

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.055

## 超弹改性沥青裂缝阻断层混合料路用性能研究

朱连照<sup>1</sup>, 孙赋成<sup>1</sup>, 蔡文龙<sup>2</sup>

(1. 江苏宁靖盐高速公路有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 江苏中路工程技术研究院有限公司)

**摘要:**为减少裂缝等病害对在役高速公路路面加铺排水沥青面层使用效果的影响,采用SBS改性沥青和超弹改性剂,并结合混合料级配设计方法,设计和研究了一种超弹改性沥青裂缝阻断层混合料AC-5。通过四点弯曲疲劳试验、动稳定度试验、小梁低温弯曲试验对其抗疲劳性能、高温性能和低温性能进行评价分析。结果表明:在20℃、1 000  $\mu\epsilon$ 的应变控制模式下,超弹改性沥青裂缝阻断层混合料疲劳寿命超过了200 000次,动稳定度达到5 522次/mm,小梁低温弯曲应变为7 599  $\mu\epsilon$ ,相比常规改性沥青混合料,具有抗疲劳性能优异以及较好的高温稳定性和低温抗裂性。最后,确定了裂缝阻断层的施工工艺,铺筑了479 m的试验路,通过铺筑2个月和1年后的现场观测可知裂缝阻断层应用情况良好。

**关键词:**排水路面;裂缝阻断层;应力吸收层;超弹改性沥青;疲劳寿命;高低温性能

近年来,路面排水问题受到越来越多的关注,很多城市道路和高速公路都存在排水不畅的问题,给交通出行带来极大的不便。应运而生的OGFC、PAC等排水路面得到道路工作者的认可,被普遍应用到沥青路面的修筑中。同时沥青路面处于养护维修期,排水路面也被作为罩面用于提升原路面的路用性能,但随之也发现排水路面容易出现裂缝、松散等病害,主要是由于排水路面为了满足排水需求,其空隙率较大,承载能力较低,沥青膜较薄,在水和车辆荷载的长期作用下,极易出现裂缝、松散等病害,尤其是裂缝病害,其极易向下发展与原路面的裂缝形成贯通裂缝,对路面的耐久性极其不利。故亟需寻找一种有效的方法,防止裂缝加重。

考虑到中国沥青路面结构的现状,大多数路面采用半刚性基层,半刚性基层由于其具有较高的模量在修筑初期就存在着一定的裂缝,随后在车辆荷载作用

下,裂缝开裂加大,并逐渐向面层反射,产生反射裂缝,故通常会在半刚性基层与沥青面层间设置应力吸收层,显著降低沥青面层层底的荷载应力,延缓反射裂缝的发展。借鉴此思想,在加铺排水罩面和旧沥青路面间设置一层类似于应力吸收层的沥青混合料,以解决加铺排水罩面养护维修后路面使用寿命短的问题,具有显著的经济效益。

该文研究开发一种与传统的应力吸收层作用相类似的裂缝阻断层沥青混合料,对其必备的抗疲劳性能、高温性能和低温性能进行测试,评价其性能的优劣,并对其施工关键技术进行研究,为其推广应用奠定一定的基础。

## 1 依托工程

江苏盐(城)一靖(江)高速公路(S29),全长

- \*\*\*\*\*
- [24] 何雁斌. 活性粉末混凝土(RPC)的配制技术与力学性能试验研究[D]. 福州大学硕士学位论文,2003.
- [25] 吴炎海,何雁斌,杨幼华. 活性粉末混凝土(RPC200)的力学性能[J]. 福州大学学报(自然科学版),2003(5).
- [26] 李莉. 活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文,2010.
- [27] 原海燕. 配筋活性粉末混凝土受拉性能试验研究及理论分析[D]. 北京交通大学博士学位论文,2009.

- [28] 徐海宾,邓宗才. 超高性能混凝土梁抗剪承载力计算方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2015(7).
- [29] 邓宗才,周冬至,程舒锴. 配筋活性粉末混凝土梁抗剪承载力[J]. 哈尔滨工程大学学报,2014(12).
- [30] 郑辉. 混凝土箱梁抗剪性能试验研究[D]. 湖南大学博士学位论文,2015.
- [31] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].

收稿日期:2020-11-10(修改稿)

作者简介:朱连照,男,研究员级高工. E-mail:1651599033@qq.com

187.66 km,运营至今已超过16年,期间进行过多次路面专项养护,取得了较为显著的效果。现阶段虽然PCI、RQI等检测指标尚好,但部分路段沥青面层老化,路面裂缝、松散等病害密集,在影响车辆行驶安全性及舒适性的同时,整体路面结构的耐久性不断下降。因此,结合盐靖高速公路的现状以及排水路面的优点,盐靖高速公路计划未来大规模使用排水路面,对原路面进行养护,以提高路面的服务水平。

通过对江苏省加铺排水路面裂缝发展形态调研可知,加铺排水路面的开裂主要表现为上下同时开裂,并有相互贯通的趋势,因此为了控制裂缝的进一步发展,避免路表水沿裂缝流入基层,必须在排水路面与老路面间设置阻断裂缝发展的抗疲劳层(也称裂缝阻断层),如图1所示,以延缓裂缝病害的进一步发展。

根据裂缝阻断层的研究成果,为了阻断排水路面裂缝快速向下发展,延缓老路裂缝向上发展,提高路面整体结构性能,设计了一种裂缝阻断层混合料。同时为了进一步提高排水路面的降噪效果,提出了降噪超薄排水混合料。制定的路面改造方案如图2所示。

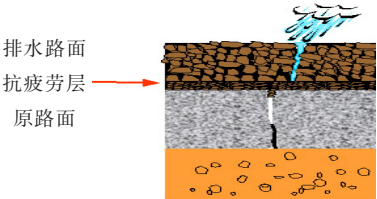


图1 加铺排水路面裂缝发展趋势

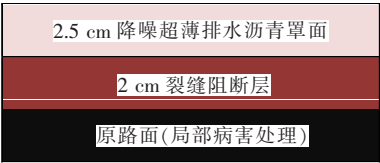


图2 盐靖高速公路路面改造方案

## 2 裂缝阻断层混合料设计

### 2.1 材料选择

为了实现裂缝阻断层的抗裂性能,沥青采用SBS改性沥青+超弹改性剂,主要是通过提升沥青的低温延度、弹性恢复和软化点,提高沥青的弹性,降低沥青的温度敏感性,从而提升抗裂层的应力吸收效果。超弹沥青技术指标如表1所示。其他沥青材料有普通SBS改性沥青、橡胶沥青等,集料采用抗压能力较强的玄武岩,通常认为玄武岩与沥青黏附性较强,从理论上

讲其与超弹改性沥青黏结可发挥较强的应力吸收效果。矿粉采用石灰岩。

表1 超弹改性沥青各项性能指标

试验项目	单位	试验数值	技术要求
软化点	℃	>100	≥70
针入度	0.1 mm	73.2	60~110
延度(5℃)	cm	64.8	≥50
溶解度	%	99.7	≥99
135℃黏度	Pa·s	3.85	<3
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.021	—
闪点	℃	>280	≥230
弹性恢复	%	89.3	≥70
离析(48 h)	℃	—	<6

### 2.2 配合比设计

裂缝阻断层与应力吸收层类似,其厚度一般为2 cm左右,为保证其具有较好的阻水性和低温韧性,必须使用粒径较小的混合料,综合考虑盐靖高速公路交通条件及当地气候环境特点,依据沥青混合料级配类型规范要求,裂缝阻断层混合料采用密级配沥青混合料AC-5。AC-5超弹改性沥青混合料级配设计过程如下:

#### (1) 集料筛分

对所取样品采用四分法进行集料筛分和密度试验,结果见表2、3。

表2 集料筛分结果

材料	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1# 碎石	100	71.0	4.8	1.9	0.7	0.2	0.2	0.2
2# 碎石	100	100	82.4	58.8	40.8	26.6	17.3	8.9
矿粉	100	100	100	100	100	96.2	89.8	74.7

表3 集料密度试验结果

材料	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率/%
1# 碎石	2.905	2.815	1.10
2# 碎石	2.913	2.810	1.26
矿粉	2.707		—

#### (2) 矿料级配调试

依据集料筛分试验结果,进行了配合比级配组合

设计,各热仓料及矿粉质量比为:1<sup>#</sup>(3~6 mm):2<sup>#</sup>(0~3 mm):矿粉=35:60:5。

矿料合成级配如图 3 所示。

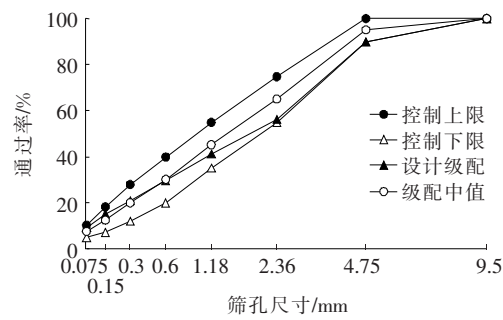


图 3 矿料合成级配图

表 4 生产级配马歇尔稳定度试验结果

项目	油石比/ %	试件毛体积 相对密度	实测理论最 大相对密度	空隙率 VV/%	流值/ (0.1 mm)	稳定度/ kN
选定级配	6.4	2.523	2.597	2.8	21.3	18.13
技术要求	—	—	—	1~3	20~40	≥8

排水路面和旧沥青路面内部裂缝尖端会产生应力集中,加之作用时间的增长,会导致面层材料疲劳而使裂缝开裂严重,两者裂缝逐步向下、向上发展直至贯穿整个面层。裂缝阻断层是设置在加铺排水罩面和旧沥青路面间的夹层,其抗疲劳开裂性能的好坏影响裂缝贯穿的速度,是整个路面结构防裂的关键,故需对其抗疲劳开裂性能进行深入研究。

裂缝阻断层混合料的疲劳试验采用四点小梁弯曲试验进行评价,试验设备采用 UTM-30,在 1 000 με 应变控制模式下施加半正弦波荷载进行试验,采用模量下降至初始模量的 50%时所对应的荷载作用次数作为混合料的疲劳寿命。

为了进一步分析裂缝阻断层混合料的疲劳性能,对比了其与普通改性沥青、橡胶沥青及 Strata 应力吸收层沥青混合料在相同应变水平下的疲劳寿命,试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,超弹改性沥青裂缝阻断层混合料的疲劳寿命远大于 200 000 次,表明其疲劳性能十分优异。对比 4 种沥青混合料试验数据可知,在相同应变水平下,Strata 应力吸收层的疲劳性能十分优异,其次是超弹改性沥青,最后分别是常规改性沥青和橡胶沥青,并且在大应变条件下,这 4 种应力吸收层的疲劳寿命都较高,因此可认为这 4 种应力吸收层的疲劳性能均十分优异。

(3) 马歇尔击实试验

根据配合比确定 6.4%为基准油石比,击实温度采用 165~170 ℃,试验结果如表 4 所示。

由表 4 可知:超弹改性沥青混合料的各项性能指标均满足规范要求,下一步计划对其路用性能进行深入研究,以判断其路用性能的优劣。

3 裂缝阻断层沥青混合料路用性能评价

3.1 抗疲劳开裂性能

沥青路面在行车荷载和温度应力的作用下,加铺

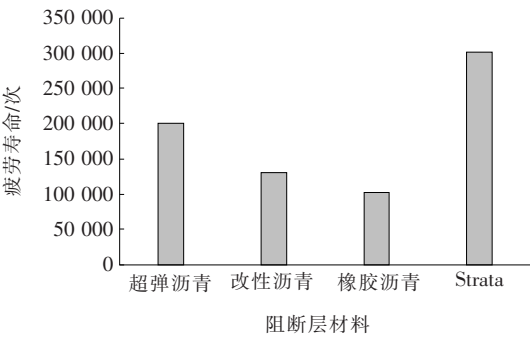


图 4 超弹沥青与其他应力吸收层的疲劳寿命

3.2 高温稳定性

沥青混合料高温性能是指在荷载作用下,沥青混合料抵抗不可逆变形的能力。裂缝阻断层位于加铺排水罩面下层,层位较浅,且其沥青混合料中沥青含量较高,级配颗粒较细,当夏季高温作用时,沥青黏度大幅降低,沥青与矿料的黏结力也会下降,从而导致裂缝阻断层强度和抗变形能力下降,在行车荷载的重复作用下,极易产生永久不可逆变形,严重影响路面结构稳定性。所以,有必要对其高温稳定性进行研究。

采用动稳定度试验评价裂缝阻断层超弹改性沥青混合料的高温性能,同时,为了进一步评价其与现有其他应力吸收层混合料高温性能的优劣,将其与常规改性沥青和 Strata 应力吸收层的高温性能进行对比,结果如图 5 所示。

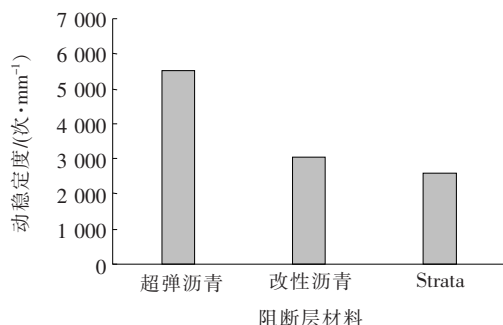


图5 超弹沥青与其他应力吸收层的动稳定度

由图5可知:超弹改性沥青混合料的动稳定度达到5 522次/mm,其高温性能十分优异,而改性沥青和Strata应力吸收层的动稳定度分别为3 028、2 603次/mm,其高温性能相对较差。

### 3.3 低温抗裂性能

由于昼夜温差大或气温骤降,沥青路面会产生温度应力和收缩变形,加之沥青路面没有伸缩缝,导致收缩变形受到限制,而使沥青内部产生拉应力,一般较小的拉应力会在沥青混凝土自身应力松弛能力的作用下慢慢消散,但当昼夜温差过大或气温骤降过大时,路面内部较大的拉应力不会被及时松弛,而产生过量的应力集中,使收缩变形超出沥青混合料抵抗不可逆变形能力或温度应力超出其自身抗拉强度时,沥青路面就会开裂出现裂缝。裂缝阻断层仅位于加铺排水罩面层下面,层位较浅,对温度变化敏感,容易出现低温开裂的情况,有必要对低温开裂性能进行研究。

采用小梁弯曲试验评价裂缝阻断层超弹改性沥青混合料的低温性能,同时,为了进一步分析其低温性能水平,将其与常规改性沥青和Strata应力吸收层混合料的低温性能进行对比,结果如图6所示。

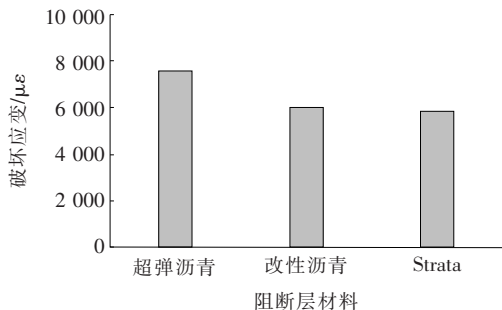


图6 超弹沥青与其他应力吸收层的破坏应变

由图6可知:超弹改性沥青混合料的低温破坏应变达到7 599  $\mu\epsilon$ ,其低温性能最优,而改性沥青混合料和Strata应力吸收层混合料的低温性能则相对较弱,

其低温破坏应变分别为6 027、5 813  $\mu\epsilon$ 。

综上所述,超弹改性沥青混合料抗疲劳性能优异,且兼具较好的高温稳定性及低温抗裂性。

## 4 裂缝阻断层施工关键技术研究

### 4.1 试验路铺筑

基于超弹改性沥青混合料室内试验研究成果,同时为了验证超弹改性沥青混合料实际使用效果,采用盐靖高速公路旧路改造方案进行试验段铺筑,为其推广应用积累实践经验。

2018年盐靖高速公路排水型沥青混凝土罩面工程的实施路段为靖盐方向K88+400~K98+200段,为了与PAC-13路段使用效果进行对比,试验段综合考虑交通量、路面病害情况等,在2018年排水路面罩面段附近选择路段进行试验段铺筑,试验段为靖盐方向K88+332~K88+811段,试验段长度为479 m。

### 4.2 施工工艺研究

#### (1) 混合料的拌制

试验段沥青混合料生产量约为120 t/h,超弹改性剂采用人工投放。混合料拌和过程中,干拌时间为10~15 s;由于超弹沥青应力吸收层混合料中细集料多,湿拌时长比一般沥青混合料要长10~15 s,为55~65 s。考虑到混合料摊铺厚度较薄,温度损失较快,因此要适当提高混合料的出料温度,出料温度约为186  $^{\circ}\text{C}$ 。

#### (2) 混合料的运输

运料车要有良好的篷布覆盖设施,并且确保卸料过程中继续覆盖,直到卸料结束取走篷布,既保温又避免污染环境。采用数字显示插入式热电偶温度计检测沥青混合料运到现场的温度,确保到场温度为185  $^{\circ}\text{C}$ 。

#### (3) 混合料的摊铺

试验段铺筑过程中,应严格控制超弹改性沥青混合料的摊铺温度,现场控制为183  $^{\circ}\text{C}$ 。摊铺机前方有足够的运料车等候卸料,确保连续摊铺。连续摊铺过程中,运料车在摊铺机前10~30 cm处停车,不得撞击摊铺机。卸料过程中运料车挂空档,靠摊铺机推动前进,以减少摊铺机抖动,提高摊铺的平整度。

摊铺过程中,摊铺机松铺系数设置为1.12,摊铺速度为4 m/min,做到缓慢、均匀、不间断地摊铺,不出现停机待料的现象;摊铺采用2台摊铺机梯队作业,相邻摊铺机相距小于20 m,有效地保证纵向接缝的碾压温度。

#### (4) 沥青混合料的碾压



沥青混合料的压实是保证沥青面层质量的重要环节,应选择合理的压路机组合方式及碾压步骤。压路机的适宜碾压速度随初压、复压、终压及压路机的类型而定,按表 5 选用。

表 5 裂缝阻断层混合料建议碾压方案

压路机类型	初压		复压		终压	
	适宜速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	遍数/ 遍	适宜速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	遍数/ 遍	适宜速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	遍数/ 遍
钢轮压路机(13~16 t)	4~6	2			4~6	1
胶轮压路机(26 t)			4~6	2		

碾压过程中为保证压实度和平整度,初压应在混合料不产生推移、开裂等情况下尽量在摊铺后较高温度下进行,按“高温、紧跟”的原则进行碾压,发现黏轮现象时,不得向压路机轮上涂油或油水混合液,必要时可喷涂清水或皂水等隔离剂,终压胶轮碾压要在 70℃左右进行,温度不能过高,以防止混合料底部温度过高导致碾压过于密实。当路面温度低于 50℃时便可开放交通或进行下一环节的施工作业。

最终确定裂缝阻断层各个环节的温度控制如表 6 所示。

表 6 沥青混合料的控制温度℃

温度控制环节	实测温度	技术要求
矿料加热	195	190~210
高黏沥青加热	170	160~170
沥青混合料出料	186	175~185,超过 190 废弃
到场	185	≥165
混合料摊铺	183	≥160
初压	160	≥155
复压	138	≥135
碾压終了	110	≥50

4.3 质量检验

裂缝阻断层混合料在施工过程中应重点控制材料级配、混合料性能、压实度、渗水等指标,施工后对试验段进行相关检测。首先对回收的沥青混合料进行了抽提,抽提后级配检测结果如图 7 所示;其次检测了沥青混合料的各项性能,结果如表 7 所示;最后对其压实度和渗水进行了测试,结果如表 8 所示。

由表 7 可知:试验路铺筑的裂缝阻断层沥青混合料的动稳定度只有 3 119 次/mm,而室内试验为 5 522 次/mm,究其原因为室内试验的裂缝阻断层沥青混合料是严格按照配合比设计结果进行成型的,故其材料性能比较稳定,测得的动稳定度较高;而试验路铺筑过程中使用的集料规格偏细,2.36 mm 的通过率偏大

(图 7),造成沥青混合料整体偏细,实际压实过程中偏细的沥青混合料并不易压实,同时由于缺乏大粒径集料,沥青混合料没有形成较好的骨架结构,造成试验路铺筑的沥青混合料动稳定度偏小。

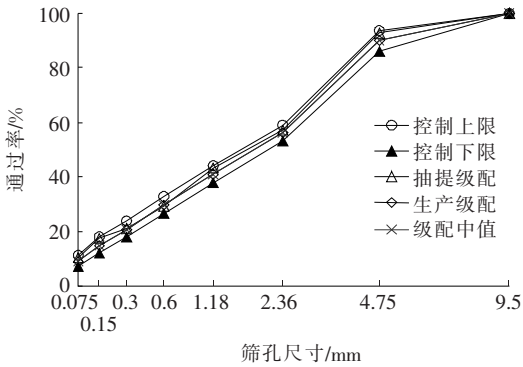


图 7 裂缝阻断层抽提级配曲线图

表 7 裂缝阻断层混合料性能

性能指标	单位	测值	设计要求
击实次数	次	双面 75	双面 75
毛体积密度	g/cm <sup>3</sup>	2.466	—
实测理论密度	g/cm <sup>3</sup>	2.512	—
空隙率	%	1.8	1~3
稳定度	kN	21.23	≥8
残留稳定度	%	98.5	≥80
动稳定度	次/mm	3 119	≥3 000
冻融劈裂强度比	%	90.9	≥75

由图 7 和表 7、8 可知:裂缝阻断层混合料级配满足级配范围要求,混合料的体积指标、高温稳定性、水稳定性等均能够满足技术要求,且施工后的路面压实度合格率为 100%,路面渗水状况良好,能够较好地防止雨水下渗损坏原路面。

5 工后观测

分别在通车2个月后和通车1年后,对裂缝阻断

表 8 裂缝阻断层现场检测结果

取芯桩号	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	参考密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	马氏压 实度/%	理论压 实度/%	渗水/ (mL · min <sup>-1</sup> )
K88+700 超	2.431	马氏密度:2.466 理论密度:2.512	98.6	96.8	不渗
K88+700 行	2.416		98.0	96.2	不渗
K88+600 超	2.423		98.3	96.5	10
K88+600 行	2.419		98.1	96.3	20
K88+500 超	2.437		98.8	97.0	不渗
K88+500 行	2.422		98.2	96.4	25
K88+400 超	2.434		98.7	96.9	不渗
K88+400 行	2.427		98.4	96.6	不渗
技术要求			≥98	—	≤50

层试验路段进行了现场观测。结果表明:试验段整体状况良好,并未出现裂缝、坑槽、车辙等病害,后期仍会继续对试验段加强跟踪观测,对裂缝阻断层的后期使用效果进行深入评价。

6 结论

- (1) 提出了防止加铺排水路面裂缝发展和降低排水路面噪音的路面改造方案,即 2.5 cm 降噪超薄排水沥青罩面+2 cm 裂缝阻断层+原路面(局部病害处理);并设计了裂缝阻断层混合料采用 AC-5 超弹改性沥青混合料。
- (2) 室内试验结果显示,超弹改性沥青混合料比常规的改性沥青及橡胶沥青应力吸收层混合料性能更加优异,具有很高的抗疲劳性能,抗疲劳性能超过 20 万次,且兼具较好的高温稳定性及低温抗裂性。
- (3) 确定了裂缝阻断层的施工工艺,并在盐靖高速公路上铺筑了 479 m 试验段,通过试验段的路面性能分析得知,裂缝阻断层的各项指标均能满足技术要求;但其与室内试验指标仍存在一定差距,故开发新材料时,应重点考虑室内试验与实体工程的差距,以实体工程性能为导向,开发出具有较好路用性能的材料。
- (4) 由竣工后使用效果观测得到,裂缝阻断层的应用情况良好,为了进一步验证是否能够达到设计目标,应进一步加强跟踪观测。

参考文献:

[1] 刘广,黄桥连,关宏信,等.改性沥青应力吸收层材料及结构性能试验比较[J].中外公路,2013(3).

[2] 赵复笑.公路沥青混合料应力吸收层结构性能及其试验研究[D].东北大学博士学位论文,2013.

[3] 黄卫东,田健君,李本亮,等.连续密级配橡胶沥青混合料应力吸收层的研究[J].建筑材料学报,2014(5).

[4] 赵乐.长寿命路面结构中应力吸收层的试验研究[J].北方交通,2018(1).

[5] 潘睿,程培峰.适于应力吸收层的寒区温拌橡胶沥青混合料配合比设计和路用性能研究[J].世界地震工程,2015(1).

[6] 唐曦.应力吸收层沥青混合料组成设计及路用性能试验研究[D].长沙理工大学硕士学位论文,2015.

[7] 李祖仲,陈拴发,廖卫东,等.改性沥青应力吸收层混合料低温抗裂性能评价[J].中国公路学报,2012(4).

[8] 汤文,盛晓军,孙立军.应力吸收层沥青混合料性能研究[J].建筑材料学报,2009(2).

[9] 王慧民.应力吸收层橡胶沥青混合料的路用性能[J].筑路机械与施工机械化,2012(4).

[10] 蔡燕霞.橡胶沥青应力吸收层结构行为与路用性能研究[D].长安大学博士学位论文,2016.

[11] 李彩霞,张苛,罗要飞.基于半圆弯拉试验的多聚磷酸改性沥青混合料低温性能改善研究[J].中外公路,2019(4).

[12] 冯新军,解明卫.再生聚苯乙烯掺配改性剂对沥青混合料性能的影响分析[J].中外公路,2020(4).