

# 大粒径透水性沥青混合料抗剪强度试验研究

许玉和<sup>1</sup>, 胡家波<sup>2</sup>, 高岳峰<sup>1</sup>, 成永宁<sup>1</sup>, 袁 帅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国铁建投资集团有限公司, 北京

<sup>2</sup>高速公路养护技术交通行业重点实验室(济南), 山东 济南

Email: 95308758@qq.com

收稿日期: 2021年6月23日; 录用日期: 2021年7月22日; 发布日期: 2021年7月29日

## 摘 要

大粒径透水性沥青混合料由于具有优良的高温稳定性、透水性, 对于解决半刚性基层路面的水损害及反射裂缝起到了很好的作用, 目前在国内形成了独具特色的山东路面结构形式。其设计标准已被国际公认为达到了长寿命沥青路面设计标准。沥青混合料的强度和稳定性理论要求沥青混合料在高温时必须具有良好的抗剪强度以抵抗荷载的作用, 而抗剪强度的高低主要由沥青混合料的黏聚力 $C$ 和内摩擦角 $\varphi$ 两个参数决定。沥青混合料的黏聚力 $C$ 取决于沥青的性能及沥青与矿料的相互作用, 而内摩擦角 $\varphi$ 的大小由沥青混合料的矿料级配、颗粒形状、表面特征及沥青膜厚度决定。基于LSPM的上述性能特点, 本文在采用不同胶结料进行LSPM混合料设计的基础上对设计混合料的抗剪强度进行了研究分析。抗剪强度结果表明, 胶粉的加入提高了沥青胶结料的黏韧性, 将其用于LSPM混合料时, 抗剪强度相比采用MAC和SBS改性沥青好, 道路石油沥青由于其黏度较低, 设计混合料的抗剪强度同比最小。MAC和SBS改性沥青较基质沥青具有明显的高温性能优势, 橡胶沥青作为高粘弹、低成本产品, 用于大粒径透水性沥青混合料具有良好的高温性能, 具有良好的应用前景。

## 关键词

沥青混合料, 大粒径透水性沥青混合料, 抗剪强度, 内摩阻力, 黏聚力

## Experimental Research on Shear Strength of LSPM

Yuhe Xu<sup>1</sup>, Jiabo Hu<sup>2</sup>, Yuefeng Gao<sup>1</sup>, Yongning Cheng<sup>1</sup>, Shuai Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing

<sup>2</sup>Key Laboratory for Expressway Maintenance Technology of Ministry of Communications, Jinan Shandong

Email: 95308758@qq.com

Received: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Due to its excellent high temperature stability and water permeability, LSPM has played a very good role in solving the water damage and reflective cracks of the semi-rigid base pavement. At present, a unique Shandong pavement structure has been formed in China. Its design standard has been recognized internationally as reaching the design standard for long-life asphalt pavement. According to the theory of asphalt mixture strength and stability, asphalt mixture must have certain shear strength at high temperature. The shear strength mainly depends on the two parameters of asphalt mixture's cohesion  $C$  and internal friction angle  $\varphi$ . The cohesive force  $C$  of the asphalt mixture depends on the performance of the asphalt and the interaction between the asphalt and the mineral material, while the internal friction angle  $\varphi$  depends on the mineral material gradation, particle shape, surface characteristics and thickness of the asphalt film of the asphalt mixture. Based on the above-mentioned performance characteristics of LSPM, this paper uses different binders to design LSPM mixtures, and analyzes the shear strength of LSPM mixtures with different binder designs. According to the research results, since the rubber asphalt has a higher viscosity, the shear strength of the mixture designed with it is better than that of MAC and SBS. Unmodified asphalt has lower viscosity. The shear strength of the design mixture is the smallest compared with others. MAC and SBS modified asphalt has obvious advantages in high temperature performance compared with unmodified asphalt. As a high viscoelastic, low-cost product, rubber asphalt has good high temperature performance when used in LSPM and has good application prospects.

## Keywords

Asphalt Mixture, LSPM, Shear Strength, Internal Friction, Cohesion

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

大粒径透水性沥青混合料 LSPM (Large-Stone Porous Asphalt Mixes)是指混合料的最大粒径为 25~63 mm (1 英寸~2.5 英寸)的热拌沥青混合料, 其应用最早可追溯到 20 世纪初。早在 1903 年 Warren Brothers 公司提出申请并获得专利在沥青混合料中使用大粒径集料[1], 其矿料的最大尺寸高达 75 mm, 能提供较大密实度和稳定度, 大粒径沥青混合料的概念才被引入。美国国家沥青技术中心(NCAT) Prithvi S. Kandhal 先生[2]在 90 年代初对大碎石沥青混合料的研究, 主要从这种定义出发进行的, 其级配设计理念与普通沥青混合料没有很大的区别, 主要解决大粒径沥青混合料的设计、成型方法等问题。

2001 年, 为了解决半刚性基层的反射裂缝等问题原山东省交通厅设立专项课题对大粒径透水性沥青混合料进行系统研究, 并由原交通厅公路局联合交通科研所于 2009 年制定《大粒径透水性沥青混合料应用技术规程》[3], 对不同粒径的 LSPM 级配范围进行规定, 同时提出相应的设计及验证技术指标。

大粒径透水性沥青混合料是以粗集料的骨架结构为典型特征的沥青混合料, 具有优良的高温稳定性, 而且其具有良好的联通空隙从而能将渗入路面结构的水分迅速排出, 同时由于孔洞的存在能够抵消半刚性基层的反射裂缝。但其对沥青的要求较高, 要求粘度较高而且要具有良好的高温性能。本文从为大粒径透水性沥青混合料寻找更加经济实用胶结料的角度出发, 选择四种不同类型的沥青胶结料进行混合料

设计, 并对设计的混合料的各项指标进行了测试, 尤为重要的混合料的抗剪强度指标进行了对比分析和研究。

## 2. 沥青混合料抗剪强度

### 2.1. 抗剪强度理论

我国早在 1990 年的《城市道路设计规范》[4] (CJJ37-90)中, 为了控制城市道路交叉口沥青面层的车辙就把沥青面层的抗剪指标写入其中, 但并未得到广泛应用。以摩尔-库伦强度理论[5]为分析方法通过三轴试验对沥青混合料的黏聚力和内摩擦角两个参数进行分析, 通过这两个参数对沥青混合料啊的抗剪强度进行评价, 计算公式为:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad \text{式 1}$$

其中:

- $\tau$ —沥青混合料的抗剪强度, MPa;
- $c$ —沥青混合料的黏聚力, MPa;
- $\sigma$ —剪切时的压应力, MPa;
- $\varphi$ —沥青混合料的内摩擦角, rad。

### 2.2. 抗剪强度实验方法

邵腊庚[6]曾对国内常用的沥青混合料抗剪试验方法进行了总结。目前我国常用到的几种测试混合料抗剪强度的试验方法主要有: 三轴压缩试验[7], 单轴贯入试验、便携式剪切仪、简单剪切试验机(SST)。

## 3. LSPM 混合料设计

为了分析不同胶结料对 LSPM 混合料抗剪切强度的影响, 本文选择了四种沥青胶结料, 道路石油沥青代号为 J, MAC 改性沥青代号为 M, SBS 改性沥青代号为 S, 橡胶沥青代号为 X。并对四种胶结料的各项指标进行了检测, 并对四种胶结料指标检测结果进行分析。石料选用石灰岩碎石, 填料选择石灰粉。

### 3.1. 原材料及性能

对选用的各种胶结料及石料进行了检测, 检测结果如表 1 所示。

**Table 1.** The detection indicators of four kinds asphalt binder

**表 1.** 四种沥青胶结料检测指标情况

项目	单位	J	M	S	X
针入度(25℃, 5 s, 100 g)	0.1 mm	60	50	50	65
软化点(R&B)	°C	46.5	117	85	62.5
60℃动力粘度	Pa·s	184	650	-	-
135℃运动粘度	Pa·s	-	-	2.5	13.3
175℃运动粘度	Pa·s	-	-	-	2.97
5℃延度	cm	-	-	33	20
10℃延度	cm	70	-	-	-
离析(48 h 软化点差)	°C	-	-	0.6	-
PG 分级		64~22	76~22	76~28	-

MAC 改性沥青和橡胶沥青目前在《公路沥青路面施工技术规范》[8] (JTG F40)中未有明确规定, 对比天津[9]、北京[10]地方橡胶沥青标准可以看出, 试验用橡胶沥青属于 CRM-II 型, 橡胶粉掺量相对较少, 针入度偏高, 软化点较低, 具有较高的粘度。

由于组分构成或改性原理的差异, 四种胶结料常规指标分别表现出不同的性质, 与基质沥青相比, 三类改性沥青的软化点均有不同程度提高, 其中 MAC 沥青软化点[11]远高于其余三类, SBS 改性沥青及 MAC 沥青的针入度接近, 均低于基质沥青, 对提高高温稳定性能有利, 由于掺加了胶粉, 在基质沥青中分散溶胀后, 橡胶沥青相对三类沥青粘度有了大幅度的提高, 对增强集料间粘聚力有利。

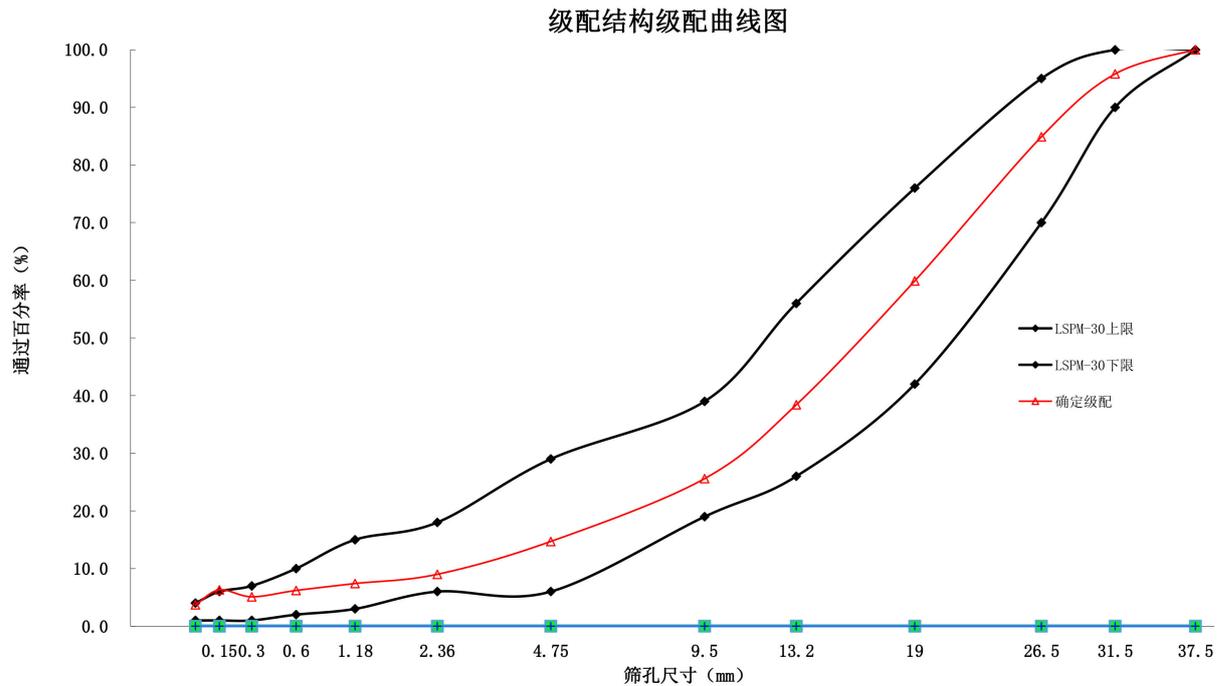
由于 LSPM 的最大公称粒径要求大于 26.5 m, 因此石料选择为石灰岩 20~30 mm、10~20 mm、5~10 mm、3~5 mm 和 0~3 mm 五种规格。为了保证其具有良好的抗飞散能力, 要求具有一定的沥青膜厚度, 为了保证沥青与集料具有良好的黏结性, 要求填充料采用钙质石灰粉。

### 3.2. 混合料级配设计

根据前面对原材料的检测情况, 室内进行了级配合成, 最终确定的合成级配通过率见表 2, 级配曲线见图 1。

**Table 2.** The calculation table of synthesis gradation  
**表 2.** 合成级配计算表

项目	筛孔尺寸(mm)													
	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配	100.0	95.8	84.9	59.9	53.3	38.4	25.6	14.7	9.0	7.4	6.2	5.1	6.3	3.7
LSPM-30 下限	100	90	70	42	33	26	19	6	6	3	2	1	1	1
LSPM-30 上限	100	100	95	76	66	56	39	29	18	15	10	7	6	4



**Figure 1.** The defined gradation curve  
**图 1.** 确定级配曲线

旋转压实能够有效模拟路面实际压实的揉搓效果以及克服了压实过程中导致集料破碎的不足，因此室内采用旋转压实仪进行试件成型。

最终确定各种胶结料混合料体积指标如表 3 所示。

**Table 3.** Summary of volume indexes of various binder mixtures

**表 3.** 各种胶结料混合料体积指标汇总

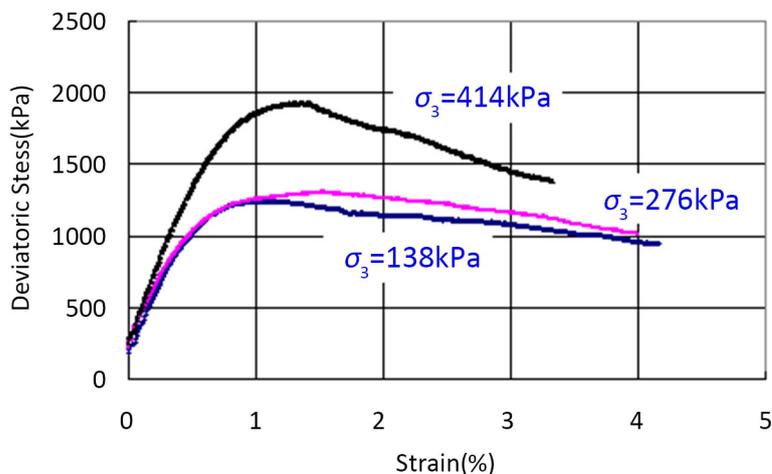
胶结料类型	沥青用量, %	最大理论相对密度	计算空隙率平均值, %	实测空隙率/平均值, %
MAC 改性沥青	3.2	2.585	16.5	16.6
基质沥青	3.5 (加 0.1%纤维)	2.577	16.9	15.3
SBS 改性沥青	3.2	2.585	15.9	15.9
橡胶沥青	3.2	2.596	16.7	16.9

### 3.3. 最佳沥青用量的确定

大粒径沥青混合料最佳沥青用量的确定与传统沥青混合料是不同的，空隙率仅是确定最佳沥青用量的指标之一，析漏试验和飞散试验是确定排水性沥青混合料最佳沥青用量的两项必不可少的试验。析漏试验可以确定保证沥青不产生流淌的最大沥青用量；飞散试验可以确定排水性沥青混合料不发生严重飞散的最小沥青用量。根据这两个沥青用量就可以确定排水性沥青混合料的沥青用量范围，在此范围内再参考设计试件体积指标与沥青膜要求的结果，选择合适的沥青用量作为最佳沥青用量。对于大粒径沥青混合料由于最大粒径较大，考虑到施工中的离析等因素，要求析漏质量损失  $\leq 0.2\%$ ，为了保证混合料不发生松散，飞散试验的质量损失不能大于 25%。综合上面各指标，同时又必须考虑采用混合料的经济性以及施工中的误差因素，综合各种因素的分析最终选取最佳沥青用量为 3.2%。

## 4. LSPM 抗剪强度结果及分析

本次对四种胶结料 LSPM 混合料采用动三轴试验方法对其抗剪强度指标进行测试及分析。前文提到了数据的处理方法，为方便理解，以 MAC 改性沥青混合料为例，对三轴试验数据处理进行处理，混合料在 40℃ 试验条件，138 kPa、276 kPa、414 kPa 围压下，偏应力(Deviatoric Stress)与应变(Strain)关系如图 2 所示。



**Figure 2.** The relationship between deviator stress and strain under different confining pressures

**图 2.** 不同围压下偏应力与应变关系

由图 2 可以看出,随着围压的增大,试件破坏时的最大竖向荷载增加,当围压增至 414 kPa 时,增幅最为明显,说明路面设计及施工过程中,保证 LSPM 合理的级配设计及充分的压实以提供足够的边界约束是提高混合料承载能力的重要因素。

用同样方法计算得到其他三种级配曲线沥青混合料的抗剪强度,四种不同胶结料沥青混合料在 414 kPa 围压下的破坏主应力及抗剪强度见图 3、图 4。

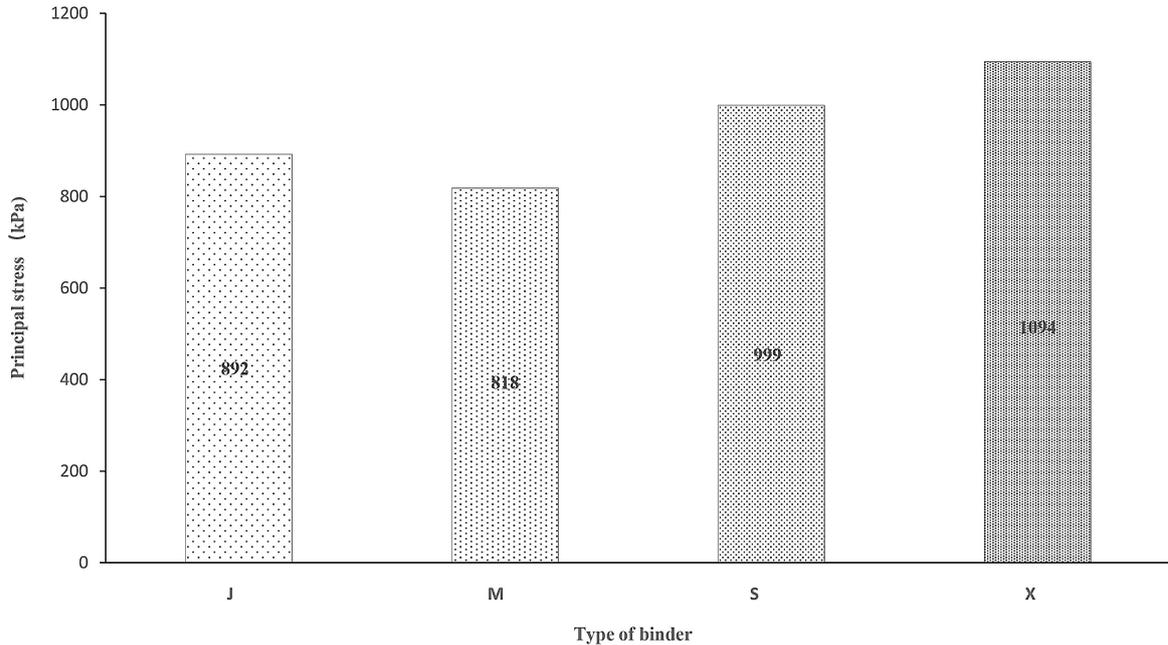


Figure 3. Comparison of the principal stress distribution of different binders asphalt mixtures

图 3. 不同胶结料沥青混合料破坏主应力分布比较

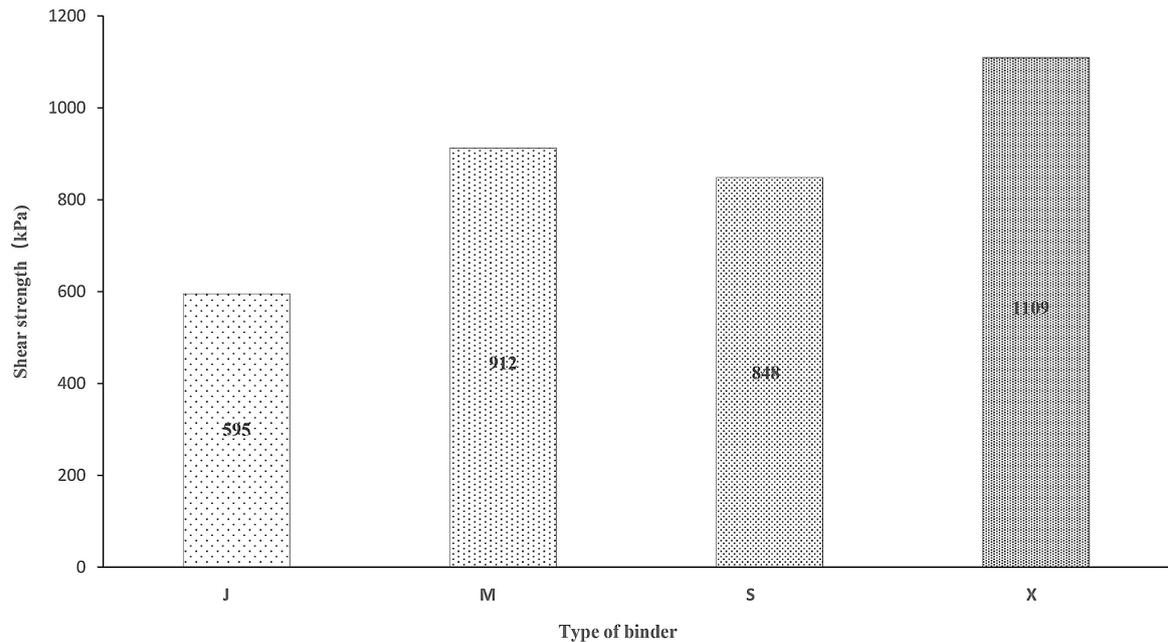


Figure 4. Comparison of the shear strength distribution of different binder asphalt mixtures

图 4. 不同胶结料沥青混合料破坏抗剪强度分布比较

由图 4 可以看出, 由于改性沥青粘度增加, 混合料抗剪强度参数  $c$  值增加, 混合料破坏时的抗剪强度均有所提高, 其中 MAC 改性沥青在破坏时主应力、抗剪强度方面比较接近, 橡胶沥青由于粘度最高, 整体抗剪性能均优于三类胶结料, 用作 LSPM 时, 有较好的应用前景。

## 5. 结束语

本文对采用不同类型胶结料进行了 LSPM 混合料的设计, 并对其抗剪强度进行了验证分析, 经验证可以得出以下结论:

1) 对四种胶结料常规指标进行检测发现分别表现出不同的性质, 与基质沥青相比, 三类改性沥青的软化点均有不同程度提高, 其中 MAC 沥青软化点远高于其余三类, SBS 改性沥青及 MAC 沥青的针入度接近, 均低于基质沥青, 橡胶沥青相对三类沥青粘度有了大幅度的提高。

2) 级配是决定 LSPM 体积指标的重要因素, 最佳沥青用量的选择要同时结合体积指标、析漏、飞散、渗水等指标最终确定, MAC 改性沥青与橡胶沥青高温时粘度优势明显, 同样膜厚条件下, 混合料发生析漏机率减小, 抗飞散能力有提高。

3) 通过动态三轴试验, 对采用不同胶结料的 LSPM 混合料高温(40℃)条件下的高温抗剪指标( $c$ ,  $\Phi$ )比较其不同围压条件下剪切面主应力及抗剪强度变化, 结果表明, 橡胶沥青和 MAC 改性沥青相比由于具有较高的黏度, 因此其高温状态下抗剪强度良好。

## 参考文献

- [1] 周磊生. 橡胶沥青透水应力吸收层力学特性与路面结构组合优化研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2009.
- [2] Kandhal, P.S. (1989) Large Stone Asphalt Mixes: Design and Construction. NCAT Report.
- [3] 山东省地方标准. 大粒径透水性沥青混合料应用技术规程(DB37T 1161-2009) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [4] 中华人民共和国行业标准. 城市道路设计规范(CJJ37-90) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [5] Zhu, L.Y., Fwa, T.F. and Tan, S.A. (2004) Rutting Prediction of Asphalt Pavement Layer Using C- $\phi$  Model. *Journal of Transportation Engineering*, **130**, 78-91. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:5\(675\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:5(675))
- [6] 邵腊庚, 等. 沥青混合料剪切试验方法研究[J]. 石油沥青, 2009, 23(2): 19-22.
- [7] 中华人民共和国行业标准. 公路工程沥青与沥青混合料试验规程(JTG E20-2011) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [8] 中华人民共和国行业标准. 公路沥青路面施工技术规范(JTG F40-2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [9] 天津市工程建设标准. 天津市废轮胎胶粉改性沥青路面设计施工技术标准(DB/T29-161-2006) [S]. 天津: 人民交通出版社, 2006.
- [10] 北京市地方标准. 北京市废胎胶粉沥青及混合料设计施工技术指南》(京路科安发[2006]912 号) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [11] 樊亮, 申全军. 天然硬质沥青软化点测量方法[P]. 中国, 200810014830. 2008-09-03.