

# 密级配抗滑超薄磨耗层材料 UWM-10 设计与路用性能研究

李正中<sup>1,2</sup>, 柴东然<sup>3</sup>, 耿磊<sup>4</sup>, 肖庆一<sup>5</sup>

(1.天津市交通科学研究院,天津市 300074;2.长安大学 公路学院;3.北京市首都公路发展集团有限公司;  
4.江苏中路工程技术研究院有限公司;5.河北工业大学 土木与交通学院)

**摘要:**采用多链聚烯烃和 SBS 复合改性方法,对超薄铺装材料 UWM-10 进行密级配设计,通过开展体积指标与高温性能、低温性能、抗水损害性能的评价,提出其设计和路用性能评价指标。同时,提出改进的车辙试验方法,研究超薄铺装材料长期行车荷载作用下路面构造深度的衰减变化规律。采用 CT 扫描方法,研究 UWM-10 与下承界面之间的黏结效果和空间空隙分布规律,评价层间黏结效果。室内研究与现场试验表明:UWM-10 具有良好的路用性能和抗滑性能,其构造深度的衰减程度小于传统的超薄铺装材料,且其与下承界面的黏结效果优于传统的超薄铺装材料,是一种性能优异的新型超薄铺装材料。

**关键词:**超薄磨耗层;UWM;抗滑;构造深度;CT扫描

超薄铺装技术产生于 20 世纪 70 年代后期的法国,主要用于沥青路面抗滑性能的恢复,后来也用于新建路面的修筑。该技术自产生以后,欧美许多国家纷纷采用,中国自 20 世纪 90 年代开始研究此项技术。目前,超薄铺装材料在工程应用中,主要存在以下问题:① 压实度不足、铣刨加铺超薄铺装层水损害、后期抗滑性能衰减迅速等问题。这主要由于超薄铺装材料一般铺装厚度为 2~2.5 cm,施工时降温速度快,低温下难以保证压实;② 采用间断级配的超薄铺装材料,水分容易渗入,降低层间黏结效果,容易造成松散等水损害,对超薄铺装材料的耐久性不利,不适用于铣刨加铺维修形式;③ 传统的超薄铺装材料抗车辙性能一般,且后期构造深度衰减较快,抗滑性能下降明显,对路面行车安全不利。

该文针对目前超薄铺装技术存在的问题,开发一种新型超薄铺装材料 UWM-10。UWM-10 通过进行密级配设计,添加多链聚烯烃类增效改性剂与 SBS 的复合改性,延长了施工温度区间,提高了混合料施工和易性,保证了层间黏结效果,并提升了路面结构的整体性。通过改进的抗车辙试验,对 UWM-10 上表面进行了高温构造深度衰减规律的评价。通过实体工程取芯,并通过 CT 扫描与现场拉拔试验,对 UWM-

10、SMA13 两种超薄铺装材料下表面与原路面的层间黏结效果进行定量评价。

## 1 UWM-10 混合料设计

### 1.1 原材料性质分析

为提高沥青混合料的路用性能,UWM-10 超薄铺装材料在采用 SBS 改性沥青、玄武岩集料、石灰岩矿粉的基础上,添加了多链聚烯烃复合增效改性剂(掺量为矿料质量的 0.35%),各种原材料的主要技术指标如表 1 所示。

### 1.2 合成级配设计

UWM-10 沥青混合料采用马歇尔方法进行设计,级配范围及设计级配如表 2 所示。

### 1.3 配合比试验及性能验证

在中国现行热拌沥青混合料设计规范中,为提高沥青混合料的施工和易性,施工温度通常根据沥青的黏温曲线选定,并未考虑到超薄铺装在实际施工过程中降温速率较快的特殊性。有研究表明:铺筑厚度 2.5 cm 的超薄磨耗层,其混合料温度在 5~10 min 之内即可从 160 ℃降至 80 ℃,而铺装厚度的增加将带来降温速率的减缓。因此,不同铺装层厚度需要选用不同的

收稿日期:2018-07-09

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(编号:15JCYBJC23100);河北省自然科学基金资助项目(编号:E2016202279)

作者简介:李正中,男,博士研究生,高级工程师,E-mail:lizhengzhonglzz@163.com

施工温度,室内配合比设计时也应根据实际情况选择不同的击实和成型试验温度。

表 1 SBS 改性沥青及超薄磨耗层用复合增效改性剂技术要求

原材料	试验指标	单位	检测结果	技术要求
SBS 改性沥青	针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	63.0	50~80
	延度(5 cm/min,5℃)	cm	42	≥30
	软化点(环球法)	℃	79	≥70
	运动黏度 135℃	Pa·s	1.2	≤3
	动力黏度 60℃	Pa·s	6 200	≥5 000
SHRP 性能等级			PG 70-22	不低于 PG 70-22
复合增效改性剂	熔滴点	℃	121	110~150

表 2 UWM-10 沥青混合料设计级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围	100	90~100	40~54	20~36	16~30	10~24	7~20	6~12	4~8
设计级配	100	99.6	42.0	31.2	21.8	17.0	11.6	8.9	7.0

UWM-10 超薄铺装混合料设计方法包括以下操作步骤:

- (1) 设计空隙率为 4%~6%。
- (2) 根据铺装层厚度情况,由路面铺装层初压后层底温度  $T_1$  和改性沥青加热温度  $T_2$  计算击实试验温度  $T_3$ ,其中  $T_3=(T_1+T_2)/2$ 。
- (3) 根据设计击实试验温度  $T_3$  和设计空隙率,确

定沥青混合料的预估油石比  $P$ 。

- (4) 按照马歇尔方法进行密级配超薄铺装沥青混合料配合比设计。

按照超薄铺装厚度 2.5 cm 计,该文确定 UWM-10 超薄铺装材料室内成型试验温度为 145℃,沥青用量为 5.1%。经马歇尔试验检测,UWM-10 混合料各项指标如表 3 所示,路用性能试验结果如表 4 所示。

表 3 UWM-10 沥青混合料马歇尔试验结果

项目	油石比/ %	最大理论 相对密度	试件毛体积 相对密度	空隙率/ %	矿料间 隙率/%	沥青饱 和度/%	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)
试验结果	5.4	2.596	2.468	4.9	16.4	70.1	9.83	26
技术要求	—	—	—	4.0~6.0	≥14	65~75	≥8	20~50

表 4 UWM-10 沥青混合料路用性能试验结果

项目	车辙板渗水系 数/(mL·min <sup>-1</sup> )	残留稳定度/ %	冻融劈裂 强度比/%	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	-10℃弯拉 应变/με
检测结果	6	92.9	89.2	12 240	2 780
技术要求	≤50	≥85	≥80	≥3 000	≥2 500
试验方法	T0730-2011	T0709-2011	T0729-2000	T0719-2011	T0715-2011

由表 3 可以看出:采用马歇尔方法设计,在 145℃成型温度下制作的 UWM-10 超薄铺装材料的马歇尔各项体积指标均满足技术要求。由表 4 可以看出:由于采用密级配设计(设计空隙率仅为 5.0%),UWM

-10 超薄铺装材料具有良好的密水性能,在路用过程中可以有效延缓或避免水损害问题。由于 SBS 改性沥青与多链聚烯烃的复合改性作用,有效提升了其施工和易性,使得 UWM-10 超薄铺装材料更加便于成

型密实,且具有优异的高、低温性能,满足了超薄磨耗层高温抗车辙和低温抗开裂的路用要求。

2 UWM-10 混合料构造深度衰减特性试验研究

2.1 构造深度衰减试验方法

由上述室内配合比设计结果计算得出,UWM-10 超薄铺装沥青混合料的粉胶比为 1.6,大于传统密级配沥青混合料 0.8~1.2 的要求。通常认为,密级配沥青混合料粉胶比过大,容易导致通车后构造深度衰减过快,原因在于,沥青混合料中集料和胶浆之间的位置在轮碾过程中会发生变动,如果胶浆不稳定就会上浮,从而降低混合料在轮碾位置处的构造深度。

该文通过观测轮碾位置处混合料表面构造深度的变化,研究 UWM-10 超薄磨耗层的构造深度衰变情况。测试原理为:在车辙试验前先测试每块车辙板的构造深度,车辙试验后沿车辙试轮宽度切割成条状试件,测试试轮碾压位置的构造深度,通过车辙试验前后该位置处构造深度的变化比对,研究超薄铺装混合料在长期荷载作用下沥青胶浆上浮对后期构造深度的影响。

现行车辙试验检测动稳定指标时,测试时间是 60 min;当测试时间较短时,混合料表面的构造深度衰减较小,不易观测。因此,将车辙试验时间延长到 180 min,具体试验过程如下:

(1) 按照 300 mm×300 mm×50 mm 尺寸要求成型车辙板试件,采用铺砂法测试初始表面构造深度  $K_0$ 。

(2) 将表面的石英砂冲洗干净,采用荷载 0.7 MPa,按照现行规范 T0719-2011 进行车辙试验,测试时间为 180 min。

(3) 在车辙板中,切取试轮碾压位置处的长条形试件。

(4) 晾干后称量长条形试件质量  $m_1$ 。

(5) 在长条形试件表面铺砂。

(6) 称取砂和试件的总质量  $m_2$ 。

(7) 测量试验所用标准砂的密度  $\rho_G$ 。

(8) 测量长条形试件的长和宽,计算试件面积  $s$ 。

由此计算得出车辙试验后碾压位置处的构造深度  $K_1$ 。 $K_1=(m_2-m_1)/(\rho_G \cdot s)$

通过对比  $K_0$ 、 $K_1$ ,就可以得出 3 h 车辙试验后,沥青混合料表面构造深度的衰减状况。

2.2 构造深度衰减试验数据分析

为了进一步研究 UWM-10 超薄磨耗层的构造深度衰减状况,分别对其与 SMA-13 型混合料(SBS 改性沥青)、AC-13 型混合料(SBS 改性沥青)的构造深度衰减状况进行对比测试,并对其动稳定度及 60、180 min 下的车辙深度进行了计算或采集。同时,为了研究复合增效剂对 UWM-10 超薄磨耗层高温性能及其构造深度衰减状况的影响,对未添加复合增效改性剂的 UWM-10 超薄磨耗层也进行了对比测试。具体试验结果如表 5、6 所示。

表 5 4 种沥青混合料车辙动稳定度及车辙深度试验结果

混合料类型	油石比/ %	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	车辙深度/mm	
			60 min	180 min
UWM-10 超薄磨耗层(掺加复合增效剂)	5.4	12 240	0.791	0.935
UWM-10 超薄磨耗层(未掺加复合增效剂)	5.5	5 181	2.509	6.298
SMA-13	6.0	7 525	1.895	2.402
AC-13	5.0	6 221	1.858	2.389

表 5 数据显示:不论从动稳定度指标,还是从 60、180 min 车辙深度指标来看,含有复合增效剂的 UWM-10 超薄磨耗层的高温性能均显著高于 SMA-13 型、AC-13 型改性沥青混合料,具有优良的高温抗车辙性能,而未掺加复合增效剂的 UWM-10 超薄磨耗层的高温性能明显弱于其他 3 种混合料。

由表 6 数据可以看出:试验前构造深度从大到小依次为:SMA-13 型混合料、UWM-10 超薄磨耗层

(掺加复合增效剂)、UWM-10 超薄磨耗层(未掺加复合增效剂)、AC-13 型混合料;试验后构造深度从大到小依次为:SMA-13 型混合料、UWM-10 超薄磨耗层(掺加复合增效剂)、AC-13 型混合料、UWM-10 超薄磨耗层(未掺加复合增效剂),而衰减值从小到大则依次为:UWM-10 超薄磨耗层(掺加复合增效剂)、AC-13 型混合料、SMA-13 型混合料、UWM-10 超薄磨耗层(未掺加复合增效剂)。SMA-13 型混

表 6 4 种沥青混合料车辙试验前后构造深度试验结果

混合料类型	状态	构造深度/mm			
		试件 1	试件 2	试件 3	平均
UWM-10 超薄磨耗层 (掺加复合增效剂)	试验前	0.98	0.95	0.96	0.96
	试验后	0.67	0.67	0.67	0.67
	衰减值	0.31	0.28	0.29	0.29
UWM-10 超薄磨耗层 (未掺加复合增效剂)	试验前	0.96	0.98	0.93	0.94
	试验后	0.57	0.57	0.57	0.55
	衰减值	0.39	0.41	0.36	0.39
SMA-13	试验前	1.16	1.32	1.17	1.22
	试验后	0.84	0.88	0.83	0.85
	衰减值	0.32	0.44	0.34	0.37
AC-13	试验前	0.93	0.88	0.91	0.91
	试验后	0.65	0.52	0.58	0.58
	衰减值	0.28	0.36	0.33	0.32

注:衰减值=试验前数值-试验后数值。

合料在试验前后构造深度均最大,其衰减值也最大。

上述试验结果表明:含有复合增效剂的 UWM-10 超薄磨耗层其构造深度的衰减慢于 AC-13 型混合料,不含复合增效剂的 UWM 超薄磨耗层其构造深度衰减快于 AC-13 混合料。含有复合增效剂的 UWM-10 超薄磨耗层的构造深度衰减明显好于无复合增效剂的 UWM-10 超薄磨耗层,说明添加复合增效剂能减缓 UWM-10 超薄磨耗层构造深度的衰减。

同时,为了研究沥青混合料高温稳定性对构造深度衰减的影响,该文对 180 min 车辙深度与构造深度衰减比例进行了相关性分析,结果如图 1 所示。

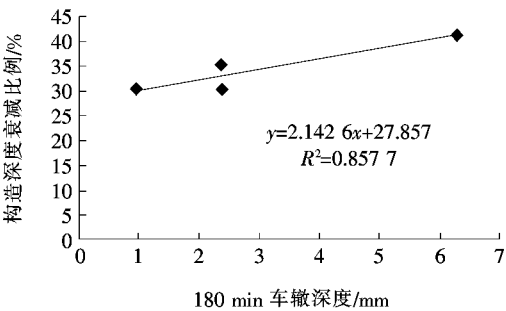


图 1 抗车辙性能与构造深度衰减的相关关系

由图 1 可以看出:对于上述 4 种不同类型的沥青混合料,抗车辙性能越强,其构造深度衰减比例越小,也就是说,通过提高沥青混合料的高温稳定性能,可以在一定程度上减缓其抗滑性能的衰减,同时也说明,通过提高混合料的高温稳定性,可以适当增大密级配沥

青混合料的粉胶比适宜范围。

3 UWM-10 混合料层间黏结效果评价

3.1 层间黏结效果评价方法

超薄铺装材料的层间黏结效果决定了铺装层与原沥青路面之间的整体性。UWM-10 超薄铺装材料由于良好的施工和易性,可以有效改善其层间黏结效果。该文为定量评价 UWM-10 超薄磨耗层与传统间断级配沥青路面的层间黏结效果,采用 CT 三维扫描技术与数字图像处理方法相结合,描述路面铺装结构层间黏结效果和内部微观结构,从而研究沥青混合料层间黏结与其内在细观结构组成的关系,以分析不同类型混合料超薄铺装的层间黏结效果。

CT 三维扫描技术,基本工作原理为:利用 X 射线对试件以扫描的方式从多方向透射其断层,用探测器对透射后发生衰减的射线进行采集,进行二维或三维灰度图像重建。

3.2 CT 三维扫描试验数据分析

该文以 UWM-10、SMA-10 两种超薄铺装结构作为研究对象。室内扫描采用的试件为标准的路面钻取芯样,扫描前需要对芯样进行切割处理,使得底面平整。CT 技术性能及参数如表 7 所示,试验参数为:电压 200 kV、电流 0.43 mA、间隔时间 300 ms。CT 扫

描结果如图 2、3 所示。

表 7 CT 技术性能及参数

X 轴/ mm	Y 轴/ mm	Z 轴/ mm	焦距范 围/mm	3D-XY-Pixel Size、 3D-Z-Pixel Size/mm
200	420	630	45~800	0.113

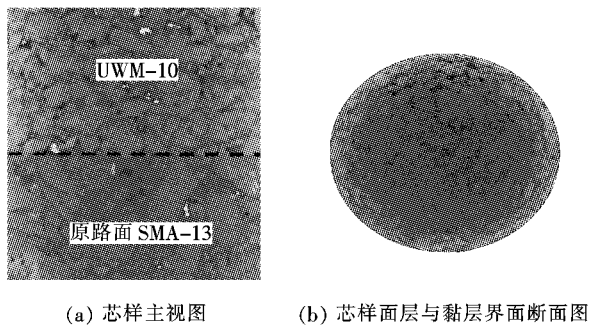


图 2 UWM-10 超薄磨耗层与原 SMA-13 沥青路面层间黏结界面扫描图片

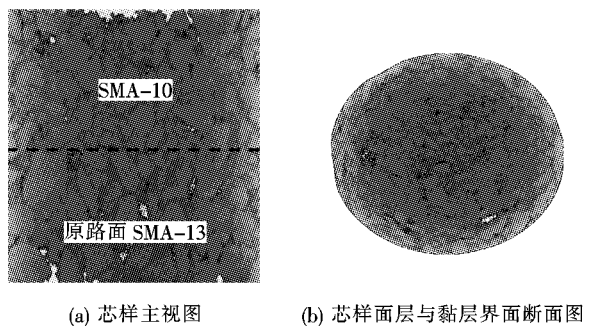


图 3 SMA-10 超薄磨耗层与原 SMA-13 沥青路面层间黏结界面扫描图片

从图 2、3 两种混合料的层间界面俯视图对比可以看出:UWM-10 超薄铺装混合料空隙大小均匀,分布也较为均匀,而 SMA-10 混合料空隙大小不一,且分布不均。

采用 CT 三维扫描技术,通过对扫描结果的图像进行分析来准确定位沥青混合料的内部骨料、空隙及裂纹等各组成部分的分布规律。对上述图片进行灰度处理,并采用 Orgin 软件进行灰度值分析计算出界面的空隙率,并绘制灰度—概率密度分布曲线(图 4)。由此,计算得出两种超薄磨耗层沥青混合料内部及其与原路面层间结合界面处的空隙率(计算结果如表 8 所示),并得到整体芯样空隙率随高度(自上而下)的变化关系(图 5)。

从表 8 计算数据可以得出:与 SMA-13 混合料相比,UWM-10 超薄铺装层与原路面黏结界面处的空隙率比其低 1.2% 左右,也就是说,UWM-10 超薄

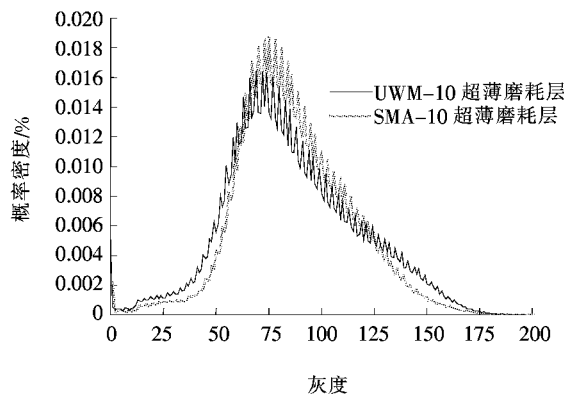


图 4 两种沥青混合料灰度—概率密度分布曲线

表 8 两种超薄磨耗层沥青混合料内部与层间界面处的空隙率

铺装结构类型	铺装层平均空隙率/%	与原路面黏结界面处空隙率/%
UWM-10+改性乳化沥青黏层+原 SMA-13 路面	3.26	1.92
SMA-10+改性乳化沥青黏层+原 SMA-13 路面	4.05	3.09

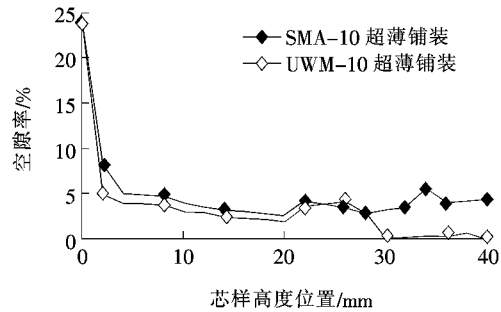


图 5 两种超薄铺装结构面层空隙率随芯样高度变化曲线

铺装层与原路面的层间黏结更加密实。由图 5 可以看出:UWM-10 超薄铺装整体面层空隙率均低于 SMA-10 混合料。分析原因:① 由于 UWM-10 超薄铺装混合料与原沥青路面之间洒布改性乳化沥青黏层,摊铺 UWM-10 混合料时,乳化沥青黏层材料重新受热软化,进而使得 UWM-10 混合料与原路面接触更为密实;② UWM-10 超薄铺装材料采用密级配并掺加复合增效剂,显著提升了其施工和易性,使其施工过程中更易压实。此外,UWM-10 超薄铺装材料的内部空隙率要比 SMA-10 混合料低 0.8% 左右,这主要是由于 SMA-10 混合料粗骨料含量较多,与原路面黏结界面存在更多的点接触,而 UWM-10 混合料采用嵌挤密实结构,细料相对更多,从而使得混合料内部

结构更为密实。

### 3.3 现场拉拔试验验证

为验证 CT 扫描试验结论,对 UWM-10、SMA-10 两种超薄铺装结构分别进行现场拉拔试验,拉拔强度计算结果如表 9 所示。

表 9 UWM-10 与 SMA-10 超薄铺装结构界面  
拉拔试验结果

超薄铺装结构类型	拉拔 力/kN	拉拔强 度/MPa	界面温 度/℃
UWM-10+改性乳化沥青 黏层+原 SMA-13 路面	2.0	0.250	30
SMA-10+改性乳化沥青 黏层+原 SMA-13 路面	1.3	0.166	30

由表 9 可知:在相同环境温度下,UWM-10 超薄铺装结构的层间拉拔强度要高于 SMA-10 超薄铺装结构层间黏结强度近 42%。采用 UWM-10 超薄铺装材料,可以增强与原沥青路面的层间黏结效果,也验证了 UWM-10 超薄铺装结构具有更好的层间密实性,由此充分说明,该文所设计的密级配 UWM-10 超薄铺装材料与传统的 SMA-10 超薄铺装材料相比,具有更好的密水性、抗车辙性能及结构整体性。

## 4 结论

(1) 采用多链聚烯烃类增效改性剂与 SBS 改性沥青复合改性,并通过密级配设计的超薄铺装材料 UWM-10 具有良好的高低温性能,其中 60℃动稳定度达到 12 240 次/mm,低温性能达到 2 780  $\mu\epsilon$ ,满足了超薄磨耗层高温抗车辙和低温抗开裂的路用要求。

(2) 该文所设计的密级配超薄铺装材料 UWM-10 具有良好的抗滑密水特性,改进的车辙试验和构造深度衰减评价表明:UWM-10 较传统的 SMA-13 和 AC-13 沥青混合料而言,高温稳定性能大幅度提升,且长期抗滑性能衰减较慢。

(3) 利用 CT 扫描试验及现场拉拔试验对 UWM-10 和 SMA-10 两种超薄铺装结构的层间黏结效果进行评价。结果表明:采用该文所设计的密级配超薄铺装材料 UWM-10,其罩面铺装结构的内部及层间

界面空隙率均低于 SMA-10 罩面铺装结构,且 UWM-10 与原沥青路面具有更好的黏结效果及结构整体性。

### 参考文献:

- [1] Lu Sheng-di, Wang Chang-yin, Li Ping. Research on Application of Ultra-Thin Wearing Surface to Highway Surface Preventive Maintenance[C]. Proceedings of International Workshop on Energy and Environment in the Development of Sustainable Asphalt Pavements, 2010: 401-405.
- [2] Xiao Y, Wang Y, Wu S, et al. Assessment of Bonding Behaviours between Ultrathin Surface Layer and Asphalt Mixture Layer Using Modified Pull Test[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015, 29(14): 1 508-1 521.
- [3] Yang Y H, Shen Y, Gao X X. Analysis Interlayer Shear Stress of Ultra-Thin Wearing Course Considering Temperature and Different Interlayer Contact Conditions[C]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 505: 102-105.
- [4] Xiao J, Wang Z. Evaluation of Air Void Distributions of Cement Asphalt Emulsion Mixes Using an X-Ray Computed Tomography Scanner[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(2): 273-280.
- [5] Y. Zhang, W. Verwaal, M.F.C. van de Vena, et al. Using High-Resolution Industrial CT Scan to Detect the Distribution of Rejuvenation Products in Porous Asphalt Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015 (100): 1-10.
- [6] 谭忆秋,姚李,王海朋,等.超薄磨耗层沥青混合料评价指标[J].哈尔滨工业大学学报,2012(12).
- [7] Rahaman F, Musty H Y, Hossain M. Evaluation of Recycled Asphalt Pavement Materials from Ultra-Thin Bonded Bituminous Surface[J]. Proceedings of Geo Congress, 2012: 25-29.
- [8] 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).
- [9] 杨献章,凌剑兴,吴超凡,等.Novachip®超薄磨耗层沥青混合料使用性能评价[J].公路工程,2013(1).
- [10] 彭亮清.超薄磨耗层路面使用性能与层间剪切试验研究[D].湖南大学硕士学位论文,2012.
- [11] 南雪峰.超薄磨耗层矿料级配实验研究[J].公路,2009 (4).