就地热再生混合料设计为基础,引入其结构设计,更好地为预防性养护工程服务。

(4) 中国对就地热再生技术的研究主要集中在施工设备及装置方面,自2017年后,对就地热再生技术的研究趋缓,标志着中国就地热再生技术应用已经日渐成熟。

(5) 就地热再生技术已经在中国大范围内开始推广使用,整体使用效果良好,具有良好的经济、环境、社会效益。

参考文献:

- [1] 中石化沥青情报站.交通运输部印发《关于加快推进公路路面材料循环利用工作的指导意见》[J].石油沥青,2012(6).
- [2] 李红英.就地热再生技术在沥青混凝土路面预防性养护中的应用[J].公路,2012(7).
- [3] 沈国印.沥青混凝土路面再生利用试验分析[J].公路,2003(5).
- [4] Campbell R. Asphalt in Pavement Maintenance[J]. The Asphalt Handbook, 2007: 569—616.
- [5] Griffiths C T, Krstulovich Jr J M. Utilization of Recycled Materials in Illinois Highway Construction[R], 2002.
- [6] 汤磷.沥青路面再生设备自动控制系统的研究[D].武汉理工大学硕士学位论文,2006.
- [7] 张文会.沥青路面厂拌热再生技术研究[D].长安大学硕士学位论文,2004.
- [8] 拾方治,孙大权,吕伟民.沥青路面再生技术简介[J].石油沥青,2008(5).
- [9] 李胜强.厂拌热再生沥青混合料路用性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2009.
- [10] 日本道路协会.日本路面废料再生利用技术指南[M].王元勋,张文魁,译.北京:人民交通出版社,1990.
- [11] Su K, Hachiya Y, Maekawa R. Study on Recycled Asphalt Concrete for Use in Surface Course in Airport Pavement[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 54(1): 37—44.
- [12] 何锋,李严,戴合理.就地热再生技术在高速公路路面养护中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2012(6).
- [13] 江燕青.沥青路面就地热再生技术的研究[D].长安大学硕士学位论文,2006.
- [14] 范勇军.沥青混合料厂拌热再生技术研究[D].长沙理工大学硕士学位论文,2007.
- [15] 欧阳自强.典型沥青再生剂性能研究与评价[D].重庆交通大学硕士学位论文,2016.
- [16] 黄晓明,赵永利,江臣.沥青路面再生利用试验分析[J].岩土工程学报,2001(4).
- [17] 吕乐宁,成高立.路面就地热再生沥青混合料配合比设计[J].公路交通科技(应用技术版),2017(9).
- [18] 张军仁,张兴军,任小遇.就地热再生沥青混合料配合比优化设计及性能研究[J].中国建材科技,2017(4).
- [19] 郑育新.加铺型就地热再生沥青混合料配合比设计与施工[J].黑龙江交通科技,2017(7).
- [20] 马君科,王冕,张永宁,等.就地热再生沥青混合料配合比设计[J].公路交通科技(应用技术版),2017(6).
- [21] 巫裕润,陈琨.复拌型就地热再生沥青混合料配合比设计及质量控制[J].筑路机械与施工机械化,2017(5).
- [22] 易忠平.沥青路面就地热再生混合料配合比设计研究[J].江西建材,2017(6).
- [23] 郭平,李艳,张娟,等.复拌型就地热再生沥青混合料的路用性能研究[C].中国公路学会养护与管理分会第六届学术年会论文集(上卷),2016.
- [24] 张广,李艳,马庆伟.复拌型就地热再生沥青混合料配合比设计与路用性能研究[J].青海交通科技,2015(6).
- [25] 王礼珍,李艳,马庆伟,等.复拌型就地热再生沥青混合料的配合比设计研究[J].筑路机械与施工机械化,2015(12).
- [26] 张娟,郭云锋,郭平.就地热再生沥青混合料配合比设计研究[J].石油沥青,2015(4).
- [27] 陈舟宇,朱祖煌,周勤.就地热再生沥青混合料配合比优化设计研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015(5).
- [28] 武鹤,孙凌,魏建军,等.就地热再生沥青混合料配合比设计研究[J].公路,2014(10).
- [29] 刘占广,张崇高.沥青路面就地热再生配合比设计及施工工艺[J].公路交通科技(应用技术版),2008(6).
- [30] 符适,舒开东.就地热再生沥青混合料配合比设计[J].现代交通技术,2007(2).
- [31] 马登成,任化杰,马尉倘.沥青路面就地热再生混合料级配优化设计[J].公路交通科技,2014(8).
- [32] 张清平,周志刚,李炎炎,等.海南地区就地热再生沥青混合料的路用性能试验研究[J].中外公路,2011(2).
- [33] Imran Hafeez, Hasan Ozer, Imad L. Al-Qadi. Performance Characterization of Hot In-Place Recycled Asphalt Mixtures[J]. J. Transp. Eng., 2014, 140(8).
- [34] 周庆华,沙爱民.高模量沥青混凝土路面疲劳研究[J].土木工程与管理学报,2013(1).
- [35] 赵延庆,刘慧,白龙,等.沥青混合料本构关系对路面力学响应的影响[J].中国公路学报,2012(5).
- [36] 李俊杰.基于模量匹配的就地热再生沥青路面结构设计方法[D].重庆交通大学硕士学位论文,2011.