

文章编号:1005-0523(2017)01-0052-09

有关 Terminal Blend 胶粉改性沥青研究的文献综述

黄卫东¹, 周 艳^{1,2}, 傅星恺¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 山东建筑大学交通工程学院, 山东 济南 250001)

摘要:在归纳国内外关于 TB 胶粉改性沥青研究报道基础上,分别从改性机理、制备工艺、改性效果的影响因素、高温性能、低温性能、抗疲劳老化性能以及储存稳定性这几个方面分析了 TB 胶粉改性沥青的特性。结论显示橡胶粉在高温强剪切条件下在基质沥青中会发生“脱硫降解”反应,胶粉溶解性增加,在沥青中形成较均匀的网状结构;TB 胶粉改性沥青的黏度小于普通橡胶沥青,低温性能提升而高温性能一般;TB 沥青具有出色的储存稳定性,复合改性后具有良好的应用开发前景。

关键词:TB 沥青;脱硫降解;改性效果;性能;复合改性

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.009

随着国民经济的迅速发展,带动人们生产生活水平的不断提高,生活节奏不断加快,人们对于出行的需求也在不断加大,汽车工业得到了飞速的发展,我国每年都会产生数百万条的废旧轮胎,加上之前累积的废旧轮胎,使我国面临非常严峻的废旧轮胎的处理问题。如何将废旧轮胎资源化、减量化、无害化,不仅关系到环境保护这一重要的社会问题,而且是保证我国国民经济可持续发展的重要前提。将废旧轮胎加工成胶粉,添加到沥青当中,不仅可以极大的改进沥青各个方面的使用性能,而且还可以缓解废旧轮胎带来的污染问题。多年的使用经验表明,橡胶沥青在高温稳定性、低温性能、抗老化性能、抗疲劳性能、水稳定性等方面都有明显地改善,同时由于橡胶沥青极大地提高了路面疲劳裂缝、反射裂缝的抵抗能力,从而增加了路面的耐久性。然而,橡胶体系当中胶粉掺量一般较大,拌合后大分子量的胶粉与沥青缺少充分的化学作用,大部分胶粉仅以溶胀的形式存在沥青之中,形成固液两相体系,经过长时间的高温存储之后,原本分散均匀的胶粉会出现一定的聚团沉析现象,即离析^[1]。由于橡胶沥青存储稳定性差、易离析,这极大地制约了橡胶沥青的使用。

Terminal Blend(TB)胶粉改性沥青近年来在美国首先投入使用的新型橡胶改性沥青^[2],制备方式为在高温高压环境下向沥青中加入高剂量的 30 目或更细的废旧橡胶粉,经过充分的脱硫降解反应形成。TB 改性沥青与普通橡胶沥青相比具有以下几个优点:

1) TB 胶粉改性沥青具有更加的施工和易性。首先其具有更低的黏度;TB 胶粉改性沥青的胶粉含量通车在外掺 5%~25%之间,不具有橡胶沥青高粘的特性^[3-6]。通过吕泉等人的试验^[7],TB 胶粉改性沥青黏度仅为 0.83 pa.s,与基质沥青相近,而普通橡胶沥青的黏度在 1.5~4 pa.s 之间,生产和施工上基本没有什么限制。

2) TB 胶粉改性沥青具有更好的贮存稳定性。Billite 的研究发现沥青和废胶粉的混合物通过高温、高剪切速率混合一段时间后橡胶会发生降解和脱硫,形成的体系为均相体系^[8]。而在普通橡胶沥青中,大部分橡胶粉在沥青中只是溶胀而没有降解和脱硫;黄卫东等人通过测试 TB 沥青的上下软化点和存储前后针入度之差发现,TB 沥青的测试结果均小于橡胶沥青相应差值的一半^[7],这表明 TB 沥青离析存储情况较橡胶沥青

收稿日期:2016-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51478351)

作者简介:黄卫东(1970—),男,教授级研究员,博士,博士生导师,主要研究方向为道路等机场工程。

要有所缓解,存储稳定性良好。

3) TB 胶粉改性沥青具有更好的低温性能。通过高速剪切作用,TB 胶粉颗粒得以进一步塑化和细化,且胶粉颗粒不易干涉混合料级配设计,从而为橡胶沥青用于密集配设计提供了可行性。李正中,宋晓燕等应用 GTM 力学设计方法,发现 GTM 设计的连续密级配综合性能(包括低温性能、抗车辙性、水稳定性等)均优于采用间断级配设计的橡胶沥青^[9]。柴冲冲通过 DSR 试验分析了 TB 胶粉改性沥青的劲度模量 S 和蠕变速率 m ,当胶粉掺量较高时(如 15%、20%时),低温分级可以达到 28℃,低温性能已得到明显改善^[1]。Elvira Joana Ferreira Peralta^[10],吕泉等学者^[7]均通过低温延度试验证明了 TB 胶粉改性沥青的低温延展性有了很大的提升。

同时,TB 胶粉改性沥青可以加入最高达 25%废旧橡胶粉,改性沥青的成本基本与普通沥青相近,远低于目前的 SBS 改性沥青。另外,由于其具有良好的疲劳性能,可用于半刚性路面及白加黑防治反射裂缝,可以使废旧轮胎变废为宝。鉴于疲劳开裂是沥青面层厚度的决定因素,如果从根本上改变了混合料的疲劳性能,这种混合料还可用于减薄沥青路面的结构厚度,这将会降低路面工程造价并延长路面寿命。

鉴于 TB 胶粉改性沥青的良好应用前景,笔者在阅读国内外相关研究资料的基础上,总结了 TB 胶粉改性沥青的各方面研究成果和进展,以便更好地了解 TB 沥青的改性机理,同时希望能为 TB 沥青的实际应用提供一些参考。

1 TB 胶粉改性沥青的机理研究

当前对 TB 胶粉改性沥青的机理还没有统一的说法,橡胶粉对沥青进行改性的机理与其他聚合物改性剂的机理不用,橡胶粉很难像其他聚合物均匀分布在基质沥青中。但是目前大多数研究显示废旧胶粉与沥青间的相互作用分为两种:

一种说法是:橡胶粉在基质沥青中吸收轻质组分发生溶胀,MaGdy^[11],Heitzman^[12],Green 等^[13],Bahia 等^[14]的研究指出:处于溶胀阶段的橡胶粉改性沥青,由于橡胶粉吸收了沥青中的油分,增加了橡胶粉的自由体积,改变了液相性质,使橡胶粉与沥青之间的自由空间减少,使体系的粘度增加,这是一种物理反应。Heitzman 研究认为把胶粉融入到沥青中的过程不是化学反应过程,仅是胶粉微粒在较高的温度下在沥青的油相中膨胀形成类似胶体状的物理过程^[15]。

另一种说法是:在较低温度下(180℃),溶胀作用是主要的,而在高温下脱硫降解是主要的,TB 改性沥青的机理趋向于用后者来解释。杨毅文,袁浩,马涛研究了脱硫橡胶溶胀原理,发现经过高温强剪切作用,橡胶粉中的硫键交联网络已经发生断裂,胶粉从弹性状态变成了塑性状态,因此在高温条件下沥青中轻质组分更容易进入到脱硫胶粉颗粒内部,使颗粒溶胀和溶解^[16]。从图 1 可见,反应后的脱硫橡胶大多以小的凝胶碎屑存在而无橡胶颗粒核;同济大学的吕泉等人采用 WQF-400 傅里叶变换红外光谱仪得到 TB 沥青与橡胶沥青的红外光谱数据图^[7],图 2 中 $2\ 920.57\text{ cm}^{-1}$, $2\ 815.33\text{ cm}^{-1}$ 为沥青中 $-\text{CH}_2-$ 伸缩振动产生,TB 沥青在该波段的吸收率明显小于橡胶沥青,说明 TB 沥青中轻质油分要比橡胶沥青少。 $1\ 590\text{ cm}^{-1}$ 波段反映的是 $\text{C}=\text{C}$ 的伸缩振动,TB 沥青在该波段的吸收率高于橡胶沥青,表明 TB 沥青中的 $\text{C}=\text{C}$ 键较多,橡胶粉完全融解于沥青。 $1\ 030\text{ cm}^{-1}$ 波段对应的是芳香族化合物或不饱和树脂,TB 的芳香族化合物少于橡胶沥青,表明 TB 胶粉吸收了沥青中的芳香油和轻质馏分。由此可见,TB 沥青中胶粉在高温剪切下发生脱硫降解,产生了大量的物理化学反应,而非单纯的溶胀,使沥青



(a) 普通橡胶沥青(从外到内依次为沥青、凝胶、橡胶颗粒核心) (b) 脱硫橡胶沥青(从外到内是沥青、凝胶)

图 1 TB 橡胶沥青和普通橡胶沥青颗粒对比图
Fig.1 Comparison of TB rubber asphalt and ordinary rubber asphalt particles

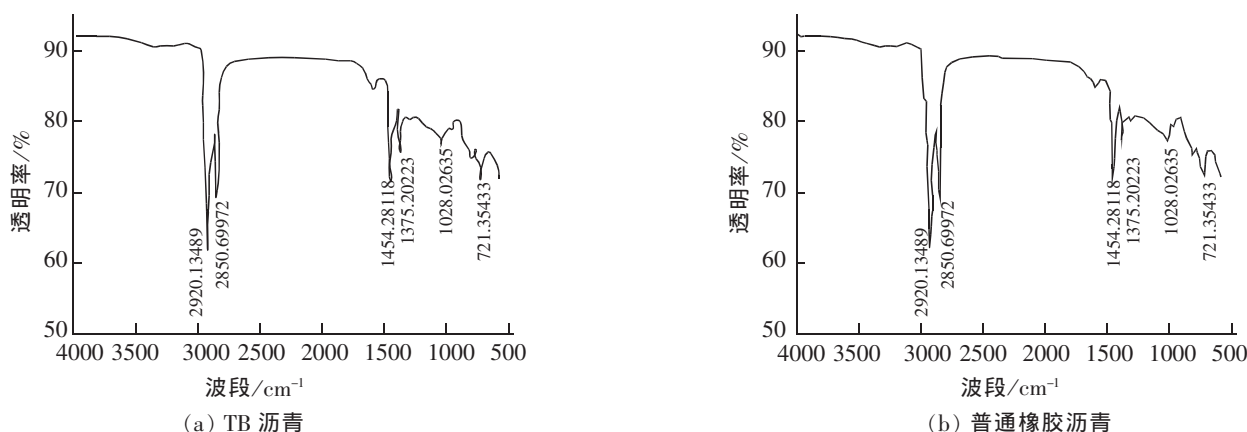


图2 TB 橡胶沥青和普通橡胶沥青红外光谱图

Fig.2 The infrared spectrum of the TB rubber asphalt and ordinary rubber asphalt

结合料中的化学成分发生了改变。

2 TB 胶粉改性沥青的制备工艺研究

关于 TB 胶粉的制备工艺,国内外已有较多的研究,TB 沥青的生产应用通常采用湿法工艺,及将胶粉与热沥青高温拌合后再与集料混合,在美国,橡胶沥青的湿法工艺^[17]又可分为 Continuous Blend 和 Terminal Blend,前者主要通过胶粉在热沥青中溶胀,后者则是脱硫降解得到一个近似均相体系。然而,Terminal Blend 工艺中废橡胶粉的掺加量一般小于 10%,某些情况达不到橡胶沥青混合料的粘度要求。按照 ASTM08-88 的要求,Terminal Blend 并不属于湿法工艺,因此 Greenbook 认为胶粉改性沥青应该分为三类,即湿法、干法和 Terminal Blend^[18]。

Saleem Khatta 和 Bob Syme 在研究中论述了 TB 胶粉改性沥青的工厂制备工艺,主要特点就是密闭、高温、强剪磨,且有以下优点^[19]: 不需要特殊设备; 不需要拌合; 不需要额外的储存设备; 方便使用成熟的传统工艺生产; 完全消除了胶粉和沥青在加热和拌合时可能存在的潜在问题; 避免了生产过程中污染气体的排放。

国内的研究主要集中在两方面,一方面是如何使橡胶粉在基质沥青中脱硫降解以及通过二次交联恢复部分弹性性能。脱硫方法有很多^[20],诸如水油法、油法、动态脱硫法、高速放热旋转法、热力学方法、分散再生法、超声波法以及目前正在开发研究的微生物脱硫法。张玉贞等介绍了一种通过胶体磨或高速剪切设备制备工厂化胶粉改性沥青的方法,即使用机械力切断交联键,提高其与沥青的相溶性,然后通过添加剂使其二次交联从而恢复部分网状结构,从而提高沥青的性能^[21]。凌晨等在胶粉中加入 2%~3% 的回收聚苯乙烯料 (PS) 颗粒和微量的有机酸酐、活化剂等物质,进行高温剪切挤压,然后按配比同基质沥青混合搅拌,在 190 °C 条件下进行强力胶磨剪切,生成废塑胶改性沥青^[22]。该废塑胶改性沥青在不搅拌、静止储存和槽车运输过程中具有不沉淀、不离析、不分层的优点。

另一方面是 TB 沥青的工厂化生产,有学者通过化学改性的方法或物理方法处理胶粉,例如利用微波或超声波的能量选择性切断硫硫键、硫碳键而不破坏碳碳键的微波降解技术^[23]和超声波再生技术^[24]以及利用线型或支化十二烷基苯磺酸、十三烷基苯磺酸改性胶粉^[25]。所得胶粉改性沥青的贮存稳定性明显提高,但是成本较高,不适宜工厂化生产。目前工厂化 TB 胶粉改性沥青一般采用较粗的沥青,采用胶体磨或高速剪切设备进行脱硫降解^[26]。

吕泉等人总结出:TB 沥青生产工艺采用很细的橡胶屑(40 目以下),无需搅拌,在高温(220 °C 以上)长时间(16 h)、高速剪切条件下进行。TB 沥青生产过程通车在炼制厂货沥青库的分装厂进行,成品可直接装入运输车进入施工现场,无需专门的生产设备;且 TB 沥青的生产是在密闭设备中,污染物可以集中处理^[7]。

3 TB 胶粉改性沥青改性效果的影响因素研究

Billiter 等研究发现高温、高剪切速率(如在 263 °C、4 000 rpm)加工处理可导致橡胶的溶解增加,改善沥青的低、中温流变性质,降低高温粘度;由于硫-硫键的热稳定性比碳-碳键的差,所以“脱硫”的潜力很大^[8]。Memon 等研究了高温和高剪切加工处理条件对胶粉改性沥青的“脱硫”和降解的影响,发现只用剪切过程就可改善胶粉改性沥青的温度敏感性;若在加热条件下(267 °C)剪切 2 小时,然后经胶体磨处理(228 °C、95 min),则能达到更好的降解和“脱硫”效果^[27]。但这些研究很少考虑高温、高剪切速率和较长的加工时间对改性沥青性能的影响。

Chipp 的研究^[28]认为较高的温度和较长的改性时间会导致胶粉改性沥青的过度降解,使改性沥青的物理性质受到影响,如弹性损失、氧化老化加重、粘合剂的硬化等等。

国内外对胶粉改性沥青的性能影响因素也进行了大量研究和论证,学者发现,剪切温度、沥青组分、胶粉掺入量、胶粉种类、加工条件均会对 TB 沥青的改性效果产生影响。张小英通过研究发现^[29],剪切时间和剪切速率对橡胶粉-沥青体系的性质影响很大程度取决于剪切温度,且 220 °C、2 000 转剪切 3 h 为脱硫降解的最佳剪切条件。叶智刚研究了剪切环境(速率、时间、温度)、沥青种类、胶粉种类对胶粉脱硫降解效果的影响得到在中等转速下(2 000~3 000 rpm),剪切速率的增大对于胶粉的脱硫降解是十分有效的,且胶粉降解程度与沥青中芳香分和沥青质含量分布呈正相关和负相关关系。

同济大学的柴冲冲通过 DSR 和 BBR 试验研究了 TB 胶粉掺量对改性效果的影响^[1],结果如表 1 所示。

由表 1 可得,随着胶粉掺量的增加,沥青的高温性能逐渐将,低温性能逐渐升高。当胶粉掺量较高时。如达到 15%,20%时,低温分级可以达到-28 °C,低温性能已经明显得到改善。但高温性能也下降到 58 °C。

总的来说,TB 胶粉改性沥青的性能影响因素可以归结为原材料特性和温度控制两大因素,无论是从原材料的选取或是在加工生产环节,TB 胶粉改性沥青都有比普通橡胶沥青生产更为严苛的控制标准和检验标准,这也为其性能的改良提供了保障。

表 1 不同胶粉掺量的 TB 沥青 PG 分级
Tab.1 The PG grade of TB asphalt with different crumb rubber content

胶粉掺量/%	PG 分级
5	PG64-22
10	PG58-22
15	PG58-28
20	PG58-28

4 TB 胶粉改性沥青的性能研究

近年来,国内外对 TB 胶粉改性沥青的性能研究主要集中在高温性能、低温性能,抗疲劳性能以及抗老化性能等方面。相关的性能测试无论是理论还是方式都较为成熟,大量的性能测试数据为 TB 胶粉改性沥青的。

4.1 疲劳性能

美国 UCPRC 用 HVS^[30]与 FHWA 用 ALF^[31]所做的加速加载试验表明 TB 胶粉改性沥青有优异的疲劳性能与抗反射裂缝能力。TB 胶粉改性沥青不同于目前常说湿法橡胶粉改性沥青(橡胶沥青),它克服了橡胶沥青存贮稳定性差的问题,是一种疲劳性能异常优异的新型改性沥青。如果 TB 胶粉改性沥青用于提高混合料的疲劳性能,并在混合料设计时采用合适的级配、更高的沥青用量、更小的空隙率及适当的混合料设计要求,会大幅度提高混合料疲劳性能,并因空隙率减小,混合料抗水损害能力得到改善,因增加沥青用量,层间粘结能力增强;低空隙率技术要求也会简化原有的混合料级配设计。

美国加州大学伯克利分校的 Tsai Bor-Wen 等人在进行溶解性胶粉改性混合料的疲劳试验时^[32],采用 7.1%的单一沥青用量;内达华大学的 Elie Y Hajj 等人在进行溶解性胶粉改性沥青混合料疲劳试验^[33]时,以控制孔隙率的方式成型构件,空隙率标准选定为 7%。可见很多美国研究者针对 TB 沥青及其混合料疲劳性

能的室内试验时,沥青用量、空隙率等关键指标的选择均有局限性,并不能全面反映TB沥青混合料的疲劳性能。

ALireza Zeinal 等人通过四点弯曲梁疲劳试验^[34]测试疲劳损坏时间对比了 Terminal Blend 胶粉改性沥青和聚合物改性沥青的抗疲劳性能,结果显示TR和PM改性沥青在各应力水平下具有相似的疲劳性能,TR的抗疲劳性能完全可以在更低的成本的条件下达到聚合物改性沥青的水平。另外,ALireza Zeinal 等人还使用重复剪切试验(RSCH)测试了TR和PM的抵抗永久变形的能力,表明在重复荷载的作用下,TR的永久应变数值较PM低^[34],表明TR的抵抗永久变形性能比PM要好。

国内的吕泉等人^[7]通过四点弯曲小梁疲劳试验并采用归一拟合的数值分析原理得到了TB沥青的疲劳方程,如表2所示。表中: NM 为归一化劲度次数积; N_f 为材料疲劳破坏次数; N_{jNM} 为当 NM 达到最大值的 N_f ,即为材料的疲劳破坏次数; ε 为应力控制条件下的疲劳应变变量; R^2 为相关系数。

从表2疲劳方程及相关系数可以看出,疲劳曲线的相关性均较好,表明疲劳数据准确性比较高。随着沥青用量的提高,沥青抵抗疲劳破坏的能力在增强,对应变量的变化的敏感性在减弱,能够承受更多的行车荷载波动。

4.2 低温性能

吕泉、黄卫东、柴冲冲采用低温延度试验,分析了TB胶粉改性沥青的低温性能,发现TB橡胶的加入可以很好的改善基质沥青的延展性问题^[7]。因为普通橡胶沥青是一种液固两相混合物状,经常由于没有充分搅拌或者搅拌后放置过久导致的体系不均匀,橡胶与基质沥青界面吸引力减弱,这会引起沥青延度的降低。而TB橡胶可以和沥青很好的相互混合,使得整体性增强,提高了体系的延展性。

Shakir Shatnawi^[35]和ALireza Zeinal 等人^[34]都在研究中证实,TB胶粉改性沥青有比普通橡胶沥青更低的黏度和更好的低温抗裂性能,后者通过DC(t)试验测定TB胶粉改性沥青的断裂能,如表3所示,显示TB沥青的断裂和聚合物改性沥青相近,且低温下损坏时间要高于聚合物改性沥青,表明其“低温韧性”更强,因此经过TB处理的胶粉可以为改性沥青提供甚至相比聚合物改性沥青更为优异的低温性能。

叶智刚^[20],Elvira Joana Ferreira Peralta^[10]等学者的研究也证实了类似结论。

表3 TB沥青和聚合物改性沥青直流断裂试验结果
Tab.3 Test results of DC of TB asphalt and polymer modified asphalt

种类	空隙率/%	断裂能/(J/m ²)		变异系数/%	峰值荷载/kN	峰值时间/s
		测试值	平均值			
TR-D1	6.8	786.5			3.2	17.5
TR-D2	7	813.3	758.1	10	3.4	13.5
TR-D3	7.2	647.5			3.1	8.5
PM-D1	7.1	751.1			3.6	10.5
PM-D2	7.1	775.4	750.2	3	3.7	15.5
PM-D3	7.5	724.2			3.6	16.5

4.3 高温性能

沥青混合料是一种粘弹性材料,其强度和模量都会随温度升高而急剧下降。随着对沥青混合料高温稳

定性能方面研究的不断深入,大多数国家认为用传统的马歇尔方法预估沥青混合料高温性能是不充分、不全面的,为此多采用车辙试验来评价沥青混合料的高温性能^[35]。

柴冲冲通过车辙试验评价了 TB 胶粉改性沥青的高温稳定性^[1],评价指标为动稳定度,如图 3 所示。

其研究结果发现胶粉的掺量会影响沥青混合料的高温稳定性,当胶粉掺量较低时,与基质沥青相比,TB 胶粉改性沥青的高温稳定性有所改善。但是 TB 胶粉改性沥青的高温性能与普通橡胶沥青相比欠佳。

吕泉等人^[7]的软化点和针入度试验表明 TB 胶粉改性沥青的高温性能一般,某些情况下不如普通橡胶沥青。由图 4,图 5 可得,随着胶粉掺量的增加橡胶沥青针入度逐渐降低,软化点升高;TB 沥青却与之相反,在软化点曲线中甚至出现了先降后升。同时,TB 沥青针入度始终高于橡胶沥青而软化点又低于橡胶沥青,反映橡胶沥青高温性能高于 TB 沥青。

杨毅文等人^[16]通过研究脱硫橡胶路用性能;叶智刚^[20]通过研究沥青—胶粉体系的脱硫降解均得到了类似的结论。

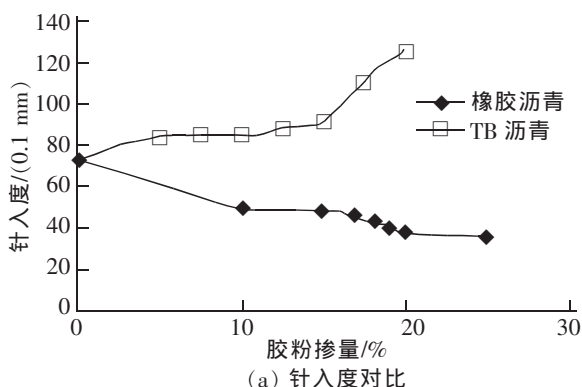


图 4 TB 沥青和橡胶沥青针入度对比

Fig. 4 Penetration contrast between TB asphalt and rubber asphalt

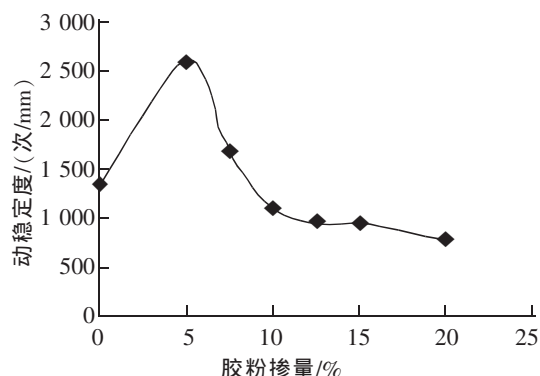


图 3 胶粉掺量对 TB 沥青动稳定度的影响

Fig. 3 The influence of TB powder content on the stability of the TB asphalt

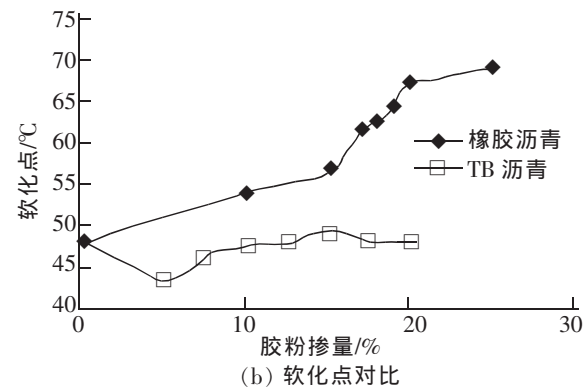


图 5 TB 沥青和橡胶沥青软化点对比

Fig. 5 Softening point contrast between TB asphalt and rubber asphalt

国外的 Shakir Shatnawi 通过测试 TB 胶粉改性沥青的性能^[35],可以得出如下结论,软化点:TR $\approx$ SBS<AR;针入度:SBS>TR $\approx$ AR。实验表明^[37],TB 沥青可以几乎可以达到聚合物改性沥青的 PG 分级标准,但是其高温性能相比橡胶沥青还是有一定的下降。对此大多数文献给出的建议是通过 TB 沥青进一步复合改性以扩大适用范围。对 TB 胶粉的复合改性也是当前针对 TB 胶粉改性沥青的重要研究方向。

5 TB 沥青的复合改性研究

TB 胶粉改性沥青的低温性能优异,高温性能一般,故为了扩大其适用范围,掺入其他改性剂进一步复合是针对 TB 胶粉改性沥青的重要研究方向,对此,国内外已经进行了深入研究,获得了许多有价值的数据和结论。

柴冲冲将 TB 沥青和 PE、岩沥青以及 SBS 复合,使用 SHRP 试验、低温延度试验、显微镜分析、表面能分析等方法分别评价了改性效果^[1]。主要结论如下:

1) 与 PE 改性沥青复合后, 针入度迅速下降; 复合沥青整体较软但表面坚硬, 离析现象较严重; 当油石比为 5% 时, 采用干法工艺与 PE 复合后高温性能突出。

2) 与岩沥青复合后, 高温性能明显改善, 同时低温性能有所降低。但由于 TB 胶粉改性沥青本身低温性能优越, 复核后 PG 低温分级仍可达到 -22 ℃; 溶解度比较高的岩 TB 性能比较稳定, 且高温性能比较好。

3) 与 SBS 复合后, 针入度明显下降; SBS 改性不但能够明显改性 TB 胶粉改性沥青高温性能, 同时对该沥青的低温性能基本没什么影响, 最大限度地保留了 TB 胶粉改性沥青低温性能突出的特点; SBS 与 TB 胶粉改性沥青的胶粉颗粒能够很好的融合在一起, 从而形成更为复杂更为密实的空间网络结构, 使该复合改性沥青性能更加突出, 更加稳定。

由于 TB 与 SBS 复合改性后显示的良好应用前景, 研究人员进一步测试了复合改性后的性能。黄卫东等人通过低温延度试验和弯曲梁流变试验, 利用数据回归分析对 TB 和 SBS 的低温性能进行了评价, 结果表明当两种改性剂复合改性时, 增加胶粉能有效提升沥青的低温塑性变形能力和低温流变性能^[37]; 另外, 在一定范围内增加 SBS 能提升低温塑性变形能力, 同时随着两种改性剂掺量的增多, 低温性能提升幅度逐渐降低^[37]。采用 TB 和 SBS 复合改性工艺可以在工程中显著降低成本。在 TB 沥青和 SBS 复合改性沥青疲劳性能的研究上, 同济大学的黄卫东等人通过四点弯曲疲劳试验机 BFA 对其疲劳性能进行研究, 并对 TB 沥青和 SBS 复合改性沥青混合料的高温性能进行了评价^[38], 结果显示, 在 4% 的设计空隙率下, TB 胶粉复合 SBS 改性沥青 AC13 的疲劳寿命均达到 SBS-AC13 疲劳寿命的 7 倍, 其自愈合能力高于 SBS-AC13, 且高温性能亦远优于 SBS-AC13。

此外, 卢晓明等采用高速剪切法制备不同配比(胶粉/SBS)的复合改性沥青, 用针入度、软化点、低温延度, 以及 RTFOT 后的质量损失、针入度比和延度评价其黏滞性、温度敏感性、塑性及老化性能, 认为 SBS 和胶粉添量分别占基质沥青的 4% 和 10% 时为最佳配比^[39]。

6 结论和展望

6.1 结论

1) TB 沥青具有内部结构稳定、低温延展性大、抗疲劳老化性能强、不易发生永久变形、不易离析分层等诸多优点。TB 胶粉改性沥青生产设备相对精简, 适宜进行工厂化生产, 相比普通橡胶沥青, TB 胶粉改性沥青可以在全封闭的设备中生产, 避免了污染排放。

2) 胶粉改性沥青疲劳性能优于普通基质沥青, 可以达到甚至优于聚合物改性沥青的水平, 考虑到 TB 沥青制备的成本, 可以在一定程度上代替聚合物改性沥青使用。

3) TB 胶粉改性沥青的高温性能相比普通橡胶沥青有不同程度的下降, 高温抗车辙能力随着胶粉掺量的变化产生波动, 制备时有一个最佳胶粉掺量的考虑。为了扩大其适用范围, 可以进行复合改性使用。

4) 基于 TB 的复合改性沥青具有良好的应用前景。TB 胶粉与 SBS 复合能在保证低温性能的情况下, 能增强改性沥青的高温性能。从经济性能方面考虑, TB 胶粉改性沥青与 SBS 复合改性后, 在达到同等高温性能的情况下, SBS 掺量大概为普通 SBS 改性沥青的 0.5 倍。岩沥青与 TB 胶粉改性沥青复合后, 高温性能提升明显, 低温性能相对于 TB 胶粉改性沥青而言有所下降, 但仍能满足我国大部分地区的工程需要。

6.2 展望

1) TB 沥青的改性效果受多方面因素的影响, 例如橡胶轮胎种类的多用性也会影响 TB 沥青的改性效果, 是否应该制定统一的标准来推广 TB 沥青的使用也是需要决策者和设计人员加紧考虑的问题。

2) TB 沥青的使用和传统橡胶沥青是有很大的关联性的^[41], 当前研究人员更多集中在 TB 沥青性能这一方面, 个人认为应该加强研究 TB 沥青相比橡胶沥青在生产工艺方面的研究, 将 TB 胶粉改性沥青在生产制备、中间运输、高温贮存方面的优势加以展现, 并将工艺的改进作为一个突破点反作用到其他改性沥青产品的制备中, 在保证理论研究的同时加强 TB 胶粉改性沥青的实用性建设。

参考文献:

- [1] 柴冲冲. TB 改性沥青及其混合料的评价与研究[D]. 上海:同济大学,2013.
- [2] SANTUCCI L. Rubber roads: waste tires find a home[J]. Pavement Technology Update,2009,1(2):2-5.
- [3] FLANIGAN T P. Process for liquefying tire rubber and product thereof;U.S. Patent 5492561[P]. 1996-2-20.
- [4] FLANIGAN T P. Process for producing tire rubber modified asphalt cement systems and products thereof;U.S. Patent 5397818[P]. 1995-3-14.
- [5] MEMON M. Homogeneous crumb rubber modified asphalt;U.S. Patent 5704971[P]. 1998-1-6.
- [6] 张建峰,宁爱民,郭皎河,等. 一种废橡胶粉改性沥青及其制备方法:中国,1609165 A[P]. 2005.
- [7] 吕泉,黄卫东,柴冲冲. Terminal Blending 橡胶沥青的特性与应用前景[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2014(4):51-55.
- [8] BILLITER TRAVIS CLARENCE. The Characterization of asphalt-rubber binder[J]. Section & Engineering, 1997,57(12):7624.
- [9] 李正中,宋晓燕,魏如喜,等. 橡胶沥青混合料基于 GTM 设计方法的级配研究[J]. 石油沥青,2009(2):33-37.
- [10] PERALTA E J F. Micro-analysis of physicochemical interaction between the components of asphalt mixtures with rubber[D]. Ames:Iowa State University,2013.
- [11] ABDELRAHMAN MAGDY. Engineering characterization of the interaction of asphalt with crumb rubber modifier (CRM)[J]. Fems Immunology & Medical Microbiology, 1996,28(2):97-104.
- [12] HEITZMAN M. Design and constuction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier[J]. Thorax, 1992,47(2):171-174.
- [13] GREEN E L, TOLONEN W J. Chemical and physical properties of asphalt rubber mixtures[J]. Perception & Psychophysics, 1982,6(6A):361-365.
- [14] BAHIA H U, DAVIES R. Effect of crumb rubber modifiers(CRM) on performance related properties of asphalt binders[J]. Asphalt paving technology, 1994,63:414-414.
- [15] HEITZMAN. State of the practice:Design and construction of asphalt paving materials with crumb-rubber modifier final report[J]. Asphalt Rubber, 1992,47(2):171-174.
- [16] 杨毅文,袁浩,马涛. 脱硫橡胶沥青溶胀原理及路用性能[J]. 公路交通科技,2012(2):35-39.
- [17] FONTES LPTL, PEREIRA AA, PAIS JC. Performance of wet process method alternatives:terminal or continuous blend[C]//Asphalt Rubber 2006 Proceeding, California, Jorge R Sousa, 2006:550-551.
- [18] PWS INC. Green book, Standard specifications for public works construction[S]. The City of San Diego, 2015.
- [19] KHATTAK S, SYME B. City of colorado springs tests terminal blend tire rubber asphalt[J]. APWA Reporter, 2009,76(7):66-69.
- [20] 叶智刚. 沥青—胶粉体系“脱硫”降解及再生的研究[D]. 太原:中国科学院山西煤炭化学研究所, 2006.
- [21] 张玉贞,刘延军. 一种胶粉改性沥青及其加工方法:北京,CN101104739[P]. 2008-01-16.
- [22] 凌晨,张可强,白琦峰,等. 废塑胶改性沥青及混合料技术参数研究[C]//南京:2009 国际橡胶沥青大会, 2009:23-28.
- [23] WICKS G G, SCHULZ R L, CLARK D E, et al. Microwave treatment of vulcanized rubber;US,US 6420457 B1[P]. 2002.
- [24] PELOFSKY A. Rubber reclamation using ultrasonic energy;US,US 3725314 A[P]. 1973.
- [25] STEVENS J L, SYLVESTER L M. Improved rubber modified asphalt cement compositions and methods;WO,WO 2004055115 A1[P]. 2004.
- [26] 张宏雷,李金亮,王仕峰,等. 工厂化胶粉改性沥青的开发与应用进展[J]. 公路,2011(10):199-203.
- [27] MEMON M S, YUNUS N, RAZAK A A. Some mechanical properties of a highly cross-linked, microwave-polymerized, injection-molded denture base polymer[J]. International Journal of Prosthodontics, 2001,14(3):214-218.
- [28] CHIPP J F, DAVISON R R, GLOVER C J. A model for oxidative aging of rubber-modified asphalts and implications to performance analysis[J]. Energy & Fuels, 2001,15(3):637-647.
- [29] 张小英. 废橡胶粉—沥青体系脱硫降解规律研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2002.
- [30] JONES D J, HARVEY J T, MONISMITH C L. Reflective cracking study, Davis, CA:University of California Pavement Research Center[R]. Summary Report UCPRC-SR-2007-01, 2007.
- [31] QI X, SHENOY A, AL-KHATEEB G, et al. Laboratory characterization and full-scale accelerated performance testing of crumb rubber asphalts and other modified asphalt systems[C]//Proceedings. Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, California, October 2006.

- [32] TSAI B W, JONES D, HARVEY J T, et al. Reflective cracking study: first-level report on laboratory shear testing[M]//University of California. Institute of Transportation Studies Working Paper, 2008.
- [33] HAJJ E Y, SEBAALY P E, HITTI E, et al. Performance evaluation of terminal blend tire rubber HMA and WMA mixtures—case studies[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2011, 80: 665–696.
- [34] ZEINALI A, BLANKENSHIP P B, MAHBOUB K C. Comparison of performance properties of terminal blend tire rubber and polymer modified asphalt mixtures[C]//T&DI Congress 2014@sPlanes, Trains and Automobiles. ASCE, 2014: 239–248.
- [35] SHATNAWI S. Comparison of rubberized asphalt binders; asphalt-rubber and terminal blend[C]//Shatec Engineering Consultants, LLC. EI Dorado Hills, CA 95762, 2011.
- [36] 王昌衡, 龚平, 卢少林. 沥青混合料车辙试验的影响因素分析[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(7): 152–153.
- [37] 黄卫东, 颜川奇, 刘少鹏. 溶解性胶粉改性沥青低温性能评价[J]. 建筑材料学报, 2016(6): 1–11.
- [38] 黄卫东, 郑茂, 黄明. 溶解性胶粉改性沥青混合料疲劳性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(10): 1543–1549.
- [39] 卢晓明, 周碧辉, 孙烈. 废胶粉-SBS 复合改性沥青路用性能的试验研究[J]. 物流工程与管理, 2009, 31(7): 117–118.
- [40] 姚城熙, 于新. 废胶粉对橡胶沥青性能的影响[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(5): 8–12.

Literature Review of Study on Terminal Blend Rubberized Asphalt

Huang Weidong¹, Zhou Yan^{1,2}, Fu Xingkai¹

(1. Key Laboratory of Road & Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250001, China)

Abstract: By reviewing domestic and foreign researches about Terminal Blend rubberized asphalt, this paper tries to analyze the properties of Terminal Blend rubberized asphalt from the perspective of the modification mechanism, preparation technology, the factors of modification effect, high temperature performance, low temperature performance, the fatigue performance and storage stability. It concludes that desulfurization and degradation reaction can occur when rubber powders suffer from high temperature and strong shear condition, which makes crumb powder solubility increase and promotes the forming of a uniform network structure in the asphalt. Meanwhile, the viscosity of TB asphalt is far lower than that of ordinary rubber asphalt and TB asphalt shows good performance at low temperature and excellent storage stability while the high temperature property is barely satisfactory. It maintains that with composite modification TB asphalt has a good application and development prospects.

Key words: Terminal Blend asphalt; desulfurization; the effect of modification; performance; composite asphalt

(责任编辑 姜红贵)