DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260826

温拌SMA-13烟气排放抑制效果分析

栗　豪,黄　明,董亚平
[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200082]

摘　要: 为解决传统热拌沥青在路面施工中存在的高能耗、高污染问题,推动道路工程的绿色转型,基于拌站、摊铺现场和实验室采集的烟气排放数据,采用定量分析和横向比较法,探究基质沥青复合添加低温改性剂对烟气排放的抑制效果。实验结果表明:拌站和摊铺现场烟气排放中,CO、NO、NO_2、TVOC 含量总平均值分别为 2.255、0.279、0.140、0.068、12.990、6.360、1.596、1.542 mg/m³,NO_2、TVOC 含量相对较低;实验室烟气检测中,相比基质沥青,低温改性沥青烟气排放中,CO、SO_2 和 TVOC 含量分别降低了 87%、100% 和 31%;相比 SBS 改性沥青,低温改性沥青产生烟气中,CO、SO_2、H_2S 和 TVOC 含量分别降低了 75%、100%、7.6% 和 31.3%。综上分析,低温改性沥青可以有效降低沥青路面施工中的烟气排放浓度,达到抑制烟气排放的效果。

关键词: 低温改性沥青;SBS 改性沥青;烟气排放抑制;级配设计;路用性能
中图分类号: U414　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0092-05

Analysis on Flue Gas Emission Suppression Effect of Warm-mixed SMA-13

LI Hao, HUANG Ming, DONGYapin
[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200082, China]

Abstract: To address the problems of high energy consumption and high pollution and advance the green transformation of road engineering, the quantitative analysis and horizontal comparison methods are adopted to explore the inhibitory effect of adding low-temperature modifiers to the base asphalt composite on flue gas emissions according to the flue gas emission data collected from mixing plants, paving sites and laboratories. Experimental results show that the overall average concentrations of CO, NO, NO_2 and TVOC in flue gas emissions from mixing plants and paving sites are 2.255 mg/m³, 0.279 mg/m³, 0.14 mg/m³, 0.068 mg/m³, 12.99 mg/m³, 6.36 mg/m³, 1.596 mg/m³ and 1.542 mg/m³ respectively, and the concentrations of NO_2 and TVOC are relatively lower. Laboratory flue gas tests indicate that compared with base asphalt, the contents of CO, SO_2 and TVOC are reduced by 87%, 100% and 31% respectively in the flue gas emissions of low-temperature modified asphalt. Based on the above analysis, low-temperature modified asphalt can effectively reduce the concentration of flue gas emissions during the construction of asphalt pavement, achieving the effect of suppressing flue gas emissions.

Keywords: low-temperature modified asphalt; SBS modified asphalt; suppression of flue gas emission; gradation design; pavement performance

0　引　言

沥青路面是现代交通基础设施的主要形式,作为全球最大的沥青路面建设市场,中国沥青路面工程每年消耗超 1.35 亿 t 沥青混合料、约 3 000 万 t 道路沥青[1]。其核心材料——热拌沥青混合料(hot mix asphalt,HMA)的生产与铺筑需要在 150~180 ℃的高温下进行,由此带来了一系列问题:首先,加热骨料和沥青需要消耗大量能源,并产生巨量的二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)等温室气体[2];其次,高温过程会逸散出成分复杂的沥青烟,其中含有大量挥发性有机物(TVOC)和强致癌物多环芳烃(PAHs),影响现场及周边人员的身体健康[3-5]。

传统的沥青烟气抑制方法,如温拌沥青技术,通过向基质沥青中加入温拌剂,一定程度上降低沥青材料的施工温度,达到抑制沥青烟气排放的目的。温度是影响沥青烟气排放浓度的关键因素,施工温度每降低 10 ℃,烟气排放量可呈指数下降[6]。但是由于其使用成本高、对于沥青的路用性能也有影响,

收稿日期:2026-07-16
作者简介:栗豪(1998—),男,博士,从事道路沥青摊铺工作。
通信作者:黄明(1985—),男,博士,总工程师,从事路桥工程技术管理工作。电子信箱:lihao20240529@163.com

并未大规模使用。

在此背景下，低温改性聚合物（SBS）沥青技术应运而生，该技术通过物理或化学方法降低沥青的黏度，使混合料能够在较低温度（通常比 HMA 低 20~40 ℃）下进行拌和与压实[7]。这种技术既可以降低能耗和烟气的排放，还能降低聚合物在高温下的降解，保持改性效果。陈俊青[8]围绕有机蜡型温拌剂的应用特性，探究其对改性沥青使用的影响，发现适量添加（1.0%~1.5%）可使拌和温度降低 25~30 ℃，且不会对 SBS 的网络结构产生明显破坏。USP 低温改性剂以高分子树脂、废旧橡胶、表面活性剂及催化剂等材料为主要原料，依托科学配比方案与独特生产工艺加工制备而成[9]。其不仅可以改善施工中沥青造成的烟气污染，还有助于降低沥青的黏度[10]改变沥青结构中分子的相互作用力，达到低温拌和的效果[11]。罗斌[12]发现其应用于道路沥青施工时，能够节约燃料费用 50% 以上，降低碳排放 90% 以上。另一种比较有代表性的是 Sasobit 改性剂，其熔点在 90~120 ℃，当温度超过熔点时，Sasobit 会逐渐融解，降低沥青高温黏性，并增强其与骨料的粘附性[13]。温度较低与熔点时，Sasobit 会结晶成颗粒，从而增强沥青混合料在高温下的抗变形性能[14]。朱沅峰[15]对掺加了 Sasobit 的改性沥青进行研究，发现其降低拌合与压实温度约 20 ℃，减少了施工过程的烟气排放，还提高了高温扛裂变性能。

本文针对热拌沥青在道路施工中的烟气排放问题，对比分析了基质沥青、聚合物（SBS）沥青和低温改性聚合物沥青（SBS）的烟气排放浓度，从而评价低温改性沥青的烟气排放抑制效果和路用性能。

1　原材料和试验方法

1.1　沥青

本文普通沥青选用中石化 70 号 A 级基质沥青，低温改性聚合物沥青（SBS）是由中油路之星提供的 SMA-13，具体指标见表 1，试验严格按照《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40—2004）的要求进行。

表 1　SMA-13 基本技术指标

试验项目	试验结果	技术要求
针入度（25 ℃，100 g，5 s）	22	20~60
延度（5 cm/min，5 ℃）/cm	37	不小于 30
软化点（环球法（5 ℃））	79.5	不小于 42
密度（25 ℃）/（g·cm^{-2}）	1.022	实测记录

1.2　集料

粗集料采用石质坚硬、干净、无风化颗粒、近方形的碎石。细集料取自加工破碎坚固的石屑或机制砂。要求洁净、无风化、无黏土、无杂质，自然级配好，细集料粉尘含量（粒径小于 0.075 mm）的质量百分比不大于 12.5%，其质量技术要求符合设计及规范要求，见表 2、表 3。

表 2　粗集料的基本技术指标

试验项目	实测值	技术要求
压碎值（%）	13.5	不大于 26
针片状含量（%）	8.5	不大于 15
小于 0.075 含量（%）	0.5	不大于 1.0
粘附性	5	不小于 5 级

表 3　细集料的基本技术指标

试验项目	实测值	技术要求
表观相对密度	2.74	不小于 2.5
毛体积相对密度	2.61	—
吸水率	1.74	—

1.3　混合料级配设计

根据热沥青混合料配合比设计方法，对 SMA-13 沥青混合料进行配合比设计，共 4 个热料仓和矿粉，依据生产配比的级配，确定如下级配曲线，见表 4 和图 1。

表 4　试验混合物的级配

筛孔尺寸/mm	设计要求	通过率（%）
		1#仓：2#仓：3#仓：4#仓：矿粉= 14.5：5：37：34：9.5
16	100	100.0
13.2	90 ~ 100	91.3
9.5	50 ~ 75	61.4
4.75	20 ~ 34	28.6
2.36	15 ~ 26	22.7
1.18	14 ~ 24	18.8
0.6	12 ~ 20	14.4
0.3	10 ~ 16	12.2
0.15	9 ~ 15	10.9
0.075	8 ~ 12	9.8

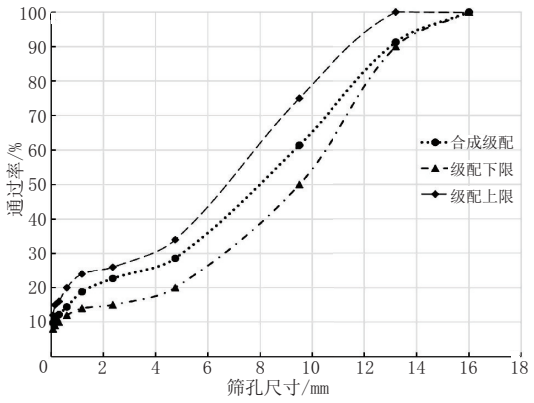


图 1　SMA-13 生产级配曲线

1.4　最佳油石比的确定

根据SMA-13的矿料级配进行配料，采用的油石比分别为5.0%、5.3%和5.6%，进行马歇尔试验，实验结果见表5。

表5　SMA-13马歇尔实验结果

油石比(%)	5.0	5.3	5.6	标准
稳定度/kN	7.6	10.1	9.1	不小于8
流值/(0.1 mm)	36.6	33.6	39.5	20~45
空隙率(%)	5.5	4.6	3.6	3~6
VMA(%0	17	16.8	16.6	不小于13
饱和度(%)	67.6	72.6	78.3	60~80
毛体积相对密度/(g·cm^{-3})	2.468	2.482	2.591	—
理论密度/(g·cm^{-3})	2.613	2.602	2.497	—

根据马歇尔实验结果，分别绘制稳定度、流值、空隙率、VMA、饱和度和密度与油石比的关系曲线。由图2可知，综合考虑以上各项性能指标，确定最佳油石比为5.3%。

1.5　烟气收集与测试方法

1.5.1　实验室烟气检测方案

实验室沥青试验烟气收集采用密闭试验舱，保证试验环境温度、风速、湿度恒定，排除外界大气环境干扰。在试验设备正上方设置小型集气罩，采用低流量匀速抽气模式，统一收集试验过程中挥发产生的沥青烟气。

1.5.2　拌站烟气检测方案

沥青混合料拌站烟气收集设置在出风口，带有良好的密封装置和除尘装置，并可以同步监控温度，在开机前对环境浓度进行测试。

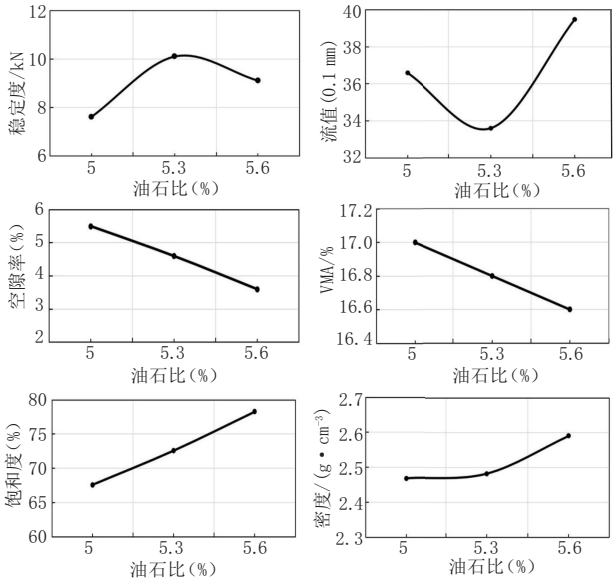


图2　油石比和马歇尔试件关系曲线

1.5.3　摊铺现场烟气检测方案

摊铺现场烟气收集设置在摊铺机下风口，同时在上风向10 m处设置对照点位，用于测试区域环境浓度。对收集的沥青烟气，使用气相色谱仪测试其成分。

2　烟气排放抑制效果

2.1　沥青生产配比

本文使用的低温改性聚合物沥青(SBS)，生产配比见表6。

表6　沥青生产配比

沥青	1#仓石料	2#仓石料	3#仓石料	4#仓石料	纤维	矿粉	沥青用量	阻燃剂
低温SMA-13(%)	14.5%	5%	37%	34%	0.35%	9.5%	5.3%	0.3%

2.2　实验室烟气检测

普通沥青在高温拌合、摊铺时会产生大量烟气，同时高温会诱发沥青分子发生裂变，生成苯系物、多环芳烃等有毒气体。低温改性沥青拌合、摊铺温度通常低20~40 ℃，减少高温挥发气体，并降低了高温裂变的有害气体含量。

为了验证低温SMA-13沥青的烟气抑制效果，采集工业沥青在实验室内进行烟气排放测试。首先将500 g工业生产的基质沥青、SBS改性沥青和低温SBS改性沥青灌入富集瓶密封。根据施工工艺，低温改性沥青常规施工温度为140 ℃，因此测试140 ℃的烟气排放浓度。并将收集的烟气用仪器检测浓度。

基质沥青、SBS改性沥青和低温SBS改性沥青的烟气测试结果见表6和图3，由数据可知，相比基质沥青，低温改性沥青产生烟气中，CO、SO_2和TVOC含量分别降低了87%、100%和31%，H_2S含量略有上升；相比SBS沥青，低温改性沥青产生烟气中CO、SO_2、H_2S和TVOC含量分别降低了75%、100%、7.6%和31.3%。进一步证明了低温改性沥青可以有效降低沥青烟气中有害气体的含量。

表6　实验室沥青烟气含量

沥青品类	CO/(mg·m^{-3})	SO_2/ppm	H_2S/10^{-6}	TVOC/(mg·m^{-3})
基质沥青	34.31	1.4	1.1	12.08
SBS沥青	16.9	1.1	1.3	12.17
低温改性沥青	4.3	0.0	1.2	8.36

2.3　拌站烟气检测

传统的沥青烟气抑制方法没有改变沥青的化学组成和结构，在实际施工中仍然会产生大量烟气。

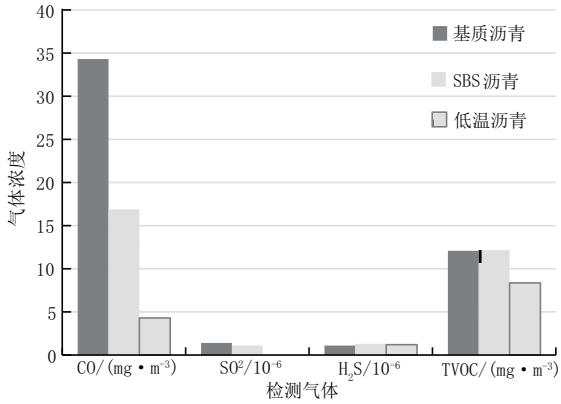


图 3　实验室沥青烟气含量

只使用一种添加剂，通常难以兼顾沥青各项性能指标，甚至引发性能缺陷。如吸附型、阻燃型添加剂，会影响沥青的低温性能，使其在低温下延展性下降，容易出现开裂现象，降低沥青路面的低温抗裂性能。

本文烟气抑制试验段采用位于静塘路的沥青混合料拌站。拌站内设置 4000 型沥青混合料拌和机，带有良好的密封装置和除尘装置，并可以同步监控温度。如图 4 所示距出风口约 2.5 m 扇形均匀布置 3 个采样点内，搅拌设备开机前对环境浓度进行测试。搅拌设备开机运行 5 min 后开启采样器，共计 4 组，每组 3 个平行采样点，第一组采样 5 min、第二组 10 min、第三组 15 min、第四组 20 min，每组采样结束间隔 5 min 测试下一组。

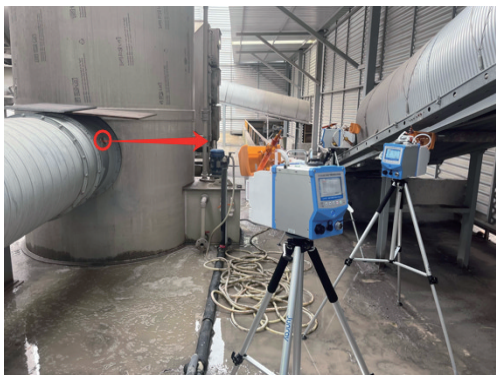


图 4　拌站气体收集

拌站采集的烟气检测结果见表 7 和图 5，气体含量取三个采样点环境气体含量的均值。拌站加入低温 SMA-13 沥青后产生烟气中，CO、NO、NO_2、TVOC 含量总平均值分别为 2.255、0.279、0.14、0.068 mg/m³。总体来看，加入低温 SMA-13 沥青后，拌站的沥青烟气含量低，只有 CO 含量略高。另外，拌站的 SO_2 硫数据极低或未检出，硫化氢三次均未检出。证明了低温 SMA-13 沥青对于烟气排放的抑制效果较好。

2.4　摊铺现场烟气检测

在摊铺机摊铺沥青时，应注意与料车的配合，掌握好进料的速度，避免中间停车。为了保证烟气数据采集的真实性，在摊铺过程中实时监测各烟气的排放浓度。采样同样分为四组，第一组采样 5 min、第二组 10 min、第三组 15 min、第四组 20 min，每组采样结束间隔 5 min 测试下一组。

表 7　拌站气体检测含量　　单位：mg/m³

气体检测浓度		低温 SMA-13
CO 含量	5 min 均值	2.20
	10 min 均值	2.23
	15 min 均值	2.24
	20 min 均值	2.34
	总平均值	2.255
NO 含量	5 min 均值	0.20
	10 min 均值	0.59
	15 min 均值	0.18
	20 min 均值	0.15
	总平均值	0.279
NO_2 含量	5min 均值	0.08
	10 min 均值	0.29
	15 min 均值	0.07
	20 min 均值	0.12
	总平均值	0.14
TVOC 含量	5 min 均值	0.15
	10 min 均值	0.04
	15 min 均值	0.03
	20 min 均值	0.03
	总平均值	0.068

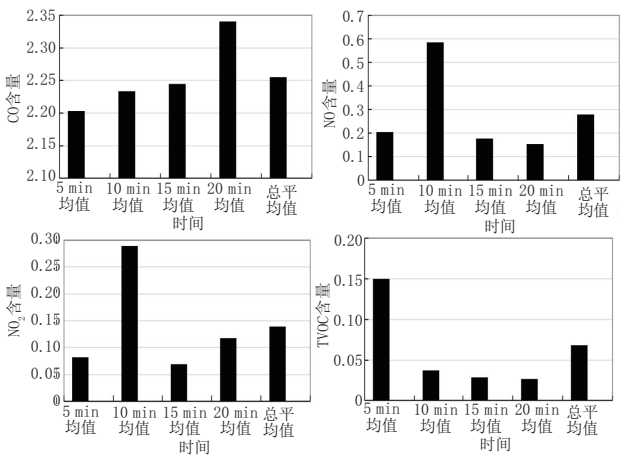


图 5　拌站气体检测含量

摊铺现场采集的烟气检测结果见表 8 和图 6。加入低温 SMA-13 沥青后，摊铺现场烟气含量中，CO、NO、NO_2、TVOC 含量总平均值分别为 12.990、6.360、1.596、1.542 mg/m³。总体来看，加入低温 SMA-13 沥青后，摊铺现场沥青烟气含量 CO 和 NO 都比 NO_2 和 TVOC 浓度高。此外，摊铺现场的二氧化硫均未检出，摊铺现场的硫化氢均未检出。说明低温 SMA-13 沥青都对烟气排放起到了抑制作用。

表8　摊铺现场气体检测含量　　单位：mg/m³

气体检测浓度		低温SMA-13
CO含量	5 min均值	13.330
	10 min均值	13.260
	15 min均值	12.700
	20 min均值	12.670
	总平均值	12.990
NO含量	5 min均值	9.280
	10 min均值	8.560
	15 min均值	5.680
	20 min均值	1.920
	总平均值	6.360
NO_2含量	5 min均值	2.910
	10 min均值	2.110
	15 min均值	1.110
	20 min均值	0.260
	总平均值	1.596
TVOC含量	5 min均值	2.220
	10 min均值	2.290
	15 min均值	0.840
	20 min均值	0.820
	总平均值	1.542

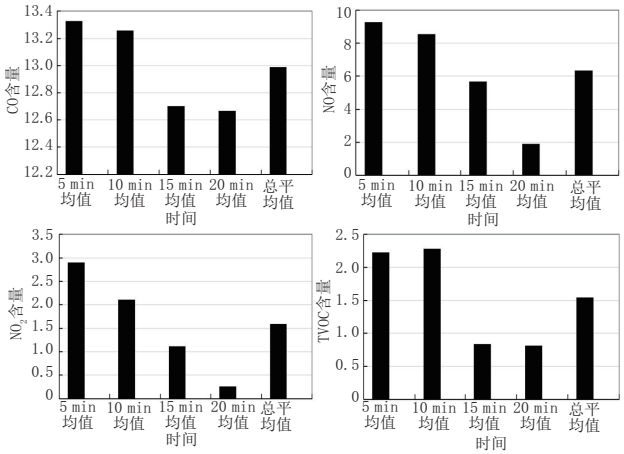


图6　摊铺现场气体检测含量

2.5　沥青路用性能检测

对工业生产的低温SMA-13沥青的基本性能进行检测，评估低温SMA-13的路用性能，结果见表9。可以看出低温SMA-13的低温弯曲破坏应变、残留稳定度、冻融劈裂强度比和动稳定度都满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的技术要求，说明低温SMA-13沥青的路用性能良好。

表9　低温SMA-13沥青混合料路用性能检测结果

技术指标	规范	SMA-13实验值
低温弯曲破坏应变(με)	不小于2 500	2 769
残留稳定度(%)	不小于80	90.3
冻融劈裂强度比(%)	不小于80	86.4
动稳定度/(次·mm^{-1})	不小于2 400	7 999

3　结　论

(1)拌站和摊铺现场采集的烟气含量中，拌站CO含量略高于其他气体浓度，摊铺现场CO和NO浓度比NO_2和TVOC浓度高。另外，拌站和摊铺现场的二氧化硫数据极低或未检出，硫化氢三次均未检出。证明了低温SMA-13改性沥青可有效抑制烟气的排放。

(2)实验室烟气实验结果表明，相比基质沥青，低温改性沥青的烟气排放中，CO、SO_2和TVOC含量分别降低了87%、100%和31%，H_2S含量略有上升；相比SBS沥青，低温SMA-13改性沥青产生烟气中CO、SO_2、H_2S和TVOC含量分别降低了75%、100%、7.6%和31.3%。证明了低温SMA-13改性沥青可以有效降低沥青烟气中的有害气体。

(3)低温SMA-13改性沥青性能测试结果表明，低温改性剂的加入不会对沥青的路用性能产生负面影响，其仍具有良好的高温性能、抗水损害性能和低温性能。

(4)低温SMA-13沥青在保证路用性能的前提下，显著降低了烟气排放，为道路工程绿色转型提供了可行技术路径，后续可进一步研究其长期服役性能。

参考文献：

[1] 杨建云，罗莎.国内沥青市场“十三五”回顾及“十四五”展望[J].石油沥青，2022，36(1)：63-68.

[2] 刘至飞，吴少鹏，陈美祝，等.温拌沥青混合料现状及存在问题[J].武汉理工大学学报，2009，31(4)：170-173.

[3] 孙良好.抑烟沥青及沥青混合料性能研[J].交通科技，2024，50(3)：136-141.

[4] 吴晓颖，刘树华，张建峰，等.沥青烟气治理技术研究现状与进展[J].石油沥青，2021，35(1)：1-5.

[5] 刘莹.沥青烟气主动抑制技术发展现状[J].石油化工安全环保技术，2020，36(3)：48-52.

[6] 张争奇，宋亮亮，陈飞.不同温拌剂对沥青混合料性能影响研究[J].武汉理工大学学报，2014，36(3)：53-58.

[7] 孙吉书，穆欣悦，宋莹，等.抑烟复合改性沥青的性能研究[J].应用化工，2022，51(11)：3224-3229.

[8] 陈俊青.基于低温性能的沥青路面应用技术研究[D].西安：长安大学，2013.

[9] 王晓力，王淑芳，张建.USP低温改性沥青及沥青混合料性能研究[J].河南科学，2017，35(9)：1458-1462.

[10] Gupta A, Rodriguez-Hernandez J, Castro-Fresno D. Incorporation of Additives and Fibers in Porous Asphalt Mixtures: A Review[J]. Materials, 2019, 12(19): 3156-3156.

[11] HAMZAH M O, GOLCHIN B, JAMSHIDI A, et al. Evaluation of Rediset for use in warm-mix asphalt: a review of the literatures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 16(9):

(下转第138页)