

文章编号:1007-9629(2023)10-1129-08

Terminal Blend 橡胶泡沫沥青制备及性能评价

温永*, 王祯国, 董永康, 裴建中, 张久鹏

(长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要:为弥补传统泡沫沥青高温稳定性和黏附性的不足,解决传统橡胶沥青发泡效果不理想的缺陷,对 terminal blend(TB)橡胶泡沫沥青进行了研究,探究了 TB 橡胶泡沫沥青发泡效果的影响规律,对其微观形貌与特征进行了表征,同时评估了 TB 橡胶泡沫沥青的高温性能、温度敏感性和黏度.结果表明:采用 TB 橡胶沥青制备泡沫沥青具备可行性;相比传统泡沫沥青, TB 橡胶泡沫沥青在温度敏感性降低的同时,还显著提升了高温性能和黏度;微观结果显示 TB 橡胶泡沫沥青的发泡过程仅为物理过程,而且受发泡温度和发泡用水量的影响,其中后者对整体发泡效果的影响更加明显;TB 橡胶泡沫沥青的最佳发泡温度为 160 °C、发泡用水量为 2.7%.

关键词:道路工程;泡沫沥青;terminal blend;发泡特性;膨胀率;半衰期;简化效能指数

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.011

Preparation and Performance Evaluation of Foamed Terminal Blend Rubberized Asphalt Binders

WEN Yong*, WANG Zhenguo, DONG Yongkang, PEI Jianzhong, ZHANG Jiupeng

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The foamed terminal blend(TB) rubberized asphalt binders were examined to address the deficiencies of common foamed asphalt binders' high-temperature stability and adhesion, as well as the shortcomings of their poor foamed effect. The influence law of foamed TB rubberized asphalt binders was comprehensively evaluated, and its microstructure and characteristics were characterized. At the same time, the high-temperature performance, temperature sensitivity, and viscosity of foamed TB rubberized asphalt binders were assessed. The results show that it is feasible to prepare foamed TB rubberized asphalt binders using TB rubberized asphalt binders. Compared to conventional foamed asphalt binders, the high-temperature performance and viscosity of foamed TB rubberized asphalt binders are significantly improved while the temperature sensitivity is reduced. The microscopic test results demonstrate that the foaming process of foamed TB rubberized asphalt binders is purely physical. In addition, the foaming performance of foamed TB rubberized asphalt binders is influenced by both foaming temperature and water consumption, but water consumption has a more pronounced effect on the overall foaming performance. The optimal foaming temperature for foamed TB rubberized asphalt binders is 160 °C, and the recommended foaming water consumption is 2.7%.

Key words: road engineering; foamed asphalt binder; terminal blend(TB); foaming performance; expansion rate; half-life; simplified efficiency index(SEI)

沥青路面再生技术是实现沥青路面废料再利用的有效途径,可避免环境污染,实现行业经济循环,

收稿日期:2022-11-29; 修订日期:2023-02-09

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB2600603,2021YFB2600600);中国博士后科学基金项目(2019M653521);江苏省住房和城乡建设厅科技项目(2022ZD099)

第一作者(通讯作者):温永(1984—),男,山西忻州人,长安大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:wy-1026@163.com

促进生态环境保护^[1-2]. 由于拌和温度和压实温度的降低,泡沫沥青再生混合料可减少30%以上的能耗和废气排放量^[3];但其服役期间常因高温稳定性和抗水损性能不足而发生病害^[4-6]. 目前,优化级配能够改善泡沫沥青再生混合料的高温稳定性,但无法明显改善水损害^[7],为此,研究人员添加橡胶或SBS等外加剂对泡沫沥青进行改性,该方法有效改善了泡沫沥青混合料的高温稳定性和抗水损害能力^[8-11].

由于橡胶沥青黏度偏高且存在橡胶颗粒,导致发泡困难.Yu等^[8]对橡胶泡沫沥青进行了研究,其中重点研究了发泡用水量的影响.Hu等^[12]为达到理想发泡效果,对橡胶沥青的发泡条件进行了研究.总之,如何有效降低橡胶沥青的黏度,提高橡胶颗粒的溶解程度,成为能否提升橡胶泡沫沥青发泡效果的关键.

近年来,通过高温、高速剪切促进橡胶发生脱硫酸裂解反应,以改善相容性,从而使其具备优越储存稳定性和工作和易性^[13-14]的terminal blend(TB)橡胶沥青逐渐兴起.TB橡胶沥青除了具备优异的高、低温

性能外,其黏度仅为普通橡胶沥青的1/5~1/7^[15-17]. 因此,采用TB橡胶沥青进行发泡处理不仅可提升泡沫沥青的性能,还可改善橡胶沥青发泡效果不佳的问题.

本文首先采用TB橡胶沥青制备泡沫沥青,利用扫描电镜(SEM)和傅里叶红外光谱(FTIR)试验分析TB橡胶泡沫沥青的微观特征;然后建立以膨胀率(β)和半衰期(t)为主要指标,简化效能指数(η_{SEI})为辅助指标的评价体系,并利用灰色关联法探究TB橡胶泡沫沥青发泡的关键影响因素,从而获得其最佳发泡条件;最后采用动态剪切流变仪(DSR)对其高温性能、温度敏感性和黏度等性能进行评价.

1 试验

1.1 原材料

本试验用基质沥青为茂名石化公司产东海70#沥青;TB橡胶沥青由基质沥青制备得到;废弃轮胎胶粉产自天津志新有限公司.基质沥青和TB橡胶沥青的基本性能见表1,胶粉的主要技术指标见表2.

表1 基质沥青和TB橡胶沥青的基本性能

Table 1 Main technical specifications of base asphalt binder and TB rubberized asphalt binder

Type of asphalt binder	Penetration at 25 °C/ (0.1 mm)	Ductility at 15 °C/cm	Softening point/°C	Viscosity/(Pa·s)	
				60 °C	135 °C
Base asphalt binder	67.0	>100.0	48.0	231.0	
TB rubberized asphalt binder	42.1	22.1	57.8		0.9

表2 胶粉的主要技术指标

Table 2 Main technical specifications of crumb rubber

Density/(g·cm ⁻³)	Sieve residue(by mass)/%	w (fiber)/%	w (carbon black)/%	w (rubber hydrocarbon)/%
0.298	7.1	0.1	30.0	59.0

1.2 TB橡胶泡沫沥青制备

本文通过定制的沥青改性装置制备TB橡胶沥青,采用WLB 10S型沥青发泡试验机进行发泡试验.TB橡胶泡沫沥青制备流程如图1所示.

1.3 试验方法

1.3.1 沥青发泡效果评价

采用膨胀率(β)、半衰期(t)和简化效能指数(η_{SEI})来评价沥青发泡效果. β 为泡沫沥青最大体积与泡沫完全消失时的体积之比. t 为泡沫沥青从最大膨胀体积衰减到1/2体积所对应的时间. η_{SEI} 按照式(1)或式(2)进行计算,其中式(1)适用于泡沫持续膨胀至最大体积,继而逐渐衰减的情况;式(2)适用于泡沫喷出后已膨胀至最大体积,继而泡沫发生破灭的情况.

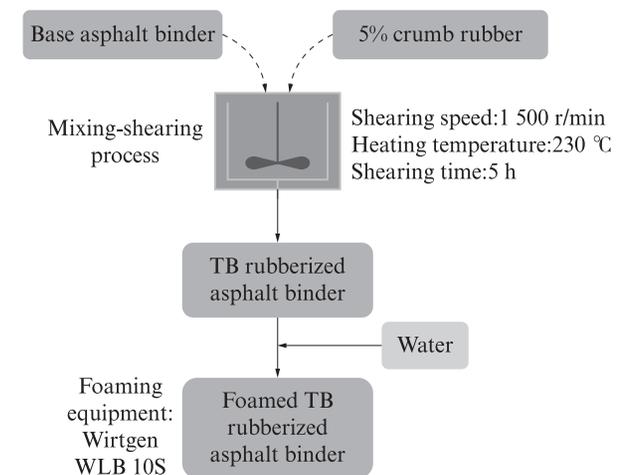


图1 TB橡胶泡沫沥青制备流程图

Fig. 1 Flow chart for preparation of foamed TB rubberized asphalt binder

$$\eta_{SEI} = \frac{1}{2} \times [(\beta_i - \beta_1) + (\beta_{max} - \beta_1)] + \frac{1}{2} \times (\beta_{max} - \beta_1) \times (t_1 - t_2) \quad (1)$$

$$\eta_{SEI} = \frac{1}{2} \times (\beta_{max} - \beta_1) \times t_1 \quad (2)$$

式中: β_i 为初始膨胀率; β_1 为容许膨胀率; β_{max} 为最大膨胀率; t_1 为衰减期, s; t_2 为膨胀期, s.

利用灰色关联分析法对沥青发泡性能的影响因素进行显著性分析, 以确定影响泡沫沥青的关键因素, 其中参考数列选取 β 、 t 和 η_{SEI} 这 3 个指标, 比较数列代表各个影响因素.

1.3.2 沥青发泡试验

选取发泡温度 155、160、165、170 °C, 发泡用水量 1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%, 在水压 0.6 MPa 和气压 0.5 MPa 条件下, 利用 WLB 10S 型沥青发泡试验机分别对基质沥青和 TB 橡胶沥青进行发泡. 每组试验对沥青的 β 、 t 和 η_{SEI} 进行 3 次平行试验, 取其平均值, 并确定最佳发泡条件.

1.3.3 微观特征表征

采用美国 FEI NOVA NANOSEM 230 型场发射扫描电镜 (SEM) 分别对基质沥青、TB 橡胶沥青和最佳发泡条件下的基质泡沫沥青、TB 橡胶泡沫沥青进行 SEM 试验, 以表征不同沥青的微观形貌. 此外, 采用 Bruker Tensor 27 傅里叶红外光谱仪 (FTIR), 对上述 4 种沥青进行红外扫描, 测量波数范围为 4 000~1 000 cm^{-1} , 波数精度为 0.01 cm^{-1} , 光谱分辨率优于 1 cm^{-1} .

1.3.4 泡沫沥青性能评价

借助 Anton Paar MCR102 型动态剪切流变仪 (DSR) 分别对基质泡沫沥青和 TB 泡沫沥青的高温性能、温度敏感性和黏度进行评价. 由于泡沫沥青中的水分残余会对其高温性能、黏度等产生一定影响, 为确保试验结果更加明显, 选用更具代表性的 2%、3%、4% 这 3 种发泡用水量进行探究. 首先, 在 40~80 °C 下, 以 5 °C 为间隔对沥青进行温度扫描试验, 获得不同温度下沥青的车辙因子 ($G^*/\sin \delta$), 以评价高温性能; 其次, 基于上述结果, 采用储能模量 (G') 对数与温度 (T) 对数的斜率表征泡沫沥青的温度敏感性; 最后, 在 40~100 °C 下, 以 10 °C 为间隔进行温度扫描试验, 借助复数黏度来表征泡沫沥青的黏度特征. 需要说明的是, DSR 试验均采用应变控制模式, 应变值均在沥青线性黏弹性范围内.

2 结果与分析

2.1 发泡结果分析

2.1.1 发泡用水量

发泡用水量是沥青发泡的关键因素之一, 采用 β 、 t 和 η_{SEI} 探究发泡用水量对沥青发泡效果的影响, 结果见图 2. 由图 2 可见: (1) 基质泡沫沥青和 TB 橡胶泡沫沥青的 β 随着发泡用水量的增加呈明显上升趋势, 且上升速率随发泡用水量增加逐渐变缓. (2) 基质泡沫沥青和 TB 橡胶泡沫沥青的 t 随着发泡用水量的增加呈明显下降趋势, 且下降速率随发泡用水量增加逐渐变缓. (3) TB 橡胶泡沫沥青的 β 和 t 均低于同条件下的基质泡沫沥青, 表明废旧胶粉的添加在一定程度上影响沥青的发泡效果. (4) 随着发泡用水量的增加, 2 种泡沫沥青的 η_{SEI} 总体呈先增后降趋势, 在发泡用水量为 2.5%~3.5% 时达到峰值, 此时 β 和 t 均接近或满足 JTG/T 5521—2019《公路沥青路面再生技术规范》要求 ($\beta \geq 10$, $t \geq 8$ s). 综上所述, 2 种沥青在 2.5%~3.5% 发泡用水量情况下, 可获得相对优异的发泡效果.

2.1.2 发泡温度

发泡温度是沥青发泡的另一关键因素, 也采用 β 、 t 和 η_{SEI} 对其进行评价, 结果见图 3. 由图 3 可见: (1) 随着发泡温度的升高, 2 种泡沫沥青的 β 和 t 呈现相似的规律, 均为先增后降, 且最大值多集中于 160 °C. (2) 随着温度的升高, 2 种泡沫沥青的 η_{SEI} 总体上呈先增后减趋势, 并均在发泡温度为 160 °C 时达到最大值, 此时 β 和 t 均接近或满足 JTG/T 5521—2019《公路沥青路面再生技术规范》要求 ($\beta \geq 10$, $t \geq 8$ s). 然而, 相对于 165 °C, 部分 TB 橡胶泡沫沥青在 170 °C 时的 η_{SEI} 呈水平或微上升趋势, 这是由于泡沫喷出后已膨胀至最大体积, 继而泡沫发生破灭, 因此需利用式 (2) 进行计算. 整体结果表明, 2 种沥青在 160 °C 下发泡, 均可获得相对优异的发泡效果.

2.2 影响因素分析

基于发泡试验结果, 利用灰色关联分析法对发泡用水量和发泡温度进行显著性分析, 定量分析 2 种影响因素的重要性. 根据发泡用水量 (质量分数) 和发泡温度的单因素结果可知, 发泡用水量和发泡温度过高或过低均难以生产优质泡沫沥青. 因此, 在进行影响因素显著性分析时, 将发泡温度选为 155、160、165 °C, 发泡用水量选为 2.5%、3.0%、3.5%, 灰色关联度的计算结果见表 3. 由表 3 可知, 发泡用水量对 β 的影响程度更大, 发泡温度对 t 的影响程度更显著, 但综合考虑 η_{SEI} 后发现, 发泡用

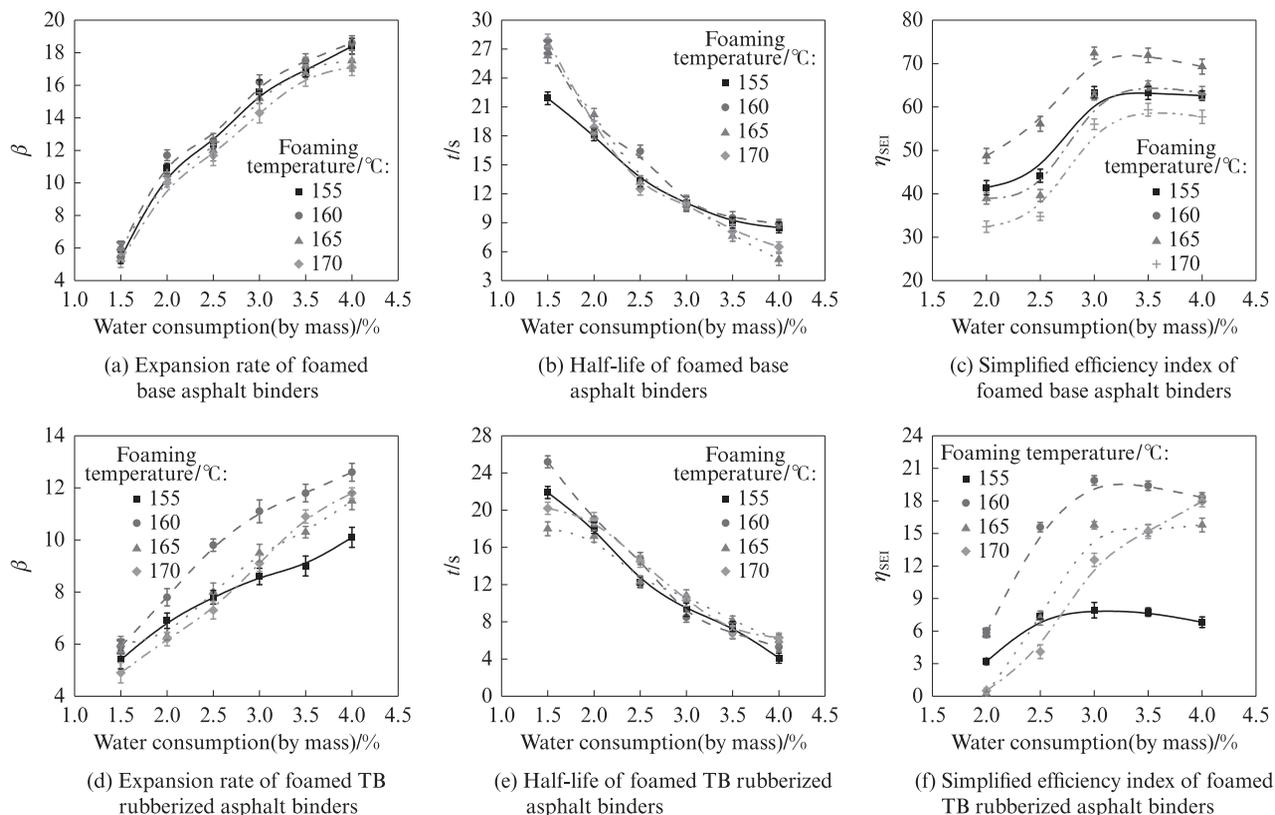


图2 不同发泡用水量下泡沫沥青发泡结果

Fig. 2 Foaming results of foamed asphalt binders under different water consumptions

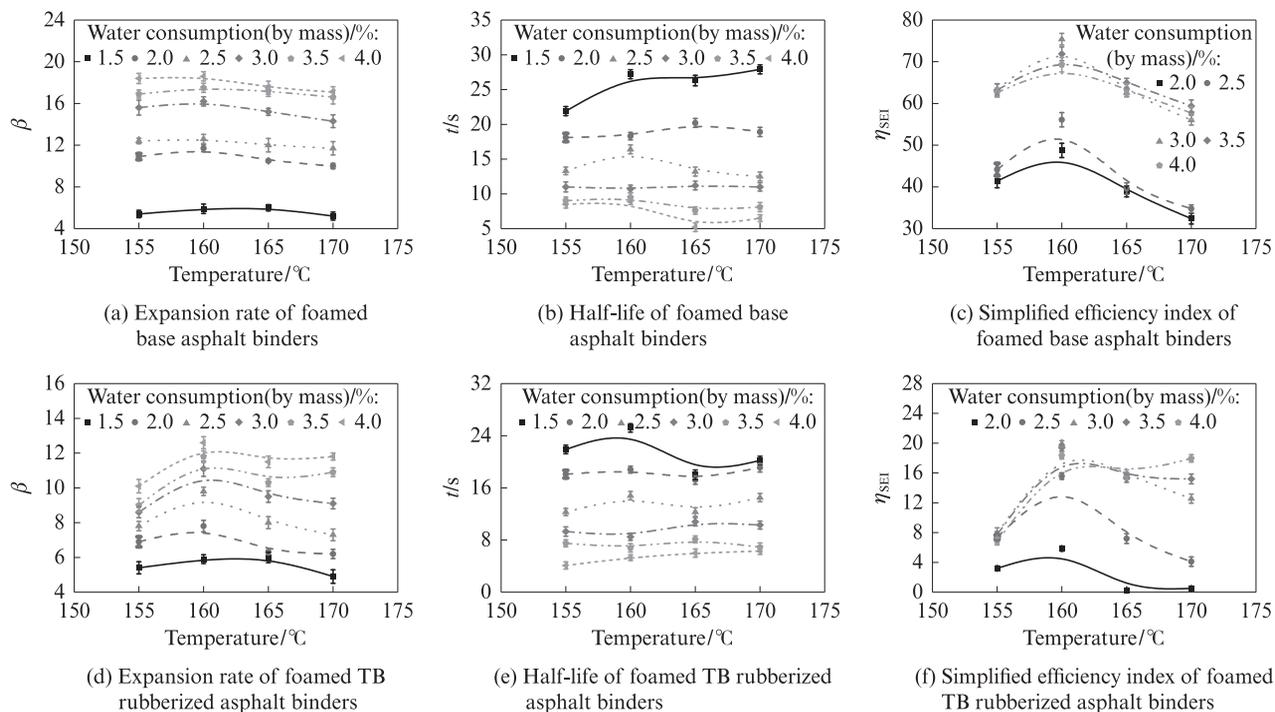


图3 不同温度下泡沫沥青的发泡结果

Fig. 3 Foaming results of foamed asphalt binders under different temperatures

水量对沥青整体发泡效果的影响更加显著.

2.3 最佳发泡条件确定

沥青发泡结果显示,基质泡沫沥青和TB橡胶泡沫沥青的最佳发泡温度均为160 °C.另外,根据JTG/

T 5521—2019《公路沥青路面再生技术规范》中最佳发泡条件的确定方法,得到最佳发泡用水量,结果如图4所示.由图4可见,将基质泡沫沥青和TB橡胶泡沫沥青的最佳用水量分别取为2.9%和2.7%,该值

表3 灰色关联度的计算结果
Table 3 Calculation results of grey correlation degree

β		t		η_{SEI}	
Temperature	Water consumption	Temperature	Water consumption	Temperature	Water consumption
0.614 6	0.657 8	0.717 5	0.608 4	0.502 7	0.540 4

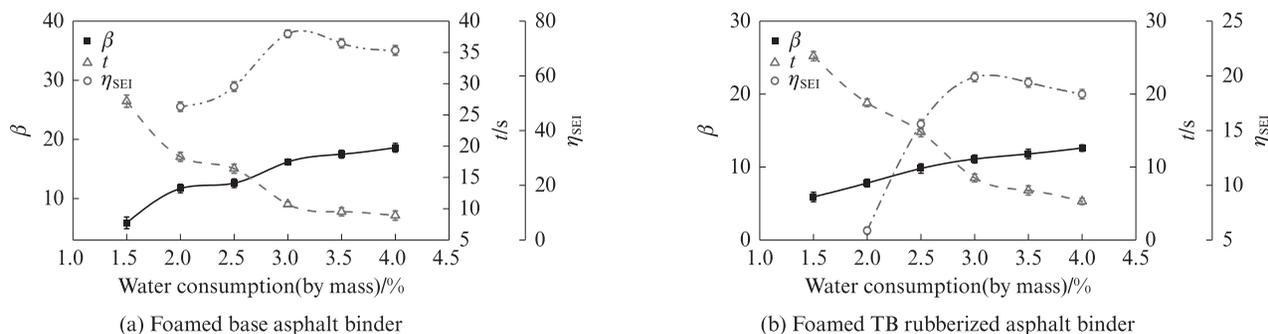


图4 泡沫沥青最佳发泡用水量确定

Fig. 4 Determination of optimum water consumption of foamed asphalt binders

符合规范要求,可满足生产实践.

2.4 微观形貌与特征

通过SEM试验表征基质沥青、TB橡胶沥青和最佳发泡条件下基质泡沫沥青、TB橡胶泡沫沥青的微观形貌,如图5所示.由图5可见:基质沥青整体较为平整,呈均相结构;基质泡沫沥青表面依然平整,

表面存在少许孔洞,这些孔洞主要是发泡过程中水分迅速蒸发所致;TB橡胶沥青中存在微小的胶粉颗粒,均匀分散于沥青中,且未溶解胶粉颗粒的粒径均在50 μm以下;TB橡胶泡沫沥青的微观形貌包含水泡、气泡、胶粉颗粒,部分水分以游离水的状态存在,使得泡沫沥青的黏度下降.

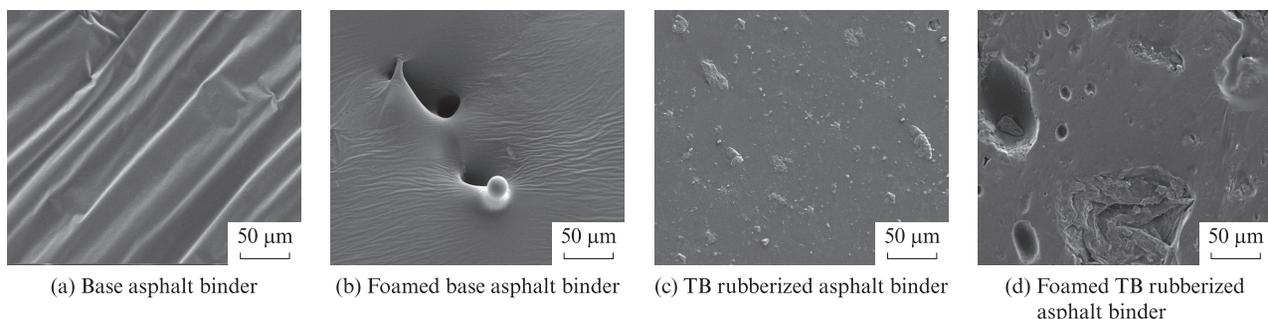


图5 4种沥青的扫描电镜照片

Fig. 5 SEM images of four kinds of asphalt binders

图6为4种沥青的FTIR图谱.由图6可见:4种沥青的主要官能团大致相同,均集中在1800~1000 cm⁻¹范围内,其中1024、1248 cm⁻¹处出现由醚类C—O—C伸缩振动引起的吸收峰,1450 cm⁻¹处苯环骨架振动引起的吸收峰,及1715 cm⁻¹处羰基伸缩振动引起的吸收峰;4种沥青均在2960 cm⁻¹附近吸收峰加强,这是由于烷烃类CH₃的C—H反对称伸缩振动;相比基质沥青,TB橡胶沥青的峰值强度明显增强,可能是由于橡胶溶解后,碳氢化合物含量增加而导致;沥青发泡前后主要官能团大致相同,并未产生新的官能团,水分仅作为自由水存在于沥青中.

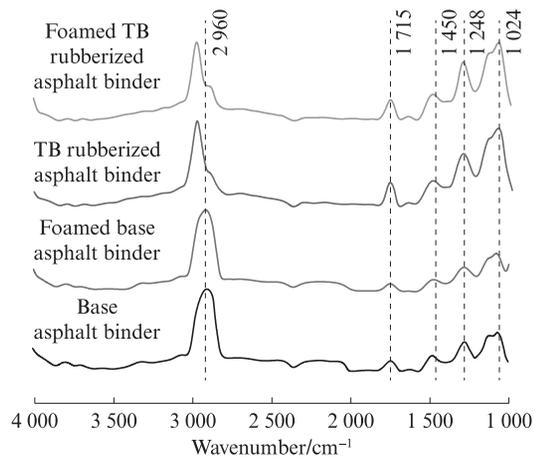


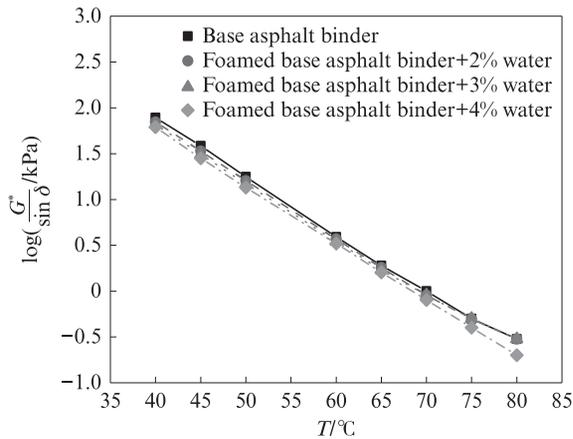
图6 4种沥青的FTIR图谱

Fig. 6 FTIR spectra of four kinds of asphalt binders

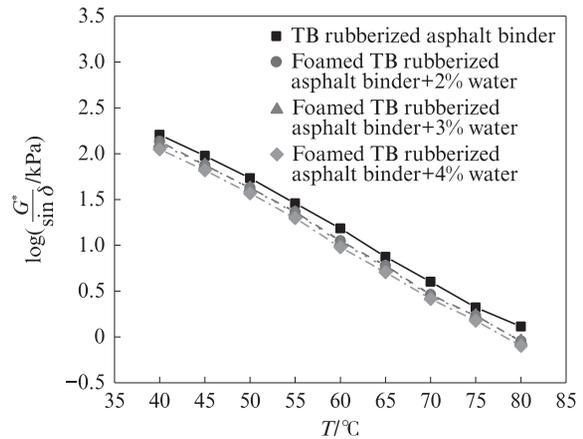
2.5 高温性能评价

将发泡用水量为2%、3%、4%，发泡温度为160℃条件下的基质泡沫沥青、TB橡胶泡沫沥青，在室温(20℃)下放置30 min，待泡沫沥青凝固后进行DSR试验；而基质沥青和TB橡胶沥青直接取样进行DSR试验。4种沥青均采用 $G^*/\sin \delta$ 评价各沥青的高温性能。

4种沥青的车辙因子与温度关系如图7所示。由图7可见：4种沥青的车辙因子均随温度升高而逐渐降低，且TB橡胶沥青及其泡沫沥青的高温性能均显著优于基质沥青及其泡沫沥青；随着发泡用水量的增加，2种泡沫沥青的车辙因子均呈下降趋势，但下降程度并不明显，究其原因可能是水分会软化沥青，在一定程度上影响其高温性能。



(a) Base asphalt binder and foamed base asphalt binders



(b) TB rubberized asphalt binder and foamed TB rubberized asphalt binders

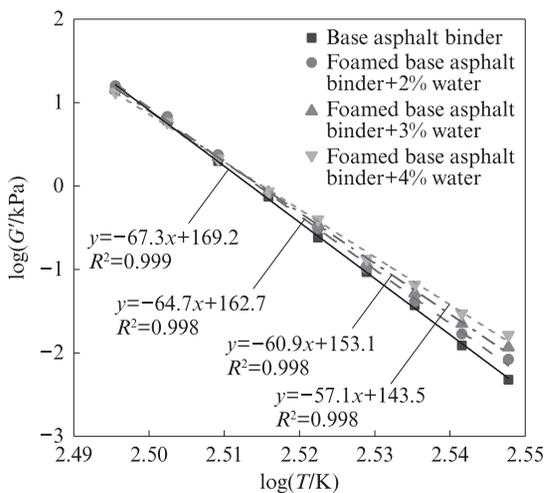
图7 4种沥青的车辙因子与温度关系

Fig. 7 Relationship between rutting factor and temperature of four kinds of asphalt binders

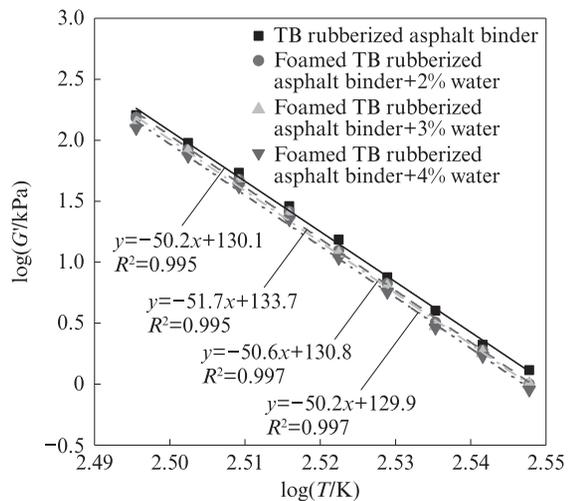
2.6 温度敏感性评价

4种沥青采用与高温性能测试相同的处理方法进行DSR试验，基于测试结果绘制4种沥青的储能模量(G')与温度(T)对数($\log G' - \log T$)关系曲线，结果见图8。采用图8中的拟合直线斜率表征沥青的温度敏感性，斜率绝对值越小，温度敏感性越小。由图8可见：(1)随着发泡用水量的增加，基质泡沫沥青的

拟合直线斜率绝对值呈下降趋势，且下降幅度几乎一致，表明发泡用水量的增加有助于降低泡沫沥青的温度敏感性。(2)就TB橡胶泡沫沥青而言，当发泡用水量从0%增加到2%时，其拟合直线斜率绝对值呈增大趋势；当发泡用水量大于2%后，拟合直线斜率绝对值呈减小趋势，表明水分的加入会稍微增加TB橡胶沥青的温度敏感性，但随着发泡用水量的增



(a) Base asphalt binder and foamed base asphalt binders



(b) TB rubberized asphalt binder and foamed TB rubberized asphalt binders

图8 4种沥青的温度敏感性分析

Fig. 8 Temperature sensitivity analysis of four kinds of asphalt binders

加, TB橡胶泡沫沥青的温度敏感性缓慢降低。(3) TB橡胶泡沫沥青的拟合直线斜率绝对值均远小于基质泡沫沥青, 表明采用TB技术制备泡沫沥青可显著降低泡沫沥青的温度敏感性。

2.7 黏度评价

4种沥青采用与高温性能测试相同的处理方法进行温度扫描试验, 基于测试结果绘制4种沥青的黏温曲线, 如图9所示。由图9可见:(1)基质泡沫沥青和TB橡胶泡沫沥青的黏度均随着温度的升高而降低, 且在相同温度下随着发泡用水量的增加而降低, 表明发泡过程中, 水的存在会降低沥青的黏度, 但降低幅度并未随水分增多而持续增大。(2)随着温度

的上升, 不同发泡用水量下基质泡沫沥青与TB橡胶泡沫沥青的黏度差逐渐减小, 表明泡沫沥青中残余水分不断蒸发。(3) TB橡胶沥青和TB橡胶泡沫沥青之间的黏度随温度上升始终保持一定的差值, 而非像基质沥青和基质泡沫沥青之间黏度差逐渐趋于零。这可能是由于TB橡胶沥青在发泡时, 减弱或破坏了TB橡胶沥青中胶粉形成的部分网状结构, 因此TB橡胶泡沫沥青黏度低于TB橡胶沥青。在同等发泡用水量和温度条件下, TB橡胶泡沫沥青黏度均远大于基质泡沫沥青, 表明TB橡胶泡沫沥青可提高与集料之间的黏附力, 增强泡沫沥青的抗水损害能力。

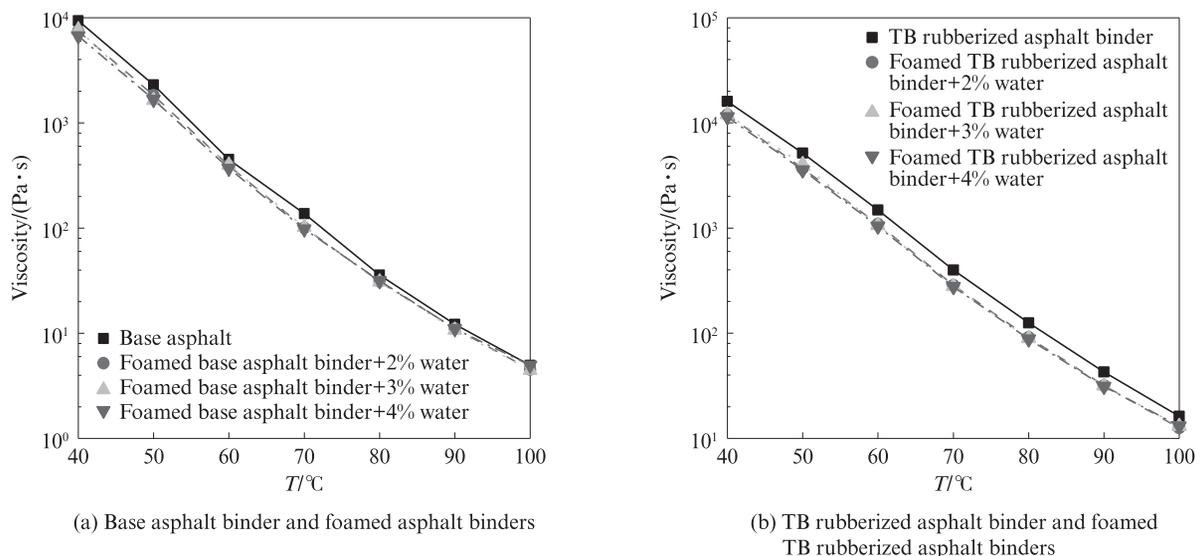


图9 4种沥青的黏温曲线

Fig. 9 Viscosity-temperature curves of four kinds of asphalt binders

3 结论

(1) TB橡胶泡沫沥青受发泡温度和发泡用水量的影响规律与基质泡沫沥青基本一致。灰色关联分析结果表明, 发泡温度对沥青半衰期的影响程度更大, 发泡用水量对沥青膨胀率和整体发泡效果的影响程度更显著。

(2) 基质泡沫沥青和TB橡胶泡沫沥青的最佳发泡条件分别为发泡温度160°C、发泡用水量2.9%和发泡温度160°C、发泡用水量2.7%。

(3) 与基质泡沫沥青相比, TB橡胶泡沫沥青在降低温度敏感性的同时, 还可以提升高温性能和黏度。

参考文献:

[1] GUATIMOSIM F V, VASCONCELOS K L, BERNUCCI L

L, et al. Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(2):385-399.

[2] VIDAL R, MOLINER E, MARTÍNEZ G, et al. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 74:101-114.

[3] ALMEIDA-COSTA A, BENTA A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112:2308-2317.

[4] HASAN M R M, YOU Z P, YANG X. A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152:115-133.

[5] LI Z G, HAO P W, LIU H Y, et al. Effect of cement on the strength and microcosmic characteristics of cold recycled mixtures using foamed asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230:956-965.

[6] 李秀君, 拾方治, 田原. 施工气温对泡沫沥青冷再生混合料性

- 能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2):289-293, 305.
- LI Xiujun, SHI Fangzhi, TIAN Yuan. Effect of construction temperature on properties of cold recycling mixture with foamed bitumen [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 289-293, 305. (in Chinese)
- [7] KAVUSSI A, HASHEMIAN L. Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2012, 13(5): 415-423.
- [8] YU X, LENG Z, WANG Y, et al. Characterization of the effect of foaming water content on the performance of foamed crumb rubber modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67:279-284.
- [9] ZHANG S W, WANG D Y, GUO F, et al. Properties investigation of the SBS modified asphalt with a compound warm mix asphalt (WMA) fashion using the chemical additive and foaming procedure[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128789.
- [10] 李秀君, 高世柱, 赵麟昊, 等. 水性环氧树脂改性泡沫沥青冷再生混合料性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):874-880.
- LI Xiujun, GAO Shizhu, ZHAO Linhao, et al. Performances of cold recycling mixture with foamed bitumen and waterborne epoxy resin [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):874-880. (in Chinese)
- [11] 温彦凯, 郭乃胜, 王淋, 等. 考虑胶浆黏附性的泡沫沥青冷再生混合料性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1504-1511.
- WEN Yankai, GUO Naisheng, WANG Lin, et al. Performance of cold recycled mixture with foamed asphalt considering adhesion of mastics [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1504-1511. (in Chinese)
- [12] HU J Y, MA T, YIN T, et al. Foamed warm mix asphalt mixture containing crumb rubber: Foaming optimization and performance evaluation[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333:130085.
- [13] 周艳, 黄卫东, 林鹏, 等. 溶解性胶粉改性沥青与SBS的交联反应研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1):54-59.
- ZHOU Yan, HUANG Weidong, LIN Peng, et al. Cross-linking investigation of terminal blend rubberized asphalt with SBS [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1):54-59. (in Chinese)
- [14] WEN Y, LIU Q, CHEN L, et al. Review and comparison of methods to assess the storage stability of terminal blend rubberized asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258:119586.
- [15] PRESTI D L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49:863-881.
- [16] 黄卫东, 吕泉, 柴冲冲. Terminal Blend胶粉改性沥青的复合改性研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1):111-118.
- HUANG Weidong, LÜ Quan, CHAI Chongchong. Research on composite modification by terminal blend asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1):111-118. (in Chinese)
- [17] LI B L, HUANG W D, TANG N P, et al. Evolution of components distribution and its effect on low temperature properties of terminal blend rubberized asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2017, 136:598-608.

~~~~~

(上接第1116页)

- [23] 金鑫, 郭乃胜, 孙思威, 等. 伊朗岩沥青改性沥青的微观特性及性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1265-1270.
- JIN Xin, GUO Naisheng, SUN Siwei, et al. Micro characteristics and properties of Iran rock asphalt modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1265-1270. (in Chinese)
- [24] 贺海, 王朝辉, 孙晓龙, 等. 新型温拌改性沥青的研发及其路用性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5):927-932.
- HE Hai, WANG Chaohui, SUN Xiaolong, et al. Research and development of new warm mix modified asphalt and its road performance[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 927-932. (in Chinese)
- [25] 王浩轩, 黄玮, 丛玉凤, 等. 环保型道路沥青的制备[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3):700-706.
- WANG Haoxuan, HUANG Wei, CONG Yufeng, et al. Preparation of environment-friendly road asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):700-706. (in Chinese)