

# 剪切效应下矿料接触面粘附及粘结强度测试

郑传峰<sup>1</sup>, 赵大军<sup>1</sup>, 陈传景<sup>1</sup>, 郑 澍<sup>2</sup>, 宋振丰<sup>3</sup>, 张 婷<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 建设工程学院, 130026 长春; 2. 吉林省交通科学研究所, 130021 长春;  
3. 深圳市政设计研究院, 518029 广东 深圳)

**摘要:** 为了分析矿料接触面的细观强度特性, 研究剪切效应下沥青与矿料表面粘附强度及沥青结合料自身粘结强度的定量测试技术. 根据矿料接触面破坏方式及沥青与矿料表面剪切粘附强度、粘附失效区面积、沥青剪切粘结强度、粘附失效区面积与剪切破坏荷载的对应关系, 确定沥青剪切粘结强度和沥青与矿料表面的剪切粘附强度, 实现矿料接触面上粘附与粘结强度的定量测试. 测试结果表明: 沥青与矿料表面剪切粘附强度受试验温度及矿料接触面上油膜厚度影响较大, 同时沥青品质也对其大小产生影响; 沥青结合料剪切粘结强度与试验温度及沥青品质有较大相关性.

**关键词:** 沥青稳定碎石; 矿料接触面; 剪切荷载效应; 粘附强度; 粘结强度; 定量测试

**中图分类号:** U414      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)04-0110-06

## The test of the adhesion and cohesion strength of mineral aggregate contact surface under shear effect

ZHENG Chuanfeng<sup>1</sup>, ZHAO Dajun<sup>1</sup>, CHEN Chuanjing<sup>1</sup>, ZHENG Shi<sup>2</sup>, SONG Zhenfeng<sup>3</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, 130026 Changchun, China;  
2. Jilin Provincial Communication Scientific Research Institute, 130021 Changchun, China;  
3. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., 518029 Shenzhen, Guangdong, China)

**Abstract:** To analyze the mesoscopic strength characters of aggregate contact surface, the quantitative testing technology of adhesion strength between bitumen and aggregates and the cohesion strength of bitumen binder itself under shear load were researched. According to the failure forms and the corresponding relationship of shear adhesion strength between aggregates and bitumen, adhesion failure area, shear cohesion strength of bitumen binder, cohesion failure area and shear failure load, the shear cohesion strength and shear adhesion strength can be determined, and the quantitative test of adhesion and cohesion strength of mineral aggregate contact surface can be realized. The test results show that the experimental temperature and oil film thickness of mineral aggregate contact surface have a big influence on shear adhesion strength, besides, the quality of bitumen also has an effect on it. The shear adhesion strength of bitumen binder has strong correlation with experimental temperature and the quality of bitumen.

**Key words:** bituminous stabilized macadam; mineral aggregate contact surface; shear load effect; adhesion strength; cohesion strength; quantitative test

沥青稳定碎石矿料接触面上强度特性对混合

料材料抗裂及抗松散能力有重要影响. 沥青与矿料表面的粘附效果对混合料材料的宏观路用性能尤其是抗水害能力有显著影响<sup>[1]</sup>. 富水环境下沥青剥离现象明显, 沥青混合料易发生系列水损害, 所以混合料水稳定性应充分关注<sup>[2]</sup>. 动水作用容易加剧混合料的松散, 对混合料的低温抗裂性存在不利影响<sup>[3]</sup>. 中国《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中采用水煮法进行沥青与矿料粘附

收稿日期: 2012-07-11.

基金项目: 吉林省交通科技发展计划资助项目(2008-1-5); 高校科学前沿及学科交叉研究计划资助项目(450060445202).

作者简介: 郑传峰(1981—), 男, 博士, 讲师;  
赵大军(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 郑传峰, cfzheng@jlu.edu.cn.

性的测试<sup>[4]</sup>。水煮法试验技巧不容易掌握,对水的微沸状态的理解与掌握因人而异<sup>[5]</sup>。同时采用目测的方式较难确定沥青剥离面积,试验结果主观性较强<sup>[6]</sup>。

材料工程领域的固液粘附理论适用于沥青与矿料的粘附问题,可以采用该理论进行沥青粘附性分析<sup>[7]</sup>。Hefer等<sup>[8]</sup>采用相应技术手段测试沥青与矿料表面的接触角。Arabani等<sup>[9]</sup>基于表面自由能理论研究矿料表面改性措施从而提高混合料抗水害能力。Jonathan等<sup>[10]</sup>分析了矿料特性对沥青矿料间界面能量的影响效果。国内学者黄继成等<sup>[11]</sup>基于表面理论对沥青剥离机理进行了分析并提出相应的抗剥对策。肖庆一等<sup>[12]</sup>基于表面理论建立沥青路面水损坏模型。基于固液粘附理论的测试方法理论意义明确,但实际测试过程受到表面张力仪性能的限制,表面张力及接触角等参数需要在热熔态下测定,测试结果表达为高温状态下沥青与矿料的粘附效果。矿料接触面的破坏形式较为复杂,且低温条件下破坏的概率较高,应用此类方法预估沥青与矿料在低温条件下的粘附效果势必会产生较大误差。本文根据矿

料接触面破坏形式,根据力学对应关系,首次实现多状态下沥青矿料间剪切粘附强度及沥青剪切粘附强度的定量测试。

## 1 试验材料

试验中选用的沥青为盘锦70#沥青、SBS改性沥青、胶粉改性沥青,技术参数见表1。为分析矿料接触面的破坏形式,制备AM-20半开级配沥青稳定碎石混合料,AM-20的级配特性见表2。选取沥青稳定碎石混合料中形状规则易于确定表面积的矿料,将矿料浸置于三氯乙烯中,并进行搅拌,直到矿料表面的沥青完全溶解于三氯乙烯中,将三氯乙烯中矿料取出并烘干,后称取矿料质量,损失的质量即为沥青的质量,根据矿料的表面积及沥青的密度计算不同油石比条件下矿料接触面上油膜厚度。其中油石比在4.5%~5%时矿料接触面油膜厚度约为0.45 mm,将其定义为厚层油膜,油石比在3.5%~4.0%时矿料接触面油膜厚度约为0.25 mm,将其定义为中厚层油膜,油石比为3.0%时矿料接触面油膜厚度约为0.08 mm,将其定义为薄层油膜。

表1 沥青技术参数

沥青类别	针入度/0.1 mm		15 °C 延度/cm	软化点/°C	标准粘度/(Pa·s)	
	5 °C	25 °C			60 °C	90 °C
盘锦70#沥青	6.8	75.3	>15	42.6	960	600
SBS改性沥青	7.5	97.2	>15	44.7	6 246	3 820
胶粉改性沥青	6.6	71.7	>15	43.4	6 536	4 086

表2 AM-20半开级配碎石各筛孔累计通过质量分数

级配类别	筛孔尺寸/mm											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	85	75	65	40	22	16	12	10	8	5
级配下限	100	90	60	50	40	15	5	2	1	0	0	0
设计级配	100	93.6	72.2	61.1	53.4	28.3	16.8	8.1	3.3	2.2	3.9	2.4

## 2 测试原理与测试方法

### 2.1 测试原理

根据统计结果可知,剪切荷载效应下矿料接触面破坏形式包括沥青结合料自身的粘结失效破坏、沥青与矿料表面剥离而发生的粘附失效破坏。其中当矿料接触面油膜厚度为厚层油膜时,接触面发生沥青结合料粘结失效。当接触面为中厚层油膜及薄层油膜时,接触面上同时存在粘附失效与粘结失效。

如图1所示,矿料接触面在剪切荷载作用下发生接触面破坏,接触面面积为 $S_i$ ,破坏后的接触

面上存在粘附失效区 $S_a$ 及粘结失效区 $S_c$ 。当 $S_a$ 为0时,矿料接触面为粘结失效破坏;当 $S_c$ 为0时,矿料接触面为粘附失效破坏;当 $S_a$ 及 $S_c$ 都不为0时,矿料接触面上同时存在粘结失效破坏与粘附失效破坏。定义矿料接触面总体剪切强度为 $\tau_i$ ,沥青与矿料表面剪切粘附强度为 $\tau_a$ ,沥青结合料自身剪切粘附强度为 $\tau_c$ ,则剪切破坏荷载 $F$ 与矿料接触面总体剪切强度 $\tau_i$ 的关系可以用式(1)表达,剪切破坏荷载 $F$ 与沥青矿料间剪切粘附强度 $\tau_a$ 、粘附失效区 $S_a$ 、沥青剪切粘附强度 $\tau_c$ 、粘结失效区 $S_c$ 的关系可以用式(2)表达。

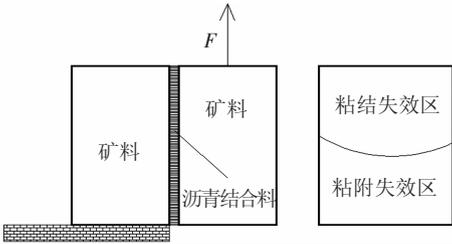
$$\tau_i \times S_i = F, \quad (1)$$

$$\tau_a \times S_a + \tau_c \times S_c = F \quad (2)$$

式中剪切破坏荷载  $F$  可以采用液压测力装置直接测得,根据矿料接触面破坏形式调查的结果可知,接触面上为厚层油膜时,剪切荷载作用下矿料接触面破坏形式完全为沥青结合料粘结失效破坏,即  $S_a = 0, S_c = S_t$ . 此时式(2)可改写为

$$\tau_c \times S_t = F \quad (3)$$

在厚层油膜条件下,根据试验中剪切破坏荷载  $F$  的大小及矿料接触面面积  $S_t$  可以求得沥青自身剪切粘结强度  $\tau_c$ . 沥青剪切粘结强度与沥青品质及试验温度有关,所以在确定沥青剪切粘结强度  $\tau_c$  及精确测量接触面粘结失效区面积  $S_c$  及粘附失效区面积  $S_a$  后根据式(2)即可确定各状态下沥青与矿料表面剪切粘附强度  $\tau_a$ 、沥青结合料自身剪切粘结强度  $\tau_c$ .



(a) 剪切荷载施加示意 (b) 接触面破坏示意  
图 1 矿料接触面细观剪切强度测试原理

### 2.2 测试方法

选择盘锦 70# 沥青、SBS 改性沥青、胶粉改性沥青作为结合料,采用石灰岩矿料,加载设备采用

HC-40 型液压测力装置,见图 2. 矿料接触面有效尺寸为  $1.0 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm}$ . 采用试管滴定的方式控制接触面油膜厚度,油膜厚度选取厚层油膜、中厚层油膜及薄层油膜 3 种. 试验温度包括 15、-5、-15、-25、-35  $^{\circ}\text{C}$ . 对试件施加剪切荷载,加载速率为  $25 \text{ mm/min}$ ,试件破坏瞬间,试验自动停止,读取剪切破坏荷载  $F$ ,见图 3. 采用游标卡尺精确测量矿料接触面上粘附失效区面积  $S_a$  及粘结失效区面积  $S_c$ ,接触面破坏见图 4.

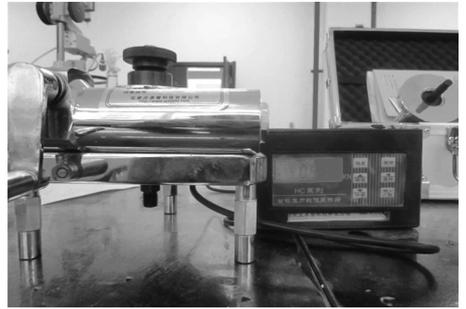


图 2 HC-40 型液压测力装置

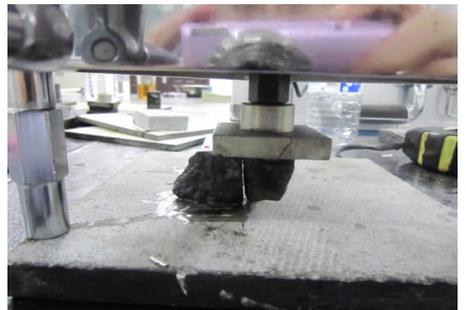


图 3 试件破坏瞬间



图 4 剪切荷载作用下矿料接触面破坏状态

### 2.3 测试步骤

将试验中所用沥青加热,同时将试验模具放置加热箱中预热. 将少部分沥青转移至滴管中,为防止在转移沥青过程中沥青凝固,将滴管连同其中的沥青置于加热箱中继续加热 10 min,确保沥青处于热熔态. 将滴管中沥青滴落至经过预热的矿料试模表面,采用经过预热的刀片将沥青平均摊平于矿料试模表面,将存有沥青膜的矿料试模再一次加热,然后与另一已预热矿料试模粘接. 将粘接完成的试模在室内静置,直到完全冷却,然后将试模放置于所需的试验环境内,时间为 4 h.

将经过温度处理的试模安置于液压测力装置上,预先加压,后清零,消除试验模具自重对试验结果的影响. 进行正式加载,矿料接触面破坏时,试验自动停止,读取剪切破坏荷载大小. 为减少室温温度对试验结果的影响,此过程必须在短时间内完成. 将破坏后的接触面进行网格划分,采用游标卡尺量取各网格尺寸,累加计算粘附失效区面积及粘结失效区面积. 将测得的剪切破坏荷载及各失效区面积代入相应公式,计算矿料接触面总体剪切强度、沥青与矿料表面剪切粘附强度、沥青结合料剪切粘结强度.

### 3 剪切效应下强度测试结果

#### 3.1 沥青剪切粘结强度

剪切荷载作用下矿料接触面的破坏形式与接触面上油膜厚度有很大关系,在薄层油膜及中厚层油膜范围内,接触面上同时存在粘结失效与粘附失效,但是当矿料接触面上为厚层油膜时,在15 ~ -35 °C 温度范围内,矿料接触面全部为沥青结合料自身的粘结失效破坏,可以采用式(3)进行沥青结合料自身剪切粘结强度的计算,结果见图5. 沥青结合料自身剪切粘结强度是沥青材料自身属性,沥青的性质较为复杂,不同温度条件其性质有较大区别,在一定的低温范围内,沥青的冻结效果可以提高沥青结合料自身的剪切粘结强度,但是在极低温度条件下,冻结后的沥青脆性显著增强,剪切粘结强度显著降低,呈现出与温度的非线性关系.

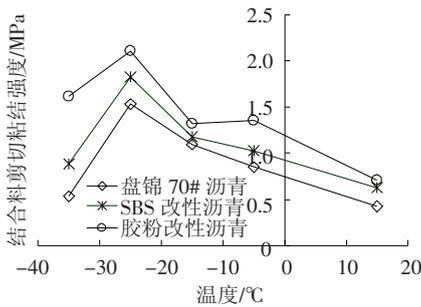


图5 沥青结合料剪切粘结强度与温度的关系

由于结合料粘结失效破坏是矿料接触面破坏的重要形式,所以结合料的粘结强度应该得到充分重视. 本文提出的方法可以对沥青结合料低温条件下的粘结强度进行定量测试. 低温条件下胶

粉颗粒对沥青的增韧效果开始发挥作用<sup>[13]</sup>,导致胶粉改性沥青具有较高的低温剪切粘结强度. 结合料粘结强度对矿料接触面细观强度影响很大,生产实践中为提高混合料的某种路用性能需要向沥青混合料中添加相应的外掺材料,如化学抗剥落剂及相应沥青改性剂如新型纳米材料改性沥青的应用<sup>[14]</sup>,此类外掺材料是否会影响到沥青结合料的粘结强度是应该考虑的问题. 而选用本文提出的方法可以实现多种状态下沥青粘结强度的测试,从而为合理选择外掺剂提供充分的依据.

#### 3.2 沥青矿料间剪切粘附强度

沥青与矿料表面的剪切粘附强度是矿料接触面上较为重要的细观强度参数. 确定各温度条件下矿料接触面粘附失效区面积  $S_a$ 、粘结失效区面积  $S_c$ 、沥青结合料剪切粘结强度  $\tau_c$  及剪切破坏荷载  $F$  后,基于式(2) 计算不同沥青、不同温度条件及不同接触面油膜厚度条件下沥青与矿料表面的剪切粘附强度  $\tau_a$ , 其中胶粉改性沥青与矿料表面剪切粘附强度计算结果见表3. 沥青矿料间剪切粘附强度与温度、沥青品质及矿料接触面油膜厚度均有明显关系. 相同条件下盘锦 70# 沥青、SBS 改性沥青及胶粉改性沥青与矿料表面的剪切粘附强度存在差异,见图6、7. 油膜厚度增加,沥青与矿料表面剪切粘附强度增大,见图8、9. 温度对沥青矿料间剪切粘附强度的影响较为复杂,随着温度的持续降低,沥青与矿料表面的剪切粘附强度在 -5 °C 左右显著增大,达到最大峰值. 然后开始降低,在 -15 °C 左右时,出现剪切粘附强度的最小值,随着温度的进一步降低,沥青与矿料表面的剪切粘附强度又开始有增大的趋势,见图10、11.

表3 胶粉改性沥青与矿料表面剪切粘附强度计算结果

试件编号	接触面油膜厚度/mm	试验温度/°C	剪切破坏荷载 $F$ /kN	粘附失效区面积 $S_a$ /cm <sup>2</sup>	粘结失效区面积 $S_c$ /cm <sup>2</sup>	剪切粘附强度 $\tau_a$ /MPa
BC[15]	0.08	15	0.03	1.81	0.19	0.04
BC[-5]	0.08	-5	0.12	1.74	0.26	0.47
BC[-15]	0.08	-15	0.09	1.43	0.57	0.10
BC[-25]	0.08	-25	0.17	1.29	0.71	0.13
BC[-35]	0.08	-35	0.06	1.83	0.17	0.18
ZHC[15]	0.25	15	0.09	1.15	0.85	0.26
ZHC[-5]	0.25	-5	0.17	1.28	0.72	0.56
ZHC[-15]	0.25	-15	0.18	0.72	1.28	0.19
ZHC[-25]	0.25	-25	0.31	0.56	1.44	0.13
ZHC[-35]	0.25	-35	0.28	0.36	1.64	0.29
HC[15]	0.45	15	0.14	0	2.00	-
HC[-5]	0.45	-5	0.27	0	2.00	-
HC[-15]	0.45	-15	0.26	0	2.00	-
HC[-25]	0.45	-25	0.42	0	2.00	-
HC[-35]	0.45	-35	0.32	0	2.00	-

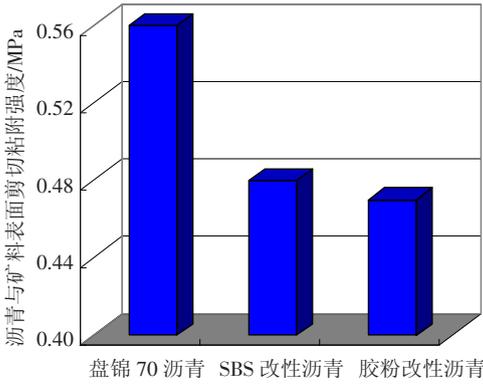


图 6 不同沥青剪切粘附强度比较 (薄层油膜, -5 °C)

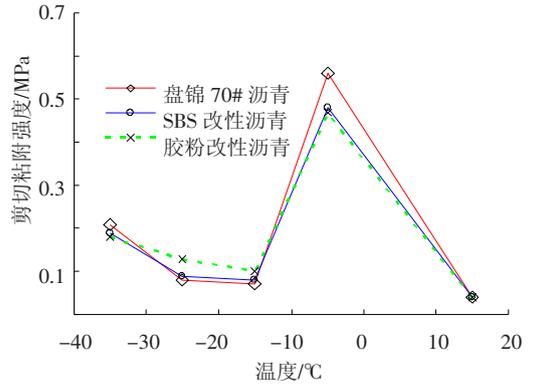


图 10 剪切粘附强度与温度的关系 (薄层油膜)

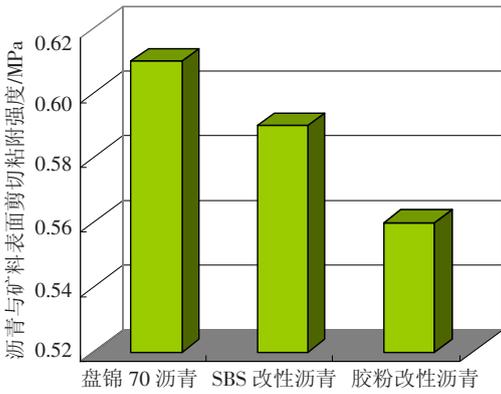


图 7 不同沥青剪切粘附强度比较 (中厚层油膜, -5 °C)

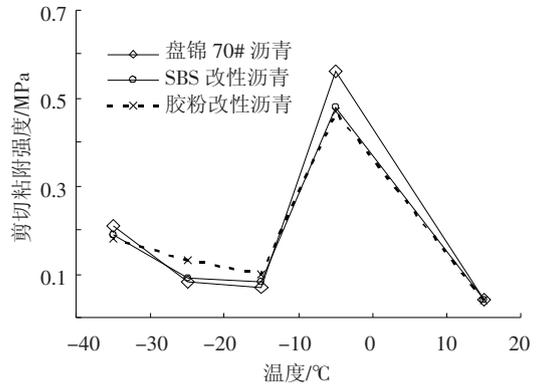


图 11 剪切粘附强度与温度的关系 (中厚层油膜)

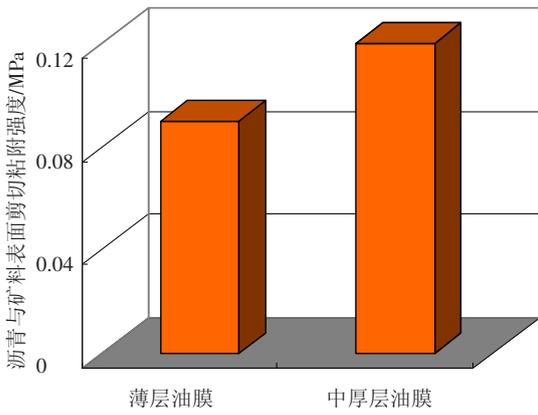


图 8 油膜厚度对 SBS 沥青剪切粘附强度的影响 (-15 °C)

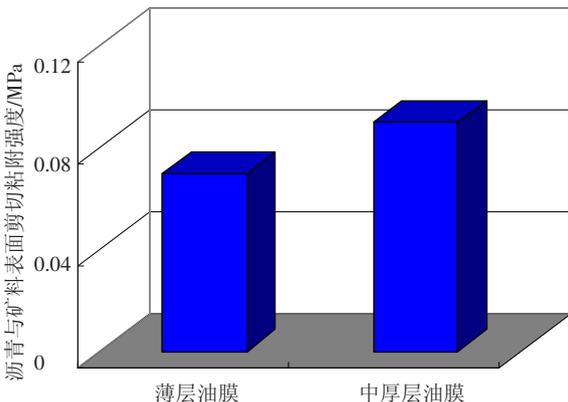


图 9 油膜厚度对盘锦沥青剪切粘附强度的影响 (-15 °C)

沥青矿料间的粘附强度对混合料抗裂及抗水害能力至关重要,实现多状态下粘附强度的定量测试对提高混合料的路用性能意义重大.矿料接触面油膜厚度及沥青的品质都是混合料设计的重要内容,较厚的油膜可以提高沥青对矿料的润湿作用进而提升沥青矿料间剪切粘附强度,但是过高的油石比容易引发高温季节的泛油等病害,所以应合理确定接触面油膜厚度.当前阶段改性沥青一直倍受推崇,尽管 SBS 改性沥青及胶粉改性沥青的低温粘结强度高于盘锦 70 号沥青,但是二者低温条件下的剪切粘附强度均小于盘锦 70 号沥青,胶粉沥青及 SBS 改性沥青低温条件下与矿料表面相对较弱的粘附性是造成该两种沥青剪切粘附强度低于盘锦 70 号沥青直接原因.优良的改性沥青应使粘结与粘附的综合作用得以增强,采用单一的粘附强度或者粘结强度选择沥青品质都有可能产生误差,综合反映粘结强度与粘附强度的矿料接触面总体强度应是优选沥青品质的合理指标.

## 4 结 论

1) 剪切荷载效应下, 矿料接触面共有两种破坏方式, 分别为沥青结合料自身的粘结失效及沥青结合料与矿料表面的粘附失效。

2) 当接触面上为厚层油膜时, 接触面破坏形式单一, 为沥青结合料自身的粘结失效, 在此条件下可以实现多状态沥青结合料剪切粘结强度的定量测试。

3) 根据沥青与矿料表面剪切粘附强度、粘附失效区面积、沥青剪切粘结强度、粘结失效区面积与剪切破坏荷载的对应关系, 可以实现沥青与矿料表面剪切粘附强度的定量测试。

4) 沥青结合料剪切粘结强度受温度影响较大。

5) 沥青矿料间剪切粘附强度与温度、沥青品质及矿料接触面油膜厚度均有明显关系。相同条件下不同种类沥青与矿料表面的剪切粘附强度存在差异。油膜厚度增加, 沥青与矿料表面剪切粘附强度增大。温度对沥青矿料间剪切粘附强度的影响较为复杂。

## 参 考 文 献

- [1] XIE Jun, WU Shaopeng, PANG Ling. Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30:340-346.
- [2] EROL I, ATAKAN A. Field and laboratory performance comparison for asphalt mixtures with different moisture conditioning systems [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1):45-53.
- [3] 谭忆秋, 李晓琳, 胡斌. 动水作用对沥青混合料低温抗裂性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1):119-122.
- [4] 弥海晨, 韩瑞民, 马志刚. 复合乳化沥青的粘附性

- 试验方法研究[J]. 石油沥青, 2002, 16(2):10-12.
- [5] 彭余华, 王林中, 于玲. 沥青与集料粘附性试验新方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(2):282-285.
- [6] 李剑飞, 盛晓军, 刘黎萍, 等. 水煮法定量研究初探[J]. 公路工程, 2009, 5:112-115.
- [7] FATHI A, AHMED A. Surface tension ( $\gamma$  (LV)), surface energy ( $\gamma$  (SV)) and crystal-melt interfacial energy ( $\gamma$  (SL)) of metals [J]. Current Applied Physics, 2012, 12(1):31-35.
- [8] HEFER A W, AMIT B, DALLAS N. Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(6):759-767.
- [9] ARABANI M, HAMED I G H. 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.
- [10] JONATHAN H, EYAD M, AMIT B. Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of changes in Ph [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5):2554-2564.
- [11] 黄继成, 黄彭. 基于表界面理论分析沥青剥离机理及防治对策[J]. 石油沥青, 2005, 19(4):52-55.
- [12] 肖庆一, 薛航, 徐金枝. 基于表界面理论的沥青路面水损坏模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5):71-75.
- [13] 栾海, 张洋, 刘铁山. 橡胶改性沥青混合料路用性能试验研究[J]. 公路, 2012, 6:224-227.
- [14] 孙璐, 辛宪涛, 王鸿遥. 纳米材料改性沥青路用结合料的性能[J]. 硅酸盐学报, 2012, 8:1095-1101.

(编辑 赵丽莹)