

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.10.003

# 沥青混合料矿料滑移剪切试验研究

张争奇<sup>1</sup>, 栗培龙<sup>1</sup>, 师晓鸽<sup>1</sup>, 李玉鑫<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 山东高速股份有限公司, 山东 潍坊 266000)

**摘要:** 为了研究沥青混合料的高温稳定性与矿料界面滑移剪切行为的关系, 从沥青混合料矿料的接触及滑移特性入手, 开发了专门用于评价沥青混合料矿料滑移剪切性能的滑移剪切试验, 分析了试验条件、级配和沥青等对滑移剪切能的影响。研究表明在试验温度 60 °C、加载速率 20 mm/min 时, 滑移剪切试验的评价指标滑移剪切能  $EI$  与车辙动稳定度  $DS$  的相关性最好, 以此初步推荐了滑移剪切试验的试验条件。矿料滑移剪切试验表明混合料的级配和沥青种类及其用量对滑移剪切能  $EI$  有显著影响, 适当增加最大公称粒径、采用改性沥青以及最佳油石比等措施能显著提高沥青路面的高温稳定性。

**关键词:** 道路工程; 沥青混合料; 滑移剪切试验; 高温稳定性; 滑移剪切能; 矿料

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2014) 10-0013-08

## Study on Slip and Shear Test of Asphalt Mixture Aggregate

ZHANG Zheng-qi<sup>1</sup>, LI Pei-long<sup>1</sup>, SHI Xiao-ge<sup>1</sup>, LI Yu-xin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China; 2. Shandong Expressway Co., Ltd., Weifang Shandong 266000, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between high temperature stability of asphalt mixture and slip and shear behavior on mineral aggregate interface, based on the contact and slip behavior of mineral aggregate of asphalt mixture, the slip and shear test specifically for evaluating the slip and shear performance of asphalt mixture aggregate is put forward, and the effect of test condition, gradation and asphalt, etc. on the slip and shear energy is analyzed. The research shows that as the evaluation indicator of the test, slip and shear energy  $EI$  has the best correlation with rut dynamic stability  $DS$  at the temperature of 60 °C and the loading rate of 20 mm/min, and the slip and shear test condition is recommended accordingly. The slip and shear test of the mineral aggregate shows that the gradation of asphalt mixture and the species and dosage of asphalt have significant effect on  $EI$ , the high temperature stability of asphalt pavement can be enhanced significantly by increasing the maximum nominal size appropriately, using modified asphalt and choosing the optimum asphalt-aggregate ratio, etc.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; slip and shear test; high temperature stability; slip and shear energy; mineral aggregate

## 0 引言

沥青混合料是由沥青结合料和矿料组成的多相复合颗粒性散体材料, 沥青的黏结性以及矿料颗粒

的嵌挤、摩擦、滑移机理在很大程度上决定了沥青混合料的力学行为。关于沥青结合料的研究, 国内外均有较丰硕的研究成果和丰富的应用经验。尽管集料的重量占沥青混合料的 95% 以上, 但由于性质

收稿日期: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50478095)

作者简介: 张争奇 (1967-), 男, 陕西扶风人, 教授, 博士. (z\_zhengqi@126.com)

参数、级配的多样性以及矿料微观作用机理的复杂性,国内外对集料的研究相对滞后,对矿料作用机理及微观力学的认识仍停留在定性描述阶段,如规范对集料颗粒的选择也仅定性地要求为颗粒有棱角、近似立方体、表面粗糙等<sup>[1-3]</sup>。

大量研究认为,沥青混合料的抗变形能力主要与其抗剪强度有关<sup>[4-8]</sup>。然而这一表述只是从宏观力学的角度分析了沥青混合料的强度形成机理,并没有抓住沥青混合料材料组成及强度构成的本质。对于典型的颗粒性材料,沥青混合料的宏观力学响应是微观层面矿料间的接触和界面摩擦、滑移行为的外在表现。然而长期以来,道路工程研究人员偏重于研究路面结构与材料的工程应用,路面材料的作用机理和微观力学行为没有引起足够的重视。

本文从分析沥青混合料矿料的接触及滑移特性入手,提出了基于矿料微观作用行为的宏观试验方法和评价指标,即滑移剪切试验和滑移剪切能  $EI$ ,并在一定的试验条件下分析滑移剪切能的变化规律及对试验条件的敏感性。本研究对改进现有的沥青混合料设计方法,提高沥青路面的抗车辙能力具有重要意义。

## 1 基于沥青混合料矿料界面接触滑移行为的试验方法

研究表明,粗集料的接触特性直接决定了沥青混合料的整体强度,也直接影响着矿料在力的作用下的滑移和重组,大量矿料颗粒间的滑移在宏观上则表现为混合料的整体变形。故对沥青混合料抵抗高温变形而言,研究混合料中矿料的力学行为的首要工作是对矿料的接触特性进行明确分析<sup>[9-13]</sup>。基于此本文提出了一种新的试验方法——滑移剪切试验。

### 1.1 试验仪器

滑移剪切试验的原理如图1所示,把外来荷载施加在一个钢制圆柱体压头对试件进行加载,钢制圆柱体压头的直径比试件的直径小很多。

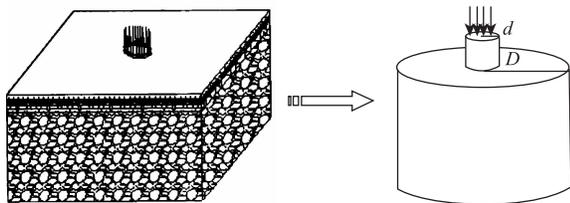


图1 矿料滑移剪切试验原理

Fig.1 Principle of slip and shear test of mineral aggregate

该试验的主要仪器之一是 MTS-810 电液伺服材料试验机,为了配合新的试验方法,研制了一套专门用于实验室模拟沥青混合料矿料滑移剪切行为的试验仪器—滑移剪切试验仪,见图2。滑移剪切试验仪由压头、上部圆柱筒、下部圆柱筒,以及卡在上下圆柱筒之间的环形盘组成。压头是具有规定尺寸的实心钢制圆柱体;上部圆柱筒是顶部封闭且留有圆形开口,底部敞开并留有外侧契口的半封闭半开口式钢筒;下部圆柱筒是顶部侧壁有内契口,底部一侧有一观测口的开口式钢圆筒;环形盘具有一定厚度,能够卡在上下部结构之间,且环形盘中心孔径大于上部圆柱筒顶部中心的孔径。该仪器的优点是装卸简单,可重复使用,能够准确地模拟混合料在荷载作用下的滑移破坏行为。



图2 滑移剪切试验仪

Fig.2 Slip and shear test instrument

### 1.2 试验过程

在进行试验时,利用 MTS-810 电液伺服材料试验机为新的试验仪器提供需要的荷载,荷载压力由万能试验机传递到压头,而压头作用在滑移剪切仪上部圆筒顶端的圆孔,最终将荷载施加于试件。该试验操作过程如下:

(1) 将标准马歇尔试件放入上部圆柱筒(滑移剪切仪的上部结构里的圆柱腔与此标准试件相匹配)。

(2) 将中部的环形圆盘放在下部圆柱筒契口顶部,对准上部结构的外契口,使3个部分准确无误地卡靠在一起,至此含有标准马歇尔试件的整体装置组装完成。

(3) 将组装完毕的装置垂直放在万能试验机的载物台上,然后将钢制压头搁置在装置顶面的环形区。

(4) 开启万能试验机对装置施压,滑移剪切试验开始,持续施压,至马歇尔试件中间部分从环形盘的圆孔完全滑出。滑出过程由装置下部结构的观察口进行观测。

(5) 终止试验,保存数据,以便后期试验分析。

破坏后的试件状态如下图 3 所示。



图 3 滑移剪切破坏后的试件

Fig. 3 Broken specimens after slip and shear test

该试验能够得到 5 个参数, 它们依次是最大破坏荷载  $F_p$  (滑移剪切破坏发生时试件承受的荷载)、破坏时间  $t_p$  (最大破坏荷载发生时的时间)、破坏变形  $\varepsilon_p$  (最大破坏荷载发生时试件的变形值)、滑移剪切模量  $E$  和滑移剪切能  $EI$ 。

$$E = F_p / \varepsilon_p, \quad (1)$$

$$EI = \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} F d\varepsilon, \quad (2)$$

式中  $F_p$  为最大破坏荷载;  $\varepsilon_p$  为相应的破坏变形;  $\varepsilon_1$  为最大破坏荷载出现时试件的变形值;  $\varepsilon_2$  为修正原点的变形值。修正方法见图 4。

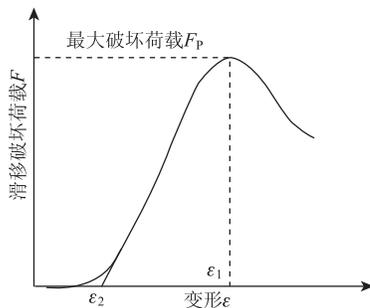


图 4 破坏变形

Fig. 4 Failure deformation

在相同试验条件下, 对 5 种不同级配的沥青混合料进行滑移剪切试验和车辙试验, 并将滑移剪切试验的各个参数和车辙动稳定度  $DS$  进行相关性分析。结果表明, 滑移剪切试验的 5 个参数中, 滑移剪切能  $EI$  与车辙动稳定度  $DS$  的相关性最好, 故选取滑移剪切能  $EI$  作为滑移剪切试验的评价指标。

## 2 试验结果及分析

试验采用 SK90<sup>#</sup> 基质沥青和 SBS 成品改性沥青, 粗细集料均选用玄武岩, 矿粉选用磨细的石灰岩, 用到的级配有 AC-13 上限、AC-13 中值、AC-13 合成、AC-13 下限、AC-16 中值、AC-20 中值和 AC-25 中值。采用马歇尔法批量成型沥青混合料试

件, 试件规格 63.5 mm × 101.6 mm (直径 × 高)。选用直径为 40 mm 的压头进行滑移剪切试验, 在试验数据稳定可靠的情况下, 不同条件下每种沥青混合料进行 3 次重复试验, 取均值, 分析试验条件、级配、沥青等对滑移剪切能的影响。

### 2.1 试验条件对沥青混合料滑移剪切性能的影响

#### 2.1.1 温度

采用 AC-13-中值、AC-16-中值、AC-20-中值三种级配的试件, 加载速率 20 mm/min, 在 70, 60, 50, 0 °C 4 个温度下进行滑移剪切试验, 分析温度对滑移剪切能变化规律的影响, 试验结果见图 5。

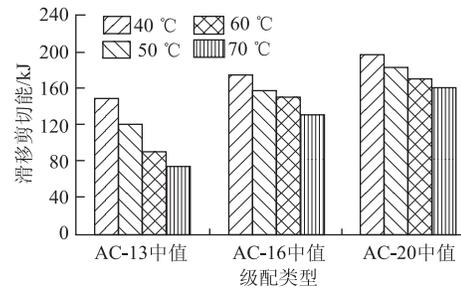


图 5 不同温度下各级配的滑移剪切能

Fig. 5 Slip and shear energy of different gradations at different temperatures

从图 5 可以看出:

(1) 考虑温度的影响, 滑移剪切试验评价指标滑移剪切能  $EI$  对温度条件有着良好的敏感性。

(2) 当试验温度相同时, 不同混合料的滑移剪切能  $EI$  有显著差别, 其中 AC-20 中值的滑移剪切能  $EI$  最大, AC-16 中值的次之, AC-13 中值的最小。

(3) 当试验温度在 40 ~ 70 °C 范围内, 随着温度的升高, 3 种沥青混合料的滑移剪切能  $EI$  都变小。分析其原因, 随温度升高, 沥青混合料中的沥青逐渐变软, 自由沥青含量增多, 且软化后的沥青对矿料的错位和滑移起到润滑作用, 使得沥青混合料的整体强度降低, 所以在荷载作用下, 试件发生滑移剪切变形需要的能量也会变小。考虑温度对沥青混合料抗滑移剪切变形能力的影响, 高温季节宜采用黏度较大的沥青来提高沥青路面的抗剪切变形能力, 减少路面车辙的发生。

采用下列 5 种级配的试件, 在上述 4 个温度下分别进行滑移剪切试验和车辙试验, 车辙试验严格按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E202011) 进行, 将滑移剪切能  $EI$  与车辙动稳定度  $DS$  做相关性分析, 以确定最佳的试验温度, 试验数据和分析结果见表 1 和表 2。

表1 不同温度各级配的  $EI$  和  $DS$ Tab. 1 Values of  $EI$  and  $DS$  in different gradations at different temperatures

温度	70 °C		60 °C		50 °C		40 °C	
	$EI/kJ$	$DS/(次 \cdot mm^{-1})$						
AC-13 上限	69.01	810.28	64.50	913.60	109.04	3 013.44	143.72	7 120.27
AC-13 中值	75.62	855.34	90.90	973.7	120.52	4 124.52	148.73	8 437.36
AC-13 - 下限	67.04	821.35	69.12	910.5	107.88	3 959.26	141.94	8 362.53
AC-16 - 中值	131.61	878.43	151.00	1242.6	158.23	4 351.71	175.34	9 945.91
AC-20 - 中值	161.72	912.53	170.90	1359.8	182.64	3 446.83	197.02	10 780.04

注:加载速率为 20 mm/min

表2 滑移剪切能  $EI$  与动稳定度的关系Tab. 2 Relation between  $EI$  and  $DS$ 

试验温度/°C	40	50	60	70
回归公式	$y = 0.015x + 22.11$	$y = 0.006x + 111.63$	$y = 0.241x - 148.62$	$y = 0.969x - 728.39$
$R^2$	0.671	0.310	0.975	0.882

表1和表2显示:

在相同的加载速率, 60 °C 时不同级配混合料的滑移剪切能  $EI$  区分性最好, 且与动稳定度  $DS$  的相关性最好, 70 °C 时次之, 40 °C 时较小, 而 50 °C 时是最小的。因此, 推荐 60 °C 为滑移剪切试验的温度。

### 2.1.2 加载速率

采用 AC-13 中值、AC-16 中值、AC-20 中值三种级配的试件, 试验温度为 60 °C, 分别在 10, 20, 50 mm/min 三种加载速率下进行滑移剪切试验, 分析加载速率对滑移剪切能变化规律的影响, 试验结果见图6。

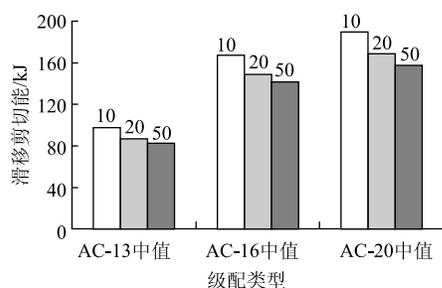


图6 不同加载速率下各级配的滑移剪切能

Fig. 6 Slip and shear energy in different gradations at different loading rates

从图6可以看出:

(1) 考虑加载速率的影响, 滑移剪切能  $EI$  对加载速率的改变有良好的敏感性。

(2) 滑移剪切试验中, 加载速率的改变对试验评价指标  $EI$  影响显著。在相同温度下, 随着加载速率的增大, 滑移剪切能  $EI$  随之减小。

(3) 滑移剪切能  $EI$  随加载速率变化的幅度大小

不同。加载速率由 10 mm/min 增至 20 mm/min 时, 滑移剪切能  $EI$  降幅较大; 由 20 mm/min 增至 50 mm/min 时, 滑移剪切能  $EI$  降幅较前者要小许多。但总的趋势是一定的, 即随着加载速率的增大, 滑移剪切能  $EI$  变小, 沥青路面越易发生滑移剪切现象, 即容易产生车辙。

采用下列五种级配的试件, 试验温度 60 °C 进行车辙试验, 并在上述三种加载速率下分别进行滑移剪切试验。将滑移剪切能  $EI$  与车辙动稳定度  $DS$  做相关性分析, 以确定最佳的加载速率, 试验数据和分析结果如表3和表4所示。

表3 不同加载速率的试验结果

Tab. 3 Result of test at different loading rates

加载速率/ (mm · min <sup>-1</sup> )	不同级配沥青混合料的 $EI$ 值/kJ				
	AC-13 上限	AC-13 中值	AC-13 下限	AC-16 中值	AC-20 中值
50n	54.76	87.50	65.71	143.58	167.73
20	64.50	90.90	69.12	151.00	170.90
10	70.00	97.61	62.00	166.31	139.12
$DS/$ (次 · mm <sup>-1</sup> )	913.6	973.7	910.5	1 242.6	1 359.8

表4 滑移剪切能  $EI$  与动稳定度  $DS$  的关系Tab. 4 Relation between  $EI$  and  $DS$ 

加载速率/ (mm · min <sup>-1</sup> )	10	20	50
回归公式	$y = 0.193x - 102.2$	$y = 0.233x - 142.7$	$y = 0.236x - 151.0$
相关系数 $R^2$	0.706	0.989	0.911

表3和表4显示, 加载速率为 20 mm/min 时, 滑移剪切能  $EI$  与车辙动稳定度  $DS$  的相关性系数最大, 50 mm/min 时的相关系数次之, 而 10 mm/min 时的相关系数最小。在此, 推荐滑移剪切试验的加载速率为 20 mm/min。

### 2.2 级配对沥青混合料滑移剪切性能的影响

#### 2.2.1 级配曲线走向

采用 AC-13 上限、AC-13 中值、AC-13 合

成, AC-13 下限四种级配走向的混合料试件, 试验温度 60 °C, 加载速率为 20 mm/min, 进行滑移剪切试验, 试验结果如图 7 所示。

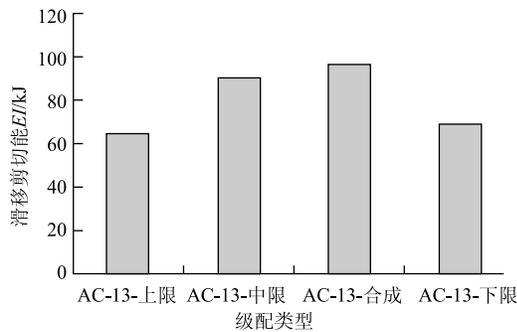


图 7 不同级配曲线下的滑移剪切能

Fig. 7 Slip and shear energy in different grading curves

从图 7 可以看出,

(1) 考虑级配曲线走向的影响, 滑移剪切能  $EI$  对级配走向的改变有良好的敏感性。

(2) 对相同最大公称粒径的沥青混合料而言, 级配曲线的差异对混合料的滑移剪切能  $EI$  有明显影响, 其中 AC-13 合成级配曲线的滑移剪切能  $EI$  最大, AC-13 中值次之, AC-13 上限最差。这说明 AC-13 合成级配混合料的高温稳定性要优于其他级配曲线, 而试验中的合成级配曲线为 S 形曲线, 说明 S 型级配混合料矿料间嵌挤得更紧密牢固, 这与目前很多研究者对 S 型级配的评价相吻合。

(3) AC-13 中值的滑移剪切能  $EI$  值与 AC-13 合成的差别较小, 而 AC-13 上、下限的滑移剪切能  $EI$  值与 AC-13 中值、AC-13 合成差别较大。

通过分析混合料级配构成特点, 解释以上试验现象: (1) AC-13 下限的沥青混合料, 粗集料所占比重较大, 细集料所占比重较小。矿料之间的空隙较大, 细集料不能有效填充矿料空隙, 混合料强度较低, 则滑移剪切破坏需要的能量值较小; 而 AC-13 上限混合料的结构特点恰恰相反, 细集料所占比重大, 粗集料所占比重小, 粗集料大部分悬浮于细集料和沥青胶浆中, 不能形成较好的接触, 同样不能形成嵌挤结构, 混合料强度较低。(2) AC-13 中值混合料的级配组成中, 中间档矿料含量较多, 而两头的较粗矿料和较细矿料所占比例较小, 虽然部分矿料能形成接触, 但大多粗集料还是处于游离状态, 使得混合料整体强度不是很理想, 但较上、下限的混合料的强度要大得多。(3) 从 AC-13 合成级配混合料的级配构成特点来看, 混合料中粗集料、中档集料及细集料三者之间的搭配比较合理, 相当

部分的矿料间能形成比较好的接触, 矿料间的嵌挤作用得以发挥。如此以来, 沥青混合料的整体强度较大, 抗滑移剪切能力也较好, 从而需要较大的能量使之发生剪切破坏。

### 2.2.2 最大公称粒径

采用 AC-13 中值、AC-16 中值、AC-20 中值、AC-25 中值四种不同最大公称粒径的混合料试件, 油石比和空隙率数据见表 5, 试验温度 60 °C, 加载速率为 20 mm/min, 进行滑移剪切试验, 试验结果见图 8。

表 5 油石比和空隙率 (单位: %)

Tab. 5 Asphalt-aggregate ratio and porosity (unit: %)

级配	AC-13 中值	AC-16 中值	AC-20 中值	AC-25 中值
最佳油石比	4.6	4.4	3.9	3.8
空隙率	4.5	4.8	4.1	4.5

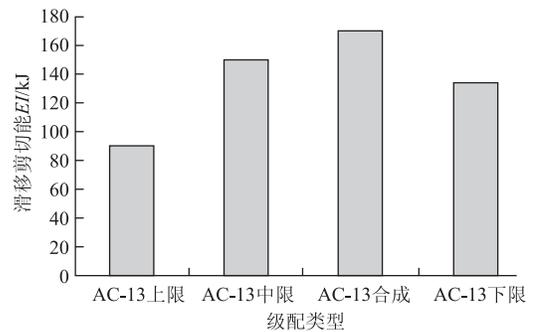


图 8 不同最大公称粒径下混合料的滑移剪切能

Fig. 8 Slip and shear energy in different maximum nominal sizes

从图 8 可以看出:

(1) 考虑矿料最大公称粒径的影响, 滑移剪切能  $EI$  对公称粒径的改变有良好的敏感性。

(2) 在级配曲线走向相同的条件下, 随着矿料最大公称粒径的改变, 滑移剪切能  $EI$  的大小也随之变化。 $EI$  值大小排序如下: AC-20 中值 > AC-16 中值 > AC-25 中值 > AC-13 中值。

(3) AC-16 中值混合料的  $EI$  值与 AC-20 中值的  $EI$  值差别较小, 而 AC-13 中值、AC-25 中值的  $EI$  值与 AC-16 中值、AC-20 中值的  $EI$  值差别比较大。

分析试验结果可知, 矿料最大公称粒径对混合料的高温抗滑移剪切性能有显著的影响, 但并不是说随着最大公称粒径的增大, 滑移剪切能  $EI$  值会一直增大下去。过大公称粒径的矿料之间空隙会很大, 混合料会形成具有较大空洞的空隙结构, 细集料填充不良, 胶浆黏结效果也不能很好地发挥, 这样混合料的整体强度必然会降低。从试验结果可以看出,

当公称粒径大于 25 mm 时,混合料的强度会较 20 mm 急剧降低。因此可以得出结论,矿料最大公称粒径的改变显著影响混合料的滑移剪切能  $EI$ ,但其影响并不是无限制的。因此要想获得高温性能好的混合料,不能一味地增大沥青混合料矿料最大公称粒径。

分析原因如下:(1)对 AC-25 中值的沥青混合料而言,大粒径矿料含量较多,而较细集料相对于 AC-20 中值、AC-16 中值、AC-13 中值的含量偏少,其粗集料间存在较大空隙,细集料不能有效填补空隙,使得混合料整体强度不好,滑移剪切能  $EI$  值比 AC-16、AC-20 中值要小很多。但另一方面,由于粗集料的接触较好,矿料的骨架作用得以发挥,其抗滑移剪切性能要优于 AC-13 中值混合料。

(2) 试验所采用的四种沥青混合料中,AC-13 中值混合料的矿料公称粒径最小,其粗集料含量较其他混合料要少,但细集料含量比 AC-16 中值、AC-20 中值要大得多,使混合料中相互接触的较粗矿料比例减少,矿料不能形成较好的嵌挤,在荷载作用下容易发生矿料间的滑移和重构,最终导致混合料的剪切破坏。

## 2.3 沥青用量和种类对沥青混合料滑移剪切性能的影响

### 2.3.1 沥青用量

采用 AC-13 合成级配,油石比分别为 3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5% 的沥青混合料试件,试验温度 60 °C,加载速率 20 mm/min,进行滑移剪切试验,试验结果见图 9~图 10。

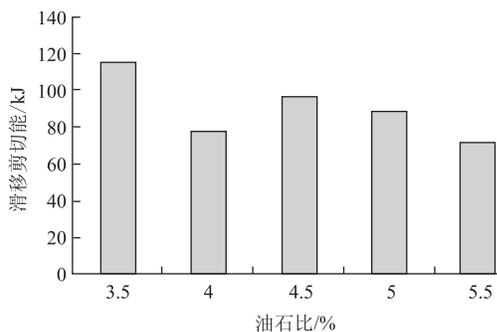


图 9 不同沥青用量下的滑移剪切能

Fig. 9 Slip and shear energy in different asphalt contents

从上图可以看出:

(1) 考虑油石比的影响,滑移剪切能  $EI$  对油石比的变化有良好的敏感性。

(2) 油石比的改变对  $EI$  值有显著影响。油石比在 3.0%~5.5% 范围内,随油石比逐渐增加, $EI$  值出现先减小后增大再减小的变化规律。当油石比在

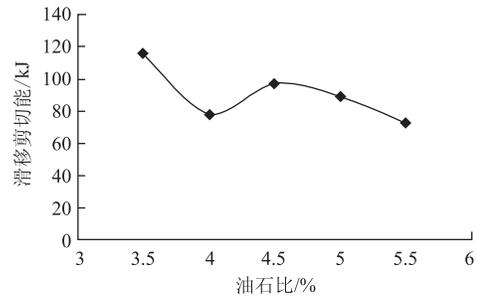


图 10 滑移剪切能  $EI$  随油石比变化趋势

Fig. 10  $EI$  varying with asphalt-aggregate ratio

4.5% 左右时, $EI$  值出现较大的值,在油石比为 3.5% 时也出现较大值,而在油石比为 5.5% 处出现最小值,在 3.5%~4.5% 之间  $EI$  值先减小后增大,在 4.5%~5.5% 区间  $EI$  值几乎呈线性减小。

(3) 在不同的油量区间,当油石比变化时, $EI$  值出现不同的变化趋势。油石比在 3.5%~4.0% 区间逐渐增加时, $EI$  逐渐变小且变化幅度较大;在 4.0%~4.5% 区间逐渐增加时, $EI$  逐渐增大且增幅较大。在 4.5%~5.5% 区间逐渐增加时, $EI$  逐渐减小且减幅较大。

由于在试验前已经通过马歇尔法确定出此 AC-13 合成级配混合料的最佳油石比大约在 4.5% 附近,对上述现象可以从最佳油石比出发,往左右分析原因。①在沥青含量处于最佳油石比附近时,矿料与沥青形成良好的裹附,且沥青的作用主要体现为结构沥青的黏附性,自由沥青含量较小,这样结构沥青使得矿料之间嵌挤得更加紧密且合成为一体,要破坏这种状态需要的能量必然大得多。②从最佳油石比往曲线右端看,沥青含量持续增大,自由沥青含量也随着增大,这样在矿料的接触面之间形成了较厚的一层自由沥青膜,自由沥青的润滑作用促进了矿料的错位和滑移,所以克服这种矿料的嵌挤需要的滑移剪切能  $EI$  就越来越小。③往左边看,当沥青含量减小直到 4% 时,认为矿料与沥青越来越难形成良好的裹附或者说结构沥青层厚度过小,这样矿料之间不能更好地黏结在一起,克服这种状态需要的能量越来越小。④但当沥青含量继续减小,矿料间沥青层厚度极小,矿料间的接触接近直接接触,这样沥青的黏附作用越来越小,矿料越来越近似处于干摩擦状态,需要克服这种摩擦状态使矿料发生滑移错位需要的能量自然就更大。

### 2.3.2 沥青种类的影响

选用 SK-90# 基质沥青和 SK-SBS 改性沥青,级配选用 AC-13-中值,试验温度 60 °C,加载速

率 20 mm/min, 进行滑移剪切试验, 结果见图 11。

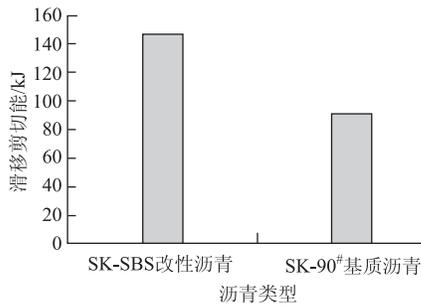


图 11 不同沥青类型的滑移剪切能

Fig. 11 Slip and shear energy of different asphalt types

从图 11 可以看出:

(1) 考虑沥青种类的影响, 滑移剪切能  $EI$  对沥青类型的改变有良好的敏感性。

(2) 在混合料的级配类型相同时, 沥青类型的改变显著影响混合料的抗滑移剪切性能。很明显, 从试验结果上看, SBS 改性沥青混合料的  $EI$  值要比同等试验条件下基质沥青混合料的  $EI$  值大得多。

从沥青的改性机理分析: SBS 是苯乙烯丁二烯苯乙烯的嵌段共聚物, 沥青经 SBS 改性后, 没有改变自身及沥青分子的化学结构单元, 而是改变了沥青组分分布, 改性过程以物理改性为主。聚合物吸附了沥青中的油分溶胀后形成连续相, 沥青重组分分布在聚合物相中, 聚合物的存在大大地改善了沥青的高、低温性能, 因而 SBS 改性沥青混合料的温度稳定性明显优于同等条件下基质沥青混合料的温度稳定性, 发生滑移剪切破坏需要的能量大得多。

综上所述, SBS 改性沥青能够改善沥青混合料的高温稳定性, 所以, 在实际工程应用中, 在条件允许的情况下, 应该尽可能采用改性沥青, 以提高路面的高温稳定性, 降低车辙病害的发生。由于现有的改性沥青的种类很多, 其对高温性能的改性机理不尽相同, 所以在实际应用时, 还应根据工程需要, 对改性沥青种类作出合理选择。

### 3 结语

(1) 滑移剪切试验能表征沥青混合料矿料的滑移剪切性能。滑移剪切能  $EI$  与车辙动稳定度  $DS$  有着良好的相关性, 作为滑移剪切试验的评价指标, 能更好地评价混合料的高温性能。

(2) 试验条件对滑移剪切能  $EI$  有显著影响。当温度升高时, 滑移剪切能  $EI$  随之变小; 加载速率逐渐增大时, 滑移剪切能  $EI$  的值也随之变小。分析表明, 试验温度 60 °C、加载速率 20 mm/min 时, 滑移

剪切能  $EI$  与车辙动稳定度  $DS$  的相关性最好。

(3) 混合料的级配对滑移剪切能  $EI$  有显著影响。S 型级配的  $EI$  值最大, 高温稳定性最好; 适当增加最大公称粒径是提高高温性能的有效方法之一, 但不能一味地增大。

(4) 沥青用量和种类对滑移剪切能  $EI$  有显著影响。 $EI$  值在最佳油石比附近出现峰值, 而 SBS 改性沥青混合料的  $EI$  值比同等试验条件下的基质沥青混合料的  $EI$  值大得多, 即采用最佳油石比和改性沥青, 可以提高沥青路面的高温稳定性。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 王彦喆. 粗集料细观结构特征对沥青混合料性能的影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.  
WANG Yan-zhe. Study of Effect of Microstructure Characteristic of Coarse Aggregate on Performance of Asphalt Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [2] 黄晚清. SMA 粗集料骨架结构的细观力学模型研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.  
HUANG Wan-qing. Study on Mesomechanical Model of Coarse Aggregate Skeleton of Stone Matrix Asphalt [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [3] 陈国明, 谭忆秋, 石昆磊, 等. 粗集料棱角性对沥青混合料性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 6-9.  
CHEN Guo-ming, TAN Yi-qiu, SHI Kun-lei, et al. Influence of Coarse Aggregate Angularity on Hot-mix Asphalt Properties [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (3): 6-9.
- [4] 张慧鲜. 基于抗剪强度的沥青混合料高温性能影响因素分析及改善措施研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.  
ZHANG Hui-xian. Influencing Factors of Asphalt Mixture High Temperature Performance Based on Shear Resistance Strength and Its Improving Measures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [5] 彭勇, 孙立军, 石永久, 等. 沥青混合料抗剪强度的影响因素 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37 (2): 330-333.  
PENG Yong, SUN Li-jun, SHI Yong-jiu, et al. Influence Factors of Shear Resistance of Asphalt Mixture [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37 (2): 330-333.
- [6] 高燕希, 曾红雄, 张东省. 沥青混合料抗剪强度的影

- 响因素研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (8): 28-32.
- GAO Yan-xi, ZENG Hong-xiong, ZHANG Dong-sheng. Research on Influencing Factors on Asphalt Mixture Shear Strength [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (8): 28-32.
- [7] 姜祎, 张阳. 沥青混合料抗剪强度的影响因素 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (7): 9-14.
- JIANG Yi, ZHANG Yang. Influencing Factors of Shear Strength of Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (7): 9-14.
- [8] 李娜, 韩森, 王海峰. 沥青混合料抗剪强度参数影响因素分析研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32 (1): 42-45.
- LI Na, HAN Sen, WANG Hai-feng. Research on Influencing Factors of Asphalt Mixture Shear Strength Parameters [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32 (1): 42-45.
- [9] 段跃华, 张肖宁, 李红杰, 等. 基于 CT 图像的粗集料颗粒接触特性细观尺度研究 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14 (6): 808-813.
- DUAN Yue-hua, ZHANG Xiao-ning, LI Hong-jie, et al. Research on Contact Characteristics of Coarse Aggregates Particles within Meso-scale by CT Images [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14 (6): 808-813.
- [10] 段跃华. 基于 X-ray CT 的沥青混合料粗集料基础特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- DUAN Yue-hua. Research on Basic Characteristics of Coarse Aggregates of Asphalt Mixture Based on X-ray CT [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [11] 林辉. 基于数字图像处理技术的粗集料形状特征量化研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- LIN Hui. Quantitative Study of Shape Characteristics for Coarse Aggregate Based on Digital Image Processing [D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [12] 王端宜, 黎侃, 蔡旭. 基于集料接触特性的沥青混合料抗车辙性能评价 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40 (11): 121-126.
- WANG Duan-yi, LI Kan, CAI Xu. Evaluation of Rutting Resistance of Asphalt Mixture Based on Aggregate Contact Characteristics [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40 (11): 121-126.
- [13] 魏鸿, 英红, 凌天清. 沥青混合料集料接触特性切片图像评价方法 [J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32 (3): 69-74.
- WEI Hong, YING Hong, LING Tian-qing. Aggregates Contact Characteristics Evaluation of Asphalt Mixtures by Analyzing Cut Images [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32 (3): 69-74.
- (上接第 12 页)
- GE Shi-rong. The Fractal Behavior and Fractal Characterization of Rough Surfaces [J]. Tribology, 1997, 17 (1): 73-80.
- [11] 王建军, 魏宗信. 粗糙表面轮廓分形维数的计算方法 [J]. 工具技术, 2006, 40 (8): 73-75.
- WANG Jan-jun, WEI Zong-xin. Computation Method for Fractal Dimension of Rough Surface Profile [J]. Tool Engineering, 2006, 40 (8): 73-75.
- [12] 李毅, 谢利利, 王名福, 等. 粉体颗粒形貌特征的提取与识别技术 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23 (5): 67-69.
- LI Yi, XIE Li-li, WANG Ming-fu, et al. Study of Drawing and Recognizing Particle Appearance [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23 (5): 67-69.
- [13] 周银军, 陈立, 刘欣桐, 等. 河床表面分形特征及其分形维数计算方法 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009 (3): 170-178.
- ZHOU Yin-jun, CHEN Li, LIU Xin-tong, et al. Study on Fractal Properties of a River Bed and the Calculation Method of Its Fractal Dimension [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science Edition, 2009 (3): 170-178.
- [14] 黄继承, 黄澎. 沥青混合料集料分形和性状相关性研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34 (12): 1633-1636.
- HUANG Ji-cheng, HUANG Peng. Relativity Study on Aggregates Fractal and Mechanics Indexes of Asphalt Mixture [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2006, 34 (12): 1633-1636.
- [15] 杨瑞华, 许志鸿. 密级配沥青混合料集料分形分维与路用性能的关系 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (3): 98-109.
- YANG Rui-hua, XU Zhi-hong. Relationship between Fractal Dimension and Road Performance of Dense-gradation Asphalt Mixture [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (3): 98-109.
- [16] 陈国明, 谭忆秋, 王哲人, 等. 沥青混合料级配曲线走向的分形研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (1): 1-4.
- CHEN Guo-ming, TAN Yi-qiu, WANG Zhe-ren, et al. Fractal Study of Grading Curve Trend of the Asphalt Mixtures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (1): 1-4.