

文章编号:1671-1637(2016)03-0008-09

## 掺外加剂沥青砂浆的力学性能

牛冬瑜<sup>1</sup>, 韩 森<sup>2</sup>, 李 星<sup>3</sup>, 李 波<sup>4</sup>, 任万艳<sup>2</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;  
3. 莫纳什大学 土木工程系, 维多利亚 墨尔本 3800; 4. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**应用压缩试验应力-应变数据,分析了常规条件与冻融条件下,70<sup>#</sup>沥青砂浆、90<sup>#</sup>沥青砂浆、橡胶沥青砂浆及其对应掺外加剂砂浆的应力响应规律、强度损失指数与影响砂浆力学性能的物理化学原因,并基于能量转化原理与能量指标,研究了压缩过程中沥青砂浆的破坏本质与力学耐久性能。分析结果表明:在常规条件下,加入外加剂KS的橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup>沥青砂浆与90<sup>#</sup>沥青砂浆的最大应力分别为1.345、1.218、1.186 MPa,分别为对应未掺外加剂沥青砂浆最大应力的1.12、1.18、1.30倍,加入外加剂沥青砂浆的能量释放系数增量分别为0.152、0.067、0.054 MPa<sup>-1</sup>·J<sup>-1</sup>,分别为对应未掺外加剂沥青砂浆能量释放系数增量的68.8%、78.8%、41.9%,因此,加入外加剂提高了沥青砂浆的抗压强度,改善了沥青砂浆的力学耐久性能;在冻融条件下,加入外加剂的橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup>沥青砂浆与90<sup>#</sup>沥青砂浆的最大应力分别为1.311、1.170、1.083 MPa,分别为对应未掺外加剂沥青砂浆最大应力的1.22、1.11、1.06倍,加入外加剂沥青砂浆的能量释放系数增量分别为0.221、0.070、0.073 MPa<sup>-1</sup>·J<sup>-1</sup>,分别为对应未掺外加剂沥青砂浆能量释放系数增量的61.7%、72.9%、65.2%,能量释放系数越小,抗疲劳性能越好,因此,加入外加剂能够改善沥青砂浆的水稳定性,减少冻融损伤,确保冻融后沥青砂浆的力学耐久性能。

**关键词:**路面材料;沥青砂浆;压缩试验;应力-应变数据;弹性能;耗散能;冻融条件

**中图分类号:**U414.18

**文献标志码:**A

## Mechanical property of asphalt mortar with additive

NIU Dong-yu<sup>1</sup>, HAN Sen<sup>2</sup>, LI Xing<sup>3</sup>, LI Bo<sup>4</sup>, REN Wan-yan<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;  
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne 3800, Victoria, Australia; 4. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** By the stress-strain data of compression test, the laws of stress response, the loss indices of strength and the chemico-physical causes for influencing the mechanical properties of 70<sup>#</sup> asphalt mortar, 90<sup>#</sup> asphalt mortar, rubber asphalt mortar and their corresponding mortars with additive were studied under the normal and freezing-thawing conditions, and the physical essences of material damage and the durabilities of six kinds of mortars during the compression process were analyzed based on the principle of energy conversion and the energy index. Analysis result indicates that the maximum stresses of rubber asphalt mortar, 70<sup>#</sup> asphalt mortar and 90<sup>#</sup> asphalt mortar with additive are 1.345, 1.218 and 1.186 MPa respectively, and they are 1.12, 1.18 and 1.30 times bigger than the values of corresponding mortars without additive

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51408287);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310831161010)

作者简介:牛冬瑜(1984-),男,陕西西安人,长安大学讲师,工学博士,从事路面材料研究。

respectively. The increments of energy release coefficients of rubber asphalt mortar, 70<sup>#</sup> asphalt mortar and 90<sup>#</sup> asphalt mortar with additive are 0.152, 0.067 and 0.054 MPa<sup>-1</sup> · J<sup>-1</sup> respectively, they are 68.8%, 78.8% and 41.9% of the values of corresponding mortars without additive respectively. So adding additive can improve the compressive strength and mechanical durability of asphalt mortar under the normal condition. Under freezing-thawing condition, the maximum stresses of rubber asphalt mortar, 70<sup>#</sup> asphalt mortar and 90<sup>#</sup> asphalt mortar with additive are 1.311, 1.170 and 1.083 MPa respectively, and they are 1.22, 1.11 and 1.06 times bigger than the values of corresponding mortars without additive respectively. The increments of energy release coefficients of rubber asphalt mortar, 70<sup>#</sup> asphalt mortar and 90<sup>#</sup> asphalt mortar with additive are 0.221, 0.070 and 0.073 MPa<sup>-1</sup> · J<sup>-1</sup> respectively, and they are 61.7%, 72.9% and 65.2% of the values of corresponding mortars without additive respectively. The smaller the energy releasing coefficient is, the better the fatigue performance is. Therefore, adding additive improves the water stability, reduces the freezing-thawing damage, and ensures the mechanical properties and durability of asphalt mortar after freezing-thawing. 3 tabs, 14 figs, 25 refs.

**Key words:** pavement material, asphalt mortar, compression test, stress-strain data, elastic energy, dissipated energy, freezing-thawing condition

**Author resume:** NIU Dong-yu(1984-), male, lecturer, PhD, +86-29-82337340, niudongyu\_1984@163.com.

## 0 引言

近年来,越来越多的研究人员开始关注沥青砂浆的力学性能<sup>[1]</sup>;Lu等对矿物粉质填料的细观特性进行了分析,研究其对低温下沥青砂浆内聚力的影响,其中,矿物粉质填料的细观空隙与沥青砂浆的内聚力直接相关<sup>[2]</sup>;Xie等采用 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)设备对水泥沥青砂浆的动态力学特性进行研究,水泥沥青砂浆的应力峰值与能量吸收率随着应变速率的增加而升高,建立的水泥沥青砂浆动态本构模型与试验结果有较好的一致性<sup>[3-4]</sup>;Herrero等研究了不同废旧轮胎橡胶颗粒的掺量比率与尺寸级配对石膏橡胶沥青砂浆各项性能的影响,研究结果表明橡胶颗粒的加入可改善力学、热力学与声学性能,并为路面铺筑与养护提供了建议<sup>[5]</sup>;Rutherford等对3种不同沥青与水泥质量比的水泥乳化沥青砂浆进行了干缩性能与力学性能研究,结果表明此比例显著影响砂浆的力学性能与水泥水化过程<sup>[6-7]</sup>;Wang等考虑了应变速率和干湿循环次数等条件,对CA(Cement-Asphalt)砂浆进行压缩试验,结果表明在相同应变速率下,抗压强度与弹性模量随着干湿循环次数的增大而减小,同时,较低的应变速率也会使CA砂浆的抗压强度与弹性模量降低<sup>[8]</sup>;Wang等对CA砂浆抗压强度与微观结构变化进行了研究,结果表明沥青材料是砂浆组成结构

中的薄弱相,但其能够改善砂浆的黏弹特性,因此,应保证足够沥青含量以满足砂浆基本性能要求<sup>[9-10]</sup>;宋鑫研究了材料组成对环氧沥青砂浆间接抗拉性能的影响,并进行了灰色关联分析,结果表明低温时矿料级配的变化对破坏劲度模量的影响最大<sup>[11]</sup>;崔亚楠等对盐冻后砂浆的力学性能展开研究,结果表明随冻融循环次数的增加,砂浆的抗压强度变差,融雪盐浓度越大,砂浆弹性模量越小<sup>[12]</sup>;傅强等采用应力-应变压缩试验,分析了压缩过程中水泥沥青砂浆的弹性能与耗散能随沥青含量的变化规律及不同龄期与干湿循环对CA砂浆的力学特性影响,结果表明随着沥青含量的增大,砂浆的强度逐渐降低,但阻尼性能与减振作用增强,同时,砂浆的抗压强度随龄期增长逐渐增大<sup>[13-17]</sup>。

由上述研究可知,沥青砂浆力学性能的研究是路面工程材料应用的理论前提,其应力-应变本构关系是研究沥青混合料力学特性的基础,而能量转化可反映混合料骨架结构颗粒间沥青砂浆力学特性的本质特征。国内外研究人员通过考虑细集料特性、外加剂比例、沥青与水泥质量比、材料组成、温度、沥青含量、龄期与盐冻条件等,利用压缩试验、拉伸试验与间接抗拉试验对沥青砂浆的内聚力性能、动态力学特性、抗压性能与抗拉性能等进行研究,但是已有研究较少涉及考虑冻融条件下不同沥青砂浆力学性能及其破坏本质的机理分析。

为此,本文在常规条件与冻融条件下,对不同沥青砂浆进行压缩试验,以试验数据为基础,提出可量化分析砂浆受到荷载作用后其力学性能的评价指标,分析了不同沥青材料与外加剂对砂浆力学性能影响的物理化学原因,并基于能量转化原理对应力-应变抗压过程中不同沥青砂浆的破坏本质的机理进行分析,以期对沥青砂浆力学性能的系统研究打下坚实基础。

1 试验设计

1.1 试验材料

1.1.1 沥青技术性质

本文采用基质沥青为 90# 沥青、70# 沥青与橡胶沥青,基本参数见表 1。

表 1 沥青参数

Tab. 1 Asphalt parameters

指标	检测结果			试验方法
	90# 沥青	70# 沥青	橡胶沥青	
针入度(25 ℃)/0.1 mm	90	73	50	T0604—2011
延度(10 ℃)/cm	>100	31	8	T0605—2011
软化点/℃	46.0	48.5	58.0	T0606—2011
黏度(135 ℃)/(Pa·s)	0.355	0.432	1.825	T0619—2011
闪点/℃	312	290		T0611—2011
溶解度/%	99.5	99.7		T0607—2011
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.035	1.031	1.041	T0603—2011

1.1.2 集料和矿粉技术性质

细集料与矿粉均采用陕西地产石灰岩,参照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)的方法对细集料的表观相对密度、含泥量、砂当量与棱角性和矿粉的表观密度、含泥量、亲水系数、塑性指数与加热安定性进行性能测试,其结果均满足规范要求。

1.1.3 外加剂

选用可改善沥青性能的高模量耐久剂,简称 KS,其参数见表 2。

表 2 耐久剂参数

Tab. 2 Parameters of durable additive

细度/ mm	长度/ mm	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	熔点/ ℃	成分质量分数/%				
				聚乙烯	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
2~4	3~5	0.94	140	42	38	6	5	9

1.2 试件制备

根据 SAC 矿料级配设计方法中的细集料级配计算公式进行配算沥青砂浆的级配,设计结果见表 3,采用“ $\delta$  体积修正法”<sup>[18]</sup>计算沥青砂浆试件的沥青用量,为 11.3%。

表 3 沥青砂浆级配

Tab. 3 Graduation of asphalt mortar

筛孔尺寸/mm	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
分计筛余百分率/%	31.3	21.5	15.9	11.0	7.9	12.4

沥青砂浆试件制作过程为:首先通过砂浆与沥青的质量比计算细集料与沥青的用量;把筛出的细集料放入 185 ℃±5 ℃的烘箱中烘干(一般不少于 4~6 h),同时,将 70# 沥青、90# 沥青、橡胶沥青根据不同规范要求分别加热至 165 ℃、160 ℃与 185 ℃,使其熔化;再将烘干细集料依据粒径尺寸由小到大,依次加入到沥青中,不断搅拌,使沥青砂浆均匀混合,并将混合好的沥青砂浆填入试模中;把填满沥青砂浆的试模放在压力机上按高度成型;最后,应用脱模机对压好的试模进行脱模,并测定试件的高度、直径与空隙率,舍去不符合要求的试件。试件为圆柱体形状,高度与直径为 50 mm。

1.3 试验方案

1.3.1 试验设备与试验参数

采用 810 材料试验系统进行压缩试验,选取加载速率为 1 mm·min<sup>-1</sup>,见图 1。试验环境温度为 25 ℃,在试验前,应用自动双端面磨平机将试件的端面磨平,并置于 25 ℃的恒温箱中保温 4 h 以上。为防止试验中端阻摩擦效应与试验仪器的污染,在试件上、下端面均铺垫薄层四氟乙烯膜。

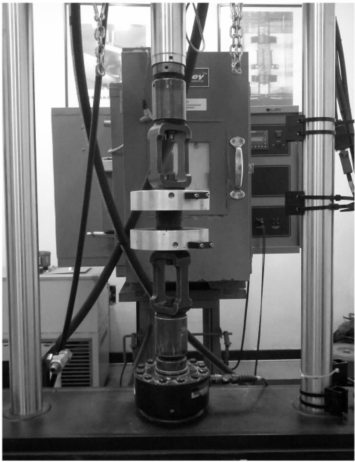


图 1 沥青砂浆压缩试验

Fig. 1 Compression test of asphalt mortar

1.3.2 冻融条件

本文借鉴《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中沥青混合料冻融劈裂试验条件,检验沥青砂浆冻融后的压缩力学性能。冻融步骤如下。

(1)将成型的沥青砂浆试件按照 T0717 饱水试

验方法真空饱水,在真空度为 97.3~98.7 kPa 条件下保持 15 min,然后恢复常压,在水中浸泡 0.5 h,见图 2。

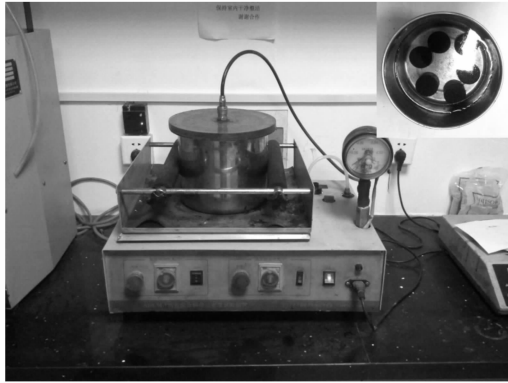


图2 真空饱水沥青砂浆试验

Fig. 2 Vacuum water-saturated asphalt mortar test

(2)取出试件放入塑料袋中,加入 10 mL 水,扎紧袋口,将试件放入恒温冰箱,放置  $16\text{ h} \pm 1\text{ h}$ ,冷冻温度为  $-18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冷冻后试件见图 3。



图3 冷冻试件

Fig. 3 Frozen specimens

(3)取出试件后,放入  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温水槽中,保温 24 h,见图 4。

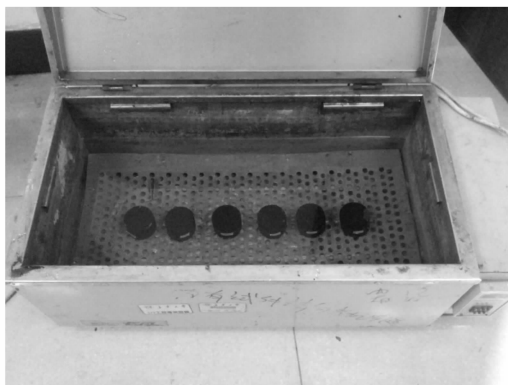


图4 保温试件

Fig. 4 Heat preservation specimens

(4)再将试件在  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温水槽中浸泡 2 h。

(5)完成冻融循环作用,对沥青砂浆试件进行压缩试验。

#### 1.4 力学性能评价指标

##### 1.4.1 力学耐久性能评价指标

为了量化在受到荷载后沥青砂浆的力学性能,采用强度损失指数来判断不同沥青砂浆的力学损伤情况,间接反映不同沥青砂浆的力学耐久性能。沥青砂浆的强度损失指数为

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \quad (1)$$

式中: $S$  为沥青砂浆的强度损失指数; $\sigma_1$  为荷载作用下的最大应力; $\sigma_2$  为荷载作用下的残余应力,是达到最大应力后,应变增加 5% 时的应力。

##### 1.4.2 基于能量转化原理的力学性能评价指标

依据热力学能量守恒定律知,能量转化是物质物理过程的本质特征。在压缩过程中,沥青砂浆达到峰值应力时,位于高位能量失稳状态,随着继续压缩试件,应力发生跌落,此过程为典型的能量突变过程,所以从能量层面来阐明应力-应变压缩过程,可更加清楚地表征沥青砂浆的破坏本质与力学耐久性能。

假设沥青砂浆在垂直压力作用下动能不变,则压力对沥青砂浆所做的功(压力功)等于可恢复的弹性能与不可恢复的耗散能之和<sup>[18-20]</sup>,即

$$W = W_1 + W_2 = Ah \int \sigma d\epsilon \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{Ah\sigma^2}{2E} \quad (3)$$

式中: $W$  为外力功; $W_1$  为可恢复的弹性能; $W_2$  为不可恢复的耗散能; $\sigma$  为荷载作用下的应力; $\epsilon$  为荷载作用下的应变; $A$  为沥青砂浆的横截面面积; $h$  为沥青砂浆的高度; $E$  为沥青砂浆的弹性模量。

在竖直荷载作用下,当不同沥青砂浆中存储的弹性能达到其单元某种表面能时,弹性能将转化为耗散能,并由开裂、变形与屈服等形式表现出来。在主应力空间,弹性能不能沿最大应力方向释放,仅能沿着最小应力方向释放,能量释放率为<sup>[13]</sup>

$$G = \frac{W_2}{W} = k(\sigma - \sigma_0)W_1 \quad (4)$$

式中: $G$  为能量释放率; $k$  为能量释放系数,反映砂浆能量耗散速率; $\sigma_0$  为水平应力。

## 2 常规条件下沥青砂浆抗压力学性能

本文选取 90# 沥青砂浆、70# 沥青砂浆、橡胶沥

青砂浆及其对应的掺加 KS 的沥青砂浆为研究对象,进行压缩试验。

## 2.1 力学性能影响规律

由图 5 可知:沥青砂浆应力-应变曲线可分为压实阶段、弹性变形阶段、破裂阶段与破坏后阶段;6 种沥青砂浆的最大应力由大到小分别为掺加 KS 的橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆与 90<sup>#</sup> 沥青砂浆;掺加 KS 的橡胶沥青砂浆的最大应力为 1.345 MPa,分别为掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆的 1.10、1.12、1.13、1.18、1.30 倍。由此可知,外加剂 KS 对于沥青砂浆抗压强度的影响起到了至关重要的作用,主要有 2 个原因:外加剂 KS 中的废旧 PE 与热沥青混融反应后,PE 支链相互结合,形成网状结构,并裹附着沥青重叠交联在一起,提高了沥青与细集料的结合强度<sup>[21]</sup>;外加剂 KS 中煤废渣的主要成分包括含量较高的 SiO<sub>2</sub>,少量的砂岩、菱铁矿、铁和其他杂质,其中 SiO<sub>2</sub> 具有高强、高韧、稳定性好等卓越特性,外加剂 KS 在与沥青混合时, SiO<sub>2</sub> 与沥青中的大分子结合成立体网状结构,起到补强增韧功能,显著提高沥青砂浆的力学性能<sup>[22-24]</sup>。基于此,掺入外加剂 KS 的沥青砂浆的最大应力显著增大,即外加剂 KS 能够提高沥青砂浆的强度,改善其抗变形能力。

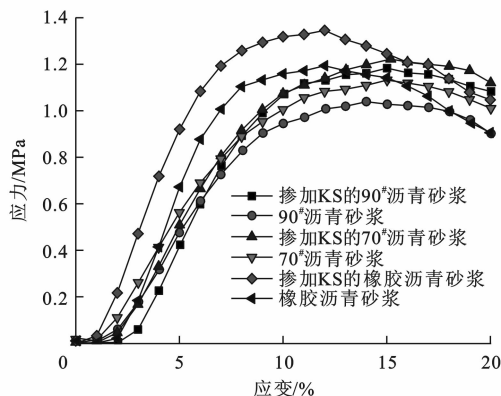


图 5 常规条件下沥青砂浆压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Compression stress-strain curves of asphalt mortars under common condition

同时,橡胶沥青砂浆的抗压强度要优于 90<sup>#</sup> 沥青砂浆和 70<sup>#</sup> 沥青砂浆的抗压强度,这是因为橡胶沥青中的橡胶粉通过溶胀作用产生凝胶膜连接,构成一个黏度较大的半固态连续相的体系,起到加劲作用,增强了橡胶沥青砂浆的强度,减小了橡胶沥青砂浆的塑性变形<sup>[25]</sup>。

由上文分析可知,外加剂 KS 与橡胶沥青对沥青砂浆的力学性能都有重要的影响。为了量化在受到荷载后沥青砂浆的力学性能,采用强度损失指数来判断不同沥青砂浆的力学损失情况。沥青砂浆强度损失指数的计算结果见图 6。最大应力和残余应力见图 7。

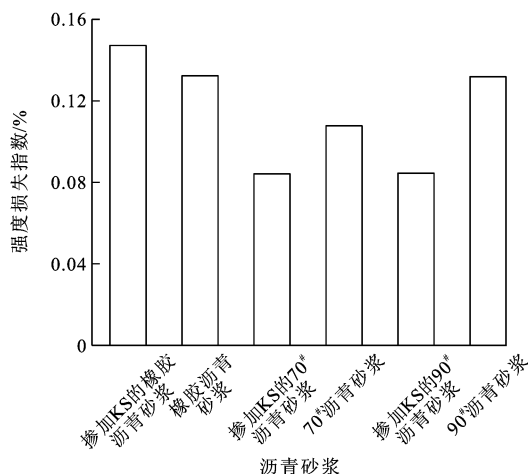


图 6 常规条件下沥青砂浆的强度损失指数

Fig. 6 Strength loss indices of asphalt mortars under common condition

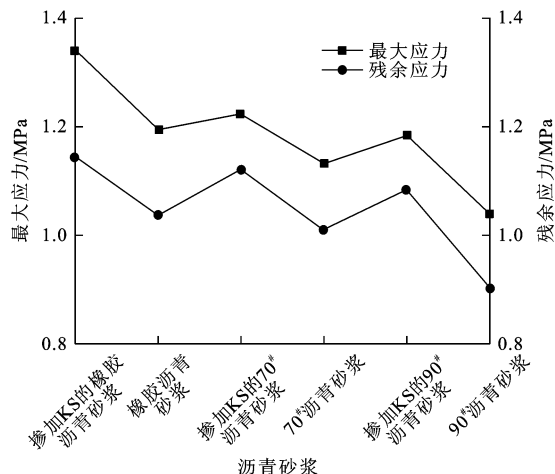


图 7 常规条件下沥青砂浆最大应力和残余应力

Fig. 7 Maximum stresses and residual stresses of asphalt mortars under common condition

虽然不同沥青砂浆残余应力变化不尽相同,但由图 7 可以看出:加入外加剂 KS 的沥青砂浆的残余应力大于对应的未加入 KS 的沥青砂浆,其中,掺加 KS 的橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆的残余应力分别为橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆的 1.08、1.12、1.14 倍。由图 6 可知:加入外加剂 KS 的沥青砂浆的强度损失指数小于对应的未加入 KS 的沥青砂浆,其中,掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆与掺加 KS 的

90<sup>#</sup> 沥青砂浆的强度损失指数分别是 70<sup>#</sup> 沥青砂浆与 90<sup>#</sup> 沥青砂浆的 77.8%、64.4%，因此，加入外加剂 KS 后，显著提高了沥青砂浆的力学耐久性能。

## 2.2 沥青砂浆的能量特征

沥青砂浆的能量特征见图 8、9。弹性能的变化规律与不同沥青砂浆应力-应变曲线的变化规律大致相同，由图 8 可知：弹性能呈现先增大后减小的趋势，在峰值应力前，弹性能迅速增大，主要压力功转化为弹性能，当达到峰值应力的 80% 左右时，即为砂浆的屈服变形阶段，压力功的增大速率减小，砂浆中部分强度弱化区域此时已达到强度极限，并产生破坏，储存的弹性能转化为耗散能而释放，即弹性能逐渐减小导致材料破坏；弹性能在峰值应力处达到最大值，将 6 种沥青砂浆以最大弹性能由大到小排序为掺加 KS 的橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆，其弹性能分别为 5.652、4.896、4.850、4.385、4.127、4.090 J；在峰值应力后，

弹性能迅速减小，此时，不同沥青砂浆内的主要承载力介质已达到强度极限，迅速破坏，并产生一定裂纹，主要为砂浆内存在的弹性能转化为宏观裂纹扩展、贯通的表面能而耗散。

由图 9 可知：能量释放系数为先减小后增大，初始阶段的系数远远大于其他变形阶段，这主要是由于在成型过程中不同沥青砂浆试件内部存有空隙、裂缝等初始缺陷，在外部荷载作用下使砂浆内的缺陷闭合，这部分能量的耗散对研究砂浆内部能量转化规律意义不大，所以，本文主要针对能量释放系数的最小值上升至较大值的变化规律进行分析（增大段）；不同沥青砂浆的能量释放系数呈单调增加趋势，最小值和屈服变形阶段的初始位置接近，当达到终值应变时，能量释放系数可达到分析范围内的最大值；6 种沥青砂浆在终值应变时能量释放系数增量由大到小分别为橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的橡胶沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆，其值分别为 0.221、0.152、0.129、0.085、0.067、0.054 MPa<sup>-1</sup> · J<sup>-1</sup>；能量耗散系数越大，表明在单位应力、单位弹性能时，砂浆的能量耗散越快，即砂浆的抗疲劳性能越差，反之，其力学耐久性能越优。加入外加剂 KS 的沥青砂浆，其终值应变时的能量释放系数明显小于对应的未加入 KS 的沥青砂浆，由此可知，外加剂可以提高沥青砂浆的力学耐久性能。

## 3 冻融条件下砂浆抗压力学性能

### 3.1 力学性能影响规律

由图 10 可知：在冻融条件下，6 种沥青砂浆的最大应力由大到小分别为掺加 KS 的橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆、橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆。

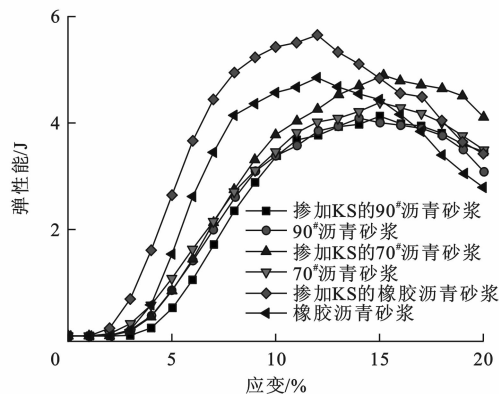


图 8 常规条件下沥青砂浆的弹性能  
Fig. 8 Elastic energies of asphalt mortars under common condition

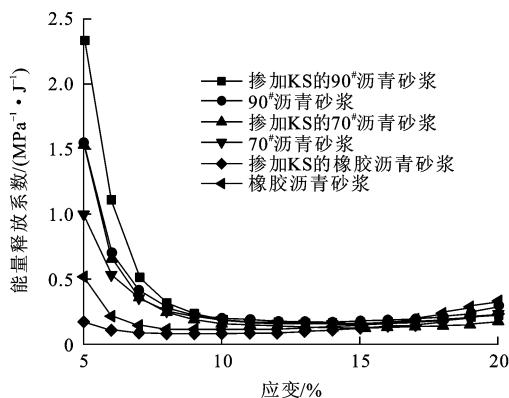


图 9 常规条件下沥青砂浆的能量释放系数  
Fig. 9 Energy release coefficients of asphalt mortars under common condition

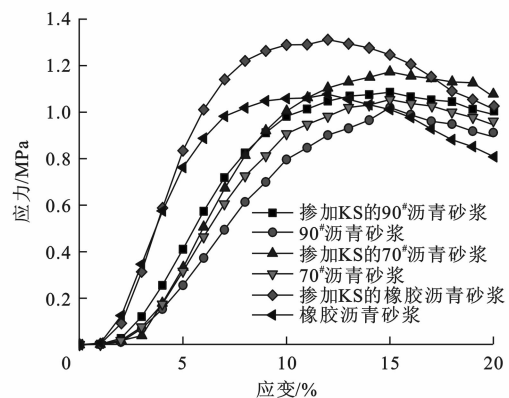


图 10 冻融条件下沥青砂浆压缩应力-应变曲线  
Fig. 10 Compression stress-strain curves of asphalt mortars under freezing-thawing condition

浆、橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆,其中掺加 KS 的橡胶沥青砂浆的最大应力为 1.311 MPa,分别为掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆、橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆的 1.12、1.21、1.22、1.24、1.29 倍;在冻融后,加入 KS 外加剂的沥青砂浆抗压强度远大于未加入外加剂的沥青砂浆,且橡胶沥青砂浆的抗压强度大于 70<sup>#</sup> 沥青砂浆与 90<sup>#</sup> 沥青砂浆。

由图 10、5 可知:在常规条件下,掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆与 70<sup>#</sup> 沥青砂浆的最大应力分别为 1.22、1.13 MPa;在冻融条件下,掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆与 70<sup>#</sup> 沥青砂浆的最大应力分别为 1.17、1.05 MPa,沥青砂浆冻融后的最大应力比未冻融的最大应力明显降低,分别降低了 0.05、0.08 MPa,这主要是由于在冻融过程中,在 -18 ℃ 时,砂浆试件空隙中的水分会凝结成冰,体积增大,产生膨胀应力,而将试件放入 60 ℃ 恒温水槽中,冰融化成水,体积减小,空隙水经历了结冰与融化的交替过程,使沥青砂浆中的空隙部分成为受力的薄弱环节,从而造成了沥青砂浆的内部损伤,破坏了内部结构稳定性,使其强度降低。

由上述分析结果可知,外加剂 KS 与橡胶沥青对冻融后的沥青砂浆有减缓力学损伤的作用。为了进一步量化冻融条件下受到荷载作用后沥青砂浆的力学性能,计算了沥青砂浆的强度损失指数,结果见图 11。最大应力和残余应力见图 12。

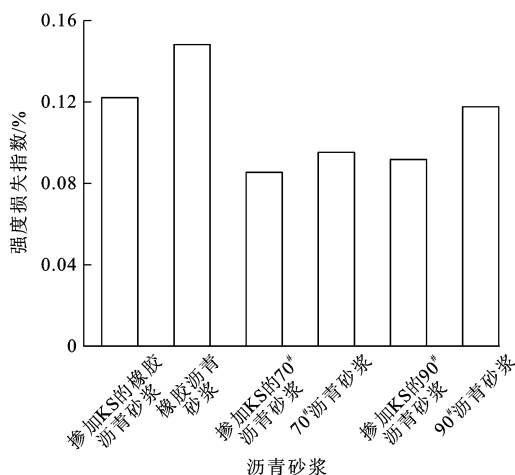


图 11 冻融条件下沥青砂浆强度损失指数

Fig. 11 Strength loss indices of asphalt mortars under freezing-thawing condition

由图 12 可以知:加入外加剂 KS 的沥青砂浆的残余应力大于对应的未加入 KS 的沥青砂浆,其中,掺加 KS 的橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂

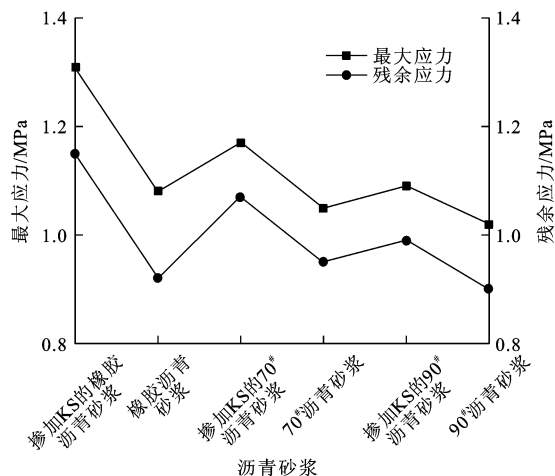


图 12 冻融条件下沥青砂浆最大应力和残余应力

Fig. 12 Maximum stresses and residual stresses of asphalt mortars under freezing-thawing condition

浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆的残余应力分别是橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆的 1.24、1.13、1.09 倍。由图 11 可知:在冻融条件下,加入外加剂 KS 的沥青砂浆的强度损失指数小于对应的未加入 KS 的沥青砂浆,其中,掺加 KS 的橡胶沥青砂浆、掺加 KS 的 70<sup>#</sup> 沥青砂浆、掺加 KS 的 90<sup>#</sup> 沥青砂浆的强度损失指数分别是橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup> 沥青砂浆、90<sup>#</sup> 沥青砂浆的 87.8%、89.2%、78.2%。由此说明,加入外加剂 KS 后,可明显提高冻融条件下沥青砂浆的力学耐久性能。

### 3.2 沥青砂浆的能量特征

在冻融条件下,沥青砂浆的弹性能的变化规律与应力-应变曲线的变化规律略有差异。由图 13 可知:在峰值应力前,弹性能迅速增大,当到达峰值应力时,压力功转化为弹性能,并达到最大值,之后压力功的增大速率减慢,砂浆中部分强度弱化区域此

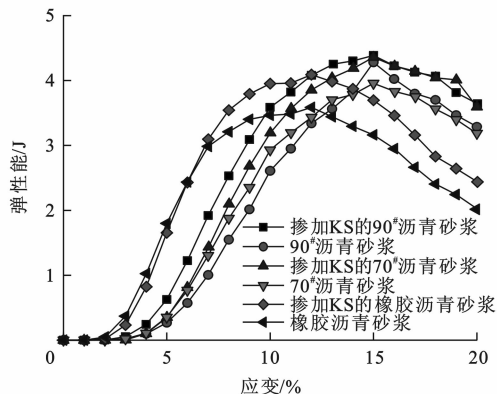


图 13 冻融条件下沥青砂浆的弹性能

Fig. 13 Elastic energies of asphalt mortars under freezing-thawing condition

时已达到强度极限,并产生破坏,储存的弹性能转化为耗散能而释放,导致材料破坏;将6种沥青砂浆以最大弹性能由高到低排序为参加KS的90<sup>#</sup>沥青砂浆、参加KS的70<sup>#</sup>沥青砂浆、90<sup>#</sup>沥青砂浆、参加KS的橡胶沥青砂浆、70<sup>#</sup>沥青砂浆、橡胶沥青砂浆,其弹性能分别为4.387、4.358、4.280、4.092、3.957、3.586 J。由此可知,在冻融条件下砂浆储存的弹性能的最大值小于未冻融条件下的弹性能,说明冻融作用产生的膨胀应力对砂浆内部产生了破坏,从而使其强度极限降低,使弹性能更易转化为宏观裂纹扩展、贯通的表面能而耗散。

由图14可知:在冻融条件下(分析范围同图9,只分析增大段),沥青砂浆的能量释放系数同样呈单调增加趋势,且其在终值应变时增幅差异较大,6种沥青砂浆在终值应变时能量释放系数增量由大到小分别为橡胶沥青砂浆、参加KS的橡胶沥青砂浆、90<sup>#</sup>沥青砂浆、70<sup>#</sup>沥青砂浆、参加KS的90<sup>#</sup>沥青砂浆、参加KS的70<sup>#</sup>沥青砂浆,其值分别为0.358、0.221、0.112、0.096、0.073、0.070 MPa<sup>-1</sup>·J<sup>-1</sup>;在冻融条件下,沥青砂浆的能量耗散系数越小,表明在单位应力、单位弹性能时,砂浆的能量耗散越慢,即砂浆的抗疲劳性能越优,加入外加剂KS的沥青砂浆,其终值应变时的能量释放系数明显小于对应的未加入KS的沥青砂浆;参加KS的70<sup>#</sup>沥青砂浆终值应变时的能量释放系数明显小于其他种类的沥青砂浆,因此,在冻融条件下,外加剂KS可以提高沥青砂浆的力学耐久性能,并且参加KS的70<sup>#</sup>沥青砂浆力学耐久性能最优。

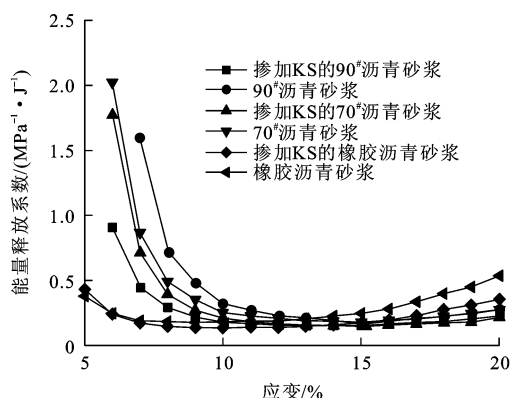


图14 冻融条件下沥青砂浆的能量释放系数

Fig. 14 Energy release coefficients of asphalt mortars under freezing-thawing condition

## 4 结 语

(1)基于砂浆压缩试验的应力-应变数据与能量

转化原理,提出了反映沥青砂浆压缩过程中破坏本质的弹性能指标,即反映不同沥青砂浆力学耐久性能的强度损失指数与能量释放系数。

(2)在常规条件下,加入外加剂显著提高沥青砂浆的最大应力,减小其强度损失指数,加入外加剂的沥青砂浆终值应变时的能量释放系数增量明显小于对应的未加入外加剂的沥青砂浆的能量释放系数增量,因此,加入外加剂能够提高砂浆的强度,增强其力学耐久性能。

(3)加入外加剂的沥青砂浆冻融后最大应力远大于未加入外加剂的沥青砂浆的最大应力,强度损失指数明显减小,并且终值应变时的能量释放系数增量小于对应的未加入外加剂的沥青砂浆的能量释放系数增量,因此,加入外加剂的砂浆可改善砂浆的水稳定性,减少冻融损伤,确保冻融条件下砂浆的力学耐久性能。

(4)本文仅就常温条件下,对不同沥青砂浆的压缩力学性能进行了研究,还应结合实际工程所处环境的特殊温度状况,对其力学性能展开进一步试验与相关研究。

## 参考文献:

### References :

- [1] 牛冬瑜,韩森,陈凯,等.加工工艺关键参数对SBS改性沥青性能影响[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(3): 7-16.  
NIU Dong-yu, HAN Sen, CHEN Kai, et al. Study on influences of key process parameters on SBS modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(3): 7-16. (in Chinese)
- [2] LU Dan, ZHENG Chuan-feng, QIN Yong, et al. Analysing the effects of the mesoscopic characteristics of mineral powder fillers on the cohesive strength of asphalt mortars at low temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 330-337.
- [3] XIE You-jun, FU Qiang, ZHENG Ke-ren, et al. Dynamic mechanical properties of cement and asphalt mortar based on SHPB test[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 217-225.
- [4] XIE You-jun, FU Qiang, LONG Guang-cheng, et al. Creep properties of cement and asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 9-16.
- [5] HERRERO S, MAYOR P, HEMANDEZ-OLIVARES F. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars[J]. Materials and Design, 2013, 47: 633-642.
- [6] RUTHERFORD T, WANG Zhen-jun, SHU Xiang, et al.



- Laboratory investigation into mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 76-83.
- [7] WANG Zhen-jun, SHU Xiang, RUTHERFORD T, et al. Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 25-30.
- [8] WANG Ping, XU Hao, CHEN Rong, et al. Experimental research on compression properties of cement asphalt mortar due to drying and wetting cycle[J]. Advance in Materials Science and Engineering, 2014(2014): 1-6.
- [9] WANG Qiang, YAN Pei-yu, KONG Xiang-ming, et al. Compressive strength development and microstructure of cement-asphalt mortar[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science, 2011, 26(5): 998-1003.
- [10] WANG Qiang, YAN Pei-yu, A Ru-hua, et al. Strength mechanism of cement-asphalt mortar[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(9): 1353-1359.
- [11] 宋 鑫. 材料组成对环氧沥青砂浆间接抗拉性能影响的灰色关联分析[J]. 石油沥青, 2015, 29(1): 153-159.  
SONG Xin. Grey relational analysis on influence of material composition on indirect tensile performance of epoxy asphalt mortar[J]. Petroleum Asphalt, 2015, 29(1): 153-159. (in Chinese)
- [12] 崔亚楠, 王 乐. 盐冻后沥青砂浆的粘弹性变化及微细观分析[J]. 中外公路, 2014, 34(2): 215-220.  
CUI Ya-nan, WANG Le. Analysis of viscoelasticity and microstructure of asphalt mortar under the condition of salt freezing[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014, 34(2): 215-220. (in Chinese)
- [13] 傅 强, 谢友均, 郑克仁, 等. 沥青对水泥沥青砂浆力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(5): 642-647.  
FU Qiang, XIE You-jun, ZHENG Ke-ren, et al. Influence of asphalt on mechanical properties of cement and asphalt mortar[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(5): 642-647. (in Chinese)
- [14] 傅 强, 谢友均, 郑克仁, 等. 水泥乳化沥青砂浆力学特性的龄期效应[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(11): 1607-1612.  
FU Qiang, XIE You-jun, ZHENG Ke-ren, et al. Age effect of mechanical property of cement and emulsified-asphalt mortar[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(11): 1607-1612. (in Chinese)
- [15] 尹晓文, 傅 强, 董传卓, 等. 干湿循环对 CA 砂浆力学性能影响的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 91-96.  
YIN Xiao-wen, FU Qiang, DONG Chuan-zhuo, et al. Influence of drying and wetting cycles on the mechanical properties of CA mortar[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(11): 91-96. (in Chinese)
- [16] FU Qiang, XIE You-jun, LONG Guang-cheng, et al. Temperature sensitivity and model of stress relaxation properties of cement and asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 1-11.
- [17] 傅 强, 谢友均, 曾晓辉. 水泥乳化沥青砂浆力学性能的能量机制[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(6): 107-113.  
FU Qiang, XIE You-jun, ZENG Xiao-hui. Energy mechanism of mechanical property of cement-emulsified asphalt mortar[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(6): 107-113. (in Chinese)
- [18] 许 福, 曹 政, 董荟青, 等. 体积法计算中沥青膜厚度与最佳沥青用量关系新解[J]. 华东公路, 2006(6): 83-87.  
XU Fu, CAO Zheng, DONG Hui-qing, et al. Relationship between asphalt film thickness and optimum asphalt content for computation of the volume method [J]. East China Highway, 2006(6): 83-87. (in Chinese)
- [19] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 岩样单轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2): 213-216.  
YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on the deformation failure and energy properties of rock specimen in uniaxial compression[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(2): 213-216. (in Chinese)
- [20] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.  
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010. (in Chinese)
- [21] 牛冬瑜, 韩 森, 徐鸥明, 等. 废旧 LDPE/SBS 复合改性沥青 SMA 混合料的路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(2): 49-53.  
NIU Dong-yu, HAN Sen, XU Ou-ming, et al. Research on the performance of SMA mixture modified by recycled LDPE and SBS[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(2): 49-53. (in Chinese)
- [22] 孙 璐, 辛宪涛, 于 鹏. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性沥青混合料的路用性能[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 1-5.  
SUN Lu, XIN Xian-tao, YU Peng. Pavement performance of nano-SiO<sub>2</sub> modified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8): 1-5. (in Chinese)
- [23] GHASEMI M, MARANDI S M, TAHMOORESI M, et al. Modification of stone matrix asphalt with nano-SiO<sub>2</sub> [J]. Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2012, 2(2): 1338-1344.
- [24] TAN Yi-qiu, LI Xiao-lin, ZHOU Xing-ye. Interactions of granite and asphalt based on the rheological characteristics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 22(8): 820-825.
- [25] 李晓燕, 平 路, 汪海年, 等. 基于国内外试验方法的橡胶沥青性能测试[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1): 10-17.  
LI Xiao-yan, PING Lu, WANG Hai-nian, et al. Performance test of rubber asphalt based on domestic and abroad test methods[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 10-17. (in Chinese)