

# Mixing Viscosity and Workability of Different Bituminous Mixtures

Jianglang Zhu<sup>1</sup>, Haixin An<sup>2</sup>, Juming Liu<sup>3</sup>, Ang Li<sup>1</sup>, Xili Yan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Xinjiang Communications Construction Administrative Bureau, Wulumuqi Xinjiang

<sup>3</sup>Sichuan Dazhou Traffic Investment Construction and Development Group Ltd., Dazhou Sichuan

Email: [xili.yan@chd.edu.cn](mailto:xili.yan@chd.edu.cn)

Received: Oct. 28<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 20<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 27<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

In order to research the mixing viscosity and the workability of different mixtures, five different bitumen such as 70# matrix bitumen, SBS modified bitumen, rubber bitumen and two kinds of warm bitumen were selected to prepare five asphalt mixtures in type of AC-13C, and the Brookfield viscosities were tested for each bitumen. Using an experimental device of mixing power measurement at different velocities, the variable mixing velocity experiment was carried out for the five different asphalt mixtures at different mixing temperatures (140°C - 180°C) and mixing velocities (20 - 50 r·min<sup>-1</sup>). By analyzing the rheogram of mixing power and mixing velocity, the mixing viscosity and the workability index of the mixtures were studied. The result shows that the mixing rheological characteristic of mixture obeys the linear visco-plastic Bingham model; the mixing viscosity of mixtures has a positive correlation with the bitumen viscosity; the mixing viscosity influences greatly the workability of mixture, and at the same temperature, compared to 70# matrix asphalt mixture, the SBS modified and rubber asphalt mixture present a madder workability, and the warm asphalt mixture is observably better; the workability indexes increase significantly by increasing the mixing temperature.

## Keywords

Road Engineering, Asphalt Mixture, Mixing Viscosity, Mixing Rheological Model, Workability

# 不同沥青混合料的拌和黏度及和易性

朱江浪<sup>1</sup>, 安海新<sup>2</sup>, 刘巨明<sup>3</sup>, 李昂<sup>1</sup>, 延西利<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>长安大学, 公路学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>新疆交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>四川达州市交通投资建设集团有限责任公司, 四川 达州

\*通讯作者。

Email: xili.yan@chd.edu.cn

收稿日期: 2018年10月28日; 录用日期: 2018年11月20日; 发布日期: 2018年11月27日

## 摘要

为了研究不同沥青混合料的拌和黏度及和易性, 试验选取了70#基质沥青、SBS改性沥青、橡胶沥青和两种温拌沥青等5种不同种类的沥青, 测试了布氏黏度, 制备了AC-13C型沥青混合料, 利用变速拌和功率测试试验装置, 在不同拌和温度(140°C~180°C)和不同拌和速率(20~50 r·min<sup>-1</sup>)下, 对5种沥青混合料进行了变速拌和试验, 通过分析“拌和功率—拌和速率”流变图, 研究了混合料的拌和黏度及和易性指数。结果表明: 沥青混合料的拌和流变特性服从线性黏塑性的宾汉模型; 混合料的拌和黏度和沥青的黏度之间具有良好的正相关性; 拌和黏度对混合料的和易性有重大影响, 相同拌和温度时, SBS改性和橡胶沥青混合料的和易性较差, 温拌沥青混合料的和易性较好; 随着拌和温度的升高, 拌和和易性有明显改善。

## 关键词

道路工程, 沥青混合料, 拌和黏度, 拌和流变模型, 拌和和易性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

沥青混合料是由黏性的沥青和松散的集料搅拌混合而成, 广泛应用于路面工程。不同沥青混合料主要是指不同级配类型的混合料(如 AC、SMA、OGFC 等)和不同沥青种类的混合料(如基质沥青、改性沥青、橡胶沥青、温拌沥青等)。本文针对不同沥青种类的混合料, 主要研究其拌和黏度及和易性, 是文献[1][2][3]研究成果的续篇。

沥青混合料的拌和黏度是其和易性的根本起源, 拌和黏度决定了其拌和的和易性, 即拌和的难易程度, 和易性则影响着沥青路面的铺筑质量。目前关于和易性的评述仍然停留在宏观的定性概念上, 并无具体的定量指标和规范性的评价方法。然而相关研究人员已经开展了大量的定量分析研究[1]-[6], 并取得了一些有价值的研究成果。

Marvillet 等[4]较早提出沥青混合料拌和和易性指标的概念, 并试验测试了搅拌叶片在特定转速(22 r/min)下的扭矩值, 以扭矩值评价混合料的拌和和易性。Gudimettla [5]基于热拌沥青混合料的拌和扭矩, 研究和易性。侯曙光等[6]开发了沥青混合料的和易性指数测试设备, 定义了和易性指数为特定转速(30 r/min)下扭矩测试值的倒数。Tao 和 Austerman 等[7][8]通过扭矩值, 研究分析了不同温拌剂掺量与沥青混合料的和易性之间的关系。延西利等[1]自行开发了变速拌和功率测试装置, 研究了不同拌和速率下的拌和流动特性, 以流变模型为基础定义了拌和和易性指数(广义黏度的倒数), 但并未提交不同沥青种类的拌和和易性成果。其它一些研究[9][10][11][12][13]通过拌和扭矩值或压实度分析了沥青混合料的和易性及施工质量控制要素, 未涉及其它和易性评价方法。

上述拌和扭矩值评价方法, 没有利用现有的拌和设备平台、且需要加装昂贵的扭矩传感器并需要标

定,不利于工程应用;数据分析仅为给定拌和速率下的单一扭矩值,没有从混合料的拌和黏度出发,来研究其拌和流动特性及其和易性,无法应用流变学理论来分析问题。

因此,论文研究团队自行开发了一种“变速拌和功率测试试验装置”,用以分析不同拌和温度、不同拌和速率下混合料的拌和流动特性,一些研究成果已撰文介绍[1] [2] [3]。本文选用5种不同性质的沥青,制备了AC-13C型沥青混合料,通过变速拌和功率测试试验,研究了混合料的拌和流变模型及其拌和黏度,定义了拌和和易性指数,分析了沥青种类对混合料拌和和易性的影响。

## 2. 沥青及混合料

### 2.1. 沥青的种类

试验选用了5种沥青:70#基质沥青、SBS改性沥青、橡胶沥青、Evotherm温拌沥青和ACMP1温拌沥青。改性沥青与温拌沥青的基础沥青均采用70#基质沥青,SBS改性沥青和橡胶沥青的制备采用常规方法和剂量[2],Evotherm、ACMP1两种温拌剂的剂量依次为0.6%、6%。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011),对其进行了基本技术性能测试,结果见表1。

### 2.2. 沥青的布氏黏度

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011),采用布氏黏度计,在不同试验温度(120、130、135、140、150、160、170、180℃)下对5种沥青进行了布氏黏度测试[14] [15],试验结果见表2。由此可以看出,SBS改性沥青和橡胶沥青的黏度明显高于基质沥青,表面活性剂型的温拌剂Evotherm对沥青本身的黏度没有影响,而降黏型温拌剂ACMP1则对沥青有明显的降黏作用。

**Table 1.** Basic technical parameters of different bitumen

**表 1.** 不同沥青的基本技术参数

沥青种类	25℃ 针入度/0.1mm	15℃ 针入度/0.1mm	软化点/℃	15℃ 延度/cm	10℃ 延度/cm	5℃ 延度/cm
70#基质	70.6	/	48.0	>100	82.6	/
SBS	74.2	/	68.4	/	/	36.7
橡胶	61.2	/	68.7	60.9	/	/
Evotherm	71.4	/	47.9	40.8	/	/
ACMP1	/	83.2	43.8	/	135.5	/

**Table 2.** Viscosity of different bitumen at different temperatures (Pa·s)

**表 2.** 不同温度下不同沥青的布氏黏度(Pa·s)

沥青种类	温 度/℃							
	120	130	135	140	150	160	170	180
70#基质	0.855	0.580	0.488	0.381	0.241	0.168	0.111	0.082
SBS	2.428	1.560	1.271	0.949	0.590	0.402	0.245	0.155
橡胶	3.658	2.388	2.068	1.617	1.118	0.692	0.485	0.360
Evotherm	0.858	0.562	0.494	0.389	0.256	0.163	0.113	0.081
ACMP1	0.533	0.380	0.312	0.260	0.176	0.119	0.085	0.061

### 2.3. 混合料的制备

试验研究选用 AC-13C 型沥青混合料, 碎石和矿粉的岩性均为石灰岩, 碎石的压碎值为 10.6%、表观相对密度为 2.715, 矿粉的表观相对密度为 2.683。沥青用量按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011), 采用马歇尔配合比试验法确定。5 种沥青混合料的最佳沥青用量基本上在 4.8%~5.0% 之间, 变化幅度较小, 反映了级配类型 AC-13C 确定后, 矿料的比表面积也为一定值, 在理论上对沥青的吸附及薄膜的形成具有一致性。因此, 试验研究对 5 种沥青混合料的沥青用量统一取值 4.9%。

### 3. 变速拌和试验

试验采用研究团队自行开发的变速拌和功率测试试验装置[1] [2] [3], 其特点为: 在现有马歇尔拌和设备的平台上增加了变速拌和系统、功率测试系统和数据储存系统, 可通过控制面板进行转速调节, 实现沥青混合料的变速拌和及其功率测试, 并对测试数据进行实时记录与存储。在不同拌和温度和不同拌和速率下, 对 5 种沥青混合料进行了拌和功率测试, 具体试验方案见表 3, 拌和功率测试结果见表 4。

Table 3. Test scheme of different mixing velocities

表 3. 变速拌和试验方案

沥青混合料种类	70#基质、SBS、橡胶、Evotherm、ACMP1
级配类型	AC-13C
沥青用量/%	4.9
混合料拌和质量/kg	12
拌和温度/°C	140、150、160、170、180
拌和速率/r·min <sup>-1</sup>	20、30、40、50

### 4. 拌和流动特性

根据表 4 试验结果, 可分别绘制出 5 种沥青混合料在不同温度下的“拌和功率—拌和速率”流变图, 以 160°C 为例, 不同沥青混合料的流变图如图 1; 以 70#基质沥青混合料为例, 不同温度下的流变图如图 2。分析发现, 对于不同沥青混合料在不同温度时, 拌和功率随着拌和速率的增大而线性增加, 表现为典型的线性黏塑性特性; 给定拌和速率下, 拌和功率随着拌和温度的升高而显著减小, 揭示了温度对黏性的影响。

若记拌和功率为  $P$ 、拌和速率为  $V$ , 则各种沥青混合料在给定温度下的拌和流动规律可写为

$$P = F + \lambda \cdot V \quad (1)$$

式中:  $F$  称为内在塑限, 表示图 1(或图 2)中直线的截距;  $\lambda$  称为广义黏度, 表示图 1(或图 2)中直线的斜率; 图 1(或图 2)即为拌和流变图, 也称  $P$ - $V$  流变图。

式(1)所描述的拌和流动特性, 在物理属性和力学原理上, 正好反映了宾汉(Bingham)模型, 如图 3, 说明沥青混合料的拌和流动特性服从 Bingham 模型, 是一种线性黏塑性流动。宾汉模型的本构方程为

$$\tau = f + \eta \cdot D \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为剪切应力;  $D$  为剪切速率;  $f$  为材料的内在塑限;  $\eta$  为材料的黏度。

### 5. 拌和黏度分析

从线性黏塑性流动变形的原理来讲, 式(1)中的广义黏度  $\lambda$  表征了混合料的黏度, 为混合料的拌和黏

度, 直接关联着混合料的拌和和易性。拌和黏度大, 和易性差; 拌和黏度小, 和易性好。沥青混合料的这个拌和黏度称为广义黏度  $\lambda$  [1], 也可以简称为拌和黏度。

对试验结果(表 4)进行线性回归分析(相关系数大于 0.99), 得到不同沥青混合料在不同温度下的拌和黏度值见表 5。

从表 5 可以看出: 不同沥青混合料的拌和黏度明显不同, 与 70#基质沥青混合料相比, SBS 改性和橡胶沥青混合料的拌和黏度  $\lambda$  提高了 6.0%~30.7%, 而两种温拌沥青混合料的拌和黏度  $\lambda$  则降低了 5.1%~26.5%; 随着温度的升高, 沥青混合料的拌和黏度  $\lambda$  初期衰减较快、后期衰减较弱。

混合料的拌和黏度  $\lambda$ , 在本质上起源于沥青的黏度  $\eta$ , 因此, 二者必然存在某种内在的联系。取

**Table 4.** Testing result of mixing power (W)

**表 4.** 拌和功率测试结果(W)

混合料	拌和温度/°C	拌和速率/(r·min <sup>-1</sup> )			
		20	30	40	50
70#基质沥青	140	139.1	187.9	247.3	303.1
	150	119.3	162.0	210.8	254.3
	160	107.9	147.8	185.0	228.2
	170	101.8	138.9	175.9	211.7
	180	96.9	131.6	168.5	201.7
SBS 改性沥青	140	160.8	218.5	279.6	350.3
	150	142.8	193.5	252.6	309.3
	160	131.0	174.1	222.3	279.2
	170	113.2	161.3	204.5	238.0
	180	105.8	148.7	184.1	217.9
橡胶沥青	140	165.0	231.1	299.1	360.3
	150	145.7	208.1	266.1	317.3
	160	137.3	186.1	241.2	292.1
	170	124.5	165.8	212.0	260.6
	180	115.7	151.1	192.6	235.8
Evotherm 温拌沥青	140	116.9	167.1	216.5	254.6
	150	103.1	146.8	187.8	223.2
	160	99.1	136.4	169.5	209.9
	170	95.3	127.3	163.1	199.9
	180	91.8	122.8	155.6	191.4
ACMP1 温拌沥青	140	109.2	153.0	193.2	242.7
	150	100.4	138.3	174.3	220.2
	160	96.0	130.8	165.3	206.9
	170	91.1	123.8	156.4	196.0
	180	86.3	122.9	153.2	186.5

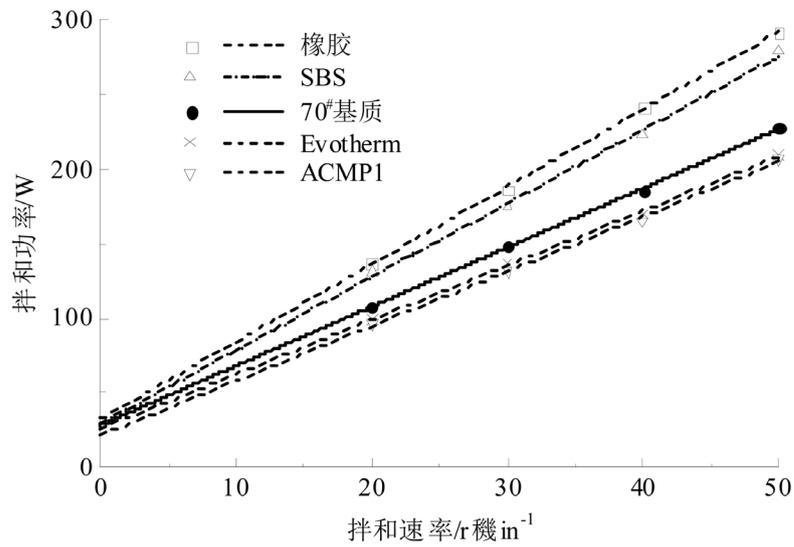


Figure 1. Mixing rheogram of different asphalt mixtures (160°C)  
 图 1. 不同沥青混合料的拌和流变图(160°C)

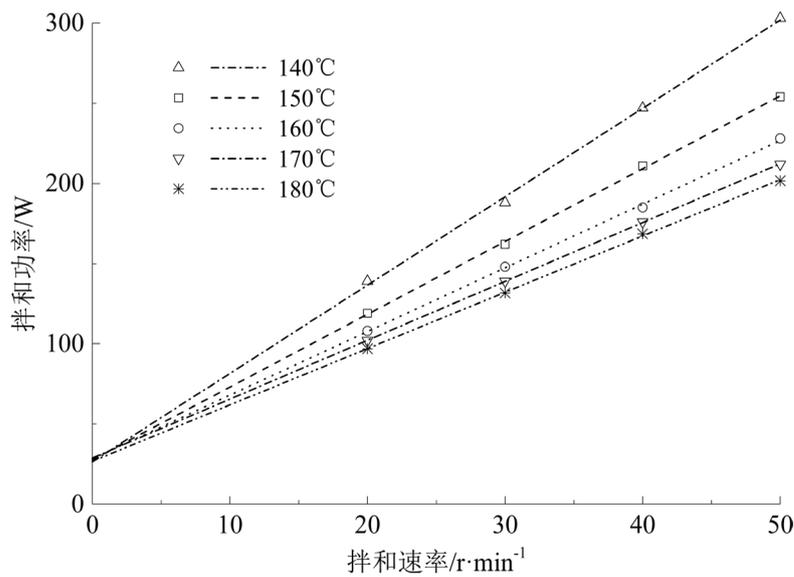


Figure 2. Mixing rheogram of 70# matrix asphalt mixture  
 图 2. 70#基质沥青混合料的拌和流变图

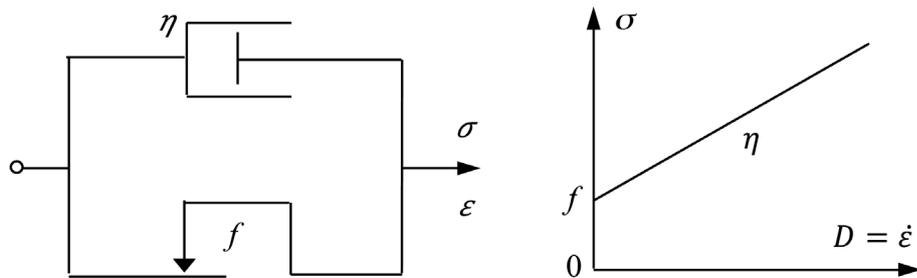
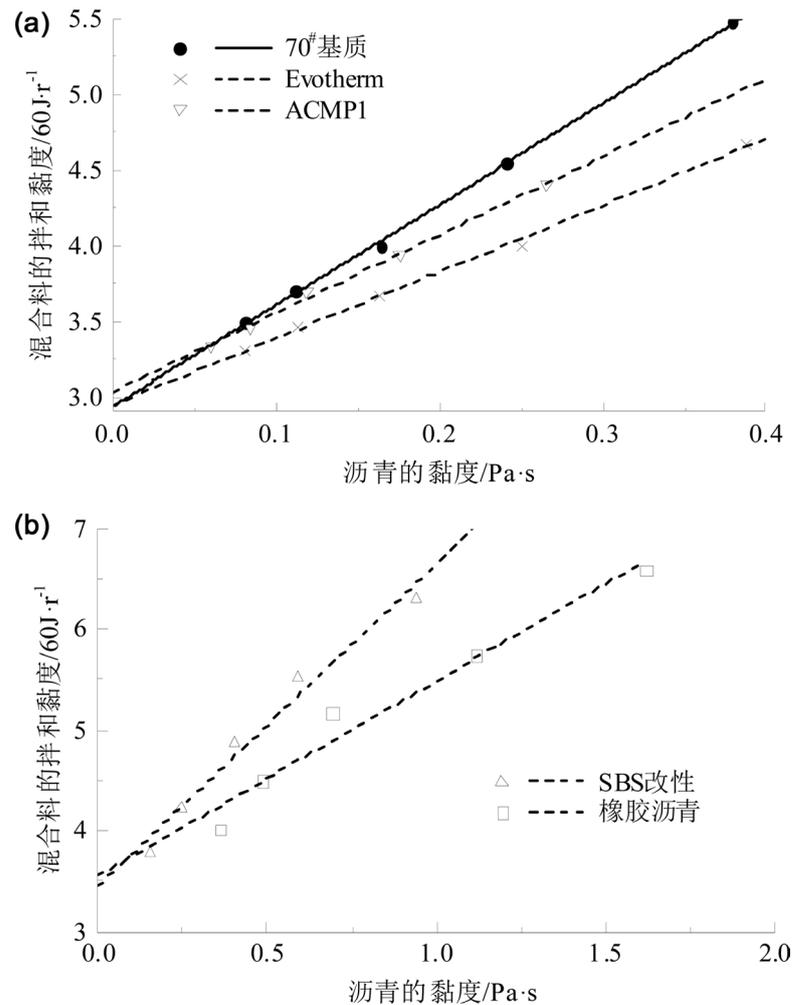


Figure 3. Bingham model and its rheogram  
 图 3. 宾汉模型及其流变图

**Table 5.** Mixing viscosity of asphalt mixtures ( $60 \text{ J}\cdot\text{r}^{-1}$ )  
**表 5.** 沥青混合料的拌和黏度  $\lambda$  ( $60 \text{ J}\cdot\text{r}^{-1}$ )

沥青混合料	拌和温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	140	150	160	170	180
70 <sup>#</sup> 基质	5.51	4.54	3.97	3.67	3.51
SBS 改性	6.30	5.59	4.93	4.18	3.72
橡胶沥青	6.54	5.72	5.19	4.50	4.01
Evotherm	4.63	4.01	3.66	3.49	3.31
ACMP1	4.41	3.94	3.67	3.47	3.33



**Figure 4.** Changing rules of mixture's mixing viscosity with bitumen viscosity. (a) 70<sup>#</sup> matrix bitumen and two kinds of warm bitumen; (b) SBS modified bitumen and rubber bitumen

**图 4.** 混合料的拌和黏度随沥青黏度的变化规律。(a) 70<sup>#</sup>基质沥青和两种温拌沥青；(b) SBS 改性沥青和橡胶沥青

140 $^{\circ}\text{C}$ ~180 $^{\circ}\text{C}$  时沥青的黏度  $\eta$  (表 2) 和混合料的拌和黏度  $\lambda$  (表 5), 可绘制  $\eta$ - $\lambda$  图, 见图 4。由于黏度比例相差较大, 故绘制成两个图。

从图 4 可以发现: 混合料的拌和黏度  $\lambda$  与沥青的黏度  $\eta$  具有良好的线性相关性, 相关系数大于 0.97,

沥青黏度越大，混合料的拌和黏度也越大。但沥青黏度相同时，不同沥青混合料的拌和黏度却不同，表现为其拌和和易性的不同，反映了沥青种类对混合料和易性的影响。

## 6. 拌和和易性分析

沥青混合料的拌和和易性在本质上为混合料的拌和黏度问题，混合料的拌和黏度越小，拌和和易性越好，反之亦然，即混合料的和易性与其拌和黏度 $\lambda$ 负相关，可以定义拌和和易性指数( $I_w$ )为拌和黏度 $\lambda$ 的倒数的百分率[1]，即

$$I_w = \frac{100}{\lambda} \quad (3)$$

式中： $I_w$  的量纲为%； $\lambda$  的量纲为  $60\text{J}\cdot\text{r}^{-1}$ 。

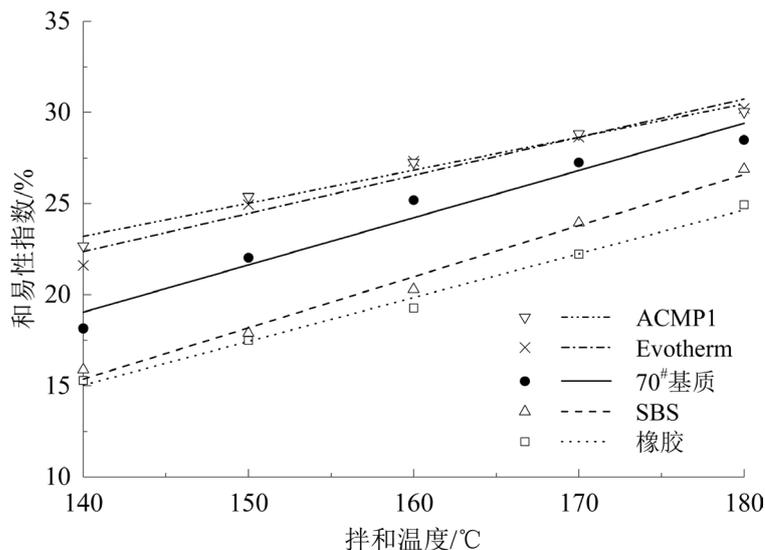
根据式(3)计算不同沥青混合料的和易性指数见表6，并绘制成图5以考察其随温度的变化规律。从表6可以发现，不同沥青混合料的和易性指数明显不同，与70#基质沥青混合料相比，SBS改性沥青和橡胶沥青混合料的和易性指数降低了5.6%~23.5%，另外两种温拌沥青混合料的和易性指数则提高了5.1%~25.0%。

从图5也可以发现，和易性指数随温度线性增长，相关系数大于0.98，温度越高，和易性指数越大，

**Table 6.** Workability index of asphalt mixtures (%)

**表 6.** 沥青混合料的和易性指数(%)

沥青混合料	拌和温度/°C				
	140	150	160	170	180
70#基质	18.15	22.03	25.19	27.25	28.49
SBS 改性	15.88	17.90	20.29	23.95	26.89
橡胶沥青	15.29	17.48	19.27	22.22	24.94
Evotherm	21.60	24.94	27.32	28.65	30.21
ACMP1	22.68	25.38	27.25	28.82	30.03



**Figure 5.** Changing rules of workability index with the temperature

**图 5.** 和易性指数随温度的变化规律

混合料拌和和易性越好；当拌和温度由 140℃ 升高到 180℃ 时，三种热拌沥青混合料的和易性指数增加幅度为 57.0%~69.3%，另外两种温拌沥青混合料增加幅度为 32.4%~39.9%；不同沥青混合料的和易性指数的大小排序为：ACMP1 > Evotherm > 70#基质沥青 > SBS 改性 > 橡胶沥青。

## 7. 结语

1) 沥青混合料的拌和流动特性服从线性黏塑性的宾汉模型，其拌和黏度可用来描述混合料的拌和和易性。

2) 混合料的拌和黏度与沥青的黏度呈良好的正相关性，但沥青黏度相同时，混合料的拌和黏度却不同，表现为其拌和和易性的不同。

3) 为了定量评价沥青混合料的拌和和易性，可引入一个拌和和易性指数，定义为拌和黏度的倒数的百分率。

4) 沥青种类不同，混合料的拌和黏度或和易性也不同，SBS 改性沥青和橡胶沥青混合料的和易性较差，温拌沥青混合料的和易性较好。

5) 随着拌和温度的升高，混合料的和易性指数增大；不同沥青混合料的和易性指数大小排序为：ACMP1 > Evotherm > 70#基质沥青 > SBS 改性 > 橡胶沥青。

## 基金项目

陕西省交通科技项目(17-11K)，四川省交通科技项目(2017-F-01)。

## 参考文献

- [1] 延西利, 田辉黎, 延喜乐, 等. 沥青混合料的变速拌和功率测试与拌和流变模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(3): 1-7.
- [2] 李昂. 不同性质沥青混合料的变速拌和和易性指数研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [3] 田辉黎. 沥青混合料变速拌和的试验特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [4] Marvillet, J. and Bougault, P. (1979) Workability of Bituminous Mixes-Development of a Workability Meter. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*.
- [5] Gudimettla, J.M., Cooley, L.A. and Brown, E.R. (2003) Workability of Hot Mix Asphalt. *Transportation Research Record*.
- [6] 侯曙光. 热拌与温拌沥青混合料和易性试验[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 36-39.
- [7] Tao, M. and Mallick, R.B. (2009) Effects of Warm-Mix Asphalt Additives on Workability and Mechanical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement Material. *Journal of the Transportation Research Board*, **2126**, 151-160. <https://doi.org/10.3141/2126-18>
- [8] Ausiterman, A., Mogawer, W. and Bonaquist, R. (2009) Evaluating the Effects of Warm Mix Asphalt Technology Additive Dosages on the Workability and Durability of Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement. *Transportation Research Board*.
- [9] Ali, A., Abbas, A., et al. (2012) Workability Evaluation of Foamed Warm-Mix Asphalt. *International Journal of Pavement Research & Technology*, **5**, 93-101.
- [10] Roozbahany, E.G. and Partl, M.N. (2016) A New Test to Study the Flow of Mixtures at Early Stages of Compaction. *Materials and Structures*, **49**, 3547-3558. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0738-8>
- [11] 汪德才, 郝培文, 刘娜, 等. 乳化沥青冷再生混合料和易性指标及影响因素[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 919-925.
- [12] 郭平. 乳化型温拌剂研发及其混合料评价体系研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [13] 张琛, 汪海年, 尤占平, 等. 橡胶沥青混合料和易性与压实特性的相关性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 202-208.
- [14] 延西利, 雍黎明, 延梦璐, 等. ACMP 沥青温拌性能的粘温曲线分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 1-8.
- [15] 安晓燕, 李美江. 橡胶沥青黏度试验方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(1): 94-97.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)