

文章编号:1007-9629(2021)01-0137-09

干湿条件下沥青自愈合性能评价与机理分析

周 璐, 黄卫东, 吕 泉

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 利用沥青拉拔试验对 5 种改性沥青的黏结与自愈合性能进行了对比, 考虑干燥与潮湿 2 种愈合养护状态以及改性剂掺量的影响; 在拉拔试验的基础上, 利用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 对破坏-愈合-再次破坏的沥青样品进行分析, 探究了沥青自愈合性能与分子结构之间的相关性. 结果表明: 线型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SBS) 改性沥青、橡胶改性沥青、TB 胶粉改性沥青及高密度聚乙烯 (HDPE) 改性沥青的黏结性能均低于基质沥青, 岩沥青改性沥青的黏结性能则远优于基质沥青; HDPE 改性沥青、橡胶改性沥青与合适掺量的岩沥青改性沥青具有更为优异的自愈合能力; 线型 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、TB 胶粉改性沥青、HDPE 改性沥青、岩沥青改性沥青的推荐改性剂最佳掺量分别为 3%、18%、10%~15%、8%、12%~20%; 沥青混合料的自愈合性能与集料表面孔隙对沥青中含较少支链结构的分子选择性吸附之间存在较强相关性.

关键词: 自愈合性能; 黏结性能; 愈合养护条件; 拉拔试验

中图分类号: U414

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.019

Evaluation and Mechanism Analysis of Asphalt Self-healing Property under Dry and Wet Conditions

ZHOU Lu, HUANG Weidong, LÜ Quan

(The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The adhesion and self-healing properties of five kinds of modified asphalt were evaluated by using pull-out test. The influences of dry and wet healing conditions and modifier contents were investigated. Based on pull-out test, the samples of damaged-healing-redamaged asphalt were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) test, and the correlation between self-healing performance and molecular structure of asphalt was explored. The results show that: the bonding properties of liner styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt, crumb rubber modified asphalt, TB rubberized asphalt and high-density polyethylene (HDPE) modified asphalt are lower than that of base asphalt, while that of gilsonite modified asphalt is much better than that of base asphalt; HDPE modified asphalt, crumb rubber modified asphalt and gilsonite modified asphalt with suitable content of gilsonite have more excellent self-healing ability. The recommended contents for linear SBS, crumb rubber, TB rubber, HDPE and gilsonite are 3%, 18%, 10%–15%, 8%, 12%–20% respectively. There is a strong correlation between the self-healing performance of asphalt mixture and the molecular selective adsorption of asphalt with less branched chain structure by aggregate surface pores.

Key words: self-healing property; bond property; healing condition; pull-out test

收稿日期: 2019-09-25; 修订日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51778481, 51978518, 51908426)

第一作者: 周 璐 (1993—), 女, 河南驻马店人, 同济大学博士生. E-mail: 1251136@tongji.edu.cn

通讯作者: 吕 泉 (1991—), 男, 浙江义乌人, 同济大学在站博士后, 博士. E-mail: 1991lvquan@tongji.edu.cn

道路沥青与集料的黏结性能是决定沥青路面抗松散剥落、耐久性的决定性指标之一。工程经验表明,沥青路面红绿灯路口停车处等与车辆轮胎摩擦较多的区域,经常出现掉粒、松散等路面病害^[1]。此外,“水损害”也是诱发路表松散、坑洞坑槽的一大外因。在高速行驶的作用下,路表会产生强大的动水压力,导致路表水进入路面孔隙中,水进入后,会存积于面层各层底部的空隙中。重型车辙荷载的重复作用会使空隙中的水产生重复的空隙水压力,沥青-集料的黏结作用逐渐难以抵抗这种重复水压力的作用,会首先在集料的尖角等一些黏结力较薄弱的部位发生剥落。剥落一旦发生,水分会更容易沿着沥青-集料的剥落面渗入,最终促使沥青从集料颗粒表面大面积剥离。

但沥青-集料的黏结能力并不是一次性的,在合适的温度与压力下,处于相互脱离状态的沥青-集料会产生自愈合行为,使其黏结力得到一定程度的恢复。目前普遍认为,沥青自愈合行为的产生是基于表面能理论^[2]和界面润湿与扩散理论^[3-4],沥青-集料界面或沥青本身产生的微裂缝处的沥青分子,在裂缝界面分子间范德华力与氢键形成的化学吸附作用力的驱动下,为降低表面能,会逐渐自发扩散,产生对集料界面的浸润与吸附,从而弥合沥青间的微裂缝及沥青-集料界面间的间隙。因此,探索道路沥青的自愈合形成机理与影响因素,以合适的方式提高沥青路面的自愈合水平,从而改善道路的疲劳开裂状况,延长沥青路面的使用寿命。

目前可以将研究沥青材料自愈合性能的试验分为2类:基于疲劳的自愈合试验(DSR 沥青疲劳试验^[5]、两点弯曲试疲劳试验、四点弯曲疲劳试验与间接拉伸试验^[6]等)与基于断裂的自愈合试验(半圆弯拉试验^[7]、基于 DSR 试验仪的两板法愈合试验^[8])。García^[9]利用三点弯曲试验探究了沥青砂浆的自愈合性能,并将初始开裂荷载与愈合后的开裂荷载比值定义为愈合率。Gaskin^[10]利用 DSR 试验探究了压力对于自愈合过程的影响。Bonnaure^[11]通过研究发现拥有较低软化点的沥青具有更好的自愈合性能。Carpenter 等^[12]发现改性剂会对沥青的自愈合性能有显著影响。Bahia 等^[13]对比了2种基质沥青与6种改性沥青,发现经过塑性体与弹性体改性剂改性的沥青会表现出更为优异的自愈合性能。综合看来,关于沥青材料的自愈合性能研究,多集中在针对沥青自身流变性能在一定损伤-愈合循环后的变化进行分析,而针对较为直观的力学指标进行的破

坏-愈合研究则较少。近年来,一种可用于直接测量沥青-集料黏结强度的拉拔(BBS)试验,逐渐发展为评价沥青材料黏结性能的标准试验,被纳入 AASH-TO TP-91《Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength(BBS) Test》中。与其他测试沥青黏结性能的试验(如间接拉伸试验^[14-15]、基于 DSR 试验仪的两板法试验等)相比,拉拔试验具有直观、简便与快速测量的特性,在沥青材料行业得到广泛应用^[16-20]。

本文基于沥青的黏结作用,利用拉拔试验,对5种改性沥青的黏结与自愈合性能进行了干燥、潮湿2种状态下的多次破坏-自愈合试验研究,并采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)对不同愈合时间下的沥青进行分析,探究沥青的自愈合能力与微观分子结构的关系。

1 试验

1.1 试验材料

沥青为 ESSO 70# 基质沥青(BA);5种改性沥青分别为线型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青(LSBS-MA)、橡胶(CR)沥青改性沥青(CR-MA)、TB 胶粉改性沥青(TBRA)、高密度聚乙烯(HDPE)改性沥青(HDPE-MA)以及岩沥青(G)改性沥青(G-MA)。线型 SBS 改性沥青不是完全均质的材料,随着贮存时间的增长,其会在基质沥青中发生离析,实际应用中通常会向线型 SBS 改性沥青中加入少量硫磺(S)作为稳定剂以减少离析,因此,本文也研究了硫磺掺量¹⁾对线型 SBS 改性沥青性能的影响;橡胶沥青所用橡胶颗粒直径为 600 μm ;TB 胶粉改性沥青所用胶粉直径为 125 μm ;岩沥青为伊朗岩沥青,性能指标符合规范要求,其性能指标见表1。

表1 岩沥青性能指标
Table 1 Performance indices of gilsonite

Performance indice	Test result
Density(15℃)/(g·cm ⁻³)	1.09
w(ash)/%	5.2
w(fixed carbon)/%	29.6
w(water)/%	<1.0

沥青配方及其技术指标见表2。表2中:LSBS-S0.15-MA 表示硫磺掺量为0.15%的线型 SBS 改性沥青,LSBS4.50-S-MA 表示线型 SBS 掺量为

1)文中涉及的掺量均为质量比。

4. 50%的含硫磺线型 SBS 改性沥青(LSBS-S-MA); 均为外掺.拉拔试验所用的石板为易于购买且贴近工程实际的玄武岩,统一由工厂切割成 10 cm×10 cm×1 cm 的石板,并对表面进行 5~7 mm 砂轮抛光打磨.

表 2 沥青配方及其技术指标
Table 2 Formulation and technical indices of asphalts

Asphalt	w(modifier)/%	Penetration (25 ℃)/(0.1 mm)	Softening point/℃	Ductility at 5 ℃/cm	Brookfield viscosity (135 ℃)/(Pa·s)
BA	0	65.3	50.9		0.43
LSBS-MA	1.5	64.7	55.4		0.95
	3.0	60.7	63.9	24.1	1.32
	4.5	58.1	73.9	47.8	2.38
	5.5	56.7	82.5	44.2	2.89
	6.0	51.0	83.33	54.6	3.02
	7.5	43.2	90.27	58.2	3.74
	0.1	63.0	56.9		2.15
	0.2	60.2	75.6		3.42
	0.3	55.1	77.4		5.25
CR-MA	5.0	48.9	49.6		1.07
	10.0	43.7	52.6		2.95
	15.0	42.9	57.7		5.12
	18.0	40.0	61.9		2.99 ^a
	20.0	35.7	69.1		3.74 ^a
TBRA	5.0	71.5	51.3		0.85
	10.0	103.3	50.9	12.3	0.93
	15.0	115.6	50.7	27.2	1.08
	18.0	118.1	50.6	29.0	1.13
	20.0	119.4	50.5	30.6	1.24
HDPE-MA	2.0	49.9	64.7		0.72
	4.0	41.3	72.8		1.66
	6.0	34.6	75.3		3.12
	8.0	30.5	78.5		3.83
G-MA	4.0	51.9	59.5		0.88
	8.0	49.7	64.3		2.12
	12.0	47.9	69.2		3.26
	20.0	43.0	73.5		5.23
	24.0	33.6	78.9		8.94

Note:“a” represents that the data was tested at 177 ℃.

1.2 试验方法

1.2.1 拉拔试验

用拉拔试验评价黏结材料的表面黏结强度.先利用拔头控制沥青膜厚度,使其形成沥青-石板结合体试件,再利用拉拔仪对拔头进行垂直拉拔,得到沥青-石板的黏结强度.为了测试沥青的自愈合性能,将拉拔试验后的拔头按原位放回至石板上,并施加以恒定

压力荷载促进其愈合.愈合试验中将试件分为干燥与潮湿 2 组,干燥组试件置于 40 ℃恒温箱中干燥养护,以模拟夏季路面的平均温度;潮湿组试件置于 25 ℃恒温水箱中水浴养护,以模拟降水条件下沥青路面所处的环境.2 组愈合试件在经过 12 h 的养护(1 次破坏-愈合循环)后,再次进行拉拔试验.沥青-石板样本每组试验有 3 个平行数据,共进行 5 次破坏-愈合循

环,结果取3个平行数据的平均值。

将拉拔仪显示数据拉拔强度作为评价沥青黏结性能的指标。为了评价沥青在干燥与潮湿状态下的自愈合能力,将破坏-愈合循环后的试件进行再次拉拔试验,得到其愈合拉拔强度(POTS)。将愈合拉拔强度与初始拉拔强度的比值称为愈合率(HR),将其作为评价沥青自愈合性能的指标。

$$HR_i = \frac{POTS_i}{POTS_{initial}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: HR_i 为第 i 轮愈合后的愈合率; $POTS_i$ 为第 i 轮愈合后的拉拔强度, MPa; $POTS_{initial}$ 为初始拉拔强度, MPa。

1.2.2 傅里叶变换红外光谱(FTIR)试验

利用 FTIR 研究沥青的自愈合性能与集料对沥青中含短支链的长链结构的选择性吸附特性之间的关系,选用亚甲基与甲基的碳氢比(MMHC)这一指标来描述沥青中长链结构包含的分支数目^[21],较低的 MMHC 值表明该长链上的支链数目较少,分子具有较好的流动性,因此沥青会展现出较优的愈合潜力^[22]。MMHC 为亚甲基与甲基的氢原子数目 $n(H)$ 之和与亚甲基与甲基的碳原子数目 $n(C)$ 之和的比值:

$$MMHC = \frac{n(H-CH_3) + n(H-CH_2)}{n(C-CH_3) + n(C-CH_2)} = \frac{\frac{A_{1380}}{5} + \frac{A_{2920}}{7}}{\frac{A_{1380}}{15} + \frac{A_{2920}}{14}} \quad (2)$$

式中: $n(H-CH_3)$ 、 $n(H-CH_2)$ 、 $n(C-CH_3)$ 、 $n(C-CH_2)$ 分别为 $-CH_3$ 、 $-CH_2$ 中氢、碳原子数; A_{1380} 为 $-CH_3$

的对称伸缩振动($1365 \sim 1385 \text{ cm}^{-1}$)区域面积; A_{2920} 为 $-CH_2$ 的反对称伸缩振动($2916 \sim 2936 \text{ cm}^{-1}$)区域面积; 5、7、14、15 分别为官能团原子质量对氢原子和碳原子的修正常数。

设置愈合时长 $t = 1、2、4、8、12、24、48、96 \text{ h}$, 分别刮取拉拔试验中经过破坏-愈合-再次破坏后的石板上的残留沥青膜,采用德国 Bruker 科研级 TENSOR 傅里叶变换红外光谱仪对沥青样品进行光谱扫描采样分析,每组试件进行4次平行测试,结果取平均值。在 FTIR 试验中,只进行1次破坏-愈合-再次破坏的过程,因为多次刮取沥青会损坏沥青与石板之间的愈合过程。

2 结果与分析

2.1 拉拔试验

利用拉拔试验对干燥与潮湿条件下5种不同改性沥青的黏结与自愈合性能进行评价,共进行5次破坏-愈合循环,即1次初次拉拔后,再进行5次愈合-再破坏试验。图2~图6为干燥与潮湿条件下不同改性沥青在不同掺量下的沥青黏结及自愈合性能。由于数据较多,为简明起见,图中省去了第2至第4次愈合率,只将第1次与第5次的愈合率展示于图中,本研究中拉拔试验数据的变异系数均小于20%。

2.1.1 线型 SBS 改性沥青的黏结与自愈合性能

不同线型 SBS 掺量的线型 SBS 改性沥青的黏结与自愈合性能见图1。由图1可见:

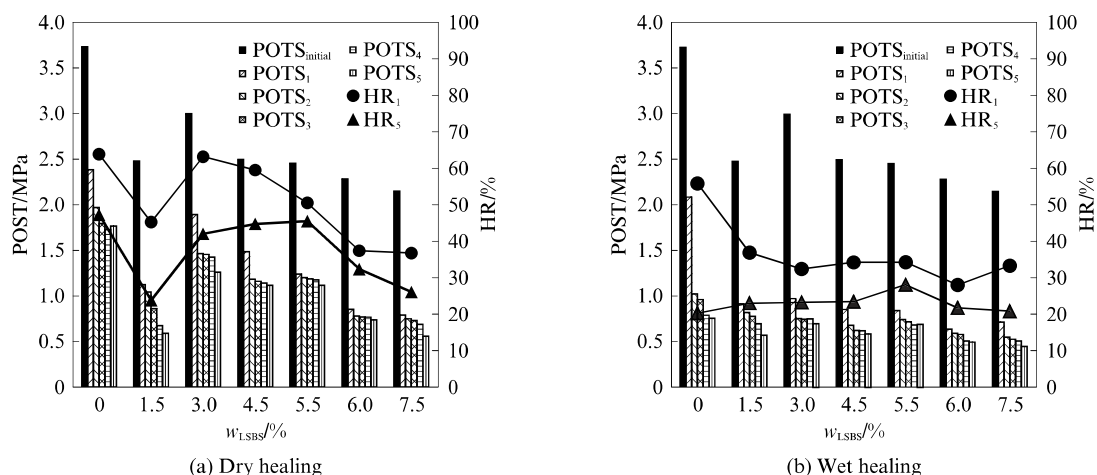


图1 不同线性 SBS 掺量的线型 SBS 改性沥青黏结与自愈合性能
Fig. 1 Bond and self-healing properties of LSBS-S0.15-MA with different LSBS contents

(1)线型 SBS 改性沥青的拉拔强度与愈合率均低于基质沥青,这说明线型 SBS 改性剂对基质沥青的黏结与自愈合性能有不利影响。这可能是由于线

型 SBS 的加入,一方面使沥青内部产生了不同程度的团聚现象,沥青不容易被石板表面的小孔隙所吸附,造成沥青的黏结能力下降;另一方面,线型 SBS

提高了沥青的黏度,在相同愈合温度下,线型 SBS 改性沥青的流动性能更差,因此在破坏后的愈合过程中,线型 SBS 改性沥青与石板难以产生较为完全的重新黏结,表现出较低的愈合率。

(2)潮湿组试件破坏后自愈合性能明显低于干燥组。这是由于:一方面,干燥组的愈合养护温度为 40 ℃,潮湿组为 25 ℃,温度较高的情况下,沥青具有较好的流动性,因此自愈合性能更强;另一方面,在潮湿养护状态下,水分会逐渐侵入到沥青-石板界面的微裂缝中,阻挡了沥青与石板的重新黏结,长时间潮湿条件下,水分甚至还会“替换”部分沥青膜,造成沥青膜的损失,削弱试件的黏结性能。

(3)干燥愈合条件下,线型 SBS 改性沥青的黏结与自愈合性能均呈现出先上升后下降的趋势,线型 SBS 掺量为 3.0% 时,其黏结性能与自愈合性能最佳,因此确定 3.0% 为干燥愈合条件下线型 SBS 改性沥青中线型 SBS 的最佳掺量;潮湿愈合

条件下,线型 SBS 的掺量越高,则沥青的愈合率越低。

含有不同掺量硫磺稳定剂的 LSBS4.50-S-MA 的黏结与自愈合性能见图 2。由图 2 可见:不同掺量硫磺稳定剂对 LSBS4.50-S-MA 在干燥和潮湿愈合条件下的黏结与自愈合性能的影响趋势一致;硫磺稳定剂的掺入会降低 LSBS4.50-S-MA 的黏结与自愈合性能,且随着掺量的增加呈先上升后下降的趋势;0.15% 是硫磺稳定剂的最佳掺量,该掺量与工程中常用的掺量一致。作为稳定剂,硫磺可以提升沥青、SBS 分子之间的网格强度最终形成一个稳定的空间网络结构,但这种网络结构同时也降低了沥青的流动性,提高了沥青黏度,影响沥青充分裹附、浸润集料表面,而过量的硫磺会引发沥青中过度的交联反应,从而导致 SBS 改性沥青有向凝胶状态转化的趋势,这解释了为何过多的稳定剂会降低线型 SBS 改性沥青的黏结与自愈合性能。

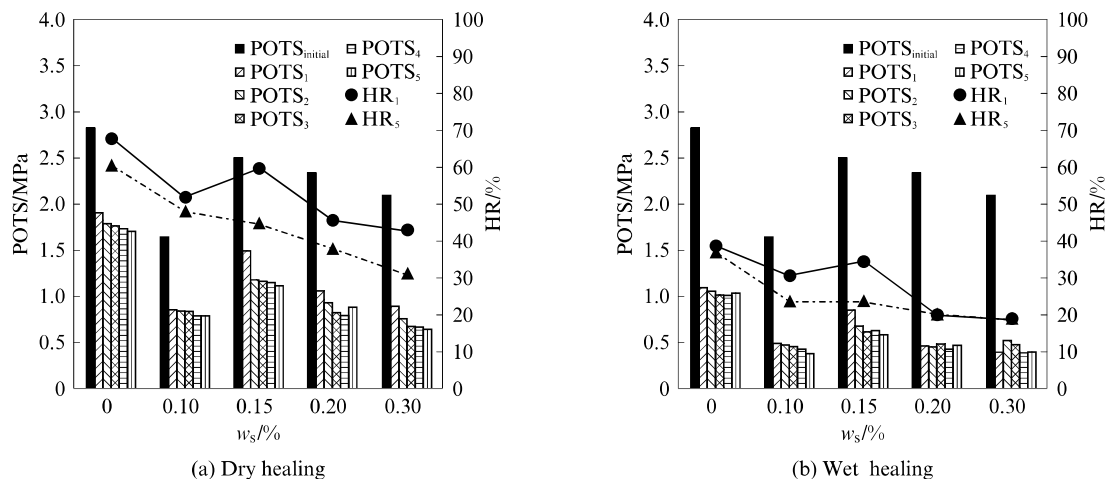


图 2 不同硫磺稳定剂掺量的 LSBS4.50-S-MA 的黏结与自愈合性能
Fig. 2 Bond and self-healing properties of LSBS4.50-S-MA with different sulfur contents

2.1.2 橡胶改性沥青与 TB 胶粉改性沥青的黏结与自愈合性能

橡胶改性沥青与 TB 胶粉改性沥青的黏结与自愈合性能见图 3、4。由图 3 可见:(1)干燥条件下,随着橡胶掺量的提高,沥青的拉拔强度下降,其愈合率先上升后下降。这是由于沥青与集料之间的黏结性能受到沥青中胶质与沥青质含量的影响,橡胶颗粒在沥青中可能会由于粒径较大的原因导致其发育溶胀不完全,对沥青中胶质含量的提升并不显著,同时橡胶颗粒本身并不具有黏结性,无法在改性沥青中提供除基质沥青以外的黏结性能,反而会减少沥青与集料石板间的黏结接触面积,造成了在拉拔试验中的拉拔强度低于基质沥青这一现象。(2)潮湿条件

下,橡胶改性沥青的自愈合性能随橡胶掺量提高而下降。这一现象产生的原因可能是橡胶颗粒的存在导致沥青表面不光滑,从而在潮湿条件下增大了水分侵入沥青-石板界面的可能性,阻碍了沥青的重新黏结过程。

由图 4 可见:TB 胶粉掺量为 10% 的 TB 胶粉改性沥青的黏结性能最优,10%~15% 掺量时其干燥自愈合性能最优;在潮湿条件下,TB 胶粉掺量对沥青的自愈合性能影响不大。

从橡胶改性沥青与 TB 胶粉改性沥青的黏结与自愈合性能对比来看,2 种改性剂对沥青的黏结性能均不利影响。值得注意的是,尽管橡胶改性沥青中橡胶颗粒尺寸较大,但二者相比,TB 胶粉改性沥

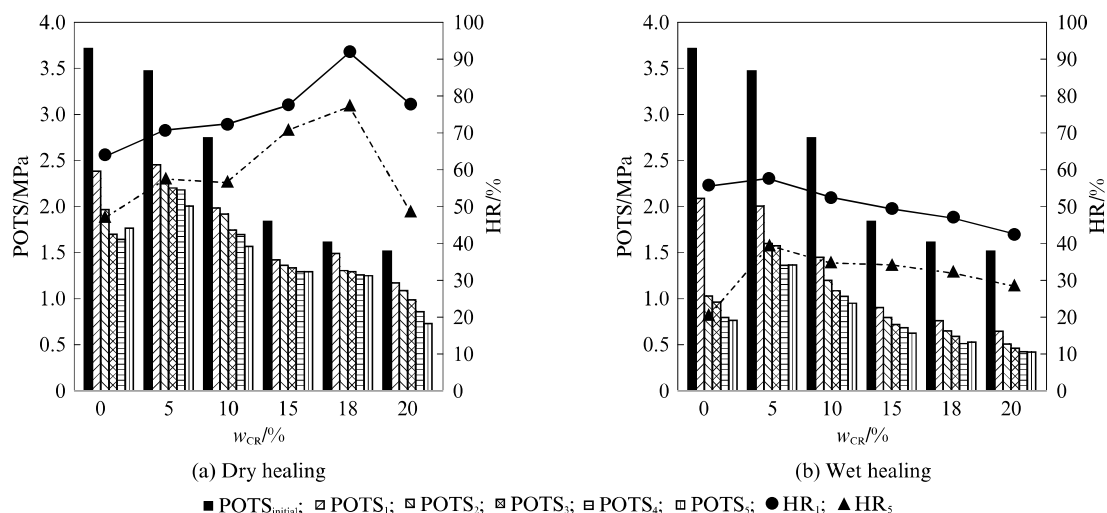


图 3 橡胶改性沥青的黏结与自愈性能
Fig. 3 Bond and self-healing properties of CR-MA

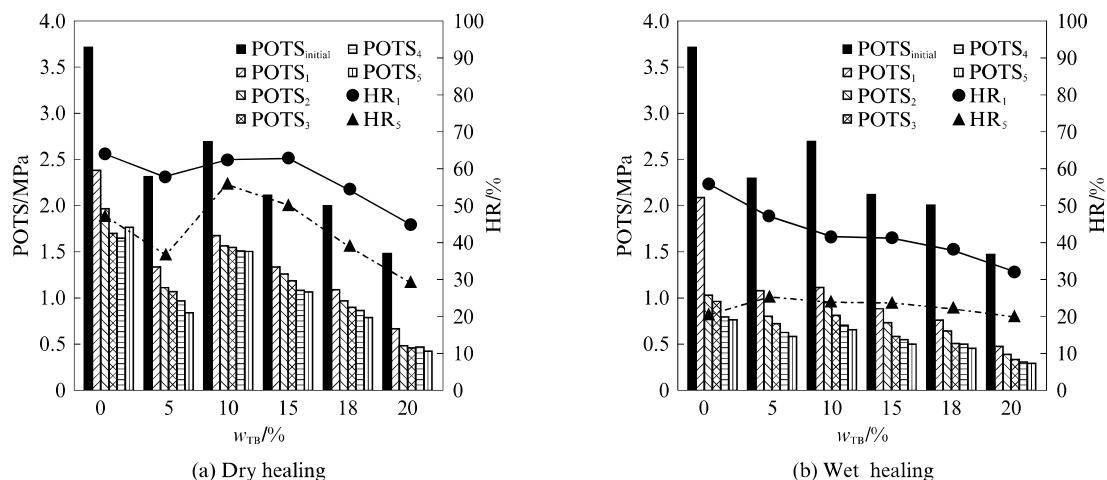


图 4 TB 胶粉改性沥青的黏结与自愈性能
Fig. 4 Bond and self-healing properties of TBRA

青的黏结性能与自愈性能却更低. 这一现象可能的原因是: 由于生产工艺与粒径大小的影响, 橡胶改性沥青中的橡胶颗粒无法均匀分散在沥青中, 而 TB 胶粉由于已经被加工成很细的粉状, 特殊的改性工艺使得其更容易在沥青中分散均匀, 因此在相同的沥青-集料的接触面上 TB 胶粉改性沥青中有更多的胶粉, 对二者的黏附性能造成不良影响, 从而造成了更低的黏结性能并对沥青的自愈形成更大阻碍.

2.1.3 HDPE 改性沥青的黏结与自愈性能

HDPE 改性沥青的黏结与自愈性能见图 5. 由图 5 可见: 整体上看, HDPE 的加入会使沥青的黏结性能下降, 但随着 HDPE 掺量从 2% 增加至 8%, 沥青的黏结性能增大; HDPE 改性沥青具有优异的自愈性能, 且随着掺量的增加而上升, 在 HDPE

掺量为 8% 时, 其干燥条件下的愈合率甚至达到了 102%, 潮湿条件下的愈合率也达到了 79%. HDPE 改性沥青愈合性能优异的原因可能在于, HDPE 改性剂是结晶度高、非极性的热塑性树脂, 不仅含有乙烯共聚物, 还含有乙烯与少量烯烃的共聚物, 这些聚合物的分子结构简单, 所含支链非常少^[23-24]. 一些研究^[21-22]已经证实这种含有较少支链的长链结构具有较好的流动自愈性能.

2.1.4 岩沥青改性沥青的黏结与自愈性能

岩沥青改性沥青的黏结与自愈性能见图 6. 由图 6 可见: 岩沥青能够显著提升沥青的黏结性能, 但过高掺量 (>20%) 会抑制这种提升效果. 岩沥青对沥青黏结性能提升作用的原因有以下几点: (1) 岩沥青中的金属元素与氮元素含量比一般的石油沥青

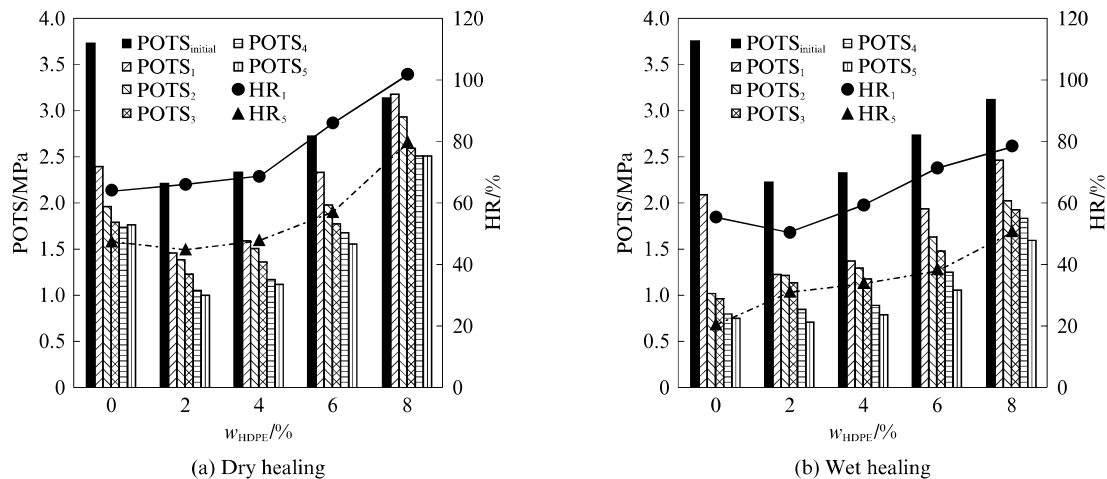


图 5 HDPE 改性沥青的黏结与自愈性能
Fig. 5 Bond and self-healing properties of HDPE-MA

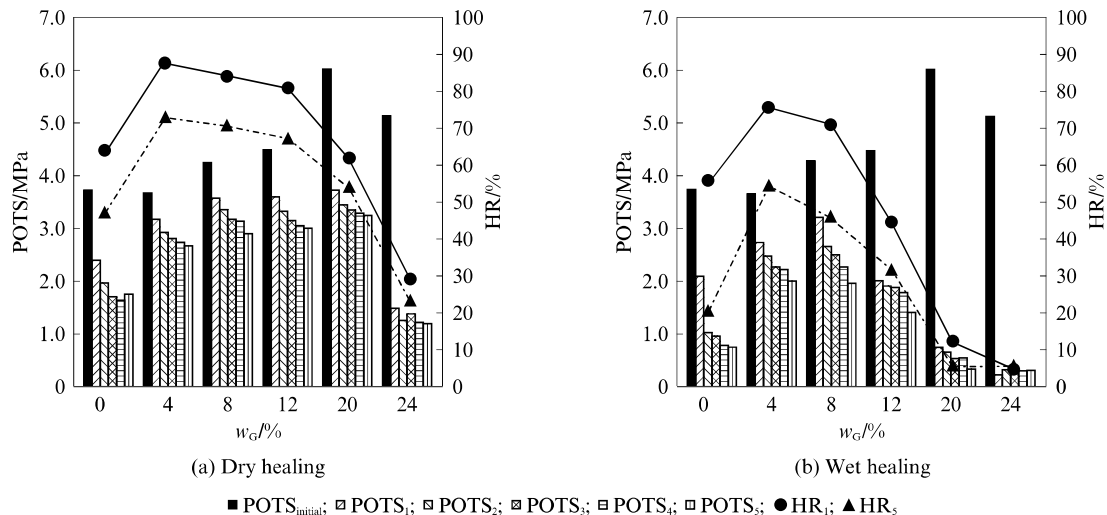


图 6 岩沥青改性沥青的黏结与自愈性能
Fig. 6 Bond and self-healing properties of G-MA

高,且氮元素都是以官能团形式存在,这使得岩沥青具有较强的浸润性与分子极性,分子间和分子内的氢键作用、分子的缔合能力大为增强,容易形成大分子。具体表现为岩沥青改性沥青的黏度增大,针入度降低,且在与集料的黏附性及抗剥离性能方面有很大的改善。(2)本文所采用的伊朗岩沥青,由于长期暴露在大自然中,其轻组分挥发较多,故其沥青质和胶质等重组分含量较多,其中,胶质的含量较高($>26\%$)。将其掺入基质沥青中,通过剪切搅拌、溶胀发育后,岩沥青会吸附基质沥青的轻组分,使基质沥青的组分重组,从而形成相互交融的高模量沥青体系。最终配制的岩沥青改性沥青的胶质含量会比基质沥青提高将近 30% 。胶质是沥青中的最强极性组分,在沥青的四组分中,胶质对沥青结合料与集料

的黏附性影响最大,胶质含量越高沥青与集料的黏附性越好。(3)岩沥青是石油基固体,具有与沥青相近的化学结构,与沥青的相容性非常好。当岩沥青溶于基质沥青后,在高温、剪切以及小分子的渗透作用下,会造成岩沥青中大胶束的破裂,暴露出很多活性点,这些活性点立刻被普通沥青中的小分子物质所填充,结合形成半聚合作用,最终形成以岩沥青大胶束分子为中心,普通沥青小分子填充、包围的新的沥青胶体。这种胶体分子既有天然岩沥青的硬度和耐磨性,同时也提升了沥青的黏结性。

综上,岩沥青作为改性剂,极易与基质沥青形成稳定的体系,一方面能够提高沥青的模量,使沥青的内聚性能更强;另一方面能够提升沥青的极性与浸润性能,根据表面能理论,这使沥青与集料接触时,

能够形成更小的浸润角,使沥青与集料形成更大的包裹接触面,因此沥青在集料孔隙中形成的机械“锚固”黏附力更强.因此,岩沥青同时从内聚性能与黏附性能两方面对沥青的黏结效果进行了改善.

此外,合适的岩沥青掺量($\leq 12\%$)能够改善沥青的自愈合性能,但过量(例如 24%)的岩沥青会对沥青的自愈合性能造成明显削弱,尤其是在潮湿条件下,岩沥青掺量为 24% 的改性沥青几乎没有自愈合能力.这可能是由于岩沥青提高了沥青的模量,降低了其流动性能,因此阻碍了沥青的自愈合进程.

2.2 FTIR 试验结果分析

在愈合-拉拔试验后,刮取石板上残留的沥青膜作为 FTIR 试验的样品,测试其 MMHC 值.破坏-愈合-再次破坏后的沥青的 MMHC 值随时间的变化情况见图 7.

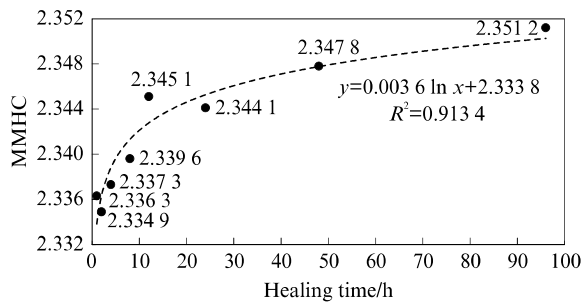


图7 破坏-愈合-再次破坏试验后沥青的 MMHC 值随愈合时间的变化

Fig. 7 MMHC value of asphalt along healing time after destroy-heal-destroy

由图 7 可见:石板残留沥青的 MMHC 值与愈合时间呈现很强的对数相关性($R^2 = 0.91$);MMHC 值在愈合初期会有较快的增长,随着愈合时间的延长,其增长速率会逐渐放慢.石板残留沥青的 MMHC 增长变化可以用拉拔试验中石板的选择性吸附来解释.在沥青愈合过程中,沥青中含有较少支链的分子结构会逐渐被石板的开口孔隙选择性吸附,从而导致石板上的残留沥青膜中的这类长链结构数量会相对减少,因此,随着愈合时间从 1 h 增加至 96 h,从石板上刮取的残留沥青中越来越多的含较少支链的分子结构被石板吸附,因此 MMHC 值也在逐渐增长.

为了进一步探究石板残留沥青的 MMHC 值与沥青自愈合性能之间的关系,将愈合率与石板残留沥青的 MMHC 值的相关性绘制于图 8 中.由图 8 可见:石板残留沥青的 MMHC 值与愈合率 HR 之间存在很强的相关性($R^2 = 0.93$).这说明沥青的自愈合性能与其分子构型息息相关,当沥青中含有较

多的饱和烃与芳香烃这类分子主链较长而支链较少的结构时,其流动性能较好,能够更自由地在沥青-集料微裂缝界面上进行移动,因此破坏后会展现出更优的自愈合性能,这也同样验证了“拉拔试验中 HDPE 改性沥青自愈合性能优异的原因在于其含有非常少支链的分子结构”这一论点.

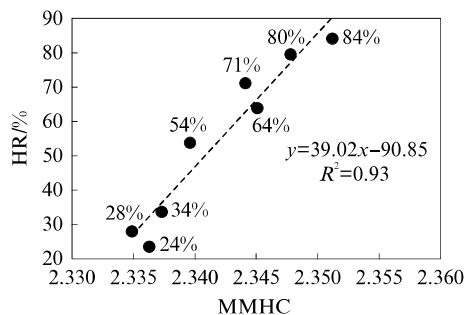


图8 愈合率与石板残留沥青的 MMHC 值的相关性

Fig. 8 Correlation between HR and MMHC value of residue asphalt on stone slab

3 结论

(1)在沥青的黏结性能方面,线型 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、TB 胶粉改性沥青及 HDPE 改性沥青的黏结性能均低于基质沥青;合适掺量的岩沥青改性沥青的黏结性能显著优于基质沥青,然而过量($\geq 24\%$)的岩沥青会明显降低这一改善效果.

(2)在沥青的自愈合性能方面,相对于基质沥青,HDPE 改性沥青、橡胶改性沥青与合适掺量的岩沥青改性沥青具有更为优异的自愈合能力.其中,8%掺量的 HDPE 改性沥青的自愈合性能最佳,其愈合率甚至达到了 102%.此外,沥青在干燥、温度较高条件下的自愈合性能总是优于其在潮湿、低温下的表现.

(3)结合黏结性能与自愈合性能综合考虑,线型 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、TB 胶粉改性沥青、HDPE 改性沥青、岩沥青改性沥青的推荐改性剂最佳掺量分别为 3%、18%、10%~15%、8%、12%~20%.

(4)MMHC 值测试的红外光谱试验表明,沥青的自愈合性能与集料吸附含有较少支链的沥青分子结构之间具有强相关性($R^2 = 0.93$).含有较少支链的沥青能够更为自由地在沥青-集料界面间移动,并更容易被集料表面孔隙所吸附而形成较强的黏结强度,因此会展现出较好的自愈合能力.

参考文献:

- [1] 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 Yamin, 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)
- [2] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1971, 324(1558): 301-313.
- [3] 孙大权, 张立文, 梁果, 等. 沥青混凝土疲劳损伤自愈合行为研究进展(1)——自愈合行为机理与表征方法 [J]. 石油沥青, 2011, 25(5): 7-11.
- SUN Daquan, ZHANG Liwen, LIANG Guo. Review on self-healing behavior of asphalt concrete(1) Mechanism and characterization methods of self-healing behavior [J]. Petroleum Asphalt, 2011, 25(5): 7-11. (in Chinese)
- [4] BHASIN A, LITTLE D N, BOMMAVARAM R, et al. A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties [J]. Road Materials and Pavement Design, 2008, 9(Suppl 1): 219-242.
- [5] QIU J, VAN D, WU S P, et al. Investigating self healing behaviour of pure bitumen using dynamic shear rheometer [J]. Fuel, 2011, 90(8): 2710-2720.
- [6] TAN Y, SHAN L, KIM Y R, et al. Healing characteristics of asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 570-577.
- [7] MAILLARD S, ROCHE C D L, HAMMOUM F, et al. Experimental investigation of fracture and healing of bitumen at pseudo-contact of two aggregates [C]//Proceedings of 9th International Conference on Asphalt Pavements. Copenhagen: International Society for Asphalt Pavements, 2002: 1-2.
- [8] QIU J. Self healing of asphalt mixtures: Towards a better understanding of the mechanism [D]. Delft: Delft University of Technology, 2012.
- [9] GARCÍA Á. Self-healing of open cracks in asphalt mastic [J]. Fuel, 2012, 93(1): 264-272.
- [10] GASKIN J. On bitumen microstructure and the effects of crack healing [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2013.
- [11] BONNAURE F P. Laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes [C]//Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions. Minnesota: [s. n.], 1982, 51: 104-128.
- [12] CARPENTER S H, SHEN S. A dissipated energy approach to study HMA healing in fatigue [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1970, 38: 178-185.
- [13] BAHIA H U, ZHAI H, BONNETTI K, et al. Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1999, 68: 1-34.
- [14] PHILLIPS M C. Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing [C]//Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders. Luxembourg: [s. n.], 1998: 115.
- [15] 徐辰. 沥青自愈合特性及影响因素研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- XU Chen. Study on the features and influencing factors of self-healing characteristic of asphalt [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [16] HUANG W, ZHOU L. Evaluation of adhesion properties of modified asphalt binders with use of binder bond strength test [J]. Transportation Research Record, 2017, 2632(1): 88-98.
- [17] LÜ Q, HUANG W, ZHU X, et al. On the investigation of self-healing behavior of bitumen and its influencing factors [J]. Materials & Design, 2017, 117: 7-17.
- [18] ZHOU L, HUANG W, XIAO F, et al. Shear adhesion evaluation of various modified asphalt binders by an innovative testing method [J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 253-263.
- [19] MOGAWER W S, AUSTERMAN A J, BAHIA H U. Evaluating the effect of warm-mix asphalt technologies on moisture characteristics of asphalt binders and mixtures [J]. Transportation Research Record, 2011, 2209(1): 52-60.
- [20] AGUIAR M, JOSE P, LORIA S, et al. Evaluation of adhesion properties of costa rican asphalt mixtures using the bitumen bond strength (BBS) and contact angle measurement tests [C]//Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D. C.: [s. n.], 2013.
- [21] KIM Y R, LITTLE D N, BENSON F C. Chemical and mechanical evaluation of healing mechanisms in asphalt concrete [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1990, 59: 240-275.
- [22] BHASIN A, BOMMAVARAM R, GREENFIELD M L, et al. Use of molecular dynamics to investigate self-healing mechanisms in asphalt binders [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 23(4): 485-492.
- [23] KOOPMANS R J. Extrudate swell of high density polyethylene. Part I: Aspects of molecular structure and rheological characterization methods [J]. Polymer Engineering & Science, 1992, 32(23): 1741-1749.
- [24] BARRY D B, DELATYCKI O. The effect of molecular structure and polymer morphology on the fracture resistance of high-density polyethylene [J]. Polymer, 1992, 33(6): 1261-1265.