

就地冷再生技术在高速公路养护工程中的应用研究

杨振海¹, 徐 亚¹, 蔡海泉^{2,3}, 王鸿森^{2,3}, 朱浩然^{2,3}

(1. 江苏宁宿徐高速公路有限公司, 江苏 宿迁 223814; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112;
3. 新型道路材料国家工程实验室, 江苏 南京 211112)

摘 要: 就地冷再生技术具有施工便捷、污染小、旧料回收利用率高、节约成本等优势,在公路养护中得到了利用。以 S49 新扬高速为例,从适用条件、混合料设计、路用性能验证以及社会经济效益等方面,对就地冷再生技术进行系统研究,结果表明就地冷再生技术在高速公路养护工程中应用效果理想,可进行推广运用。

关键词: 乳化沥青;就地冷再生;混合料设计;路用性能;经济效益

中图分类号: U418.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)02-0181-05

1 概 述

随着我国基础设施建设的迅猛发展,公路事业逐步从建养护并重进入以养为主的新时期。传统的铣刨重铺技术,旧料被大量废弃,造成了资源浪费,也带来了严重的环境污染。路面再生技术凭借特有的优势应运而生,其中,就地冷再生技术因其能够 100% 循环利用废料,节约资源,缩短工期,且交通影响小,节省投资等优点,已应用于部分公路的养护工程中。

目前工程案例中绝大部分冷再生技术应用于基层,应用于面层的研究仍较少。本文结合 S49 新扬高速公路养护工程,开展就地冷再生技术在沥青层的应用研究,提出混合料设计的关键指标要求,并对路用性能进行验证,分析其经济效益,为就地冷再生技术在高速公路养护工程中推广应用提供借鉴和参考。

2 旧路状况评价及再生方案

2.1 旧路状况评价

乳化沥青就地冷再生技术应用于 S49 新扬高速新扬方向,试验段共计 3.7 km,原路面采用“4 cm AC-16I+5 cm AC-25I+7 cm AC-25 II”三层普通沥青的结构形式,2019 年年平均日交通量达到 22 774 veh/d,依据相关规范对交通荷载分级规定,交通荷载等级为重。路面使用性能状况如下,

其中车辙状况较差,中面层车辙贡献度为 47.06%,同时,汉堡车辙试验结果显示中面层混合料高温性能已经出现衰减,见表 1、表 2。

表 1 原路面使用性能状况

路面破损 状况 PCI	路面车辙 状况 RDI	路面抗滑 性能 SRI	路面结构 强度 PSSI
95.74	80.11	90.71	100

表 2 原路面中面层状况

车辙贡献度 /%	中面层汉堡车辙 /mm
47.06	6.97

2.2 再生方案

基于旧路状况评价结果,试验段中面层状况较差,需处理至中面层。由于就地冷再生施工后混合料密度(约 $2.15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)较热拌低,再生层厚度较原面层厚度有所增加,为保持原路面标高一致,因此在养护路段采用先铣刨 1 cm 上面层后,再生 3 cm AC-16I+5cm AC-25I 后整体加铺罩面 4 cm SMA-13 的方案,再生层作为中面层使用,见图 1。

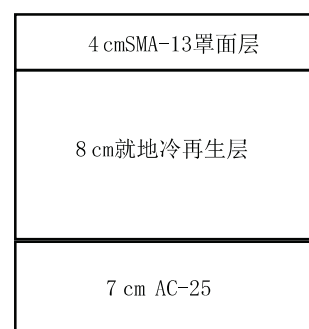


图 1 就地冷再生路面结构形式

收稿日期: 2020-06-22

作者简介: 杨振海(1969—),男,高级工程师,从事道路建设、养护管理工作。

3 混合料设计及性能评价

3.1 原材料性能

原材料主要包括乳化沥青、RAP料、水泥、矿粉和水。采用慢裂改性乳化沥青以提高再生混合料的质量,改性乳化沥青的技术指标及要求见表3,水泥满足相应技术标准见表4。

表3 乳化沥青试验结果			
试验项目	试验结果	技术要求	试验方法
筛上剩余量 (1.18 mm 筛)/%	0.10	≧0.1	T0652-1993
破乳速度	慢裂	慢裂	T0658-1993
储存稳定性:1 d/%	0.3	≧1	T0655-1993
储存稳定性:5 d/%	0.5	≧5	T0655-1993
粒子电荷	阳离子 (+)	阳离子 (+)	T0653-1993
与粗集料的黏附性	>2/3	≧2/3	T0654-2011
与矿料拌和	均匀	均匀	T0659-1993
蒸发残留物含量 /%	65.7	≧62	T0651-1993
针入度 25℃ 0.1 mm	63	50-150	T0604-2011
蒸发 残留物	溶解度 /%	≧97.5	T0607-2011
	15℃延度 /cm	≧40	T0605-2011

RAP料为铣刨料,主要包括:0~9.5 mm 细铣刨料和9.5~26.5 mm 粗铣刨料。无新材料添加,各项指标均能满足要求,水泥采用普通硅酸盐水泥 P.O 42.5。RAP、水泥和矿粉筛分结果见表5。

3.2 混合料设计

(1)级配组成

参考相关规范的级配范围以及工程案例经验,初

表4 水泥基本技术指标

水泥性能		技术要求
出磨时安定性		蒸煮法检验合格
标准稠度需水量 /%		≦30
细度 (80 μm)/%		筛余量≦10
初凝时间 /h		≧1.5
终凝时间 /h		≦10
3 d 强度 /MPa	抗折	≧3.5
	抗压	≧16
28 d 强度 /MPa	抗折	≧6.5
	抗压	≧42.5

选的再生混合料的配合比为粗铣刨料:细铣刨料:水泥:矿粉=35.4%:60.1%:1.5%:3%,合成级配见表6。

(2)确定最佳含水率、最佳乳化沥青用量

在级配设计的基础上,参考《公路沥青路面再生技术规范》确定再生混合料的最佳含水量及最佳乳化沥青含量。首先拟定乳化沥青掺量为4.0%,分别选择不同的含水量进行拌合试验,对应的最佳含水率为2.6%,在最佳含水率的基础上,以预估的沥青用量为中值,变化不同的乳化沥青用量,进行空隙率、15℃劈裂强度试验,结果见图2、图3,确定最佳乳化沥青用量为3.8%。

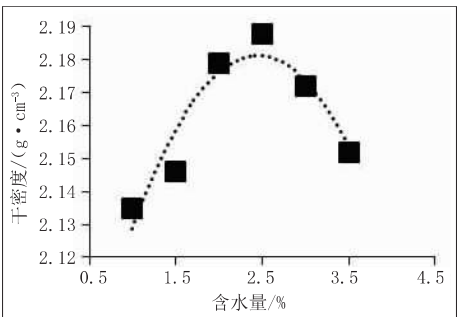


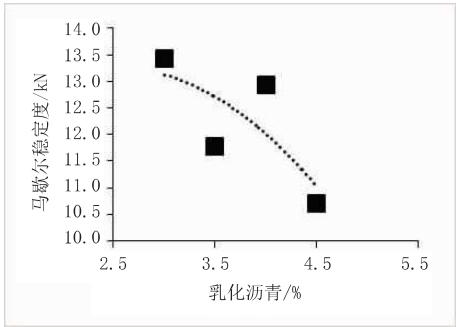
图2 拌和试验结果

表5 原材料筛分试验结果

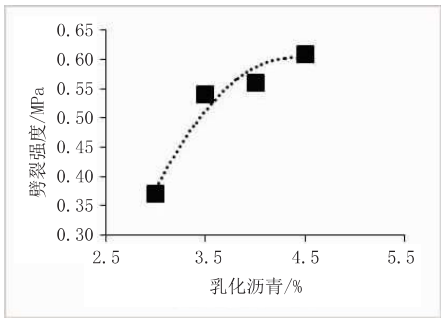
矿料	通过筛孔(方孔筛, mm)百分率 /%												
	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
粗 RAP	100	98.3	87.0	75.6	56.3	11.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0
细 RAP	100	100	100	100	100	100	82.2	52.0	28.6	12.3	3.2	1.0	0.4
水泥	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.7	98.2
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.2	91.4	82.8

表6 合成级配表

通过率 /%	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配	100.0	98.4	84.6	77.3	68.5	55.2	43.7	29.5	18.5	10.9	6.5	5.2	4.7
级配上限	-	100	-	-	80	-	60	45	-	-	-	20	7
级配下限	-	80	-	-	60	-	25	15	-	-	-	3	1



(a)马歇尔稳定度变化趋势



(b)劈裂强度变化趋势

图3 马歇尔试验、劈裂试验结果

(3)性能验证

在混合料设计的基础上,对乳化沥青再生混合料的高温及抗水损害性能进行验证,水稳定性采用冻融劈裂试验、高温稳定性采用动稳定度试验分别验证,结果表明:冻融劈裂强度比能够满足要求,抗水损害能力较好;同时,动稳定度达到2 758次/mm,表明乳化沥青再生混合料的抗车辙能力较强,能够用于中面层,见表7。

表7 试验验证结果

路段	马歇尔 稳定度 /kN	空隙率 /%	残留 稳定度 /%	干劈裂 强度 /MPa	干湿劈 裂强度 比/%	冻融劈 裂强度 比/%	动稳 定度/ (次·mm ⁻¹)
S49	6.21	10.1	98.2	0.72	90.3	78.2	2 758
技术要求	≥6.0	8~13	≥75	≥0.5	≥80	≥75	≥2 000

表9 永久变形与围压的相关性

1 : 1			1 : 2			1 : 3		
a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
0.006 6	0.027 6	0.923 2	0.011 3	-0.121 4	0.917 9	0.010	0.032 3	0.964 2

表10 回弹模量与围压的相关性

1 : 1			1 : 2			1 : 3		
a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
1.005 4	48.992	0.989 3	1.464 2	69.303	0.956 8	2.424 7	64.748	0.991 5

3.3 路用性能研究

3.3.1 高温性能

本文研究采用动态蠕变试验、重复三轴试验评价再生混合料的高温性能。

(1)动态蠕变试验

采用UTM-25设备进行动态蠕变试验,温度为50℃,旋转压实30次成型,试件尺寸为直径100 mm、高150 mm。考虑到乳化沥青冷再生混合料的材料性质,采用围压为138 kPa,偏应力为700 kPa。试验结果表明再生混合料的累积应变经历了较为明显的三阶段,高温稳定性较好,见表8、图4。

表8 动态蠕变试验结果

第一阶段		第二阶段		F(n)	累积 变形 /mm
模型	终止 点	模型	起始 点 终止 点		
$y=805.68x^{0.500\ 4}$ $R^2=0.990\ 1$	72	$y=67.68x+773.91$ $R^2=0.979\ 1$	72 280	280	7.5

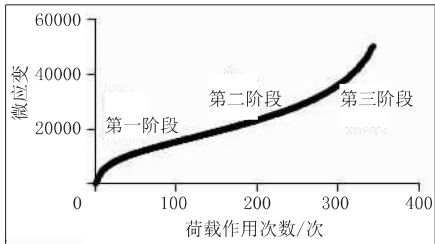


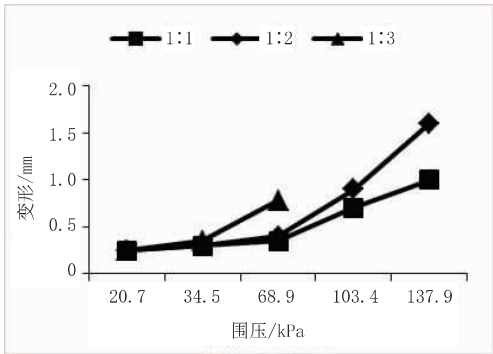
图4 动态蠕变试验结果

(2)重复三轴试验

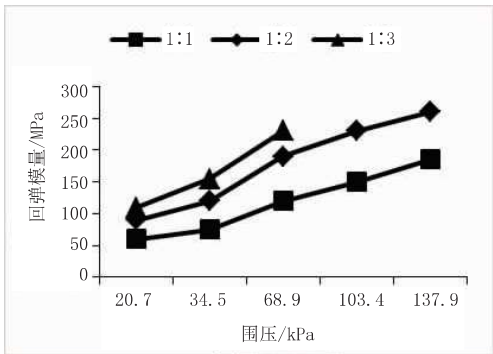
采用旋转压实30次成型,试件尺寸为φ100 mm×150 mm,试验温度为50℃。为了较好的反映路面的实际工作状态,分析试件在 $p_c:p_a$ (围压:偏应力+接触应力)为1:1、1:2、1:3三种应力状态下的永久变形和回弹模量的变化规律,再生混合料的剪切试验结果见表9~表11和图5,分析结果表明:在不同的应力状态下,永久变形、回弹模量与围压均有较好的线性相关性,同时再生混合料的破坏应力较大且破坏应变较小,具有较优的抗剪切性能。

表 11 剪切试验结果

试验结果	乳化沥青冷再生混合料
破坏应力 /kPa	230.3
破坏应变 /10 ⁻²	0.344



(a)不同应力比和围压下的永久变形



(b)不同应力比和围压下的回弹模量

图 5 重复三轴试验结果

3.3.2 低温性能

采用低温弯曲破坏试验评价再生混合料低温性能,试验温度为-10℃,加载速率为50 mm/min,尺寸符合长250±2 mm、宽30±2 mm和高35±2 mm。低温弯曲试验结果表明:再生混合料的低温性能表现较好,抗弯拉强度较高,结合国内的研究成果^[1],确定当乳化沥青冷再生混合料用作沥青面层时,其破坏应变应不小于2 000 με,见表12。

表 12 低温弯曲试验结果

跨中挠度 /mm	抗弯拉强度 /MPa	破坏应变 /(×10 ⁶)	弯曲劲度模量 /MPa	临界弯曲应变 /(kJ·m ⁻³)
1.031	2.45	5 415	452.5	2.0

3.3.3 力学性能

本文研究采用劲度模量试验、单轴压缩试验评价再生混合料的力学性能。

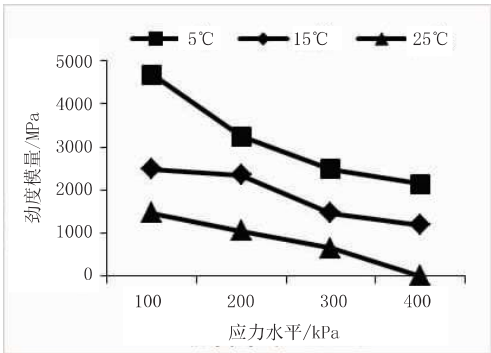
(1)劲度模量试验

采用再生混合料进行间接拉伸劲度模量试验,试件直径100 mm,高63.5±2.0 mm,试验温度分

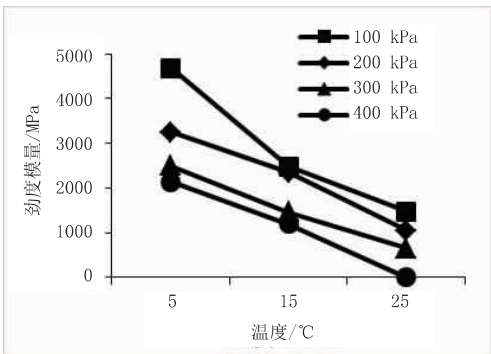
别5℃、15℃和25℃,应力水平分别为100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa。泊松比在再生混合料充分养生的基础上采用热拌沥青混合料的泊松比,试验结果表明:应力水平、温度与劲度模量均具有较好的线性相关性。同时,随着应力水平的增加,模量逐渐减小;随着温度的升高,模量逐渐降低,见表13和图6。

表 13 泊松比

温度 /℃	≤10	15	20	25	30
泊松比	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45



(a)劲度模量 - 应力水平关系



(b)劲度模量 - 温度关系

图 6 劲度模量试验结果

(2)单轴压缩试验

采用旋转压实30次成型φ100 mm×100 mm的圆柱体试件,试验设备采用MTS。按照相应规范中的试验方法测定再生混合料15℃和20℃时的抗压回弹模量与无侧限抗压强度,试验结果表明:随着温度的升高,抗压强度下降0.39 MPa,抗压回弹模量降低约22%,见表14。

表 14 单轴压缩试验结果

水泥 /%	抗压强度 /MPa		抗压回弹模量 /MPa	
	15℃	20℃	15℃	20℃
1.5	2.25	1.86	1 427	1 114

3.3.4 疲劳性能

采用间接拉伸试验评价混合料的疲劳性能,试

验温度为 15℃,加载恒定水平应力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa,试件尺寸为直径 100 mm、高 63.5±2 mm,由于缺乏对冷再生混合料材料性质的认知,拟定竖向变形达到 10 mm 作为疲劳破坏的标准,记录荷载作用的次数。试验结果表明:混合料的疲劳寿命较高,同时,在高应力水平 300 kPa 和 400 kPa(应力比约 0.4 和 0.55)的条件下表现出一定的脆性,见表 15、图 7。

表 15 间接拉伸疲劳试验结果

应力水平 σ/kPa	应力比	疲劳寿命 $N_f/\text{次}$	疲劳方程	相关系数的平方
100	0.13	22110	$N_f=2E+12\cdot\sigma^{-3.929\ 5}$	0.982 1
200	0.27	2660		
300	0.40	421		
400	0.53	88		

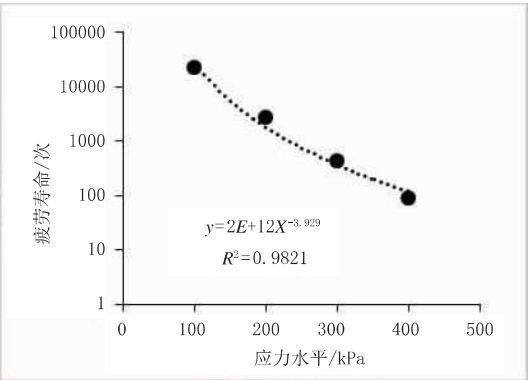


图 7 疲劳试验结果($\lg N_f-\sigma$)

3.3.5 抗松散性能

松散是目前再生混合料应用于路面后的主要问题之一。本文采用国外普遍采用的抗松散仪评价混合料的抗松散能力,依据规程 ASTM D 7196-06,旋转压实 30 次,养生温度为 25℃,养生时间 4 h±5 min。试验结果表明:再生混合料的松散损失率为 1.5%,满足不大于 2%的要求,表现出较好的抗松散性能。

4 经济社会效益分析

4.1 经济性分析

根据当地的经济状况和材料价格,对乳化沥青就地冷再生、铣刨重铺两种方案的经济性进行对比分析。S49 新扬高速就地冷再生层厚度 8 cm,对比同样厚度的铣刨重铺技术,结果表明,乳化沥青就地冷再生方案,相比于铣刨重铺技术减少了集料、沥青等原材料及相关运输费用,成本降低了 70%,见表 16。

表 16 两种方案造价对比 单位:元/m²

费用组成	就地冷再生	铣刨重铺
沥青	97.06	104.26
纤维	5.29	5.29
集料	32.34	52.06
水泥	1.32	0
运输	0	84.2
混合料拌和	14.69	15.9
摊铺	1.8	1.73
碾压	1.32	1.11
铣刨	5.5	5.5
合计	159.32	270.12
税费及其他	28.68	48.62
总价	188.00	318.74

4.2 环境效益分析

本文基于寿命周期评价(LCA)选择能耗、碳排放作为测算指标,计算结果表明:乳化沥青就地冷再生技术相较于铣刨重铺技术,能源消耗减少约 72%,二氧化碳当量排放减少约 64%,见表 17。

表 17 环境效益对比

施工过程	乳化沥青就地冷再生		铣刨重铺	
	能耗 / (MJ·m ⁻²)	二氧化碳当量 / (kg·m ⁻²)	能耗 / (MJ·m ⁻²)	二氧化碳当量 / (kg·m ⁻²)
沥青	94.01	5.85	92.19	5.68
集料	8.83	0.67	13.65	1.04
水泥	13.73	3.6	—	—
运输	—	—	112.15	10.44
混合料拌和	85.94	7.14	145.69	12.15
摊铺	4.38	0.33	4.38	0.33
碾压	5.81	0.43	5.81	0.43
铣刨	9.87	0.74	9.87	0.74
合计	222.57	18.76	383.74	30.81
资源节约量	普通沥青 / (kg·t)	集料 / (kg·t)	—	—
	31.19	708.81	—	—

5 结 论

本文得到如下结论:

- (1)混合料设计采用马歇尔设计方法,通过拌和试验、干湿劈裂强度试验确定乳化沥青再生混合料的最佳含水量、最佳乳化沥青用量分别为 2.6%、3.8%。
- (2)基于设计结果进行高温性能、低温性能、力学性能、抗疲劳性能等路用性能验证,满足我国再生规范中各技术指标要求。

(下转第 192 页)

其侧根在土壤中的伸延范围也较广。一般来说,轴根系的深入土壤的深度大于须根系,一般木本植物的根深达10~12 m。而生活在沙漠地区的骆驼刺可深入地下20 m,以吸收地下水。单子叶植物如禾本科植物,其须根入土只有20~30 cm。

R 可根据水文地质勘察资料确定,最好通过现场注水试验和水文地质条件相似地区水井的长期观测资料确定。无上述条件时,可以根据渗透系数选择确定。

根据公式代入本文试验条件,得到与实际测定数据的拟合情况,如图2~图4所示,拟合情况较好。

5 软土地基促渗植物选择

对实际工程进行演算如下:

对于直径0.4 m的促渗井,影响半径为25 m,渗透系数选择1 m/d,管井深度选择5 m,为了安全性考虑,注水井深为5 m,降雨强度 Q 选择为5 m³/d,得到浸润水头,见表4。

表4 软土地基淹没水位

距离/m	水透数值	水位埋深/m
2	3.02	1.98
5	2.55	2.45
10	2.34	2.66
15	2.21	2.79

由表4可以看出,利用促渗井,周围2 m处的水位深度埋深为2 m,15 m以外埋深为2.8 m,因此促进周围需要选择深根系植物,单纯草本植物无法利用促渗井的水分。促渗井只能起到储水作用,需要种植灌木和乔木才能发挥软土地基的促渗作用。合适软土地基的乔木和灌木选择与配置如下:

乔木的选择与配置:可分段栽植少量耐涝、耐旱、抗污染的乔木,同时可选择观赏价值高的树种点缀整体景观。此外,乔木的栽植不能影响交通,应选择分枝点较高的树种。上海地区可选用如水杉、池

杉、落羽杉、垂柳、意杨等。

灌木的选择与配置:灌木与乔木及地被搭配种植形成复层植物群落景观,应选择根系发达、抗雨水冲刷、耐旱的种类。上海地区可选用如雀舌黄杨、小叶黄杨、夹竹桃等。

6 结 语

通过对软土地基促渗砂井进行模拟试验、分析计算,得出以下结论:

(1)在总流量一定的情况下,半径大,0.5 m测定位置距离砂井距离较近,浸润水头线较高;半径小,距离砂井距离较远,浸润水头线较低。

(2)管井越深,浸润水头线越高。水量越大,浸润水头线越高。

(3)促渗井周围需要选择深根系植物,单纯草本植物无法利用促渗井的水分。可分段栽植少量耐涝、耐旱、抗污染的乔木,上海地区可选用如水杉、池杉、落羽杉、垂柳、意杨等。灌木应选择根系发达、抗雨水冲刷、耐旱的种类,上海地区可选用如雀舌黄杨、小叶黄杨、夹竹桃等。

参考文献:

- [1] 成旭辉.公路工程软土地基处理技术[J].交通世界,2019(20):66-67.
- [2] 汪亚敏.市政道路软土路基施工处理技术探究[J].绿色环保建材,2019(9):100,102.
- [3] 康帅.袋装砂井处理软土地基固结沉降的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.
- [4] 韩松磊,李田,时珍宝.低影响开发设施提高上海建成区排水能力的模型研究[J].给水排水,2016,52(10):52-56.
- [5] 王静.基于SWMM模型的山地城市暴雨径流效应及生态化改造措施研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [6] 赵春雷.袋装砂井处理软土地基固结沉降的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.
- [7] 赵飞,张书函,陈建刚,等.透水铺装雨水入渗收集与径流削减技术研究[J].给水排水,2011,47(S1):254-258.
- [8] 孟莹莹,王会肖,张书函,等.基于生物滞留的城市道路雨水滞蓄净化效果试验研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(Z1):286-291.

(上接第185页)

(3)就地冷再生技术相比于传统的铣刨重铺技术,费用减少约70%,能源消耗节约72%,二氧化碳当量排放减少约64%,具有显著的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] JTG E20—2019,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

- [2] 曹丽萍,王兴隆,谭忆秋.乳化沥青冷再生混合料初期性能评价[J].石油沥青,2007,21(1):29-33,61.
- [3] 董泽蛟,谭忆秋,曹丽萍.乳化沥青冷再生混合料的室内设计与性能评价研究[J].公路交通科技,2006,23(2):43-47,62.
- [4] JTG/T 5521—2019,公路沥青路面再生技术规范[S].
- [5] 严金海.沥青路面冷再生设计方法及性能评价[D].江苏南京:东南大学,2006.