

基于拉拔实验的多种改性剂对沥青黏附与自愈合性能的影响

黄卫东¹, 周璐¹, 吕泉¹, 关维阳²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200135)

摘要: 利用沥青拉拔实验评价了5种工程中常用的改性剂对沥青黏附与自愈合性能的作用,并探究了不同掺量的影响。此外,对不同种类的沥青对应的混合料试件进行了引入间歇愈合时间的四点小梁疲劳实验,并将沥青的拉拔自愈合与沥青混合料疲劳自愈合结果进行相关性分析。结果表明,线型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)、高密度聚乙烯、胶粉对沥青的黏附性能均有不利影响,而岩沥青能够显著提升沥青的黏附强度。高密度聚乙烯、橡胶颗粒及较低掺量(质量分数 $\leq 12.0\%$)的岩沥青能够改善沥青的自愈合能力。此外,四点小梁疲劳-愈合实验表明,沥青黏附与自愈合性能与对应混合料的疲劳自愈合性能之间存在强相关性,验证了拉拔实验在评价沥青材料自愈合性能方面的准确性。

关键词: 沥青;黏附性能;自愈合性能;改性剂;拉拔实验;四点小梁弯曲疲劳-愈合实验

中图分类号: U414

文献标志码: A

Effects of Multiple Modifiers on Adhesive and Self-Healing Properties of Asphalt Based on Bitumen Bond Strength Test

HUANG Weidong¹, ZHOU Lu¹, LV Quan¹,
GUAN Weiyang²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: Adhesive and self-healing properties are two inherent properties that should be considered when evaluating the durability of asphalt materials. In this paper, the binder bond strength (BBS) test is applied to evaluate the effects of five representative modifiers at

varying dosages on the adhesive and self-healing properties of asphalt. Moreover, the four-point beam (4PB) fatigue test with a healing interval period is conducted and correlated with BBS testing results. It is found that linear SBS, high-density polyethylene (HDPE) and rubber all have negative effects on the asphalt adhesive strength while only gilsonite can enhance the adhesive property. HDPE, rubber and gilsonite at lower dosages ($\leq 12.0\%$) can improve the asphalt self-healing property. In addition, the strong correlation of the healing performance between binder and mixture is found, verifying the accuracy of the BBS test in evaluating the healing performance of asphalt materials.

Key words: asphalt; adhesive property; self-healing property; modifiers; binder bond strength test; four-point beam fatigue-healing test

随着道路服役时长以及交通量的增长,路面损害会频繁产生。对于沥青路面来说,剥落、麻面与飞散等主要病害会降低路面结构的使用寿命,增加路面维修、养护成本^[1]。产生以上路面病害的主要原因在于老化、水损害等因素引发的路面沥青的黏附失效。研究发现,若给予一定的间歇期与合适的温度,黏附失效的沥青-集料会重新产生黏附,表现出自愈合特性,使得已产生微裂缝或宏观破坏的沥青混合料在一定程度上愈合空隙、重新形成强度,及时避免或延迟裂纹的发展,延长材料的疲劳寿命^[2-3]。鉴于自愈合性能是沥青材料的固有性能之一,在对沥青路面的长期黏结性能进行评价时,将黏附与自愈合性能纳入考虑范围内能够更贴合实际路面的使

收稿日期: 2020-10-04

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

第一作者: 黄卫东(1970—),男,研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为沥青材料性能。

E-mail: hwd@tongji.edu.cn

通信作者: 周璐(1993—),女,博士生,主要研究方向为沥青材料黏附与自愈合性能。

E-mail: 1251136@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

用情况。探究沥青混合料自愈合的形成机理和影响因素,找到合适的方法提升沥青混合料的自愈能力,对抵抗沥青混合料的疲劳开裂,延长沥青路面的服役寿命具有至关重要的意义。

目前对沥青及混合料的自愈合性能研究主要通过以下两类实验:一是基于疲劳的自愈合实验,包括动态剪切流变(dynamic shear rheological, DSR)沥青疲劳实验、两点弯曲实验、四点弯曲实验(four-point bending test, 4PB)、间接拉伸实验等^[4-6];二是基于断裂破坏的自愈合实验,包括半圆弯拉实验、基于DSR实验仪的两板法愈合实验等^[5-7]。以上两类实验均是对试件施加荷载,至试件发生损伤之后,给予其一定的时间与温度进行愈合,然后再次对试件进行加载,以两次加载后的试件响应对比为指标对其自愈合性能进行评价。在现有针对沥青材料的自愈合研究中,大部分是基于疲劳破坏的自愈合实验(DSR疲劳实验、4PB沥青混合料疲劳实验),不仅所用仪器较昂贵,实验所需时间较长,数据分析也较为复杂。近年来,一种新型的用于评价沥青黏附性能的实验——拉拔实验,在沥青材料研究领域受到广泛关注。拉拔实验是沥青黏结性实验(bitumen bond strength test, BBS实验)中的一种实验方法,早期发展于涂层行业^[8],最初被用来评价一些刚性基座表面涂层的黏结强度,近些年开始在沥青行业内逐渐得到越来越多的应用^[9]。Johannes^[10]利用拉拔实验开展了关于沥青材料黏结性能的测试,以黏结强度为指标评价了碎石封层中沥青的抗水损害性能。Copeland等^[11]通过拉拔实验探究了老化对沥青

黏附性能的影响,并将拉拔实验结果与汉堡车辙实验结果进行了关联。Hoki等^[12]探究了拉拔实验中实验参数对结果的影响,包括沥青膜厚度、浸水养护时间的影响。拉拔实验能够在短时间内准确测量沥青与石板的黏结强度,较好地反映沥青混合料中沥青与石料的黏结程度。

本文利用拉拔实验,对4类具有代表性的改性剂(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)、胶粉、高密度聚乙烯(high-density polyethylene, HDPE)以及岩沥青)进行研究,探究不同掺量的改性剂对基质沥青黏附性能与自愈合性能的影响。并通过4PB疲劳-愈合实验,从沥青混合料层面评价不同沥青的自愈合性能。通过拉拔实验结果与4PB疲劳-愈合实验结果的相关性分析,验证拉拔实验在评价沥青自愈合性能的准确性,并根据实验结果综合考虑黏附性能与自愈合性能,给出了以上改性剂在沥青中的推荐掺量。

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料

实验材料为ESSO 70#基质沥青与5种改性沥青,包括SBS改性沥青、普通橡胶沥青、terminal blend溶解性胶粉改性沥青(TB胶粉沥青)、HDPE改性沥青与岩沥青改性沥青。所有改性沥青的基质沥青均为ESSO 70#基质沥青,改性剂掺量(质量分数)除了橡胶粉与TB胶粉为内掺以外,其余均为外掺。所用沥青与其详细配比及制备方法见表1。

表1 实验所用沥青及其制备方法

Tab. 1 Summary of selected asphalt and preparation method

材料	改性剂	改性剂掺量/%	制备温度/℃
基质沥青 ESSO70#			
SBS类改性沥青	线型SBS(不同掺量) + 硫磺稳定剂(固定掺量0.15%)	1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5	185
橡胶类改性沥青	普通胶粉	5.0, 10.0, 15.0, 18.0, 20.0	185
	TB胶粉	5.0, 10.0, 15.0, 18.0, 20.0	220
HDPE改性沥青	HDPE	2.0, 4.0, 6.0, 8.0	180
岩沥青改性沥青	岩沥青	4.0, 8.0, 12.0, 20.0, 24.0	180

需要说明的是,传统橡胶沥青与TB沥青虽均属于橡胶沥青的范围,但二者的制备工艺与外观(如图1所示)均有所不同。本文中的普通橡胶沥青由30目的橡胶颗粒制成,其表面有明显的橡胶颗粒凸起(如图1b所示),由于胶粉颗粒与沥青不相容,会导致贮存稳定性差与黏度高的问题,影响橡胶沥青混

合料的路用性能。而TB胶粉沥青在制备时选用粒径更小的胶粉颗粒(本文中为100目),采用了高温脱硫、高速剪切技术,明显改善了贮存稳定性,降低了沥青黏度,其外观无橡胶沥青的颗粒状(如图1a所示),是一种具有广泛应用前景的改良型橡胶类改性沥青。

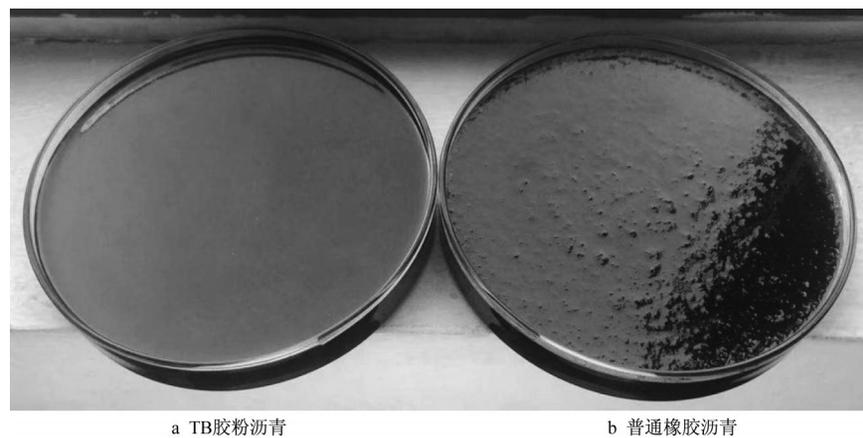


图1 橡胶类改性沥青

Fig. 1 Rubber-modified asphalt

1.2 实验参数与方法

1.2.1 拉拔实验

拉拔实验是 AASHTO TP—91^[13] 规范中用于评价沥青黏结性能的标准实验。具体操作步骤如下:在试件成型的准备阶段,将沥青、经过清洗的拔头和玄武岩石板放入 150 °C 烘箱中(若为改性沥青,则温度为 170 °C)加热 1 h,使得沥青具有充分的流动性,同时能够让石板内部孔隙中的水分完全蒸发。加热后,在石板上放置硅胶圈,并在其中心处均匀滴下直径为 0.8 cm 左右的沥青(图 2a),将加热好的拔头放置其上(图 2b),并在拔头上搁置 3 块质量、体积相同的石板(图 2c),提供一定压力使拔头底部沥青流淌均匀。实验中所用拔头底部直径为 20 mm,环刻有 0.2 mm 高的开口凹槽,以便使多余沥青溢流出来^[10],形成 0.2 mm 厚的沥青膜。而对于橡胶沥青,由于橡胶颗粒的存在,因此选用了 0.8 mm 的拔头。在 25 °C 恒温箱中养护 4 h 待强度形成后,取下压重石板与硅胶圈(图 2d)。为了使试件的拉拔破坏形式为沥青-石板间的黏附破坏(而非沥青内部的内聚破坏),将试件置于 40 °C 的水浴箱中 24 h。水浴结束后,将试件放入 25 °C 恒温箱中降温 10 min,随后可进行拉拔测试。本文中拉拔实验所采用的拉拔仪器为美国 DeFelsko PosiTest AT-A 全自动数字显示拉拔式附着力测试仪(图 2e),该仪器内部的压力系统运行稳定,精度可达 ±1%(满量程),同时,高等级工业压力传感器能够保证持续的实验精度。实验中,拉拔速率按 AASHTO TP—91^[13] 规范中要求选定为 0.7 MPa·s⁻¹。

为了评价沥青的黏附与自愈合性能,在进行第 1 次拉拔实验之前,用记号笔标记每个拔头的位置(图 2f)。拉拔实验在 25 °C 条件下进行,第 1 次拉拔后,

记录拉拔强度(pull-off tensile strength, POTS),按照标记将拔头原位放回,并在拔头上压盖 3 块石板以施加恒力,置于 40 °C 恒温箱中养生 12 h(一轮愈合)后,再次进行拉拔实验并记录愈合后的拉拔强度。愈合温度及时长的确定依据如下:对于沥青路面,在晴天状态下,路面温度可达 40~60 °C,这为已产生裂缝或受到损伤的沥青-集料提供了合适的愈合条件;在沥青拉拔实验中,为了模拟实际沥青路面的状况,愈合温度也应在此范围内。由于橡胶沥青试件的沥青膜厚为 0.8 mm,若采用较高温度进行愈合养护,则其有可能产生塌陷流动,导致沥青膜厚发生变化,造成实验结果的不准确,因此选取 40 °C 作为愈合温度。沥青-石板总共进行 1 次初始拉拔与 5 次愈合-再次拉拔循环,若每一轮的愈合时长过久,则实验会耗费较长时间。综上,本文选取“在 40 °C 恒温箱中养生 12 h”作为愈合条件。此外,需要说明的是,愈合后的试件在测试前也需要在 25 °C 恒温箱中放置 10 min,以确保愈合后的拉拔测试条件相同。

以每次愈合后的拉拔强度与初始拉拔强度的比值作为每轮循环中沥青的黏附愈合率(healing ratio, HR)。

$$R_{Hi} = \frac{p_{pi}}{p_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_{Hi} 为第 i 轮愈合后的愈合率; p_{pi} 为第 i 轮愈合后的拉拔强度,MPa; p_p 为初始拉拔强度,MPa。

1.2.2 4PB 疲劳-愈合实验

四点小梁弯曲疲劳(4PB)实验用于评价沥青混合料的疲劳性能。本文选用基质沥青与典型掺量下的改性沥青(4.5% SBS 改性沥青、15.0% TB 胶粉沥青、24.0% 岩沥青改性沥青、8.0% HDPE 改性沥青与 18.0% 橡胶沥青);采用 Controls 公司生产的

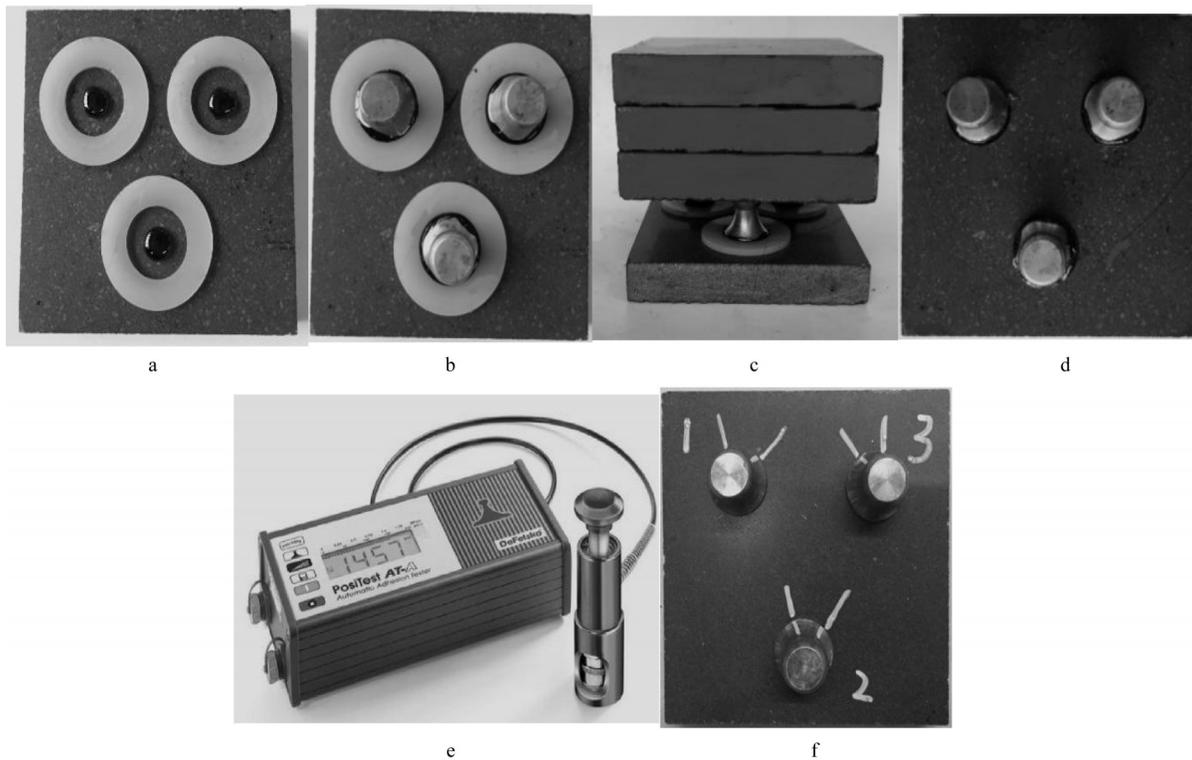


图2 实验样品制备与实验设备

Fig. 2 Preparation of the sample and experimental device

Pavelab 77-PV41A02型标准板压成型机制备沥青混合料车辙板试件,并切割成尺寸为380.0 mm×63.5 mm×50.0 mm的四点小梁试件,利用4PB疲劳-愈合实验评价沥青混合料的疲劳自愈合性能。

文中混合料中所用集料为玄武岩石料,矿粉为石灰岩矿粉。为对比不同改性沥青混合料的疲劳自愈合性能,除橡胶沥青外,本研究所有混合料均选用相同级配(AC-13),油石比(质量比)统一采用5.0%;对于橡胶沥青的适用级配,我国目前还没有相关的规范,在国内橡胶沥青的实验研究中使用较多的是美国规范^[14]推荐的橡胶沥青混合料级配(本文简称ARAC-13),与我国SMA(stone matrix asphalt)级配类似,具有粗集料多、细集料少、骨架结构、高矿料间隙率、高沥青用量的特点。不同点是橡胶沥青间断级配中不加矿粉,并严格控制0.075 mm筛孔的通过率在3%以下,而对于0.075~2.36 mm之间的范围不加以控制^[15]。在本文的研究中选取级配中值作为橡胶沥青的设计级配,油石比选用6.5%。

4PB实验中采用 N_{NM} 法作为判断改性沥青的疲劳破坏的标准^[16-17]。实验温度为25℃,加载频率为10 Hz,应变为 $1\ 000\times 10^{-6}$ 。为了研究改性沥青混合料的自愈合特性,在疲劳实验结束后对小梁试件进

行愈合养生,将试件在50℃条件下平置养护4 h后,在25℃条件下静置24 h。愈合养护过后,再次进行疲劳测试。将两次疲劳实验的疲劳寿命结果的比值作为评价沥青混合料疲劳自愈合性能的指标,如式(2)所示。

$$R_{4PB} = \frac{N_{f1}}{N_{f2}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{4PB} 为沥青混合料的愈合率,%; N_{f1} 为愈合后的疲劳寿命; N_{f2} 为初次实验的疲劳寿命。

2 实验结果及分析

2.1 拉拔实验结果分析

利用拉拔实验对不同改性剂及其掺量对沥青黏附性能与自愈合性能的影响进行了研究,初次拉拔破坏后的愈合-再次拉拔循环次数为5次,即1次初次拉拔后,进行5次愈合-再拉拔实验。图3~6为基质沥青与不同掺量的改性沥青实验结果。为了使图表简洁便于分析,本文只将第1次与第5次的愈合率绘制于图中。此外,本文中拉拔实验数据的变异系数均小于15.0%,图中省略了误差棒的绘制。

2.1.1 SBS改性剂对沥青黏附与自愈合性能的影响

沥青的黏附与自愈合性能随线型SBS改性剂掺量的变化如图3所示。

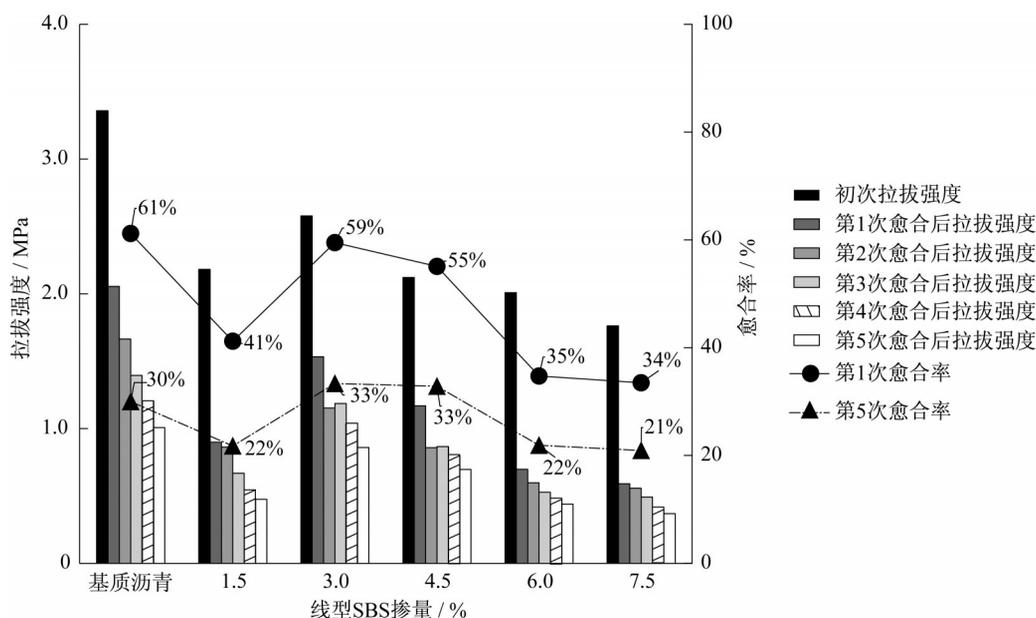


图3 不同掺量线型SBS对沥青黏附与自愈性能的影响

Fig. 3 Effect of linear SBS of different dosages on asphalt adhesive and self-healing properties

图3显示了不同掺量线型SBS改性剂对沥青黏附与自愈性能的影响。总体看来,线型SBS改性剂的拉拔强度值与愈合率均低于基质沥青。这说明SBS虽然能够提高沥青的弹性性能,改善其模量及内聚性能,但SBS改性沥青的黏附强度则低于普通基质沥青。根据沥青黏附理论中的“机械锚固机理”,沥青在热流动状态下与集料混合时,沥青会覆盖集料表面,并进入到集料表面的微小孔隙中,当沥青冷却后,其在集料孔隙中形成了“锚固”,因此提供了沥青-集料间的黏附强度。对于SBS改性沥青来说,相比于基质沥青,其分子结构体积较大,不易被石板表面微小孔隙所吸附,部分已经溶胀的SBS网状结构甚至会阻碍基质沥青与石板表面的黏附。此外,由于SBS改性剂本身并没有黏附能力,因此未完全溶胀的SBS也无法对沥青-石板间的黏附做出贡献。综上,SBS改性剂不利于提高沥青的黏附性能。

从愈合性能角度分析,沥青的愈合过程包括“流动-浸润-强度恢复”,而SBS改性剂的加入显著提高了沥青的黏度,降低了沥青的流动性能,使得SBS改性沥青的流动愈合受阻;与基质沥青相比,体现出较差的自愈性能。综合考虑沥青的黏附性能与愈合性能,可以看出,3.0%~4.5%为SBS改性剂的最佳掺量。

此外,第5次愈合率与第1次愈合率相比,下降了约1倍,说明多次的破坏-愈合循环会显著降低沥青-石料抵抗外界荷载的能力,但当在合适的温度

下受到一定的愈合压力后,仍能有部分黏附强度得到恢复。随着循环次数的增加,沥青-集料之间黏附强度的愈合率在不断下降,但下降趋势也在逐渐变缓。总体来看,SBS改性沥青在经过5次反复破坏后仍保留有至少20%的黏附与愈合行为。

2.1.2 橡胶颗粒与TB胶粉对沥青黏附与自愈性能的影响

普通胶粉与TB胶粉对沥青黏附与自愈性能的影响如图4所示。从图4可以看出,橡胶沥青的黏附性能相对于基质沥青有明显下降,且黏附强度随着胶粉掺量的增加而逐渐下降,这是由于橡胶颗粒与石板之间并无黏附,且橡胶颗粒会占据部分本该由沥青进行黏附的面积,使得总体的有效黏附面积下降,因而导致黏附强度的降低。

TB胶粉的掺入同样会造成沥青黏附性能的降低,且其黏附强度与自愈率均随TB胶粉掺量的增加而先上升后下降。TB胶粉掺量导致的黏附性能变化的原因在于:TB胶粉沥青是在高温($\geq 220^\circ\text{C}$)中经过脱硫得到,在热解过程中,橡胶颗粒变小,分子间相互作用(范德华力)减小。随着掺量的增加,橡胶分子的某些部分通过化学交联或物理纠缠连接起来,形成空间网络结构。TB橡胶沥青的Lewis酸性成分也增加,从而在一定程度上提高了沥青的黏附强度和表面能。然而,当TB胶粉掺量过高时,沥青的模量降低明显,其黏附强度显著下降。由于特殊的高温脱硫制备方式,TB胶粉沥青的黏度较小,

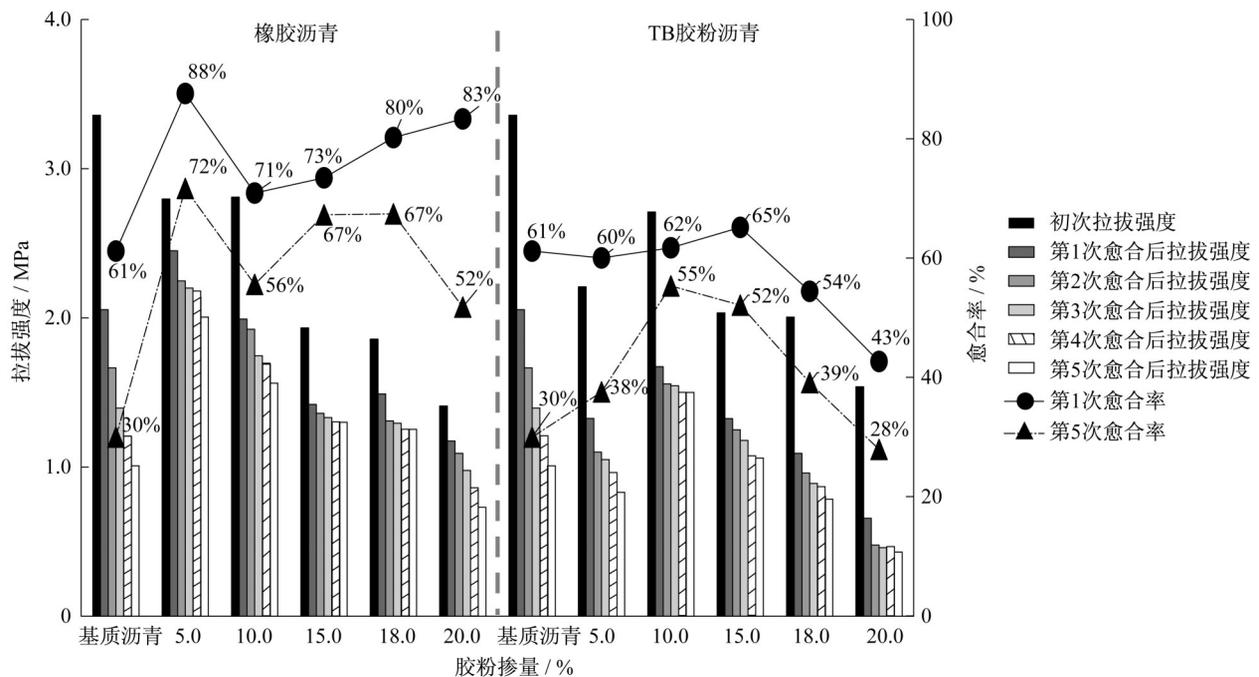


图4 不同掺量橡胶颗粒与TB胶粉对沥青黏附与自愈合性能的影响

Fig. 4 Effects of crumb rubber and TB rubber powder of different dosages on asphalt adhesive and self-healing properties

流动性佳,这也解释了为何在多次反复破坏后,TB胶粉沥青仍具有较好的愈合性能。综合考虑黏附性能与自愈合性能,10.0%~15.0%为TB胶粉沥青中的胶粉的最佳掺量。

从橡胶沥青与TB胶粉改性沥青对比来看,两种改性剂对沥青的黏附强度均有不利影响。值得注意的是,尽管橡胶沥青中橡胶颗粒尺寸较大,但二者相比,TB胶粉改性沥青的黏附性能与自愈合性能却更低。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,更容易在沥青中分散均匀。

因此,对于TB胶粉沥青来说,在沥青-集料的接触面上,有更多的胶粉颗粒与部分炭灰对二者的黏附性能造成不良影响,降低了黏附强度。另外,由于TB胶粉沥青是通过高温脱硫的方式制得,其模量较小,沥青整体偏“软”,即使在愈合的过程中能够更为自由地流动,但重新产生的黏附强度并不大。因此相比较于模量较高的橡胶沥青,TB胶粉改性沥青的整体愈合率较低。

2.1.3 HDPE改性剂对沥青黏附与自愈合性能的影响

沥青的黏附与自愈合性能随HDPE改性剂掺量的变化如图5所示。从图5可以看出,HDPE的加入首先会使得基质沥青的黏附性能下降,但随着掺量

从2.0%增加至8.0%,沥青的黏附性能也会不断增加。这是由于HDPE的结晶度为85%~97%,随着HDPE掺量的增加,其在沥青中的分子链折叠堆积逐渐紧密,分子链间相互作用力增强,沥青的黏结性能得到改善。值得关注的是,HDPE改性沥青具有优异的愈合性能,随着掺量的增加而上升,在掺量为8.0%时,其拉拔愈合率甚至达到了97%,表明在破坏-愈合之后,其黏附强度几乎完全恢复。出现这一现象的原因可能在于,HDPE改性剂不仅含有乙烯共聚物,还包含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^[18-19],这种含有较少支链的长链结构已被证实具有很好的流动愈合性能^[20-21]。而HDPE改性沥青由于具有较好的流动愈合能力,当沥青-石板界面产生裂缝后,若给予合适的愈合温度,相比于其他种类的沥青,其能够在更短时间内在裂缝表面移动,从而弥合裂缝,恢复强度。因此,在相同的愈合时间下,HDPE改性沥青整体表现出较强的愈合能力。此外,HDPE改性剂的加入提高了沥青的表面能,增强了沥青在破坏-愈合后再次接触石板时的浸润能力与黏结力。综上所述,HDPE改性剂能够显著提高沥青的自愈合性能。

2.1.4 岩沥青改性剂对沥青黏附与自愈合性能的影响

沥青的黏附与自愈合性能随岩沥青掺量的变化如图6所示。

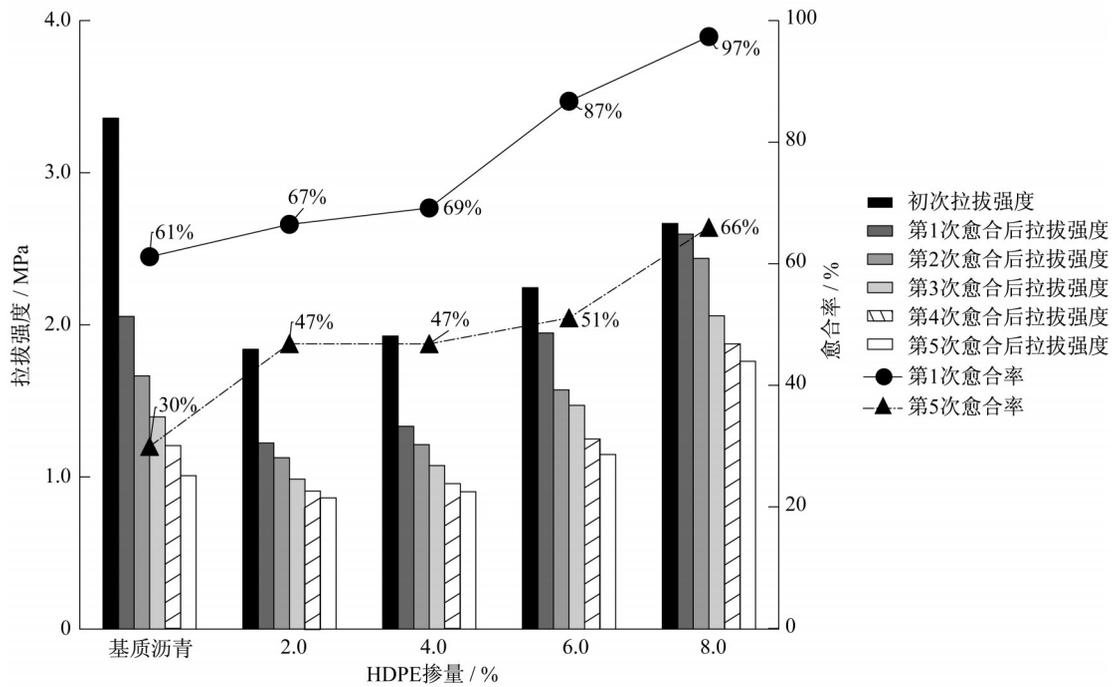


图5 不同掺量HDPE对沥青黏附与自愈性能的影响

Fig. 5 Effect of HDPE of different dosages on the asphalt adhesive and self-healing properties

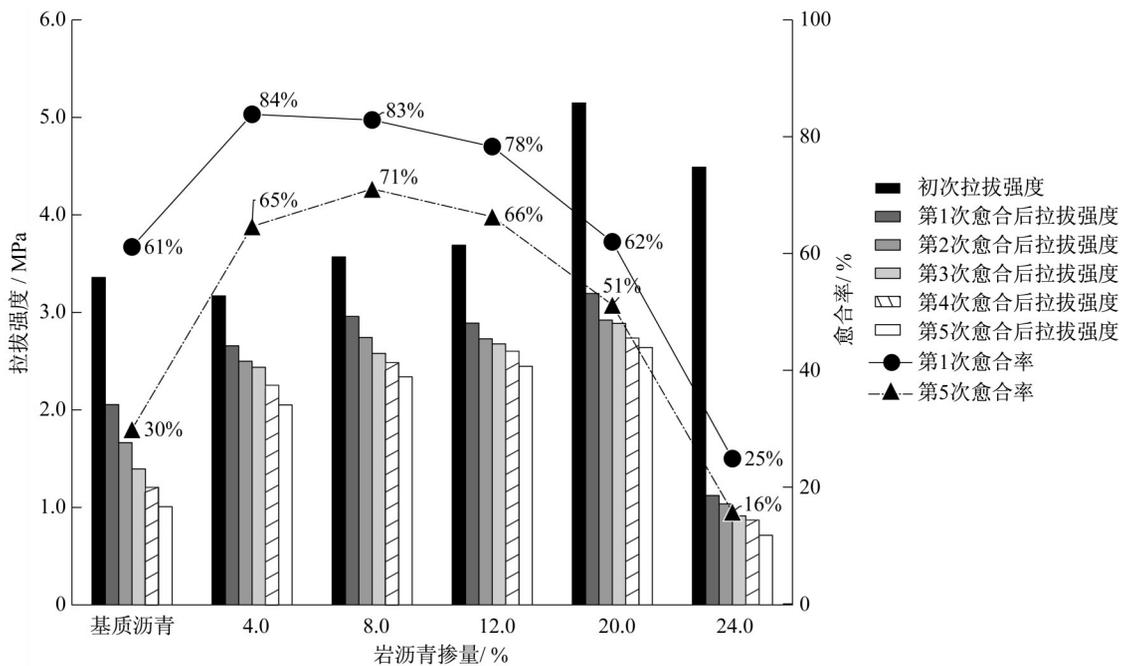


图6 不同掺量岩沥青对沥青黏附与自愈性能的影响

Fig. 6 Effect of gilsonite of different dosages on asphalt adhesive and self-healing properties

从图6可以看出,岩沥青能够显著提高沥青的黏附性能,在合适的掺量范围内($\leq 20.0\%$),沥青的黏附强度随掺量的增加而提升。这是由于岩沥青中含有较多杂原子与氮元素,且氮元素都是以官能团的形式存在,这能够提高沥青的极性与浸润性,增强沥青与石板接触时的黏附性。在微观层面上,由于

岩沥青与沥青的成分相近,二者相容性优,岩沥青提高了沥青的模量,岩沥青在沥青中会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,同时也增强了渗入石板表面微小孔隙中形成的沥青“锚固力”。然而,过高掺量($\geq 24.0\%$)

的岩沥青可能会导致沥青的模量过大,沥青变得较“脆”,试件在测试前若受到外界扰动容易出现内部裂纹损伤,因此24.0%岩沥青改性沥青的黏附性能有所下降。

此外,较低掺量($\leq 12.0\%$)的岩沥青能够改善沥青的愈合性能。但是过量($> 20.0\%$)的岩沥青会对沥青的自愈合性能造成明显削弱。这是由于当岩沥青掺量较低($\leq 12.0\%$)时,其具有较好的黏附与自愈合性能,这是由于此时岩沥青含量适中,在本文的愈合温度(40℃)下,沥青仍然有一定的流动性,能够在拉拔破坏后,与石板表面重新产生黏附。且由于岩沥青改性沥青的浸润性较强,再次与石板的黏结仍能够产生较高的黏附强度。而当岩沥青掺量过高时($> 20.0\%$),此时沥青的模量显著上升,流动性

大大降低,导致虽然给予较高的愈合温度与较长的愈合时间(40℃, 12 h),沥青仍不能发生明显的流动,无法与石板重新产生有效的黏附。因此,对于岩沥青改性沥青来说,岩沥青提升了沥青的浸润性与黏附性,但同时也会降低并限制沥青的流动性,阻碍沥青流动愈合的发生,这一双面影响相互博弈,随着岩沥青掺量的高低而呈现出不同的愈合效果。

2.2 4PB疲劳愈合实验结果分析

选取了基质沥青与5种具有代表性掺量的改性沥青,包括4.5% SBS改性沥青、18.0% 橡胶沥青、15.0% TB胶粉改性沥青、24.0% 岩沥青改性沥青以及8.0% HDPE改性沥青,对这6种沥青混合料的小梁试件进行4PB疲劳-愈合实验,实验结果见表2。

表2 4PB疲劳-愈合实验结果

Tab. 2 Results of 4PB fatigue-healing test

沥青种类	N_1	N_2	4PB实验			拉拔实验		
			愈合率/%	平均值/%	变异系数/%	愈合率/%	平均值/%	变异系数/%
基质沥青	24 140	12 800	53.0			60.7		
	23 400	8 720	37.3	47.9	15.70	62.1	61.2	1.01
	24 320	12 990	53.4			60.9		
4.5% SBS 改性沥青	371 850	182 300	49.0			51.3		
	398 340	216 470	54.3	53.0	5.32	61.0	55.1	7.65
	373 830	207 430	55.5			53.1		
18.0% 橡胶沥青	245 180	172 730	70.5			78.2		
	213 490	145 390	68.1	70.3	2.50	84.1	80.2	3.44
	257 910	186 720	72.4			78.3		
15.0% TB胶粉改性沥青	206 990	107 580	52.0			67.2		
	177 580	119 200	67.1	61.4	10.97	67.5	65.2	4.60
	187 500	122 300	65.2			61.0		
24.0% 岩沥青 改性沥青	77 240	26 570	34.4			27.1		
	102 380	35 680	34.9	35.4	3.03	21.8	25.0	9.26
	87 670	32 320	36.9			26.2		
8.0% HDPE 改性沥青	242 310	188 520	77.8			106.5		
	277 450	194 950	70.3	71.8	6.10	92.6	97.4	6.59
	280 190	188 890	67.4			93.2		

4PB疲劳-愈合实验结果表明,8.0% HDPE改性沥青与18.0% 橡胶沥青具有良好的疲劳愈合性能。对于HDPE改性沥青来说,其愈合性能主要来源于其所含的较少支链的长链结构带来的优异愈合流动性,这为沥青弥合混合料中的微小裂缝提供了良好基础。而对于橡胶沥青来说,愈合性能可能主要体现在其弹性性能的恢复上。橡胶沥青中橡胶颗粒的存在为混合料提供了更强的弹性变形的能力,因此能吸收更多外力做功,展现出较好的抵抗疲劳破坏的能力。橡胶颗粒本身在受力的过程中受损害较小,只要在愈合过程中能够再次与沥青产生黏结,在第2次的疲劳实验中,混合料中的橡胶颗粒便能够继续发挥弹性效应。此外,在经历一段时间的愈

合后,橡胶沥青混合料中的微裂缝也同样会有部分弥合,综合橡胶颗粒的弹性恢复与沥青-集料黏结重建造成的强度恢复两方面,橡胶沥青混合料整体上表现出较高的愈合率。

15.0% TB胶粉改性沥青也具有较好的疲劳-愈合性能,这是由于TB胶粉改性沥青“较软”,具有良好的流动性,能够在短时间内产生愈合;基质沥青与4.5% SBS改性沥青混合料的疲劳-愈合表现相近,但4.5% SBS改性沥青混合料更优。在6种沥青混合料中,24.0% 岩沥青改性沥青混合料的愈合性能最差,这是由于岩沥青混合料模量较高,尽管其抵抗外界荷载的能力较强,但一旦混合料内部出现微裂缝,便较难愈合。此外,由于岩沥青改性沥青混合料试件可变形性

较小,容易出现脆断的破坏模式。在两次加载之间的愈合阶段,相同愈合温度下,岩沥青改性沥青混合料中沥青的流动性相对较差,导致混合料中的裂缝难以充分愈合,因此展现出较低的愈合率。

由于相对于沥青实验,混合料实验的测试结果更接近实际路面情况,因此本文将4PB混合料愈合实验与沥青拉拔愈合实验(一次愈合循环后)的数据进行对比与相关性分析,以验证拉拔实验在评价沥青愈合性能方面的准确性。二者的相关性分析如图7所示。

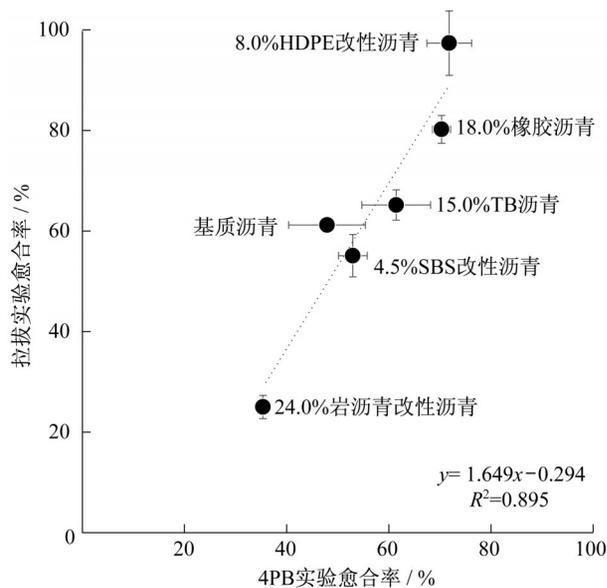


图7 沥青拉拔自愈合实验与混合料4PB疲劳自愈合实验相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of BBS healing test and 4PB mixture fatigue-healing test

从图7可以看出,4PB混合料愈合实验与沥青拉拔愈合实验中的愈合率存在着明显的线性相关关系($R^2 = 0.895$)。无论是沥青还是沥青混合料,添加HDPE改性剂后的愈合性能均最优异,而加入岩沥青后的愈合性能均最差。沥青实验与沥青混合料实验之间的相关性分析表明了沥青拉拔实验能够有效表征对应的沥青混合料的疲劳-愈合性能,因此能够较为准确地预测与反映实际工程中沥青路面在长期使用下的疲劳愈合性能。

3 结论

本文利用拉拔实验,对基质沥青与5种改性沥青(SBS改性沥青、橡胶沥青、TB胶粉沥青、HDPE改性沥青与岩沥青改性沥青)进行研究,探究了不同掺量改性剂对沥青黏附性能与自愈合性能的影响。

进行了4PB沥青混合料疲劳-自愈合实验,并将沥青拉拔愈合实验的混合料疲劳-自愈合实验结果进行相关性分析。得到以下结论:

(1) 从黏附性能角度看,尽管从工程经验来说,大部分改性剂会提高沥青的内聚性能,但根据本文的拉拔实验结果,线型SBS、HDPE、橡胶颗粒与TB胶粉对沥青的黏附强度均有不利影响;岩沥青能够显著提升沥青的黏附性能,然而,过量($\geq 24.0\%$)的岩沥青会明显降低这一改善效果。

(2) 从自愈合角度看,HDPE、橡胶颗粒与较低掺量($\leq 12.0\%$)的岩沥青能够改善沥青的自愈合水平。其中,8.0%掺量的HDPE改性沥青的黏附自愈合率甚至能够达到97%。随着破坏-愈合循环次数的增加,沥青-集料之间黏附强度的愈合率在不断下降,但下降趋势逐渐变缓,说明沥青在受到多次破坏后,仍具有长期的黏附愈合能力。

(3) 在评价不同改性剂对沥青材料愈合性能的影响方面,沥青的拉拔-自愈合实验与沥青混合料的疲劳-自愈合实验结果一致,二者结果之间具有较强相关性($R^2 = 0.895$)。这验证了拉拔实验在评价沥青材料愈合性能方面的准确性,也说明通过沥青的拉拔实验,能够较为准确地预测相应混合料的长期疲劳-愈合性能。

(4) 综合考虑黏附性能与自愈合性能,不同改性沥青的推荐最佳掺量如下:线型SBS改性沥青为3.0%~4.5%;TB胶粉改性沥青为10.0%~15.0%;HDPE改性沥青为8.0%;岩沥青改性沥青为12.0%~20.0%(以上掺量均为外掺)。而对于橡胶沥青,由于其黏附性能与愈合性能随掺量的变化趋势并不明显,因此在实际工程实践中,建议综合考虑胶粉应用的经济性与其他路用性能,选用合适的掺量。

作者贡献说明:

黄卫东:负责论文的整体思路与实验研究方法的指导,以及论文的审核。

周璐:负责实验方案的制订与实施,数据处理,论文的撰写与修改。

吕泉:负责论文的撰写与修改。

关维阳:负责论文的修改。

参考文献:

- [1] 孙大权,林添坂. 改性剂对沥青自愈合能力的影响[J]. 公路, 2015, 60(4):224.

- SUN Daquan, LIN Tianban. The effects of modifiers on asphalt self-healing property [J]. Highway, 2015, 60(4):224.
- [2] 张宏超, 孙立军. 沥青路面早期损坏的现象与实验分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(3):331.
- ZHANG Hongchao, SUN Lijun. Development and analysis of premature failures of the asphalt pavements [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(3):331.
- [3] BAZIN P, SAUNIER J. Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes [C]// Proceeding of the Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmts. Ann Arbor: Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmts, 1967:438-451.
- [4] PHILLIPS M C. Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing [C]// Proceedings of Eurobitume Workshop on Performance Related Properties for Bituminous Binders. Luxembourg: European Bitumen Association, 1998: No 115.
- [5] 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.
- [6] QIU J, VAN DE VEN M F C, WU S P, *et al.* Investigating self healing behaviour of pure bitumen using dynamic shear rheometer[J]. Fuel, 2011, 90(8): 2710.
- [7] TAN Y, SHAN L, KIM Y R, *et al.* Healing characteristics of asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 570.
- [8] American Society for Testing and Materials. Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers: ASTM D4541[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1995.
- [9] HUANG Weidong, ZHOU Lu. Evaluation of adhesion properties of modified asphalt binders with use of binder bond strength test[J]. Transportation Research Record, 2017, 2632(1): 88.
- [10] JOHANNES P. The use of the binder bond strength (BBS) test in quantifying moisture damage resistance of bituminous binders used in chip seals [C]// Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Sun City: Southern African Bitumen Association, 2015:9-19.
- [11] COPELAND A, YOUTCHEFF J, SHENOY A. Moisture sensitivity of modified asphalt binders: factors influencing bond strength[J]. Transportation Research Record, 2007, 1998:18.
- [12] HOKI B, YONG R. Integrated experimental-numerical approach for estimating material-specific moisture damage characteristics of binder-aggregate interface [J]. Transportation Research Record, 2018, 2011(1):9.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for determining asphalt binder bond strength by means of the binder bond strength (BBS) test: AASHTO TP 91-15 [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.
- [14] Florida Department of Transportation. Standard specifications for road and bridge construction [R]. Tallahassee: Florida Department of Transportation, 2010.
- [15] 高川. 橡胶沥青混合料疲劳性能研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
- GAO Chuan. Research on fatigue performance of asphalt rubber mixture [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [16] American Society for Testing and Materials. Standard test method for determining fatigue failure of compacted asphalt concrete subjected to repeated flexural bending: ASTM D7460-10 [S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2010.
- [17] 黄明, 温学钧, 黄卫东, 等. 不同设计目标下沥青混合料的疲劳性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4):572.
- HUANG Ming, WEN Xuejun, HUANG Weidong, *et al.* Fatigue performance of asphalt mixtures with different design goals [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(4):572.
- [18] KOOPSMANS 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.
- [19] 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.
- [20] KIM Y R, LITTLE D N, BENSON F C. Chemical and mechanical evaluation on healing mechanism of asphalt concrete [C]// Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Albuquerque: Association of Asphalt Paving Technologists, 1990:240-275.
- [21] 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.