

文章编号:1671-8879(2014)04-0038-07

# 基于表面自由能理论的温拌再生沥青-集料粘附特性

郭 鹏<sup>1</sup>, 唐伯明<sup>1</sup>, 冯 敏<sup>1</sup>, 杨赞华<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室, 重庆 400074;

2. 贵州省公路勘察设计院, 贵州 贵阳 550003)

**摘 要:**根据表面能理论,通过表面张力分析仪测试不同掺量新旧沥青和集料的表面自由能参数,分析温拌再生沥青表面自由能的变化规律以及温拌再生沥青-集料粘附特性。研究表明:再生沥青的表面自由能随旧沥青掺量增加而增大;温拌剂的添加改变了沥青的极性分量和 Lewis 酸碱作用力参数,改善了沥青的表面自由能,增强了沥青与石料的粘附能力;结合温拌条件下石灰岩、花岗岩 2 种石料粘附功之比以及水稳性能试验结果,说明温拌剂的添加增强了沥青混合料粘附性能,从而改善再生沥青混合料的水稳性能。

**关键词:**道路工程;表面自由能;温拌再生沥青混合料;沥青-集料;粘附作用

**中图分类号:**U416.26

**文献标志码:**A

## Warm mix recycled asphalt-aggregates adhesion based on surface free energy theory

GUO Peng<sup>1</sup>, TANG Bo-ming<sup>1</sup>, FENG Min<sup>1</sup>, YANG Zan-hua<sup>2</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Traffic Civil Engineering Materials Chongqing

Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Guizhou Province Road Investigation and

Design Institute, Guiyang 550003, Guizhou, China)

**Abstract:** Based on surface free energy theory, this paper evaluated different dosage old asphalt and aggregate surface free energy, and analyzed the variation of warm mix asphalt surface free energy and the adhesion properties of warm mix recycled asphalt-aggregate. The results show that: recycled asphalt surface free energy increases with the increase of dosage of old asphalt; the addition of temperature change agent changes asphalt polar component and Lewis acid-base interaction parameter, improves asphalt surface free energy, and enhances the adhesion of asphalt and stone. Combined with adhesion ratio of the stone work between limestone and granite under the condition of warm mix and results of water stability test, it's indicated that the addition of warm mix agent enhances adhesion properties of asphalt mixture, thereby improves the recycled asphalt mixture water stability. 7 tabs, 4 figs, 22 refs.

**Key words:** road engineering; surface free energy; warm mix recycled asphalt mixture; asphalt-aggregate; adhesion

收稿日期:2013-11-14

基金项目:重庆交通科技项目(KJXM2011-0186);重庆市博士后科研基金项目(201102010);重庆交通大学研究生创新基金项目(20120121)

作者简介:郭 鹏(1982-),男,河南商丘人,工学博士研究生,E-mail:hnguopeng@126.com。

## 0 引言

温拌再生沥青混合料是由复杂的多相体系组成,在多相体系中必然存在相与相之间的界面。沥青作为高温流变特性的粘弹性材料对集料和再生沥青混合料界面必然有一定粘附,集料与沥青的粘附必然有一定能量。随着表面能理论的发展,研究人员采用表面能理论研究沥青-集料的粘附性能。

Elphingstone 首次提出表面能理论可以用来预测热拌沥青混合料疲劳破坏和水损害<sup>[1]</sup>;Cheng 采用吊片法和万能吸附仪分别测定了沥青和集料表面能,计算了无水条件下沥青和矿料粘附功和有水条件下沥青从矿料表面剥落的粘附功,探讨了这些参数与沥青混合料水敏感性的相关性<sup>[2]</sup>;Bhasin 等应用表面能理论计算得到沥青集料之间粘附能量以及胶结料内部粘聚能量,并对沥青混合料抗水损害能力进行了现场测试,结果表明水损害与沥青混合料粘结性能密切相关<sup>[3]</sup>;Arabani 等通过对沥青混合料沥青-集料粘附性及沥青胶结料粘聚力机理的认识,认为表面能方法可以用来评价沥青混合料水稳定性<sup>[4]</sup>;Lytton 等从微观角度研究了沥青膜厚度与沥青-集料界面粘附性的关系<sup>[5-6]</sup>;Arambula 等分析了空隙率以及空隙分布对沥青混合料水稳定性能的影响<sup>[7]</sup>;周卫锋等在沥青-集料界面粘附性的基础上,研制出高性能的抗剥落剂<sup>[8]</sup>;也有研究人员采用该理论研究了沥青或者重油的表面自由能<sup>[9-12]</sup>。但是,当前研究者对再生沥青混合料的水稳定性能评价都是基于宏观性能,无法反映出再生沥青混合料集料-沥青的粘附特性<sup>[13-16]</sup>。为此,本文应用表面能理论分析不同比例再生沥青与集料的表面能参数,研究温拌再生沥青混合料沥青-集料的粘附特性,分析不同比例温拌再生沥青混合料水稳性能。

## 1 表面能理论

根据表面物理化学以及 Fowkes 指出<sup>[17]</sup>,液固界面的粘附功可以有分子间相互作用所产生的粘附功简单组成,结合范德华理论和酸碱理论,忽略较小作用力,分别计算其表面自由能。因此,沥青与石料的粘附功表达式为

$$W_{as} = W_{as}^d + W_{as}^p \quad (1)$$

式中: $W_{as}$ 为沥青(a)-集料(s)粘附功; $W^d$ 为范德华力(d)产生的粘附功; $W^p$ 为 Lswis 酸碱作用力(p)

产生的粘附功。

由于沥青混合料在拌和过程中,沥青是温度粘弹性材料,处于流动的液体与矿料颗粒表面铺展润湿,由原来的固相、液相形成沥青-矿料新相体系,沥青冷却之后变成新的固相结构,所以范德华力以及酸碱作用力产生的粘附功为

$$W_{as}^d = \gamma_a^d + \gamma_s^d - \gamma_{as}^d \quad (2)$$

$$W_{as}^p = \gamma_a^p + \gamma_s^p - \gamma_{as}^p \quad (3)$$

根据表面自由能理论评价沥青和集料的粘附性问题,可以选用的表面能参数主要有:沥青与石料的接触角、沥青与石料的粘附功。接触角的大小直接反映了沥青在石料表面的浸润性好坏;沥青与石料粘附功的大小则反映液体沥青在石料表面发生粘附过程时驱动力的大小,粘附功越大小,直接反映了沥青与石料的界面的粘附性。

依据表面能理论,沥青、集料、沥青-集料自由能分别为

$$\gamma_a = \gamma_a^d + \gamma_a^p \quad (4)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (5)$$

$$\gamma_{as} = \gamma_{as}^d + \gamma_{as}^p \quad (6)$$

式中: $\gamma_a^d$ 和 $\gamma_a^p$ 分别为沥青表面自由能的色散分量和极性分量的酸碱作用力; $\gamma_s^d$ 和 $\gamma_s^p$ 分别为矿料表面自由能的色散分量和极性分量的酸碱作用力。 $\gamma^p$ 表示为表面自由能酸性参数 $\gamma^+$ 和表面自由能碱性参数 $\gamma^-$ 的几何平均关系。其中, $\gamma_{as}^d = (\sqrt{\gamma_a^d} - \sqrt{\gamma_s^d})^2$ , $\gamma_{as}^p = 2(\sqrt{\gamma_a^+} - \sqrt{\gamma_s^+})(\sqrt{\gamma_a^-} - \sqrt{\gamma_s^-})$ , $\gamma_a^p = 2 \cdot \sqrt{\gamma_a^+ \gamma_a^-}$ , $\gamma_s^p = 2 \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-}$ 。

结合式(1)~式(5)可得粘附功为

$$W_{as} = 2 \sqrt{\gamma_s^d \gamma_a^d} + 2 \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_a^-} + 2 \sqrt{\gamma_s^- \gamma_a^+} \quad (7)$$

在表面能理论中,液体润湿固体表面的能力,直接影响到液体与固体的粘附力大小。根据杨氏方程式(8),可以看出液体对固体的相对润湿程度。根据热力学定律,接触面积为单位值时,在恒温、恒压下,此过程体系吉布斯函数自由能为

$$\gamma_s = \gamma_s \cos(\theta) + \gamma_{sa} \quad (8)$$

$$-\Delta G = \gamma_a + \gamma_s - \gamma_{sa} = W_{as} \quad (9)$$

由于液-固相界面可以用 Young 方程表示接触角与表面自由能的关系,将式(7)、式(8)和式(9)联系,得到

$$\gamma_s(1 + \cos(\theta)) = 2 \sqrt{\gamma_s^d \gamma_a^d} + 2 \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_a^-} + 2 \sqrt{\gamma_s^- \gamma_a^+} \quad (10)$$

## 2 温拌沥青表面能参数测定

### 2.1 温拌沥青接触角的测定

依据确定的再生沥青混合料级配见表 1 和材料组成表 2(表中的含量,添加量均为质量分数),进行新旧沥青的调配,为了便于表达,文中关于再生沥青

中参量的图表,用 RAP 掺量表示。温拌剂为表面活性剂溶液,温拌剂用量与沥青用量质量比为 1 : 19,温拌再生沥青的表面能参数测定按照文献[18],3 种液体的表面自由能及其分量见表 3。通过表面张力分析仪测定不同比例新旧沥青的接触角见表 4,为了减少数据的离散性每组样本数量 20 个。

表 1 AC-20 温拌再生沥青混合料级配组成

Tab.1 Composition of AC-20 warm mix recycled asphalt mixture gradation

筛孔/mm	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
累计通过率/%	100	97	90	79	56	36	26	20	15	11	8	5

表 2 AC-20 温拌再生沥青混合料材料组成

Tab.2 Composition of AC-20 warm mix recycled asphalt mixture material

RAP 掺量/%	旧集料含量/%	旧沥青含量/%	新集料添加量 含矿粉/%	新沥青 添加量/%	旧沥青占总 沥青的比例/%	沥青用量/%
20	19.29	0.71	76.86	3.14	18.4	3.85
30	28.94	1.06	67.21	2.79	27.5	
40	38.57	1.43	57.58	2.42	37.1	
50	48.23	1.77	37.92	2.08	46.0	

表 3 液体表面自由能及其分量( $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Tab.3 Surface free energy and its components of liquids( $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )

液 体	$\gamma_l$	$\gamma_l^d$	$\gamma_l^p$	$\gamma_l^+$	$\gamma_l^-$
蒸馏水	72.8	21.8	51.0	25.50	25.5
甘 油	63.4	33.4	30.0	3.92	57.4
甲酰胺	57.9	38.9	19.0	2.28	39.6
乙二醇	48.0	29.0	19.0	3.00	30.1

表 4 沥青与液体的接触角试验结果

Tab.4 Contact angle test results of liquid and asphalt

表面活性 (温拌剂)	RAP 掺量 (旧沥青含量)/%	蒸馏水		甘油		甲酰胺	
		平均值/(°)	变异系数/%	平均值/(°)	变异系数/%	平均值/(°)	变异系数/%
添加温 拌剂	20(18.4)	91.40	0.34	83.52	0.57	77.16	0.80
	30(27.5)	91.01	0.65	83.71	2.03	77.23	0.90
	40(37.1)	89.78	0.87	83.80	1.40	77.01	1.26
	50(46.0)	89.40	0.92	83.24	1.30	76.19	1.39
未添加 温拌剂	20(18.4)	95.21	0.36	83.42	0.57	77.26	0.66
	30(27.5)	94.51	0.56	83.31	1.55	77.18	0.84
	40(37.1)	96.60	0.98	83.22	1.75	76.17	0.77
	50(46.0)	94.20	0.75	83.54	1.12	75.88	1.07

从表 4 可看出,蒸馏水测定的不同比例温拌再生沥青接触角小于与再生沥青接触角,其他 2 种液体接触角相差不大。由于表面活性温拌剂与水具有很好的相容性,在蒸馏水滴定温拌沥青界面时,蒸馏水与温拌沥青的膜出现浸润现象,致使温拌沥青接触角变小。为了检验试验数据的有效性,结合表 3 不同溶液的表面自由能以及文献[19]提出的方法进行检验。随着旧沥青比例的增加  $\gamma_l \cos(\theta)$  与  $\gamma_l$  有很

好的线性关系,并且判定系数( $R^2$ )在 0.994 5~0.999 3 之间,表明试验结果满足文献[19]的要求。下页图 1 是不同比例的再生沥青  $\gamma_l \cos(\theta)$  与  $\gamma_l$ (表面张力与接触角)的相关性。

### 2.2 沥青表面自由能计算

为了测定不同掺配比例再生沥青的表面自由能,结合式(10),3 种液体表面能参数见表 3,计算沥青表面自由能及其分量,其试验结果见下页表 5。

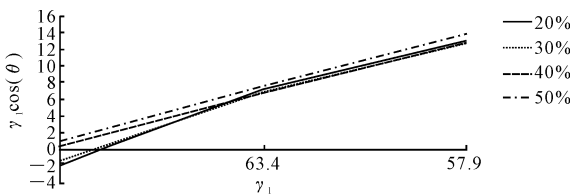


图 1  $\gamma_l \cos(\theta)$  与  $\gamma_l$  的相关性

Fig. 1 Correlation between  $\gamma_l \cos(\theta)$  and  $\gamma_l$

表 5 温拌沥青表面自由能及其分量

Tab. 5 Surface free energy and its components of

warm asphaltm <span style="float:right">J · m<sup>-2</sup></span>						
表面活性 (温拌剂)	RAP 掺量 (旧沥青含量)/%	$\gamma_a$	$\gamma_a^d$	$\gamma_a^p$	$\gamma_a^-$	$\gamma_a^+$
添加 温拌剂	20(18.4)	22.76	19.68	3.08	5.03	0.47
	30(27.5)	22.97	20.13	2.85	5.38	0.38
	40(37.1)	23.58	21.25	2.32	6.30	0.21
	50(46.0)	24.33	22.17	2.16	6.24	0.19
未加 温拌剂	20(18.4)	21.85	18.88	2.97	2.61	0.85
	30(27.5)	21.61	18.91	2.71	2.01	0.91
	40(37.1)	23.21	21.01	2.19	1.68	0.71
	50(46.0)	24.12	21.81	2.31	2.78	0.48

由表 5 可以看出,沥青表面能中  $\gamma_a^d$  非极性部分,即范德华力占据主要作用;极性部分  $\gamma_a^p$ , Lewis 酸碱作用力相对再生沥青表面能作用较小,这主要是因为沥青由非极性碳氢化合物组成,随着旧沥青掺配比例的增大,改变了沥青中的极性分量的比例,使再生沥青中的轻质组分(芳香分、饱和分)的比例降低,轻质组分的极性向非极性较强的胶质和沥青质过渡,使沥青的非极性分量逐渐增大,从而再生沥青的表面自由能随旧沥青掺量增加而增大。由于温拌剂是表面活性剂水溶液,其 pH 值具有弱碱性,温拌剂的添加改变了再生沥青的 Lewis 碱性参数。相同掺量比例的旧沥青其温拌再生沥青路易斯碱性参数较大, Lewis 酸参数降低,表面活性温拌剂的添加改善了再生沥青中的极性分量以及 Lewis 酸碱作用力。

3 集料表面自由能参数测试

本次试验采用灯芯柱法进行表面参数测定,其试验方法见文献[20]。集料的表面自由能及其分量计算方法与沥青相同,结合式(10),集料的表面自由能及其分量见表 6 所示。

表 6 集料表面自由能及其分量

Tab. 6 Surface Free Energy and Components of Aggregatem J · m<sup>-2</sup>

岩性	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s^-$	$\gamma_s^+$
石灰岩	33.58	22.55	11.03	20.45	1.49
花岗岩	31.74	26.62	5.11	7.84	0.83

通过对集料的表面自由能及其分量计算,与沥青的表面自由能相比,集料的表面自由能数值远大于沥青的表面自由能,这也与文献[2]、文献[21]中的结论一致。一般来讲,集料属于高表面自由能的物质,所以其表面具有很强的吸附能力以降低其表面自由能,即存在平衡扩展压。由于接触角测定处于开放的环境中进行,所以集料表面不可避免会吸附空气中的水分子或者其他存在于空气中的杂质分子,从而导致集料的表面自由能降低。结合接触角以及变异系数,说明测试的数据具有很好的重复性。从表面能的数值可以看出石灰岩、花岗岩极性分量占据主要部分,其值大于色散分量,主要是由于集料本身的组成元素极性大小造成的影响。

4 温拌再生沥青混合料沥青-集料的粘附性

表面能理论认为任何固体表面都存在不饱和力场,因此固体表面有自发吸引其他物质以降低自身自由能的能力。当再生沥青扩散并润湿石料表面时,沥青混合料中矿料自发地吸引沥青分子以降低系统的自由能,由于这种能量交换而产生了粘附。再生沥青混合料在拌和过程中热沥青与石料、旧沥青混合料的沥青膜之间的粘附主要是由于热沥青润湿石料及其旧沥青混合料的表面而形成,该润湿过程是石料表面自由能减小的过程。表面能理论运用润湿来解释沥青在石料表面的铺展或者被水置换而发生剥落的过程,即为有水和无水 2 种情况下粘附和剥离的过程。

结合范德华力理论和 Lewis 酸碱理论,忽略分子间较小的作用力,温拌再生沥青混合料摊铺碾压温拌剂亲水基侵入矿料表面,亲油基侵入到添加沥青和回收沥青混合料沥青膜表面,温拌再生沥青混合料内部能量主要为沥青与温拌剂、温拌剂与矿料以及沥青与矿料粘附能量。根据表面自由能理论得到沥青、温拌剂与集料的 Gibbs 自由能的变化,温拌体系内沥青与集料的粘附模型为

$$\begin{aligned} W_{ase} = -\Delta G_{ase} = & -[2(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_a^d} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_a^-} + \\ & \sqrt{\gamma_s^- \gamma_a^+}) + 2(\gamma_e^d + 2\sqrt{\gamma_e^+ \gamma_e^-}) + \\ & 2(\sqrt{\gamma_a^d \gamma_e^d} + \sqrt{\gamma_a^+ \gamma_e^-} + \sqrt{\gamma_a^- \gamma_e^+}) + \\ & 2(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_e^d} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_e^-})] \end{aligned} \tag{11}$$

式中:  $\gamma_e^d$ 、 $\gamma_e^+$ 、 $\gamma_e^-$  分别为温拌剂的色散分量、Lewis 酸和 Lewis 碱,其表面能参数见文献[22]。

在理想状态下,温拌再生沥青混合料剥离破坏可以分3个阶段:①沥青通过具有流变特性的热熔态沥青与不同比例的再生集料以及温拌剂拌和形成温拌再生沥青混合料,此时的能量为新旧沥青、温拌剂与新旧矿料的能量;②热的温拌再生沥青混合料通过摊铺、碾压,最终热沥青逐渐冷却形成冷固态的再生沥青混合料;③温拌再生沥青混合料在交通荷载环境等因素作用下产生动压力,使沥青与石料的界面发生破坏,即沥青-石料界面被破坏。因此,沥青、集料、温拌剂、水四相体系粘附模型可以表示为

$$W_{asew} = -\Delta G_{asew} = -[4(\sqrt{\gamma_a^d \gamma_e^d} + 4\sqrt{\gamma_s^d \gamma_e^d} - 4\sqrt{\gamma_e^d \gamma_w^d} - 2\sqrt{\gamma_a^d \gamma_w^d} - 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_w^d} - \sqrt{\gamma_a^d \gamma_s^d}) - 4(\sqrt{\gamma_a^+ \gamma_e^-} + \sqrt{\gamma_a^- \gamma_e^+} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_e^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_e^+} - \sqrt{\gamma_e^+ \gamma_w^-} - \sqrt{\gamma_e^- \gamma_w^+}) + 2(\sqrt{\gamma_a^+ \gamma_s^-} + \sqrt{\gamma_a^- \gamma_s^+} + \sqrt{\gamma_a^+ \gamma_w^-} + \sqrt{\gamma_a^- \gamma_w^+} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_w^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_w^+}) - 2\gamma_w + 2\gamma_e] \quad (12)$$

式中: $\gamma_w^d$ 、 $\gamma_w^+$ 、 $\gamma_w^-$ 分别为水的色散分量、Lewis酸和Lewis碱,其他符号与前面意义相同。

#### 4.1 温拌条件无水状态下粘附功计算

依据再生沥青混合料集料-沥青粘附模型式(11)计算粘附功的大小。温拌条件下不同掺量再生沥青混合料集料-沥青的粘附功如图2所示。

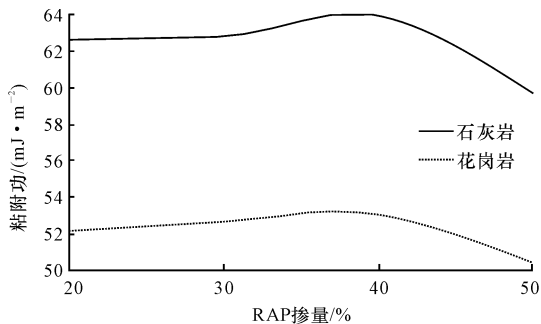


图2 温拌再生沥青-矿料无水状态粘附功变化趋势

Fig. 2 Adhesion work trends without water of warm mix recycled asphalt-aggregate

从图2可以看出,沥青-集料的粘附功大于0,说明温拌条件下粘附过程可以自发进行,其值越大,粘附强度就越大。在温拌沥青混合料生产过程中,温拌剂最先与沥青接触,再与集料裹附,温拌沥青改变了再生沥青极性分量中Lewis碱参数表面自由能,改变了沥青与石料的裹附能力。同种比例石灰石温拌再生沥青-矿料的粘附功大于花岗岩的,温拌剂的添加改善了油石界面的酸碱作用力,增强了集料沥青的粘附性能。对于同集料来说,随着旧料的掺量

的增加,沥青-集料的粘附功先增加后降低,旧料掺量40%时达到最大,由于再生沥青混合料中回收沥青混合料比例增加,新沥青用量降低,有效沥青用量降低,使混合料中温拌再生沥青-集料的粘附强度贡献不足,造成粘附功下降。

#### 4.2 温拌条件有水状态下粘附功计算

根据再生沥青、水、温拌剂和集料的粘附模型式(12),石灰岩和花岗岩2种石料在温拌条件下有水状态时粘附功的大小如图3所示。

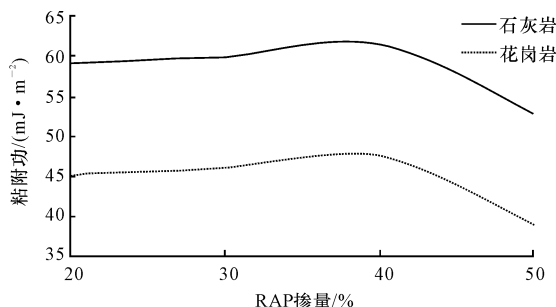


图3 再生沥青-矿料有水状态粘附功变化趋势

Fig. 3 Adhesion work trends with water of recycled asphalt-aggregate

从图3可以看出,温拌再生沥青混合料有水存在时,同比例的再生沥青(RAP)与石灰岩的粘附功大于花岗岩。石灰岩、花岗岩和再生沥青的粘附功与无水状态相比变化趋势相同,其粘附功先增加后降低。沥青-集料粘附功的增加是水与温拌剂共同作用时改善了新旧沥青的极性分量以及Lewis酸碱作用力(分子作用力),其分子作用力能够抵消一部分水损害,但是随着旧料掺量的增加,同样也是有效沥青的贡献不足,造成粘附功下降。说明有水存在时,同类集料的粘附功小于无水状态粘附功。

### 5 温拌再生沥青混合料水稳定性能

#### 5.1 粘附功比

为了比较石灰岩、花岗岩在有水、无水条件下粘附功的大小,本文采用粘附功比反映沥青的混合料的水稳定性能。下页图4是有水、无水条件下粘附功之比。

从图4中可以看出,再生沥青混合料添加温拌剂其粘附功之比大于未添加温拌剂粘附功之比,说明温拌剂的添加,增强了沥青混合料粘附性能,从而改善了沥青混合料的水稳定性能。通过对比有水、无水条件下粘附功之比可知随着旧沥青混合料掺量的增加,再生沥青混合料无论是否添加温拌剂其粘

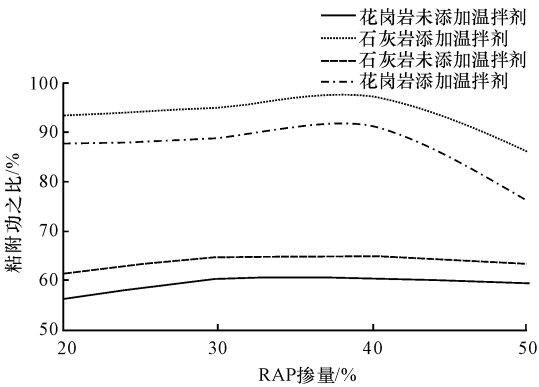


图 4 再生沥青混合料有水、无水条件下粘附功之比

Fig. 4 Adhesion work proportion with or without water of recycled asphalt mixture

附功比先增加后降低,旧料掺量在 40% 时,粘附功比达到最大值;在温拌条件下再生沥青的极性分量以及 Lewis 酸碱作用力与集料的粘附程度低于抵抗水损害的能力,致使沥青-集料的粘附功降低。由于石灰岩、花岗岩表面自由能和酸碱作用力不同,致使沥青与集料的粘附程度出现差异性。因此,结合有水、无水状态 2 种石料与沥青粘附功之比的大小关系从大到小为:温拌条件下石灰岩粘附功比、温拌条件下花岗岩粘附功比、石灰岩粘附功比、花岗岩粘附功比,说明温拌剂的添加增强了沥青-集料粘附性能,改善了再生沥青混合料水稳定性能。

5.2 水稳定性能检验

依据 AC-20 温拌再生沥青混合料的级配和材料组成,进行温拌再生沥青混合料冻融劈裂试验,试验结果见表 7。

表 7 AC-20 温拌再生沥青混合料水稳定性能

Tab. 7 Water stability of AC-20 warm mix recycled asphalt mixture

旧料掺量/%	20	30	40	50
冻融劈裂强度比/%	85.7	88.4	90.6	80.9

从表 7 可以看出,温拌再生沥青混合料的水稳定性能随旧料的掺量增加其冻融劈裂强度比变化趋势先增加后降低,与集料-沥青的粘附功比变化一致,说明温拌剂的添加改善了再生沥青混合料的水稳定性能。

6 结 语

(1)随着旧沥青掺配比例的增大沥青的表面能逐渐增加,老化沥青改变了沥青中的极性分量的比例,使再生沥青中的轻质油分的比例降低,轻质油分(芳香分、饱和分)的极性的向非极性较强的胶质和沥青质过渡,使沥青的非极性分量逐渐增大。从表

面能的大小来看,随着旧沥青比例的增大,沥青的表面能增加。

(2)温拌剂的添加改变了沥青极性分量和 Lewis 酸碱作用力参数,改善了沥青的表面自由能和内聚功,增强了沥青与石料的粘附能力。

(3)通过粘附功的计算分析表明:石灰岩的粘附功大于花岗岩,在温拌再生沥青混合料体系中,随着旧沥青混合料掺量增加,其粘附功比先增加后降低,掺量 40% 达到最大值,粘附功比最大,掺量超过 40% 时温拌再生沥青的极性分量作用力强度低于水损害的能力,沥青-集料的粘附功逐渐降低。结合温拌条件下两种石料粘附功之比以及水稳定性能检验,说明温拌剂的添加增强了沥青混合料粘附性能,从而改善再生沥青混合料的水稳定性能。

参考文献:

References:

[1] Elphinstone G M. Adhesion and cohesion in asphalt-aggregate systems[D]. College Station; Texas A & M University,1997.

[2] Cheng D. Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy[D]. College Station; Texas A & M University,2002.

[3] Bhasin A, Masad E, Little D, Lytton R, et al. Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mx asphalt to moisture damage[J]. Journal of the Transportation Research Board,2007,1970(3):3-13.

[4] Arabani M. Hamed G. Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23 (6):802-811.

[5] Lytton R L, Masad E A, Zollinger C, et al. Measurement of surface energy and its relationship to moisture damage [R]. Austin; Texas Transportation Institute,2005.

[6] Wang G H, Huang Z H, Li L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1 (1):55-61.

[7] Arambula E, Masad E. Influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(8):655-664.

- [8] 周卫峰,张秀丽,原健安,等. 基于沥青与集料界面粘附性的抗剥落剂的开发[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):16-20.  
ZHOU Wei-feng, ZHANG Xiu-li, YUAN Jian-an, et al. Development of new anti-stripping agent based on adhesion of asphalt with aggregate[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2):16-20. (in Chinese)
- [9] 魏建明,张玉贞, Youtcheff J S. 躺滴法表征沥青的表面自由能[J]. 石油学报:石油加工, 2009, 25(2): 207-215.  
WEI Jian-ming, ZHANG Yu-zhen, Youtcheff J S. Determination of the surface free energy of asphalt binders by sessile drop method[J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2009, 25(2): 207-215. (in Chinese)
- [10] 肖庆一,郝培文,徐鸥明,等. 沥青与矿料粘附性的测定方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(1): 19-22.  
XIAO Qing-yi, HAO Pei-wen, XU Ou-ming, et al. New method for evaluating adhesion between asphalt and aggregate[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(1): 19-22. (in Chinese)
- [11] 孔维川. 集料特性对沥青-集料界面性能影响研究[D]. 西安:长安大学,2012.  
KONG Wei-chuan. Impacts of Aggregate characteristics on asphalt/aggregates interface properties[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [12] 刘亚敏,韩 森,李 波. 基于表面能理论的沥青与矿料黏附性研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 769-772.  
LIU Ya-min, HAN Sen, LI Bo. Research on adhesion between asphalt and aggregate based on surface energy theory[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 769-772. (in Chinese)
- [13] 孙吉书,肖 田,杨春风,等. 温拌再生沥青混合料的路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2011, 30(2): 250-254.  
SUN Ji-shu, XIAO Tian, YANG Chun-feng, et al. On properties of warm mix recycled asphalt mixture in highway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(2): 250-254. (in Chinese)
- [14] Shu X, Huang B S, Emily D S, et al. Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high RAP in Tennessee [C]// TRB. TRB 2012 Annual Meeting, Washington DC: Elsevier Ltd, 2012: 125-130.
- [15] Zhou H P, Holikatti S, Vacura P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [16] 刘唐志,朱洪洲,李佳坤,等. 温拌再生沥青混合料水稳定性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3): 54-59.  
LIU Tang-zhi, ZHU Hong-zhou, LI Jia-kun, et al. Research on water stability of warm recycled asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 3(3): 54-59. (in Chinese)
- [17] Fowkes F M. Dispersion force contributions to surface and interfacial tensions, contact angles, and heats of immersion[J]. Advances in Chemistry Series, 1964, 43(1): 99-111.
- [18] 魏建明. 沥青、集料的表面自由能及水分在沥青中的扩散研究[D]. 东营:中国石油大学(华东), 2008.  
WEI Jian-ming. Study on surface free energy of asphalt, aggregate and moisture diffusion in asphalt[D]. Dongying: China University of Petroleum: East China, 2008. (in Chinese)
- [19] Kwok D Y, Neumann A W. Contact angle measurement and contact interpretation [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1999, 81(3): 167-249.
- [20] 顾庆峰,沈 青,胡剑锋. 聚木糖表面能及表面能成分的估算[J]. 中国造纸学报, 2003, 18(2): 11-13.  
GU Qing-feng, SHEN Qing, HU Jian-feng. Estimation of surface free energy and related components of hemicellulose[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2003, 18(2): 11-13. (in Chinese)
- [21] Hefer A W. Adhesion in bitumen- aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond [D]. College Station: Texas A & M University, 2004.
- [22] 窦 晖. 基于表面能理论的温拌沥青混合料水稳定性研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2012.  
DOU Hui. Research on water stability of warm mix asphalt based on the theory of surface energy[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

