

薄层罩面级配特征与适用性分析

施向东¹, 陈先华^{1*}, 高见², 文科²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 绍兴市公路管理局)

摘要:薄层罩面技术广泛应用于国内外沥青路面的预防性养护中,其技术种类与适用范围均不尽相同。在实际应用过程中,需明确不同薄层罩面类型对应的技术特点与适用范围以实现物尽其用。该文整理了近期薄层罩面领域的相关研究进展,包括室内试验研究、现场试验段短期与长期性能观测,总结并论证了国内外典型薄层罩面级配特征及其适用性的一般关系,得出最大公称粒径 N_{MAS} 和级配类型对薄层罩面若干服务性能的影响,指出不同薄层罩面技术的适用范围,揭示了中国薄层罩面技术种类较为单一、应用范围相对受限的问题。

关键词:道路工程;薄层罩面;级配类型; N_{MAS} ;抗滑性能

1 引言

中国经济社会发展步入新时代,道路行业经过数十年的发展,在规模和质量上均已达到世界先进水平。2019年底中国公路总里程已达501.25万km,其中养护里程495.31万km,占总里程的98.8%。当前道路养护面临的问题集中表现为:路面服务功能衰减明显,主要包括抗滑性能、平整度、行驶质量下降。路面功能性损伤直接影响到道路服务对象的行驶安全与质量,必须采取针对性的处置措施。

20世纪80、90年代,欧美各国的主要道路同样出现了服务性功能下降的问题,薄层罩面技术应运而生。1999年AASHTO公布的美国国家路面养护报告指出,薄层罩面是最为有效的沥青路面预防性养护技术。薄层罩面可用于修复路表非结构性损伤的裂缝和车辙、提高路面的平整度和抗滑性能、改善旧路面老化状况、延长路面使用期限,国外工程实践证明:薄层罩面技术作为一种预防性养护措施,与微表处相比可延长高速公路路面使用寿命至少6年以上。

薄层罩面技术起源于20世纪70年代后期的法国,之后在欧美各国广泛使用。应用初期以Nova-chip[®]系列产品为代表,经过不断地推广应用技术革新,目前薄层罩面技术的产品已扩展至SMA、OGFC、

再生技术(RAP)、温拌技术(WMA)等多个领域,表现出更加显著的应用价值和光明的发展前景。中国薄层罩面技术虽已形成较为完整的设计、生产和施工体系,但同国外多样化的技术应用相比,其技术种类与使用范围仍存在改进优化的空间。该文通过调研国内外典型薄层罩面技术的相关室内试验研究与现场实测数据,针对薄层罩面技术的若干关键服务性能,总结并论证了薄层罩面技术的级配特征及其适用性,为不同种类薄层罩面技术的实际应用提供参考。

2 国内外典型薄层罩面技术类型

薄层罩面技术种类的区分主要以级配类型与铺筑厚度为分类标准,薄层罩面级配类型的确定与其自身的结构特点和使用功能直接相关。薄层罩面层厚较小,不同国家和地区的厚度范围存在一定差异性,普遍为15~35mm。薄层设计的理念主要反映了道路工作者对于养护成本以及路面压实效率的重视,面层厚度的减薄也直接影响到级配设计中最大公称粒径($D_{N_{MAS}}$)的确定。NCHRP相关报告指出薄层罩面结构层厚度与 $D_{N_{MAS}}$ 之比一般为2~3;JTG D40-2017《公路沥青路面设计规范》对该比值的规定为:对于连续级配沥青混合料和SMA,比值不宜小于2.5;对于开级配沥青混合料,不宜小于2.0。结合薄层罩面的

收稿日期:2020-07-15

基金项目:浙江省公路科技计划项目(编号:2018H28)

作者简介:施向东,男,硕士研究生。E-mail:shi_xd@foxmail.com

* 通信作者:陈先华,男,教授,博士生导师。E-mail:chenxh@seu.edu.cn

一般铺设厚度,可确定薄层罩面 D_{NMAS} 为 4.75~13.2 mm,主要分为 4.75、9.5 和 13.2 mm 3 类,级配种类亦分为密级配、半开级配与开级配 3 种。

2.1 密级配型薄层罩面

密级配型薄层罩面是应用最为广泛的一类薄层罩面技术,中国相关规范与部分省级养护规范涉及的密级配薄层罩面主要有以下 4 种,分别为 SMA-10、SAC-10、ACG-10 和 Sup-10,铺筑厚度一般为 25~35 mm,实际应用中以 SMA-10 最为普遍。 D_{NMAS} 为 9.5 mm 密级配薄层罩面可有效增加路面抗滑能力,亦兼顾了降噪的需求,在渗水方面,密实型混合料用作表面层主要表现为低透水性能,原路面的水稳定性可得到改善,但无法有效改善雨天行驶的可视性与安全性。

美国将欧洲薄层罩面技术与 Superpave 设计方

法相融合,结合各州实际交通情况与养护经验,提出了多种类型的密实型混合料,级配组成见表 1。此类薄层罩面的铺筑厚度一般为 0.5~1 in(12.7~25.4 mm)。美国各州薄层罩面的厚度与 D_{NMAS} 的比值并非严格满足 ASSHTO 规范中 3~5 的要求。由于具有粒径较小以及相对较高的沥青含量,薄层罩面混合料较为容易压实。厚度与 D_{NMAS} 的比值限制也可适当降低,这意味着可以将较大公称粒径如 12.5/13.2 mm 的混合料用于薄层罩面中,事实上 D_{NMAS} 为 12.5 mm 薄层罩面的通常铺设厚度仅为 0.75 in(19 mm),压实要求的降低也可由表 1 中混合料设计压实次数反映:阿拉巴马州 D_{NMAS} 为 12.5 mm 混合料的设计压实次数为 60 次;马里兰州 D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料设计压实次数则根据交通量大小,分别设定为:中小交通量对应 50 次;大交通量对应 65 次。

表 1 美国薄层罩面密实型混合料级配组成及设计压实次数

$D_{\text{NMAS}} /$ mm	地区	$N_{\text{design}} /$ 次	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
			19	12.5	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
12.5	Alabama	60	100	90~100	<90		28~58		2~10
	North Carolina		100	85~100	60~80	28~38	19~32	8~13	4~7
	Nevada			100	85~100	50~75			3~8
9.5	Utah	50~125		100	90~100	<90	32~67		2~10
6.3	New York	75			100	90~100	37~70		2~10
	Maryland	50/65			100	80~100	36~76		2~12
4.75	Georgia	50		100	90~100	75~95	60~65	20~50	4~12
	Ohio	50		100	95~100	85~95	53~63	4~19	3~8

2.2 半开级配型薄层罩面

半开级配型薄层罩面特指美国 Novachip® 系列产品,源于 1986 年法国 SCREG Routes Group 研发的薄层罩面技术,通常铺筑厚度为 3/8~3/4 in(9.5~19 mm)。Novachip® 采用间断级配,分为 A、B、C 共 3 种类型, D_{NMAS} 分别对应 4.75、9.5、12.5 mm。Novachip® 混合料级配断点为 2.36~4.75 mm,级配曲线与 SMA 类似,但其结合料与填料含量低。因此该混合料本身透水,空隙率为 8%~16%,表面纹理与开级配磨耗层(OGFC)相似。Novachip® 的细集料含量更多,力学稳定性与抗剪能力优于开级配沥青混合料,但空隙率相对下降,曹东伟等对半开级配沥青混合料真空饱水后的自然排水试验结果表明:半开级配沥青混合料孔隙结构以有效孔隙(连通孔隙)和半有效孔隙为主,30 min 排水率为 40%~50%,实际路面排水效率

存疑。同密级配沥青磨耗层相比,Novachip® 在构造深度、抗滑、降噪、改善雨天行车可视性和安全性等方面仍存在一定的优势。

2003 年中国引进了 Novachip® 专用设备在广韶高速公路铺筑了 2 km 的试验路。此后,南方部分省市,如广东、福建、江苏、浙江等分别引进该技术作为超薄磨耗层用于高速公路预防性养护。目前 Novachip® 薄层罩面在中国很多地区的实际养护工作中均得到一定程度的推广,但关于半开级配沥青混合料设计理论及配套设备技术的研发仍处于研究评估阶段,且缺少该类型薄层罩面的实际使用效果及使用寿命分析数据。

2.3 开级配细粒径磨耗层

开级配细粒径磨耗层(OGFC)是 20 世纪 60 年代由美国西部几个州的混合料封层发展而来的。OGFC

在应用初期曾出现过多种问题,如沥青析漏、过早氧化、松散、下面层剥落等问题。为改进这项技术,20世纪90年代美国开始逐渐向欧洲学习,美国的OGFC材料组成、厚度、施工等逐渐向欧洲靠近。OGFC用于预防性养护中的沥青混合料类型以 D_{NMAS} 为9.5/12.5 mm混合料为主,设计空隙率增至20%,铺设厚度为0.75~1.25 in(19~32 mm)。改进之后的OGFC在排水、降噪、抗滑以及耐久性方面得到了进一步提升,目前已广泛应用于美国西、南部各州的高等级路面养护;在北部冻融病害十分显著的地区,开级配磨耗层铺设厚度会相应增大,有些地区如威斯康辛州、俄勒冈州则明确提出限制OGFC在寒冷地区的使用。

中国OGFC主要用于表面磨耗层以及排水沥青路面面层,作为薄层罩面应用于道路养护中较少,仅北京、江苏、广东等部分地方养护规范中将其作为薄层罩面用于预防性养护。江苏省曾铺设过OGFC-10/13薄层罩面,如宁高高速公路2006年路面养护铺设的3 cm厚AR-OGFC-13薄层罩面,沥青胶结料选用橡胶沥青,级配设计主要参考了美国得克萨斯州OGFC级配范围,沥青用量较大(油石比为8.9%)。

3 薄层罩面级配特征与适用性论证

总结上述国内外薄层罩面级配类型的级配组成及使用特点,可以得出目前薄层罩面技术的级配特征及其适用性的一般特点:

(1) 厚度减薄使得路面压实效率提高,一般结构层厚度与 D_{NMAS} 比值的限制在厚度减薄后可相应降低, D_{NMAS} 为12.5/13.2 mm混合料可应用于薄层罩面; D_{NMAS} 为9.5 mm混合料应用最为广泛; D_{NMAS} 为4.75 mm密级配沥青混合料在国外薄层罩面中已有应用,在不同交通量条件下的使用效果仍需论证。

(2) 密级配型薄层罩面如SMA-10、Sup-10应用最为广泛,抗滑、密水、降噪及耐久性能显著;开级配细粒径磨耗层OGFC-10/13的骨架空隙结构赋予其良好的抗滑、降噪和排水特性,但为保障耐久性需提高沥青用量并引入纤维类材料,施工成本相对提高;Novachip®半开级配的组成特点介于间断密级配与开级配之间,具有一定的排水性能,在中国一般用作超薄磨耗层。

上述薄层罩面级配特征与适用性的一般关系主要通过总结实际应用经验得出,其可靠性尚需真实数据的论证。该文拟选用国内外薄层罩面技术应用的实测

数据,反映级配特征与关键服务性能的内在联系,并进行薄层罩面应用 D_{NMAS} 为4.75 mm混合料的可行性分析,以论证上述结论的可靠性。

3.1 薄层罩面级配特征与关键服务性能的关系

薄层罩面技术的核心服务导向是其抗滑特性,在过去一般通过摩擦系数与构造深度表征面层的抗滑性能。摩擦系数反映面层材料的微观构造,在低速条件下,微观构造是路面抗滑性能的决定性因素;构造深度则反映材料表面的宏观纹理,在较高速度,尤其当有水膜存在时,构造深度对抗滑性能的影响更大。图1、2分别为美国早期铺设的Novachip®型薄层罩面以及用作对照组的密级配磨耗层路表纹理特征,由图1、2可以看出:Novachip®型混合料的路表纹理更为粗糙。两种路面竣工后3年内摩擦系数随时间的分布如图3所示。



图1 Novachip®型混合料路表纹理



图2 密级配磨耗层路表纹理

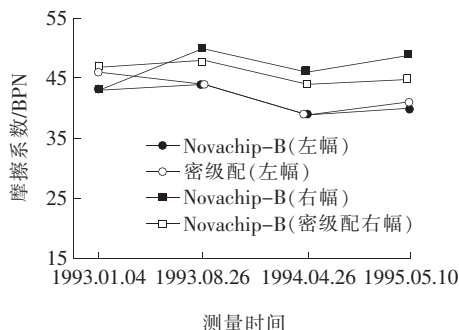


图3 美国1992年薄层罩面试验路摩擦系数测量数据

由图 3 可以看出:Novachip[®] 型混合料试验段右幅摩擦系数较大,而在左幅与密级配混合料相当。仔细比较两种级配类型混合料的摩擦系数大小,会发现二者的差异性并不明显,甚至出现密级配混合料摩擦系数大于 Novachip[®] 的情况,即摩擦系数无法直观体现 Novachip[®] 在抗滑性能上的优势。类似结果也出现在中国的一些研究中,图 4 为中国研究人员对 AC-13C、Novachip[®] Type-C 以及 OGFC-13 进行抗滑性能比较的摩擦系数试验结果,3 种混合料摩擦系数差异性并不明显,且摩擦系数相对大小无法直观体现 Novachip[®] 和 OGFC 在抗滑性能方面的优势。图 5 反映的是同一研究中 3 种混合料的构造深度试验结果,构造深度的大小关系与 3 种混合料实际抗滑性能相对应且差异性明显。

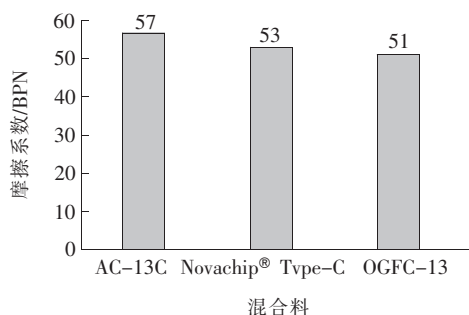


图 4 3 种不同级配类型混合料摩擦系数试验结果

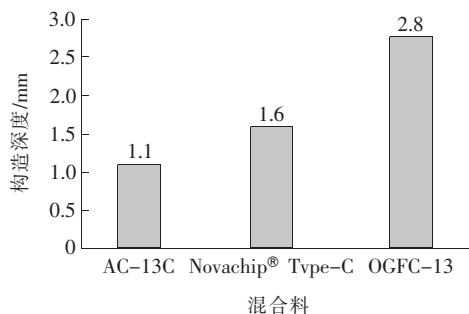


图 5 3 种不同级配类型混合料构造深度试验结果

上述两组案例,对应于国外试验路现场测试与中国室内试验研究,所得数据均表明摩擦系数表征路面材料的抗滑性能存在一定的缺陷。现行 JTG D40—2017《公路沥青路面设计规范》将抗滑技术指标修改为横向力系数和构造深度,去除了旧版规范中的摩擦系数指标,一定程度上论证了上述结论的可靠性。为进一步论证级配特征对薄层罩面抗滑性能的影响,该文拟采用构造深度作为主要评价指标。

构造深度反映了路表宏观纹理,研究认为宏观纹

理与混合料级配类型以及孔隙结构存在一定的函数关系。美国 NCAT 试验路的长期观测数据表明宏观纹理同路面耐久性相关:路面耐久性下降通常表现为集料松散、剥落的现象,致使混合料内部孔隙结构暴露在表面。研究发现,路表构造深度在这一过程中表现出增大的趋势。这意味着采用构造深度表征路面抗滑性能时,通过孤立的试验数据说明构造深度满足规范要求,不足以完全反映实际路面的抗滑性能;应体现构造深度随使用期限或加载次数的变化趋势,客观真实地评价路面实际抗滑与耐久的使用效果。

NCAT 于 2003 年铺设了 D_{NMAS} 为 4.75、9.5、12.5 mm 3 种 Superpave 密级配薄层罩面的试验路,并对 3 段试验路进行了为期 8~9 年的性能跟踪观测。抗滑性能采用构造深度表征,构造深度随加载次数的变化曲线如图 6 所示。在试验路段使用寿命初期,累计作用次数 N_{esals} 小于 3.0×10^6 次,对应于 AASH-TO 规范中的低交通量,3 种密级配混合料构造深度大小关系表现为:12.5 mm (D_{NMAS}) > 9.5 mm (D_{NMAS}) > 4.75 mm (D_{NMAS}),符合构造深度随粒径增大而增加的一般观点; N_{esals} 超出 3.0×10^6 次后, D_{NMAS} 为 9.5 mm 混合料的构造深度超过了 D_{NMAS} 为 12.5 mm 混合料,这一发现与构造深度同粒径大小的关系相矛盾。需结合抗滑性能与耐久性的关系进行解释。相关研究指出:构造深度与加载次数线性拟合的斜率可反映相应混合料的耐久性:较大斜率的混合料具有相对较差的耐久性能。因此,NCAT 试验路构造深度的观测结果说明: D_{NMAS} 为 9.5 mm 混合料薄层罩面抗滑性能在使用后期会受到耐久性下降的显著影响,虽然构造深度不断增加,但实际使用效果可能会伴随松散、剥落等耐久性病害而有所削弱; D_{NMAS} 为 12.5 mm 混合料薄层罩面可兼顾抗滑性能与耐久性的要求。此外,该研究还认为, D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料用于薄层罩面抗滑性能是其明显缺陷,但却表现出较好的耐

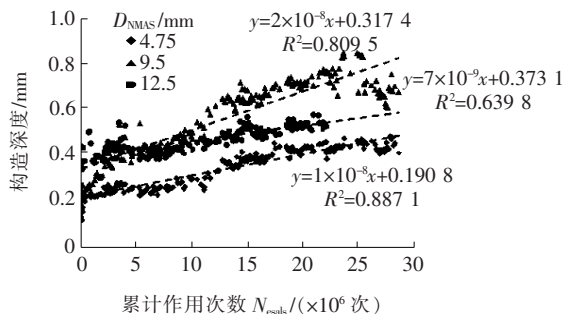


图 6 NCAT 试验路 3 种 D_{NMAS} 混合料构造深度比较

久性、平整度和抗永久变形能力, D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料用于薄层罩面技术的可行性需额外论证。

以上论述通过引用国内外试验路现场测试、长期性能观测以及室内试验研究,说明了以构造深度为评价指标的薄层罩面级配特征与抗滑性能的关系,可得到以下结论:

(1) 级配种类与抗滑性能的关系:密级配 $<$ Novachip[®]半开级配 $<$ 开级配。

(2) Superpave 密级配型薄层罩面 D_{NMAS} 与抗滑性能的关系:在使用初期,或荷载作用次数较小时,与一般认识相符,即 $4.75\text{ mm}<9.5\text{ mm}<12.5\text{ mm}$,但在使用后期, D_{NMAS} 为 9.5 mm 混合料实际使用效果受耐久性降低影响,松散剥落等病害间接引起构造深度的相对增大。因此,实际使用效果应结合抗滑性与耐久性进行评估。 D_{NMAS} 为 12.5 mm 混合料抗滑性与耐久性在荷载加载前后阶段均表现较好。

(3) D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料主要缺陷表现在抗滑性能上,但 NCAT 试验路的实测结果表明该种混合料具有较好的耐久性、平整度以及抗车辙能力,是否适合用作薄层罩面仍需论证。

3.2 薄层罩面应用 D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料的可行性分析

由 3.1 节分析可知, D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料的缺陷主要是无法提供足够的构造深度以满足抗滑性能

的要求。中国 SAC 混合料类型研究时,同样对 D_{NMAS} 为 4.75 mm 的 AC-5 混合料进行了评估:AC-5 的 2.36 mm 以上的碎石含量为 25%~45%,该种混合料的构造深度难以满足路面抗滑性能的要求。对于高等级路面的养护工作而言,抗滑性能的保证居于主导地位。但是考虑到不同区域交通轴载、通行水平以及气候特点的多样性, D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料仍具有广泛的应用空间。

国内外已有关于 D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料实际应用效果的研究,NCAT 于 2011 年公布了 D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料应用研究的成果,为修改 ASSHTO 中此类混合料设计标准提出相关建议,以推广 D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料的应用。研究报告总结了不同地区试验段路用性能的实测结果,如表 2 所示。

4 条试验段路用性能测试结果表明:APA 车辙深度均满足小于 9.5 mm 的要求;且明尼苏达州试验段在相对较高的 N_{esals} 情况下表现出较好的抗车辙性能,其原因主要和使用改性 PG 64-33 沥青和棱角性粗糙度极优的铁燧岩有关;渗水性能方面,田纳西州试验路因现场空隙率较大,实测渗透系数相对较大,但综合现场实测渗透系数与室内试验结果,研究认为 D_{NMAS} 混合料在相对较高的现场空隙率下仍具有不透水性;构造深度测试结果处于 D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料的正常范围。

表 2 NCAT D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料试验段路用性能测试结果

地区	面层厚度/ (in/mm)	AADT/ pcu	$N_{\text{esals}}/$ ($\times 10^6$ 次)	APA 车辙 深度/mm	渗透系数/ ($\times 10^{-5}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	CTM 构造 深度/mm
Alabama	0.75/19.0	4 700	0.3~3.0	9.4	90×10^{-5}	-
Missouri	0.75/19.0	2 500	0.3~3.0	6.7	40×10^{-5}	0.17~0.22
Tennessee	0.75/19.0	1 620	0.3~3.0	4.5	160×10^{-5}	0.16~0.33
Minnesota	1.00/25.4	-	3.0~30.0	5.3	5×10^{-5}	0.13~0.18

上述研究总结了 D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料的实际使用效果,分析了该类型混合料的设计要点和优缺点。报告明确指出, D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料不能用于高等级、重载条件下的道路养护;但对于等级较低、交通量较小的路面,该类型混合料在降噪、防水、施工方便、以及对剩余矿料资源的有效利用方面均表现出明显的优势。因此, D_{NMAS} 为 4.75 mm 混合料用作薄层罩面依然具有广泛的使用前景。

4 结论

该文系统概述了国内外薄层罩面典型级配及其使用特点,在此基础上提出并论证了薄层罩面级配特征与其适用性的一般关系,主要结论包括:

(1) D_{NMAS} 为 9.5 mm 密级配混合料在薄层罩面中使用最为普遍,但使用后期路面耐久性可能会有所

降低。

(2) D_{NMAS} 为 12.5/13.2 mm 混合料同样适用于薄层罩面,且 D_{NMAS} 为 12.5/13.2 mm 混合料可兼顾抗滑性与耐久性,长期使用效果较好。

(3) Superpave D_{NMAS} 为 4.75 mm 密级配型混合料可用作低等级、低交通量路面的薄层罩面。

(4) 级配类型对薄层罩面抗滑性能的影响表现为:密级配 $<$ Novachip $^{\text{®}}$ 半开级配 $<$ 开级配。

(5) 密级配型薄层罩面应用最为广泛,抗滑、密水、降噪及耐久性能显著;开级配细粒径磨耗层 OGFC-10/13 兼具抗滑、降噪和排水特性,但成本较高;Novachip $^{\text{®}}$ 半开级配的组成特点介于间断密级配与开级配之间,具有一定的排水性能,在中国一般用作超薄磨耗层。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2017 年交通运输行业发展统计公报[OL]. http://zizhan.mot.gov.cn/zfxxgk/bnssj/zhghs/201803/t201803_29_3005087.html.
- [2] Newcomb D E. Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation[R]. Lanham: National Asphalt Pavement Association, 2009.
- [3] Bashaw R E, Grant K S. Survival Analysis of Thin Overlay and Chip Seal Treatments Using the Long-Term Pavement Performance Data[J]. Journal of Personal Selling & Sales Management, 2013, 14(2):41-56.
- [4] Son S, Al-Qadi I L, Zehr T. 4.75 mm SMA Performance and Cost-Effectiveness for Asphalt Thin Overlays[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(9):799-809.
- [5] 张荣荣,薛忠军,王春明,等. 橡胶沥青开级配沥青混合料路用性能及降噪效果研究[J]. 公路,2016(9).
- [6] Swaner, K. Preliminary Results of Thin-Overlay Mixes with RAP and RAS[R]. Buda: Texas Asphalt Pavement Association, 2012.
- [7] 范平. 温拌橡胶沥青混合料薄层罩面技术研究[D]. 东北林业大学硕士学位论文, 2014.
- [8] 王松根. 沥青路面预防性养护的新思考[J]. 中国公路, 2017(3).
- [9] Watson D E, Heitzman M. NCHRP Synthesis 464: Thin Asphalt Concrete Overlays: A Synthesis of Highway Practice[R]. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, 2014.
- [10] JTG D40-2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [11] 王秋胜. 超薄抗滑磨耗层结构组成的优化设计[J]. 中外公路, 2017(1).
- [12] 曹东伟, 刘清泉, 唐国奇. 排水沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [13] Qureshi N A, Khurshid M B, Watson D. Evaluation of Premature Failures of Open-Graded Friction Course Pavements in Alabama[J]. Revue Canadienne De Génie Civil, 2015, 42(12).
- [14] Muench S T, Weiland C, Hatfield J, et al. Open-Graded Wearing Courses in the Pacific Northwest[R]. Salem: Oregon Department of Transportation, 2011.
- [15] 卞海洋. 橡胶沥青 OGFC 薄层罩面设计与施工[J]. 现代交通技术, 2008(5).
- [16] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [17] Kandhal P S, Lockett L. Construction and Performance of Ultrathin Asphalt Friction Course[R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 1997.
- [18] 曾梦澜, 彭良清, 吴超凡, 等. 超薄磨耗层沥青混合料使用性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012(4).
- [19] Powell R. Predicting Field Performance on the NCAT Pavement Test Track[D]. Auburn University, 2006.
- [20] Buzz D R, Buchanan S. Long Term Performance of a Thin Asphalt Overlay on the NCAT Pavement Test Track[C]. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D. C., 2012.
- [21] 刘朝晖, 沙庆林. 超薄层沥青混凝土 SAC-10 矿料级配比较试验研究[J]. 中国公路学报, 2005(1).
- [22] West R C, Heitzman M A, Julian G, et al. Laboratory Refinement and Field Validation of 4.75 mm Superpave Designed Asphalt Mixtures, Volume I: Final Report[R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2011.