

文章编号:1007-9629(2021)02-0377-08

不同改性剂对沥青黏结及抗水损害性能的影响

周璐¹, 黄卫东¹, 吕泉^{1,2,3}, 郑茂⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点试验室, 上海 201804; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 3. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点试验室, 上海 201804; 4. 四川交投建设工程股份有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 利用拉拔试验(BBS试验),研究了5种道路常用改性剂(SBS、橡胶颗粒、TB胶粉、岩沥青、多聚磷酸)及其掺量对沥青内聚性能和黏附性能的影响,并在此基础上进行了5种改性沥青混合料的肯塔堡飞散试验和浸水汉堡车辙试验。结果表明:SBS改性剂会阻碍沥青与集料表面的黏附,但能够提高沥青的内聚性能,延长沥青的荷载承受能力;橡胶颗粒和TB胶粉均会造成沥青内聚性能和黏附性能的下降,岩沥青能够显著提高沥青的内聚性能和黏附性能,多聚磷酸则会明显降低沥青的水敏感性、改善其黏附性能;不同改性沥青混合料抗松散性能和抗水损害性能的排序为:20%岩沥青改性沥青混合料>4.5%SBS改性沥青混合料>0.4%多聚磷酸改性沥青混合料>基质沥青混合料>15%橡胶沥青混合料>20%TB胶粉沥青混合料。

关键词: 沥青; 内聚性能; 黏附性能; 抗水损害; 拉拔试验; 路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.021

Effects of Various Modifiers on the Bond Property and Moisture Damage Resistance of Asphalt

ZHOU Lu¹, HUANG Weidong¹, LÜ Quan^{1,2,3}, ZHENG Mao⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. Sichuan Jiao Tou Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The binder bond strength(BBS) test was conducted to evaluate the effects of five typical modifiers(SBS, crumb rubber, terminal blend rubber, gilsonite and polyphosphoric acid) on the cohesion and adhesion properties of asphalt respectively. Various contents were also investigated. Cantabro and wet Hamburg wheel-tracking(HWT) tests were also performed. The results show that SBS modifier would hinder the adhesion process between asphalt and aggregate, however, it enhances the cohesive performance and extends the load bearing capacity of asphalt. Both crumb rubber and terminal blend rubber harm the asphalt cohesion and adhesion behavior. Gilsonite significantly improves both the cohesion and adhesion strength while polyphosphoric acid can reduce the moisture sensitivity and improve the asphalt adhesion performance. The ranking evaluation of raveling and moisture damage resistance of different asphalt mixtures is obtained through Cantabro and wet HWT tests, and the accuracy and effectiveness of the BBS test in evaluating the asphalt raveling resistance and moisture damage resistance are valid.

收稿日期:2020-04-17; 修订日期:2020-06-30

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,同济大学博士后,博士. E-mail:1991lvquan@tongji.edu.cn

Key words: asphalt; cohesion property; adhesion property; moisture damage resistance; binder bond strength test; road performance

剥落松散与水损害是发生在沥青路面的主要病害.在车辆荷载、冻融循环及水的剥离作用下,沥青-集料之间的黏结作用逐渐失效从而发生剥落现象.根据黏结失效产生界面的不同,可以分为沥青自身的内聚失效与沥青-集料界面的黏附失效.

从上世纪 30 年代至今,国内外对于沥青-集料黏结性能已有较多研究,但大部分研究并未明确区分沥青或沥青混合料的“内聚破坏”与“黏附破坏”.在研究方法上,大多针对沥青混合料开展试验,评价检测所需时间较长.在研究内容上,关于各类改性剂对沥青黏结性能的影响,由于不同研究中所用改性剂的掺量不同,试验方法也不统一,导致研究结果较为零散,未成体系,甚至对于同一类改性剂,研究结论也不相同^[1-3].综上,目前缺少利于快速检测的标准试验来对多种改性沥青的内聚性能和黏附性能进行准确、统一的系统评价.

针对沥青黏结性能的评价,很多研究人员采用肯塔堡飞散试验来探究沥青混合料的抗松散性能,利用浸水汉堡车辙(HWT)试验来评价沥青混合料在有水条件下的抗剥落性能.这些试验虽然能够较为准确地反映出沥青材料的路用性能,但检测过程耗时耗力,且由于影响因素(沥青、集料、矿粉、纤维等)较多,通常试验结果的变异性都较大.而传统的水煮法与水浸法试验由于易受试验人员主观判断因素影响,现在已经不常使用.另外,研究人员还开发出了不少新的定量评价方法,例如 Gaskin 等^[4-5]基于动态剪切流变仪进行了两板法黏结测试;Cui 等^[6]用剥离试验对比了基质沥青与 SBS 改性沥青的黏附性.这几种试验方法虽然较为快捷,但存在试验仪器较昂贵、试验夹具需定制、试验流程未规范的问题.

近年来,一些研究中采用拉拔试验(BBS 试验)对沥青-集料的黏结性能进行测试.BBS 试验最开始发展于涂料行业^[7],后被引入到沥青材料行业并被纳入规范 AASHTO TP—91《Standard method of test for determining asphalt binder strength by means of the binder bond strength(BBS) test》中,成为评价沥青-集料黏结性能的标准试验.由于其能够在较短时间里对沥青的黏结性能进行直观、便捷的测量,已得到越来越多的应用^[8-11].

针对目前在沥青黏结性能方面研究存在的不足,本文基于 BBS 试验,采用 5 种道路常用改性剂(SBS、橡胶颗粒、TB 溶解性胶粉(简称 TB 胶粉)、

岩沥青、多聚磷酸(PPA)),研究了改性剂种类及其掺量对沥青黏结性能的影响;同时为明确区分沥青的内聚破坏和黏附破坏形式,试验时设置了干燥与潮湿 2 种养护条件.另外,为验证 BBS 试验在评价沥青黏结性能与抗水损害性能方面的有效性与准确性,还进行了相应沥青混合料的肯塔堡飞散试验和浸水汉堡车辙试验.

1 试验

1.1 材料

基质沥青选用埃克森美孚公司生产的埃索(ESSO)70# 沥青;改性剂有 5 种,分别为 SBS、橡胶颗粒(粒径 0.60 mm)、TB 胶粉、岩沥青、多聚磷酸(PPA),其中橡胶颗粒为内掺,其余均为外掺.改性沥青种类及改性剂掺量(质量分数,本文涉及的掺量、用量等均为质量分数)如表 1 所示.

表 1 改性沥青种类及改性剂掺量
Table 1 Modified asphalt types and modifier contents

Modified asphalt type	Modification formulation	$\omega(\text{modifier})/\%$
SBS modified asphalt	Linear SBS+Sulfur stabilizer	1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5
	Crumb rubber	5.0,10.0,15.0, 18.0,20.0
Rubber modified asphalt	TB rubber	5.0,10.0,15.0, 18.0,20.0
	Gilsonite	4.0,8.0,12.0, 20.0,24.0
Gilsonite modified asphalt	PPA	0.2,0.4,0.8,2.0
PPA modified asphalt		

SBS 改性沥青在储存过程中容易发生离析,影响其路用性能.在制备过程中,通常向其中加入硫磺稳定剂以防止离析的产生.本文使用的 SBS 改性沥青中硫磺掺量均为 0.15%.TB 溶解性胶粉改性沥青(TB 胶粉沥青)是一种新型的橡胶粉改性沥青,通过向沥青中加入较细的橡胶颗粒(粒径一般细于 0.60 mm),在高温下剪切脱硫制成.与传统的橡胶沥青不同,TB 胶粉沥青具有很好的储存稳定性,不容易产生离析现象.此外,在施工和易性、路用性能与环保方面,TB 胶粉沥青相较于传统的橡胶沥青也具有明显优势^[12].近 20 年来,TB 胶粉沥青相关技术在国内外得到了不断的发展与应用.

1.2 试验参数与方法

1.2.1 BBS 试验

本文利用 BBS 试验对不同改性沥青的内聚性

能和黏附性能进行评价。在试件制备过程中,将沥青加热至 150 ℃(若为改性沥青,则加热温度为 165~170 ℃)后,将约 1 g 流动沥青滴在玄武岩石料基板上,再将拔头覆盖其上,施加一定的压力。由于拔头底部边缘高度突出 0.2 m 作为支撑,多余的沥青可以从溢流槽中流出,借此可保证拔头底部与石板之间的沥青膜厚度为 0.2 mm,如图 1(a)所示。随后,将试件置于 25 ℃恒温箱中养护 2 h,以确保沥青-集料黏结强度的形成。为了区分沥青的内聚破坏和黏附破坏,将试件分为干燥养护与潮湿养护 2 组。干燥养护组试件在 25 ℃条件下继续养护 24 h;潮湿养护

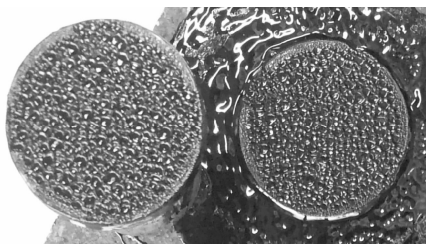
组为模拟路面水损害情况,将试件置于 40 ℃水浴箱中浸泡 24 h。养护结束后,潮湿养护组试件在 BBS 试验前需在 25 ℃恒温箱中降温 10 min,以确保 2 组试件在测试过程中温度相同。随后利用 Positest AT-A 拉拔仪(见图 1(b)),对黏结在石板上的拔头进行垂直拉拔。拉拔破坏后,记录拉拔强度(f_p)作为评价沥青内聚性能和黏附性能的指标,每种样品有 3 个平行数据,结果取平均值。通常情况下,干燥养护组试件的破坏形式基本均为沥青内聚破坏(见图 1(c)),而潮湿养护组试件由于水的侵入剥离作用,破坏形式以沥青-石板界面的黏附破坏(见图 1(d))为主。



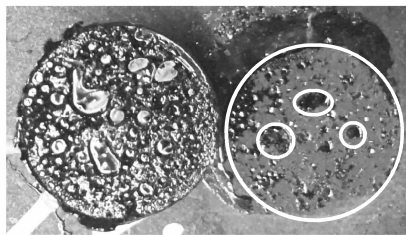
(a) Pull-off stubs with overflow weirs in BBS test



(b) Positest AT-A apparatus



(c) Cohesive failure



(d) Adhesive failure

图1 BBS 试验

Fig. 1 BBS test

1.2.2 肯塔堡飞散试验

肯塔堡飞散试验被用来评价沥青混合料的抗松散能力。测试前,沥青混合料试件在 25 ℃水中浸泡 20 h,取出后以 30 r/min 的速率旋转 300 转。试验结束后,计算试件的质量损失作为评价沥青混合料抗松散性能的指标。每组试件有 4 个平行样品,结果取平均值。

1.2.3 浸水汉堡车辙试验

本文利用浸水条件下的汉堡车辙试验来测试沥青混合料的抗水损害性能。在试验中,汉堡车辙试件被放置在 50 ℃水浴中进行反复轮碾,当加载次数 N 达 20 000 次或形成的车辙深度 d 达 20.0 mm 时终止试验。利用试验数据能够得到试件在加载过程中出现的蠕变斜率与剥落斜率,2 条拟合线相交的点即为“剥落拐点”(SIP),如图 2 所示。剥落拐点代表着沥青混合料开始进入水损害阶段,一般研究通常将最大车

辙深度和剥落拐点指标作为评价沥青混合料性能优劣的指标^[13]。在本文的浸水汉堡车辙试验中,将剥落拐点对应的轮碾加载次数作为沥青混合料抗水损害性能的评价指标。每组试件有 2 个平行样品,结果取平均值。

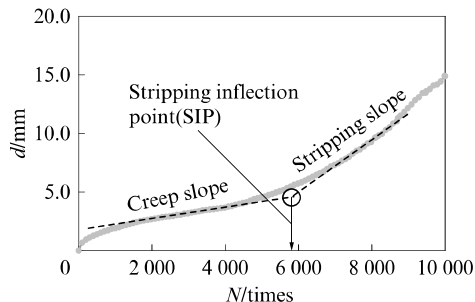


图2 浸水汉堡车辙试验结果

Fig. 2 Result of wet Hamburg wheel-tracking test

2 试验结果与分析

2.1 BBS 试验结果分析

2.1.1 SBS 对沥青内聚性能和黏附性能的影响

图3为SBS掺量对沥青内聚性能和黏附性能的影响。由图3可见:SBS改性沥青的内聚拉拔强度和黏附拉拔强度均低于基质沥青;当SBS掺量达到4.5%时,SBS改性沥青的拉拔强度才有一定的提升,接近于基质沥青,而当SBS掺量较高($\geq 6.0\%$)时,SBS改性沥青的内聚拉拔强度和黏附拉拔强度又呈现出下降的趋势。因此,4.5%是SBS改性沥青的最佳SBS掺量。

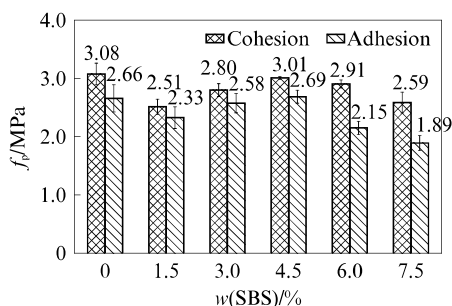


图3 SBS掺量对沥青内聚性能和黏附性能的影响

Fig. 3 Effect of SBS contents on asphalt cohesion and adhesion properties

BBS试验结果显示,从内聚拉拔强度的角度来看,SBS对沥青的内聚性能有不利影响,但多年的道路工程经验却表明,SBS改性剂能够明显改善沥青的抗松散能力。对这一现象,有以下2点解释:

(1)根据前期研究,在BBS试验中,当沥青膜厚度一定时,沥青样品的黏结强度会随着拉拔速率的上升而增加。沥青在常温下是黏弹性体,相较于基质沥青,SBS改性沥青在受力状态下的延迟弹性变形更为明显,延长了加载力从拉拔仪器传递到沥青内部所需要的时间,这导致了SBS改性沥青相对于基质沥青具有较低的被加载速率。因此利用BBS试验在测定SBS改性沥青的内聚拉拔强度时,存在着由于沥青的延迟变形而导致的拉拔强度降低现象,且随着SBS掺量的增加,这种效应愈加明显。然而在实际改性效果方面,SBS在沥青中聚集形成物理交联区域,并相互交织形成网状结构。这一网状结构会吸收基质沥青中的饱和分和芳香分而发生溶胀,同时与沥青形成较多的物理交联和缠绕,导致SBS嵌段共聚物链段伸张和取向的阻力增大,从而提高了SBS改性沥青的内聚力。因此,SBS掺量带来的正向效应与反向效应相互拮抗,导致了“沥青的内聚拉拔

强度随SBS掺量增加先上升后下降”这一结果。

(2)由于SBS改性沥青突出的弹性性能,在评价其内聚性能时,不应单纯从内聚拉拔强度的角度分析,还应当考虑在拉拔过程中其所能承受的拉力做功。在试验中观察拉拔仪采集的数据发现,基质沥青的拉拔强度在达到峰值后会立即降至零,破坏界面偏向于“脆断”;SBS改性沥青的拉拔强度在达到峰值后并不呈断崖式下降,而是呈“坡状”逐渐降至零,试验后的破坏界面呈现出部分沥青“拉丝”的状态。这表明SBS改性沥青试件在达到拉拔破坏值之后,依然能够承受一定的拉力荷载,说明相对于基质沥青,需要更多的外界拉力做功才能将SBS改性沥青试件完全破坏。

综上所述,SBS的掺入一方面会提高沥青的内聚力,另一方面会增加沥青的弹性性能,导致SBS改性沥青在受力时出现变形延迟现象。这二者相拮抗的作用效果造成了“SBS改性沥青的内聚拉拔强度随SBS掺量增加先提高后下降,但低于基质沥青”的现象。但从试件破坏所消耗的能量角度分析,SBS改性沥青在受到路面各向荷载时,能够更持久地抵抗荷载,耗散路面荷载的破坏能。因此,SBS的掺入提高了基质沥青的内聚性能,这与工程实践中得到的结论一致。

在黏附性能方面,SBS的掺入降低了沥青的黏附拉拔强度。根据沥青黏附理论中的“力学理论”,集料表面有粗糙的多孔结构,高温状态下的沥青能够进入这些孔隙中。当温度降低,沥青冷却硬化后,会在孔隙中形成“机械锚固力”。而SBS的掺入会造成沥青内部产生不同程度的团聚现象,使得沥青不易被石板表面的小孔隙所吸附。此外,相同加热条件下,SBS改性沥青的流动性明显弱于基质沥青,这也在一定程度上阻碍了沥青-集料的黏附过程,降低了沥青与集料实际接触的面积,从而导致了沥青黏附能力的下降。

2.1.2 胶粉对沥青内聚性能和黏附性能的影响

图4显示了多种掺量下传统橡胶沥青和TB胶粉沥青的内聚性能和黏附性能,以及这2种橡胶沥青的对比。由图4可见,橡胶颗粒的加入会降低沥青的内聚性能和黏附性能,并且随着掺量的增加,这种不利影响愈加明显。这是由于0.60 mm橡胶颗粒的粒径较大,在沥青中不易分散均匀,溶胀并不充分,降低了沥青的匀质性,且橡胶颗粒与沥青的结合较弱,降低了沥青的内聚力。橡胶颗粒对沥青黏附性能的不利作用主要有以下原因:沥青中胶质和沥青质含量越高,沥青-集料间的黏附

性越好,而橡胶颗粒在沥青中的溶胀发育不充分,橡胶带来的胶质含量提升并不明显;此外,橡胶颗粒本身并不具有黏附性,其存在又占用了本该被沥青覆盖的集料表面积,降低了沥青与集料黏附的可能性。因此,橡胶颗粒对沥青黏附性带来的负面影响抵消了其“胶质含量上升”的正面提升效

应,总体上呈现不利影响。在试验中可以观察到,经过 BBS 拉拔试验后的石板表面会附着部分橡胶颗粒,这进一步验证了橡胶颗粒的存在会对沥青-集料界面的黏附效应产生不利影响,在有水条件下,水更容易侵入到沥青-集料界面,从而加速了水损害的进程。

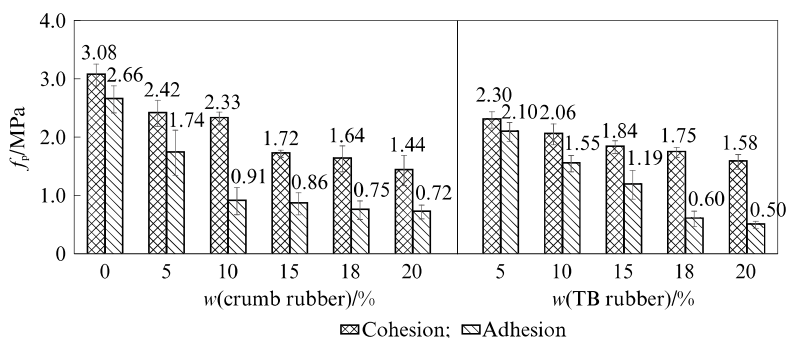


图4 橡胶颗粒掺量和 TB 胶粉掺量对沥青内聚性能和黏附性能的影响

Fig. 4 Effect of crumb rubber contents and TB rubber contents on asphalt cohesion and adhesion properties

对于 TB 胶粉沥青,其内聚性能和黏附性能也劣于基质沥青。即使高温剪切的制备方式使得 TB 胶粉沥青具有较好的稳定性和匀质性,但 TB 胶粉会导致沥青的低温劲度模量降低,其内部应力吸收的能力变差,抗变形能力不足。此外,在 TB 胶粉沥青制备过程中会产生炭黑,这些炭黑在沥青中分散较为均匀,会阻碍沥青被集料表面孔隙吸附的过程,从而造成 TB 胶粉沥青的黏附性能下降。

对比传统橡胶沥青和 TB 胶粉沥青的内聚性能可知,当二者均处于较低掺量($\leq 10\%$)时,橡胶沥青的内聚性能略微优于 TB 胶粉沥青,这是由于橡胶沥青黏度较大,相对于 TB 胶粉沥青有较高的内聚拉拔强度。当掺量较高($\geq 15\%$)时,橡胶沥青的内部匀质性下降明显,影响了其内聚拉拔强度,而 TB 胶粉沥青中的细小胶粉溶胀发育,与沥青的相容性较好,因此保持了较好的内聚性能。在黏附性能方面, TB 胶粉沥青明显优于传统橡胶沥青,这是因为在有水条件下,较大粒径的橡胶颗粒会增大水侵入沥青-集料界面的可能性,造成较低的黏附拉拔强度,且掺量越高,该现象越明显。

2.1.3 岩沥青对沥青内聚性能和黏附性能的影响

图 5 为不同掺量的岩沥青对沥青内聚性能和黏附性能的影响。由图 5 可见,相较于其他改性剂,岩沥青能够显著提高沥青的内聚性能和黏附性能,且掺量越高,提升效果越明显。岩沥青对沥青黏结性能具有优异改性效果的原因有二:

(1)岩沥青与基质沥青的化学成分相近,二者具

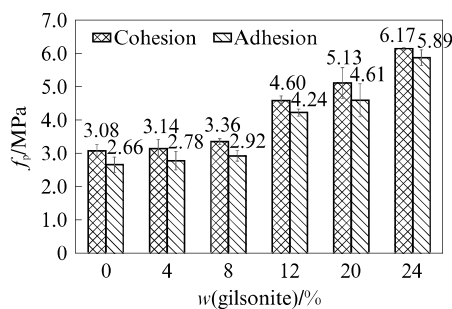


图5 岩沥青掺量对沥青内聚性能和黏附性能的影响

Fig. 5 Effect of gilsonite contents on asphalt cohesion and adhesion properties

有非常好的相容性,其极易与基质沥青形成稳定的体系;相比于其他改性剂,岩沥青在沥青中分散更均匀,性能也更为稳定。将沥青进行岩沥青改性,能够显著提高沥青的模量与黏度,改善沥青的内聚性能。

(2)岩沥青中含有较多金属元素与氮元素,具有较强的分子极性与浸润性^[14],同时能够提高沥青中的胶质含量和沥青极性。根据表面能理论,这使得沥青在与集料接触时,能形成更小的沥青-集料接触角,增大沥青与集料在黏附过程中的吸附面积,从而提高沥青的黏附性能。

综上,岩沥青能够同时改善沥青的内聚性能和黏附性能,起到非常好的抗剥落及抗水损害的效果。

2.1.4 PPA 对沥青内聚性能和黏附性能的影响

图 6 展示了不同掺量 PPA 对沥青内聚性能和黏附性能的影响。由图 6 可见,PPA 改性剂对沥青的内聚性能有轻微的提升效果。这是由于 PPA 能够

降低沥青的针入度,促进沥青的凝胶化^[15].而对于沥青在有水条件下的黏附性能,PPA 有较明显的有利影响,改性效果随其掺量的提高先上升后下降.根据沥青黏附性表面能理论,极性较强的沥青具有较大的表面能,在有水条件下,沥青从沥青表面剥落的可能性较低.已有研究^[16-17]表明,沥青在 PPA 改性过程中,其组分结构会发生变化,其中沥青质含量增加,使沥青的吸附极性得以增强,因此沥青-集料间的黏附性得到提高.根据图 6 中沥青的内聚拉拔强度和黏附拉拔强度随 PPA 掺量的变化情况,认为最佳 PPA 掺量为 0.4%.

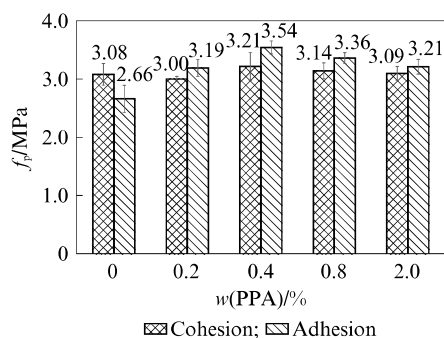


图 6 PPA 掺量对沥青内聚性能和黏附性能的影响

Fig. 6 Effect of PPA contents on asphalt cohesion and adhesion properties

值得注意的是,与上述其他改性沥青在干燥养护和潮湿养护条件下的对比结果相反,经过浸水养护后的 PPA 改性沥青试件的拉拔强度反而高于其在干燥养护条件下的拉拔强度,说明 PPA 能够降低沥青的水敏感性.可能的原因除了以上提到的“表面能理论”中沥青黏附极性的增强之外,还在于 PPA 带来的沥青酸性增强.根据沥青黏附性能的酸碱理论,酸性较强的沥青能够与集料形成更稳定的有效黏附.相比于其他改性剂,PPA 的酸性较强.利用 PPA 对沥青进行改性,能够明显提高沥青表面活性点的酸性,从而提高沥青与集料表面形成化学黏附的强度.

2.2 肯塔堡飞散试验和浸水汉堡车辙试验结果分析

本文对以上 BBS 试验测试的改性沥青,选取其常用掺量(或者推荐掺量),进行肯塔堡飞散试验和浸水汉堡车辙试验,以分别验证 BBS 试验在评价沥青混合料抗松散性能和抗水损害性能方面的准确性.选择 4.5% SBS 改性沥青、20% 橡胶沥青、15% TB 胶粉沥青、20% 岩沥青改性沥青及 0.4% PPA 改性沥青,用以制备沥青混合料试件.除了橡胶沥青混合料之外的其余混合料均采用相同级配 AC-13,沥青用量为 4.7%;对于 20% 橡胶沥青混合料,采用文献^[18]的技术规范,混合料级配采用 ARAC-13,该

级配与 SMA 级配类似(粗集料多、细集料少、矿料间隙率高、沥青用量高,呈骨架结构),但不同点是该橡胶沥青混合料的间断级配中不加矿粉,并严格控制 0.075 mm 档筛孔的通过率在 3% 以下,对于 0.075~2.36 mm 之间的通过率则不加控制^[19],沥青用量选用 6.5%.

利用肯塔堡飞散试验的质量损失指标来评价不同沥青混合料的抗松散能力;浸水汉堡车辙试验的剥落拐点(SIP)指标来评价不同沥青混合料的抗水损害能力,试验结果见图 7.

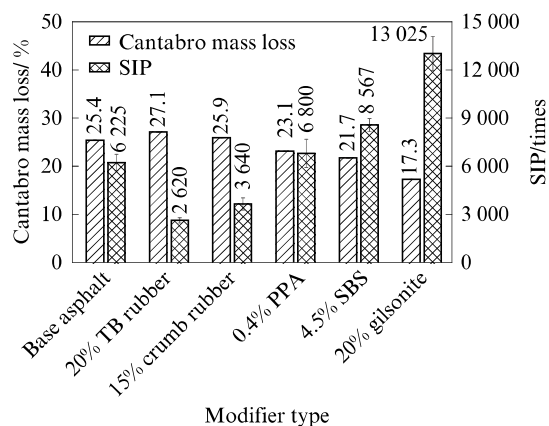


图 7 不同沥青混合料的肯塔堡飞散试验和浸水汉堡车辙试验结果比较

Fig. 7 Results comparison of Cantabro test and HWT test of different asphalt mixtures

将图 7 中基质沥青混合料与 5 种改性沥青混合料的试验数据进行对比,可以看出同种改性剂对于沥青混合料抗松散性能和抗水损害性能的作用效果基本一致.其中,岩沥青不但能够大幅提高沥青混合料的抗水损害性能,在改善沥青混合料抗松散性能方面也有显著效果,是本文所研究的 5 种改性剂中效果最显著的一类改性剂.此外,0.4% PPA 及 4.5% SBS 均能同时提高沥青混合料的抗松散性能和抗水损害性能,而 20% TB 胶粉和 15% 橡胶颗粒均会对沥青混合料抗松散性能和抗水损害性能造成不利影响,尤其是在抗水损害性能方面,20% TB 胶粉会造成沥青混合料抗水损害性能下降约 2/3.因此在实际应用工程中,对于降雨量较多的地区,应谨慎考虑 TB 胶粉沥青用量,或者掺入一定量的 SBS 改性剂进行复合改性,以确保能够满足沥青混合料在抗水损害方面的道路指标.综合以上对比,得到不同沥青混合料抗松散性能和抗水损害性能的排序为:20% 岩沥青改性沥青混合料>4.5% SBS 改性沥青混合料>0.4% PPA 改性沥青混合料>基质沥青混合料>15% 橡胶沥青混合料>20% TB 胶粉沥青

混合料。

2.3 沥青试验与混合料试验相关性分析

为了验证 BBS 试验在评价沥青材料抗松散性能和抗水损害性能方面的准确性,将基质沥青和 5

种改性沥青在干燥、潮湿养护条件下得到的 BBS 试验拉拔强度与 5 种沥青混合料的肯塔堡飞散试验质量损失指标、浸水汉堡车辙试验的剥落拐点指标进行相关性分析,结果见图 8。

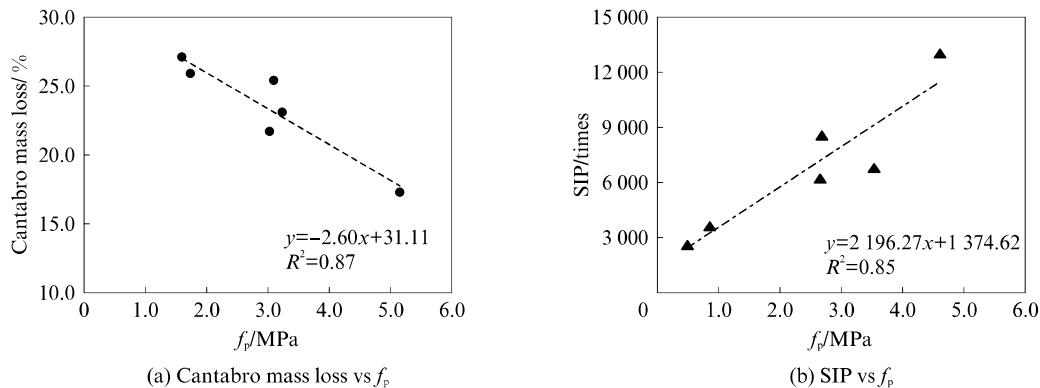


图8 BBS 试验拉拔强度与肯塔堡飞散试验质量损失指标及浸水汉堡车辙试验剥落拐点指标相关性分析
Fig. 8 Correlation analysis of pull-off tensile strength in BBS test and Cantabro mass loss index in Cantabro test and SIP index in HWT test

由图 8 可知,本文采用的沥青 BBS 试验与混合料肯塔堡飞散、浸水汉堡车辙试验数据之间具有良好的相关性。其中,干燥养护条件下的沥青内聚拉拔强度与肯塔堡飞散试验质量损失指标之间的线性相关系数达到 0.87,潮湿养护条件下的沥青黏附拉拔强度与浸水汉堡车辙试验的剥落拐点指标之间的线性相关系数达到 0.85,说明 BBS 试验能够较为准确地评价不同沥青的内聚抗松散性能和黏附抗水损害性能,并反映出相应沥青混合料上述 2 种指标之间的对比差异。鉴于 BBS 试验操作简单、试验器材价格相对于大型混合料设备较为低廉、试验周期短、数据稳定易得,在工程项目检测中,可以考虑将其作为检测沥青混合料抗松散性能和抗水损害性能的筛选试验。

3 结论

(1) 尽管从 BBS 试验的拉拔强度指标来看,SBS 改性剂并不能够改善沥青的黏结性能(由于沥青弹性增强带来的变形延迟导致),但从能量角度看,SBS 改性剂能够提升沥青的内聚性能,改善其承受荷载的能力。然而,由于 SBS 会阻碍沥青被石板表面的微小孔隙吸附,因此 SBS 改性剂对沥青的黏附性能具有不利影响。综合判断,SBS 改性剂的最佳掺量为 4.5%。

(2) 0.60 mm 粒径大小的橡胶颗粒与 TB 胶粉均会造成沥青内聚性能和黏附性能的下降。当其掺量较低($\leq 10\%$)时,相同掺量的橡胶沥青内聚性能

优于 TB 胶粉沥青;当其掺量较高($\geq 15\%$)时,由于橡胶颗粒粒径较大而导致橡胶沥青稳定性不足的劣势凸显,相同掺量的 TB 胶粉沥青反而具有较高的内聚拉拔强度。在抗水损害性能方面,TB 胶粉沥青优于橡胶沥青。

(3) 岩沥青能够显著提高沥青的内聚性能和黏附性能,掺量越高提升效果越明显。PPA 改性剂也能够提升沥青的内聚性能和黏附性能,且黏附性能的提升效果明显高于内聚性能,表明 PPA 改性沥青混合料具有较强的抗水损害性能和较低的水敏感性。根据试验结果,PPA 改性剂的最佳掺量为 0.4%。

(4) 根据沥青混合料肯塔堡飞散试验和浸水汉堡车辙试验,得到最佳掺量(或常用掺量)下不同沥青混合料抗松散性能和抗水损害性能的排序为:20%岩沥青改性沥青混合料>4.5% SBS 改性沥青混合料>0.4% PPA 改性沥青混合料>基质沥青混合料>15%橡胶沥青混合料>20% TB 胶粉沥青混合料。此外,肯塔堡飞散试验质量损失指标与干燥养护条件下沥青内聚拉拔强度、浸水汉堡车辙剥落拐点指标与潮湿养护条件下沥青黏附拉拔强度之间的相关性分析验证了本文中 BBS 试验方法在评价沥青内聚性能和黏附性能方面的准确性。

参考文献:

- [1] KANITPONG K, BAHIA H U. Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA [J]. Asphalt Paving Technology Association of Asphalt Pav-

- ing Technologists Proceedings of the Technical Sessions, 2003, 72: 502-528.
- [2] XU Z R, CHEN Z D, LIN J, et al. The research of shear property of SBS modified asphalt and aggregated rock [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030-1032: 932-939.
- [3] 董刚. 多聚磷酸及多聚磷酸/聚合物复合改性沥青的性能和机理分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- DONG Gang. Performance and mechanism of asphalt modified with polyphosphoric acid and polyphosphoric acid/polymer [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [4] GASKIN J. On bitumen microstructure and the effects of crack healing [D]. Nottingham, UK: University of Nottingham, 2013.
- [5] SEO A, SAKHAEIFAR M S, WILSON B T. Tackiness properties of non-tracking tack coats [C]//International Conference on Transportation and Development. Houston Texas, United States: Transportation & Development Institute of ASCE, 2016: 740-751.
- [6] CUI S, BLACKMAN B R K, KINLOCH A J, et al. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014, 54: 100-111.
- [7] ASTM D 4541 Standard. Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers [S]. 2009.
- [8] ZHOU L, HUANG W D. Evaluation of adhesion properties of modified asphalt binders with use of binder bond strength test [J]. Transportation Research Record, 2017, 2632(1): 88-98.
- [9] COPELAND A, YOUTCHEFF J, SHENOY A. Moisture sensitivity of modified asphalt binders: Factors influencing bond strength [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1998: 18-28.
- [10] CHATURABONG P, BAHIA H U. Effect of moisture on the cohesion of asphalt mastics and bonding with surface of aggregates [J]. Road Materials & Pavement Design, 2018, 19(3-4): 741-753.
- [11] 周璐, 黄卫东, 吕泉. 干湿条件下沥青自愈性能评价与机理分析 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 137-145.
- ZHOU Lu, HUANG Weidong, LÜ Quan. Evaluation and mechanism analysis of asphalt self-healing property under dry and wet conditions [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 137-145. (in Chinese)
- [12] 黄卫东, 吕泉, 柴冲冲. TB+SBS 复合改性沥青的性能 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 522-527.
- HUANG Weidong, LÜ Quan, CHAI Chongchong. Performance of TB+SBS composite modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3): 522-527. (in Chinese)
- [13] 张争奇, 罗要飞, 张苛. 沥青混合料汉堡车辙试验评价研究综述 [J]. 材料导报, 2017, 31(3): 96-105.
- ZHANG Zhengqi, LUO Yaofei, ZHANG Ke. Review on Hamburg wheel-track device evaluation of asphalt mixture [J]. Materials Reports, 2017, 31(3): 96-105. (in Chinese)
- [14] KÖK B V, YILMAZ M, GULER M. Evaluation of high temperature performance of SBS+Gilsonite modified binder [J]. Fuel, 2011, 90(10): 3093.
- [15] 张峰. PPA、硫磺对聚合物改性沥青老化性能影响的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- ZHANG Feng. Research on influence of PPA and sulfur on the aging performance of polymer modified asphalt [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [16] 张恒龙, 史才军, 余剑英, 等. 多聚磷酸对不同沥青的改性及改性机理研究 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 255-260.
- ZHANG Henglong, SHI Caijun, YU Jianying, et al. Modification and its mechanism of different asphalts by polyphosphoric acid [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 255-260. (in Chinese)
- [17] 马庆丰. 多聚磷酸改性沥青流变性能及改性机制研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 165-170.
- MA Qingfeng. Rheological properties and modification mechanism of PPA modified asphalt [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science), 2015, 39(6): 165-170. (in Chinese)
- [18] Florida Department of Transportation. Standard specifications for road and bridge construction [S]. Tallahassee, FL: [s. n.], 2010.
- [19] 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. (in Chinese)

(上接第 376 页)

- [23] LU X, ISACSSON U. Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens [J]. Construction and Building Materials, 1997, 11(1): 23-32.
- [24] 小野寺陵太郎, 黄木秀实, 伊藤達也. 排水性舗装のねじれ抵抗性に対するバインダ評価手法の一検討 [C]//土木学会第 59 回年次学術講演会. 豊田: 日本土木学会, 2004: 1101-1102.
- ONODERA R, OKI H, ITO T. Binder evaluation for reserve resistance of drainage pavement [C]//JSCE 59th Symposium. Toyota: Japan Society of Civil Engineers, 2004: 1101-1102. (in Japanese)
- [25] 上野貞治, 羽入昭吉, 小野寺陵太郎. 排水性舗装の耐久性に関する一検討 [C]//第 23 回日本道路会議一般論文集. 東京: 日本道路協会 1999: 42-43.
- UENO S, HANYU A, ONEDERA R. Durability of Drainage Pavement [C]//Proceeding of the 23rd Japan Road Conference. Tokyo: Japan Road Association, 1999: 42-43. (in Japanese)