

文章编号:1671-8879(2018)04-0021-08

冷再生混合料用乳化沥青流变性能

高新文^{1,2}, 庞瑾瑜³

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 山西省交通运输厅, 山西 太原 030001;
3. 山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006)

摘要:为了准确评价乳化沥青流变特性对冷再生混合料路用性能的影响规律,从而为乳化沥青冷再生混合料性能指标的建立提供参考。采用界面流变和动态剪切流变的手段,以乳化沥青的界面扩张模量、黏性/弹性模量、相位角、黏性和弹性的转变点等流变参数为主要特征参数,考察其随频率和温度的变化情况以及对冷再生混合料性能的影响规律,并结合乳化沥青各组分的作用机理和流变模型分析,采用描述线性黏弹性流体的理想模型(即 Maxwell 流体模型)进行拟合计算,建立了多项流变参数与路用性能指标的构效关系,并进行乳化沥青冷再生混合料的性能评价。试验结果表明:所考察的流变性能参数与乳化沥青及冷再生混合料的性能有很好的相关性;界面扩张模量与乳化沥青的黏度和储存稳定性呈正相关性,其值越高,乳化沥青黏度越大,储存稳定性更佳;乳化沥青黏性-弹性的转变温度以及模量与冷再生混合料的强度和水稳定性呈正相关性,其值越大,乳化沥青冷再生混合料的强度越高,水稳定性更好;与经典的 Maxwell 流体模型相比,乳化沥青的 cole-cole 图(弹性模量对黏性模量作图)和 $G'/G''-\omega$ 图(弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 对频率 ω 作图)均与理论模型偏离,属于具有非单一结构松弛时间的非线性黏弹性流体。研究结果可为乳化沥青冷再生混合料的理论研究及性能指标的建立提供参考。

关键词:道路工程;乳化沥青冷再生;流变性能;界面流变;动态剪切流变

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Emulsified asphalt cold recycled mixture based on rheological properties

GAO Xin-wen^{1,2}, PANG Jin-yu³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Transport Department of Shanxi Province, Taiyuan 030001, Shanxi, China; 3. Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

Abstract: Interfacial rheology and dynamic shear rheology were employed to investigate the effect of rheological properties of emulsified asphalt on the performance index of cold recycled mixture with emulsified asphalt, as well as to provide guidance for establishing the performance index. The main characteristic parameters were set up, including interfacial dilational modulus, viscous/elastic modulus, phase angle, and viscous to elastic transition. The variations of all the parameters as functions of temperature and frequency, and their effects on the properties of cold recycled mixture were studied. The ideal Maxwell model was used to calculate the real model of the fluid. Based on the interaction mechanism and rheological model, the relationship between the

收稿日期:2017-12-20

基金项目:山西省应用基础研究计划项目(2015021054)

作者简介:高新文(1974-),男,山西新绛人,山西省交通运输厅高级工程师,长沙理工大学工学博士研究生,E-mail:106684513@qq.com。

rheological parameters and the pavement properties of cold recycled mixture with emulsified asphalt was established, and it can be applied for the property evaluation of the cold recycled mixture. The results show that the rheological parameters related to the pavement properties of emulsified asphalt cold recycled mixture. The dilational modulus as well as viscosity has a positive correlation with the storage stability of the asphalt emulsion. A large dilational modulus and high viscosity result in favorable storage stability for the asphalt emulsion. The rheological parameters of the transition temperature from the viscous to elastic state and the modulus have a positive correlation with the strength and moisture stability of the cold recycled mixture. A high transition temperature and modulus of the emulsified asphalt result in high values of strength and moisture stability of the cold recycled mixture. Furthermore, the diagrams of cole-cole (elastic modulus versus viscous modulus) and $G'/G''-\omega$ (elastic modulus G' and viscous modulus G'' versus frequency ω) deviate from the classical Maxwell fluid model, indicating a nonlinear viscoelastic fluid with a non-structural relaxation time. These results could provide a database for theoretical research and help to establish a performance index for emulsified asphalt cold recycled mixture. 2 tabs, 9 figs, 24 refs.

Key words: road engineering; emulsified asphalt cold recycled mixture; rheological property; interfacial rheology; dynamic shear rheology

0 引言

乳化沥青冷再生是废旧沥青路面循环利用的一种常见方式,与发达国家相比,中国的废旧沥青路面再生技术,无论从再生利用方式、材料性能、再生设备还是到施工技术的研究均处于起步阶段,在乳化沥青材料性能研究方面更是鲜见报道。

而国外已经越来越多地关注材料性能研究,用于丰富标准和规范。如美国联邦公路管理局胶结料专家组下属的乳化沥青工作组,一直致力于制定乳化沥青的性能规范,不断尝试新的检测手段,尤其是流变性能测试方面,构建其与路用性能指标的相关性,并取得了一定进展。根据流变参数评估应用于碎石封层的乳化沥青在不同温度范围内的性能,确定了可使用加载前后应变的比值替代弹性恢复指标,确定了使用 $1\sim 150$ rad/s 下复数模量和相位角的变化评估混合料的强度和刚度,从而指导实际应用中碎石封层用乳化沥青材料(包括乳化剂和聚合物胶乳的类型)的选择^[1]。乳化沥青的流变特性在中国相关报道相对更少,且采用的流变性能参数大都是沥青胶结料研究中常见的模量、车辙因子、损耗因子、疲劳因子^[2-4]。

由于乳化沥青属于分散体系,其另一个重要的流变特性便是界面黏弹性,该性质已顺利用于研究原油乳状液(与乳化沥青相似)各组分之间的相互作用^[5-7],为路用乳化沥青的性能研究提供了可能性,且已证实其与乳化沥青的性能如储存稳定性、工作

性有一定的联系^[8]。也有研究者参考原油乳状液的研究方法,借助模拟乳液分析了乳化沥青与石料的絮凝作用^[9]。此外,参考流变参数在沥青胶结料性能评估中的应用,同样发现其对乳化沥青老化具有一定的敏感性^[10],也建立了模量与乳化沥青冷再生混合料强度的相关性^[11],而这一流变性质的研究在中国尚属空白^[12]。

虽然国外学者已对碎石封层用乳化沥青的材料性能进行了较完善的研究,但是对于冷再生混合料用乳化沥青材料研究的报道甚少。为推进中国冷再生技术的发展,有必要建立更合理的乳化沥青冷再生混合料性能测试方法和评价指标。碎石封层用乳化沥青的流变特性与其路用性能已被证实有一定的联系,鉴于不同用途乳化沥青及原油乳状液的相似性,将界面和体相流变测试方法引入乳化沥青冷再生混合料的性能评价是可行的。为此,本文首次将界面流变和动态剪切流变应用于乳化沥青冷再生混合料的性能研究中,考察了包括界面扩张模量、黏性/弹性模量、相位角、黏性和弹性的转变点(VET)等多项参数,以及乳化沥青及其混合料的性能,建立流变性能与路用性能的相关性,以为乳化沥青冷再生混合料性能指标的建立提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料及样品制备

所使用的乳化剂均适用于乳化沥青冷再生,分

别为美德维实伟克公司生产的 INDULIN W-5(简称 W-5)、阿克苏诺贝尔公司生产的 E4875 和实验室自主合成的乳化剂 JK-201,所使用的沥青为 SK 90[#]。

乳化沥青的制备使用嘉兴米德的小型胶体磨,见图 1。W-5 掺量(质量分数,下同)2.0%,E4875 掺量2.0%,JK-201 掺量 2.2%,乳化沥青的固含量为 62%。制备过程中,先将 10 g(W-5、E4875)或 11 g(JK-201)乳化剂溶解在 170 g 水中,搅拌溶解后,滴加盐酸,调节 pH 至 2.0,再加水至 190 g,得到皂液;将皂液在电炉上缓慢加热至 55 ℃,取沥青 310 g,在电炉上缓慢加热至 125 ℃;使用热水预热胶体磨,保证磨机温度在 60 ℃左右,然后先倒入皂液,开动磨机循环 5 s,缓慢倒入沥青,并使用玻璃棒不停搅拌,倒完沥青后,保持磨机循环,再搅拌 10 s 后,收集乳化沥青,关磨机。

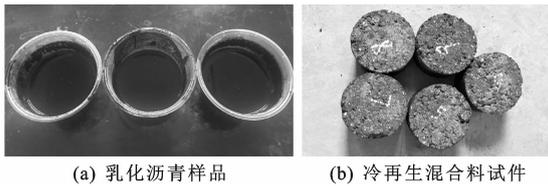


图 1 乳化沥青及冷再生混合料样品

Fig. 1 Samples of emulsified asphalt and cold recycled mixture with emulsified asphalt

乳化沥青冷再生混合料的级配及制备参考《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008),选择细粒式 A,其中废旧料比例 90%,油石比 2.4%,水 5%。乳化沥青冷再生混合料制备时先将矿物集料倒入拌和机内,加水拌和 1 min,加入乳化沥青拌和 1 min;然后将拌和好的混合料装入试模,在马歇尔击实仪上,双面各击实 50 次;将试件连同试模一起侧放在 60 ℃ 鼓风烘箱中养生 48 h,取出后再双面各击实 25 次,侧放在地面上,室温冷却 12 h,然后脱模等待测定。冻融劈裂强度测试的试件双面各击实 50 次。

1.2 界面扩张流变特性试验

界面扩张流变的测试首先需要通过液滴提供一个液/液界面,得到界面张力 γ 随时间 t 的变化 $\gamma(t)$ 情况。通过控制界面面积 A 的扩张应变变形 $A(t)$,便可以得到界面的流变信息,界面扩张模量 ϵ 可通过式(1)计算得到

$$\epsilon = \frac{d\gamma}{d\ln(A)} A \frac{dA}{dA} \quad (1)$$

界面扩张模量如式(2)所示,由一个虚数部分 ϵ' 和一个实数部分 ϵ'' 组成,即

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' \quad (2)$$

实数部分的 ϵ' 为弹性模量,虚数部分的 ϵ'' 为黏性模量,界面张力 $\gamma(t)$ 和界面面积 $A(t)$ 之间存在的相位移为相位角。对于完全弹性界面, $\gamma(t)$ 和 $A(t)$ 之间的相位角为 0°,对于完全黏性界面,相位角则为 90°。弹性和黏性模量与扩张模量之间满足式(3)的函数关系,并可以通过相位角 φ ,按照式(4)、式(5)计算得到

$$|\epsilon| = (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\epsilon' = |\epsilon| \cos(\varphi) \quad (4)$$

$$\epsilon'' = |\epsilon| \sin(\varphi) \quad (5)$$

界面扩张流变的测试使用法国 TECLIS 公司的 TRACKER 界面流变仪进行,见图 2。该设备通过 500 μ L 微量调节注射器和 U 形针头精准地控制液滴的体积变化,高速摄像机监控液滴体积的变化过程,通过对液滴形状的分析,计算得到界面张力 γ 。样品准备时,需要将乳化剂溶液装入石英皿中,并保证液面超过刻度线;沥青溶液的制备参照文献[6]、文献[7],使用甲苯作为溶剂,制成质量分数为 3%的沥青溶液,再装入 U 形针头的微量调节注射器中,吸入推出几次,保证注射器内没有气泡;将注射器固定在设备卡槽中,拧好顶部和侧面的固定螺丝,将石英皿放入观测槽内;将注射器的位置下调,保证 U 形针头浸入石英皿中的乳化剂溶液内,在观测孔的区域看得到 U 形针头的最上沿;通电推动注射器,在乳化剂水溶液中形成一个上悬的沥青油滴,通过软件选择计算区域,保证油滴震荡过程中,整个油滴都在计算区域内,且该区域内无其他油状物质。

振幅对黏性模量和弹性模量均有显著的影响^[13],且当振幅低于 2%时,其模量没有明显的变化,因此振幅常选择为液滴初始面积的 10%^[14-15]。乳化沥青界面黏弹性测定时保证其在油/水界面上吸附平衡,即静态吸附 4 h 后进行振荡试验。振荡试验中的扩张频率为 0.017、0.033、0.1、0.2、0.5 s^{-1} (即周期分别为 60、30、10、5、2 s)。乳化剂的浓度从 0.1 mg/L 变化至 500 mg/L,在此浓度范围内,界面扩张模量随浓度先增大后减小,可得到扩张模量的最大值。

1.3 动态剪切流变试验

使用美国 TA 公司的 DHR-1 流变仪(图 3),进行乳化沥青蒸发残留物测试,夹具为直径 8 mm 的平行板,温度范围 -25 ℃ ~ 50 ℃。将测试样品滴在下平行板上,随后调节上平行板与下平行板的距离,在保证样品在 2 个平行板之间均匀分布的前提

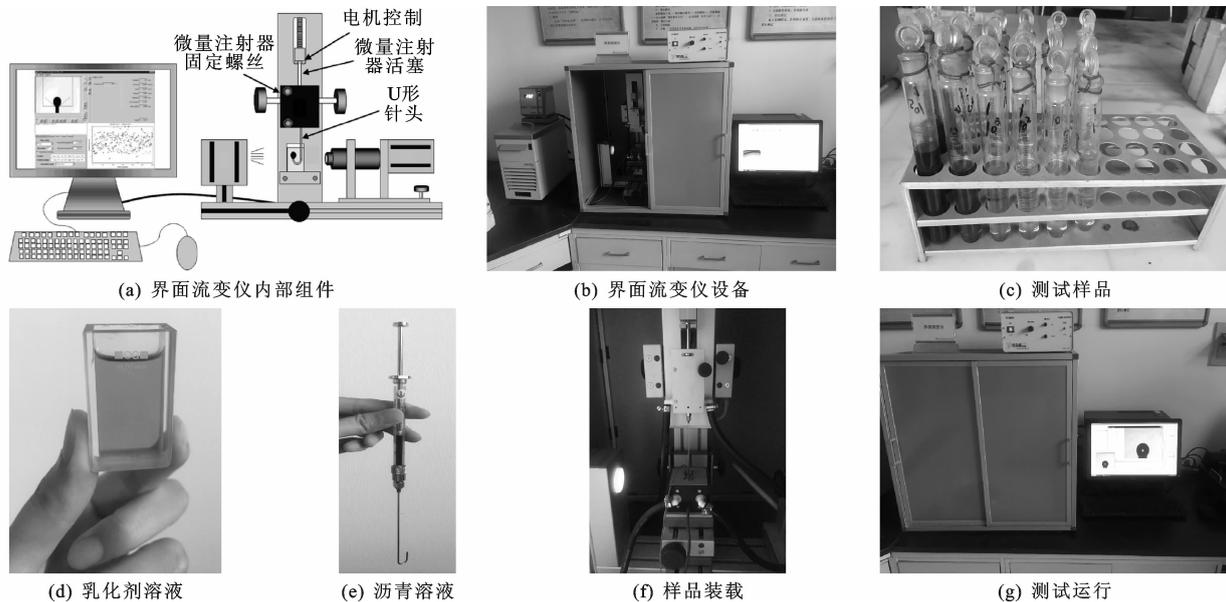


图2 界面流变仪及样品制备

Fig. 2 Interfacial rheometer instrument and sample preparation

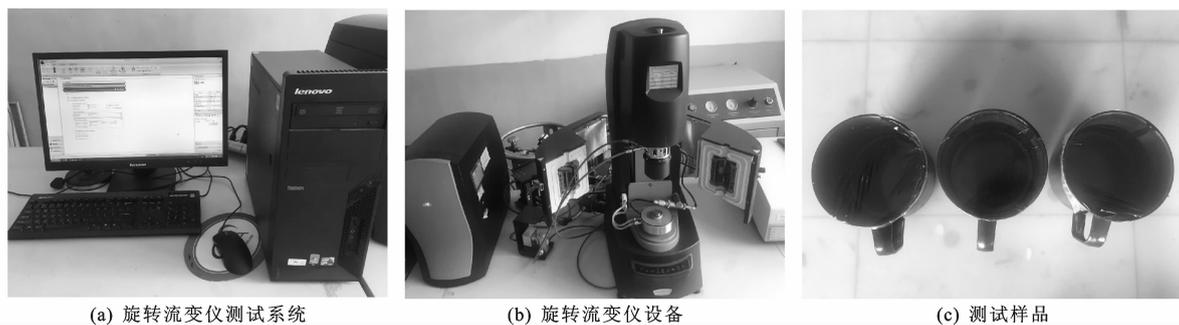


图3 旋转流变仪及样品制备

Fig. 3 Rheometer instrument and sample preparation

下,控制间隙 $1\ 000\sim 1\ 200\ \mu\text{m}$ 。开展动态剪切测试之前,首先进行应力扫描试验,找到线性黏弹区,用以确定动态剪切时合适的应力和应变^[16-17]。测试可得到储能模量 G^* 、弹性模量 G' 、黏性模量 G'' 、相位角 δ 和VET温度。乳化沥青蒸发残留物的制备参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中T0651-1993乳化沥青蒸发残留物含量试验,将乳化沥青倒入不锈钢杯中,然后将其放在垫有石棉垫的电炉上加热,使用玻璃棒一直搅拌,温度始终低于 $163\ ^\circ\text{C}$,直至水分完全蒸发,然后在 $163\ ^\circ\text{C}$ 下保持搅拌1 min,得到蒸发残留物样品。

1.4 乳化沥青及冷再生混合料性能评价

按照《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)(简称规范,下同)中的要求。进行乳化沥青冷再生混合料的性能指标测试,包括乳化沥青的筛上残留物、恩格拉黏度、储存稳定性(5 d),以及冷再生混合料的劈裂强度、干湿劈裂强度比、冻融劈裂强

度比。

2 试验结果与分析

2.1 界面黏弹性

界面扩张模量对扩张频率的变化趋势见图4。由图4可知:随着频率的增大,扩张模量持续增大,且不受乳化剂浓度的影响;随乳化剂浓度的增大,扩张模量先增大后降低,而沥青及乳化沥青的固含量相同、乳化剂不同时,乳化沥青的油/水界面扩张模量完全不同。

在乳化沥青溶液中,作为连续相的乳化剂溶液,其内部的乳化剂分子与沥青油滴表面的乳化剂分子有交换作用,并且沥青油滴表面的乳化剂分子还会发生分子结构上的构象变化^[18-19]。压缩条件下,沥青油滴表面上的乳化剂分子会重新回到连续相中,并达到平衡浓度。在低频段时,这种分子交换有充足的时间达到平衡,不存在抵抗压缩-扩张的阻力,此时界面张

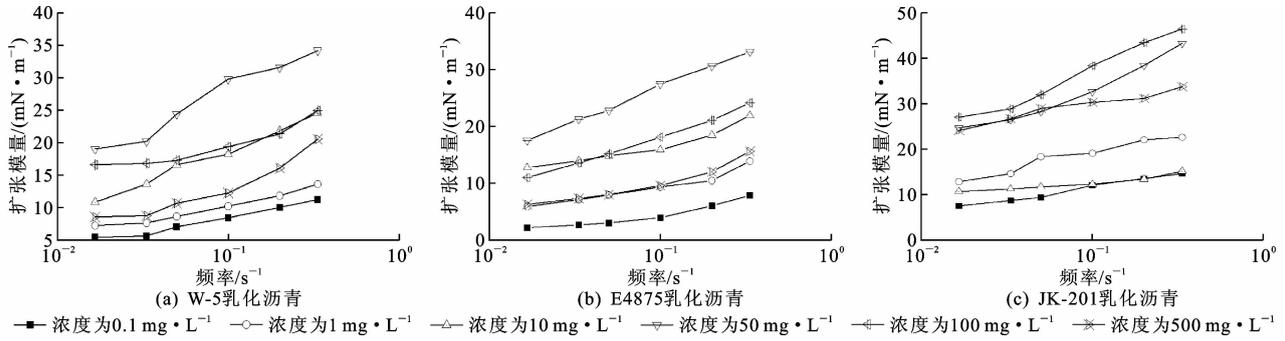


图 4 不同乳化剂的扩张模量随频率的变化

Fig. 4 Variations of different emulsifier dilational modulus with frequencies

力变化较小,扩张模量也相对小。而在高频段时,乳化剂分子的交换速率远低于扰动频率,在沥青油滴表面的乳化剂分子吸附层形成了不溶性单层膜,从而达到最大扩张模量。乳化剂在沥青油滴上的吸附情况直接影响乳化沥青的黏弹性,因此乳化剂不同,乳化沥青的界面黏弹性具有明显的差别。

选择某一特定频率(0.1 s^{-1}),考察扩张模量随乳化剂浓度的变化,见图 5。由图 5 可知:扩张模量出现先增大后降低的趋势;W-5 乳化剂最大扩张模量为 29.1 mN/m ,极值所对应的乳化剂浓度为 50 mg/L ;含有 E4875 乳化剂的最大扩张模量为 27.4 mN/m ,其极值所对应的乳化剂浓度为 50 mg/L ;含有 JK-201 乳化剂的最大扩张模量为 38.3 mN/m ,其极值所对应的乳化剂浓度为 100 mg/L 。

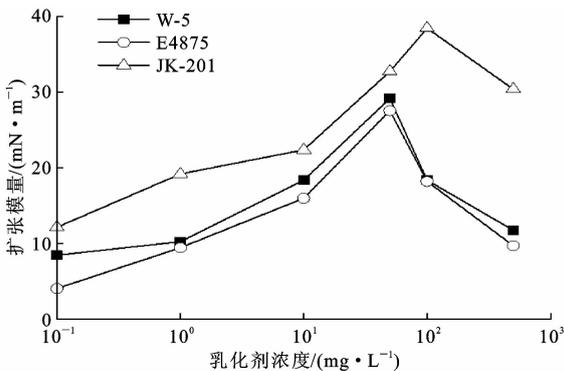


图 5 扩张模量随乳化剂浓度的变化

Fig. 5 Variations of dilational modulus with emulsifier concentration

当乳化沥青连续相中的乳化剂浓度增大时,分散相沥青油滴上吸附的乳化剂浓度会相应增大,乳化剂分子由连续相扩散至沥青油滴表面的能力增强。沥青油滴表面吸附的乳化剂分子增多会提高扩张模量,但乳化剂分子从连续相向沥青油滴的扩散会降低其扩张模量^[20-21],乳化剂浓度增大后,只有在某一个浓度下,提高和降低扩张模量的作用达到

平衡,此时扩张模量最大;如果继续增大乳化剂浓度,则会减弱乳化剂分子向沥青油滴扩散的能力,从而导致扩张模量的下降。

乳化剂的自身结构会影响乳化剂在沥青油滴表面的吸附形式,吸附单层膜的分子排列越紧密,界面膜强度越高,所需乳化剂用量相对较高。所测试的 3 个乳化沥青样品中,乳化剂 JK-201 的分子体积最小,根据胶体扩散机理,JK-201 分子扩散至沥青油滴表面的速度最快,降低界面张力的速率最高,此外分子之间的斥力相对较小,界面膜最致密,扩张模量最大,吸附在界面上的乳化剂分子最多,因此最大扩张模量对应的浓度最高。

将界面膜的黏性模量、弹性模量与扩张模量进行对比,结果见图 6。由此发现:3 个体系的弹性模量 ϵ' 与扩张模量 ϵ 数值相近;扩张模量和弹性模量随乳化剂浓度的变化曲线基本重合,尤其是含有 JK-201 的体系更为明显;弹性模量也随着乳化剂浓度的增大出现先增大后减小的趋势。

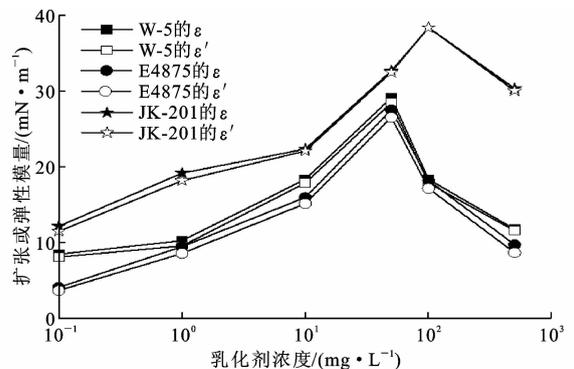


图 6 扩张模量 ϵ 和弹性模量 ϵ' 随乳化剂浓度的变化

Fig. 6 Variations of dilational modulus ϵ and elastic modulus ϵ' with emulsifier concentration

3 个乳化沥青样品的乳化剂分子吸附在沥青油滴表面形成的界面膜均主要表现为弹性性质,这也是沥青与水之间排斥力的一种表现,2 种物质完全不相溶,乳化剂在二者之间起到桥连作用,乳化剂的疏

水基团吸附在沥青油滴表面,亲水基团则伸向水相,形成了稳定分散的乳液状态。弹性成分为主的界面性质则决定了其弹性模量与扩张模量曲线的基本重合,沥青油滴表面吸附的乳化剂分子浓度的增大,以及在不同乳化剂浓度下,沥青油滴表面和连续相中的分子交换成为决定其弹性模量的主要因素^[22]。

2.2 动态流变特性

3种乳化沥青的弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 随温度的变化见图7。由2个模量的交点即黏性和弹性转变(VET)温度可知,W-5乳化沥青、E4875乳化沥青和JK-201乳化沥青的VET分别为6.8℃、5.4℃和8.4℃。

下,相位角为45℃,弹性模量和黏性模量相同($G' = G''$),黏性性质越显著的物质,VET温度越低^[23]。不同乳化剂类型对沥青性能有一定的影响,JK-201乳化沥青的弹性性能优于W-5乳化沥青和E4875乳化沥青。随着破乳的发生,JK-201分子可以更好地融合并分散在沥青内部,一定程度上增强了沥青的内聚力,W-5和E4875则与沥青的相容性相对较差,内聚力增强效应不明显。本文乳化剂掺量仅为2.0%~2.2%,而三者所对应VET温度的差距达到1.6℃,说明在可以制备得到满足规范要求的乳化沥青前提下,乳化剂的类别对乳化沥青冷再生混合料的性能有一定的影响。

根据线性黏弹性流体模型,计算并绘制了所使用3种乳化沥青的cole-cole图和 $G'/G''-\omega$ 图,见图8和图9。同时,进行了Maxwell流体模型的计算,可知:cole-cole图中的实测结果散点偏离半圆形; $G'/G''-\omega$ 图中的实测结果偏离直线。

流变性能研究中,常使用理论模型探究流体的性质,其中Maxwell流体模型是描述线性黏弹性流体的理想模型^[24]。该模型在谐波振荡下的动态性质可以通过式(6)~式(8)来表示

$$G' = \frac{G_0 \omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (6)$$

$$G'' = \frac{G_0 \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (7)$$

$$G''^2 + (G' - \frac{G_0}{2})^2 = (\frac{G_0}{2})^2 \quad (8)$$

式中: G_0 为零剪切模量; τ 为结构松弛时间。

如果所测试的样品属于线性黏弹性流体,则 $G'-G''$ 图是一个圆心不在原点的半圆,此半圆又称为cole-cole图。根据 $G'/G'' = \omega t$, t 为结构松弛时间,表示该样品结构松弛的速度,因此线性黏弹性流体的 $G'/G''-\omega$ 图为一曲线。

由于实测数据与理论模型不吻合,因此所测试的乳化沥青不属于线性黏弹性流体,无单一的结构松弛时间,且偏离Maxwell流体模型,属于具有非单一结构松弛时间的非线性黏弹性流体。

2.3 乳化沥青流变性与混合料性能相关性分析

乳化沥青及冷再生混合料的性能测试结果见表1和表2。3种乳化沥青均使用了同一规格的集料、相同的级配,油石比均为2.4%。由表1、表2可以看出:3种乳化沥青及制备的冷再生混合料各项指标均满足规范要求;JK-201乳化沥青的恩格拉黏度最大,储存稳定性最好;JK-201乳化沥青冷再生混合料的劈裂强度、干湿劈裂强度比、冻融劈裂强度比最高。

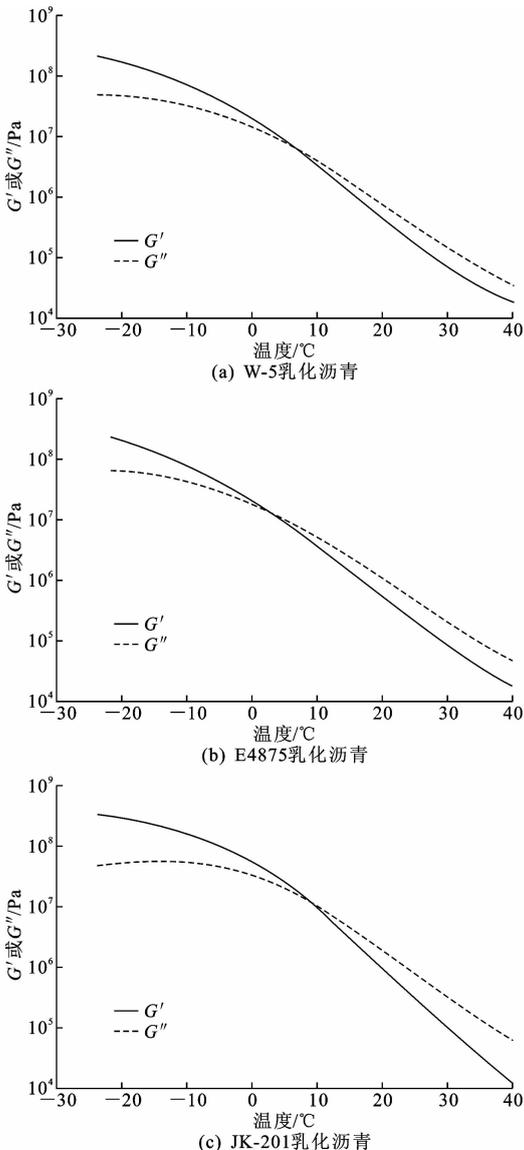


图7 乳化沥青弹性模量和黏性模量的交点

Fig. 7 Cross of asphalt emulsions of G' and G''

低于VET温度时弹性模量大于黏性模量,高于VET温度时黏性模量大于弹性模量,因此VET温度代表了弹性性质和黏性性质的转变。该温度

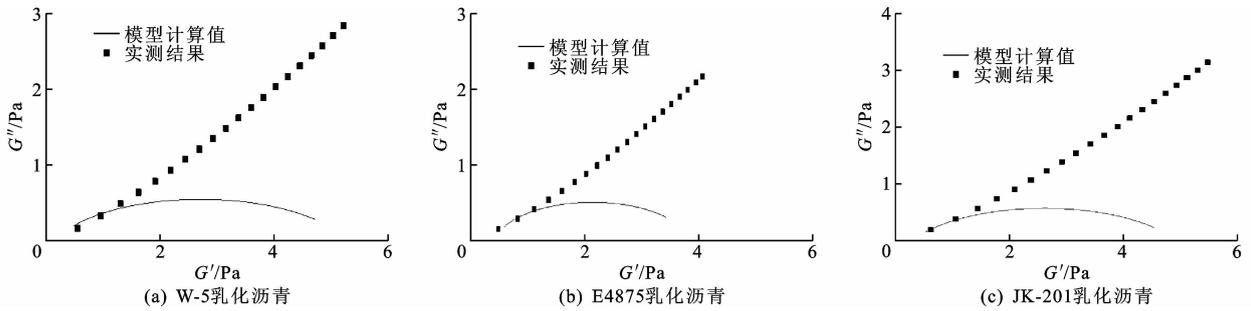


图 8 实测和理论计算的乳化沥青的 cole-cole 图

Fig. 8 Experimental and calculated data of emulsified asphalt plotted in cole-cole diagrams

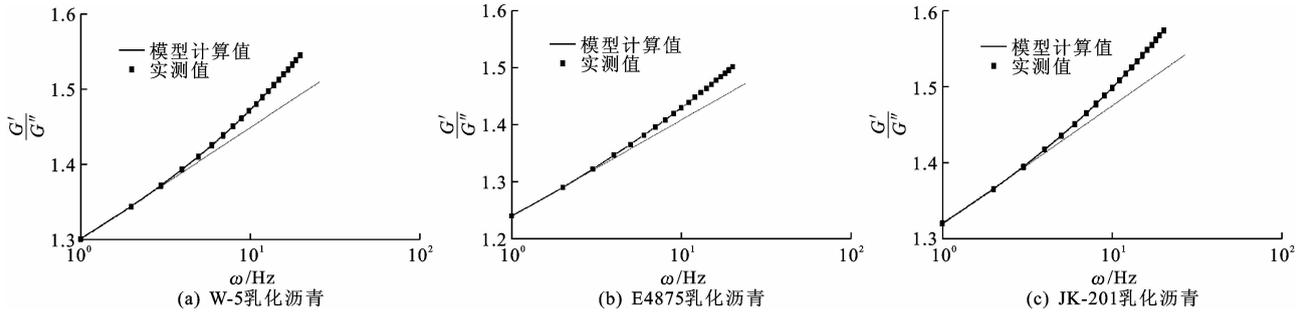


图 9 实测和理论计算的乳化沥青的 $G'/G''-\omega$ 图

Fig. 9 Experimental and calculated data of emulsified asphalt plotted in $G'/G''-\omega$ diagrams

表 1 乳化沥青性能

Tab. 1 Properties of emulsified asphalt

测试指标	W-5 乳化沥青	JK-201 乳化沥青	E4875 乳化沥青	规范 技术要求
筛上残留物 (1.18 mm 筛)/%	0	0	0	<0.1
恩格拉黏度(25℃)	13.0	14.7	12.5	2~30
5 d 储存稳定性/%	4.1	3.2	4.3	<5

表 2 乳化沥青冷再生混合料性能

Tab. 2 Properties of cold recycled mixture with emulsified asphalt

测试指标	W-5 乳化沥青	JK-201 乳化沥青	E4875 乳化沥青	规范 技术要求
劈裂强度 (15℃)/MPa	0.86	0.91	0.79	>0.4
干湿劈裂强度比 (15℃)/%	77.3	83.5	76.6	≥75
冻融劈裂强度 比/%	74	79	72	≥70

3 结 语

(1) 探究了乳化沥青流变特性对冷再生混合料路用性能的影响,建立了多项流变参数与路用性能指标之间的相关性,为乳化沥青冷再生混合料性能指标的建立提供了数据支持和理论基础。

(2) 探索性地将界面流变测试手段应用于路用乳化沥青的研究中,解释了乳化沥青油/水界面黏弹性的变化规律,确定了影响乳化沥青界面性能的关

键指标及作用机理。

(3) 基于流变学中的 Maxwell 流体模型,计算冷再生乳化沥青的流体模型,明确了乳化沥青属于具有非单一结构松弛时间的非线性黏弹性流体。

(4) 初步确定了乳化沥青界面扩张模量、复数模量、VET 温度与其路用性能指标之间的联系,其适用性还有待进一步验证,包括不同类型冷再生乳化沥青,以及不同级配冷再生混合料。今后工作中需要通过大量样本的统计分析,形成基于流变性能参数的材料性能评价指标。

参考文献:

References:

[1] HANZ A J, JOHANNES P, BAHIA H U. Development of emulsion residue testing framework for improved chip seal performance[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2012.

[2] 秦先涛, 祝斯月, 姜 艺, 等. 水泥乳化沥青复合材料特征及其混合料性能研究[J]. 公路, 2017(1): 191-198.
QIN Xian-tao, ZHU Si-yue, JIANG Yi, et al. Research on characteristics of cement emulsified asphalt composite materials and mixtures[J]. Highway, 2017(1): 191-198.

[3] 畅润田, 杜素军, 裴 强, 等. SBR 胶乳对乳化沥青流变性能的影响[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(5): 38-41.

- CHANG Run-tian, DU Su-jun, PEI Qiang, et al. Effect of SBR on the rheological properties of emulsified asphalt[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University; Natural Science, 2016, 35(5):38-41.
- [4] 崔东霞, 庞瑾瑜. 冷再生乳化剂对乳化沥青残留物流变性能的影响[J]. 中外公路, 2015, 35(6):229-232.
- CUI Dong-xia, PANG Jin-yu. Effect of the emulsifier used in cold recycling on the rheological properties of evaporated residues of asphalt emulsions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(6):229-232.
- [5] NUNEZ G A, SANCHEZ G, GUTIERREZ X, et al. Rheological behavior of concentrated bitumen in water emulsions[J]. Langmuir, 2000, 16(16):6497-6502.
- [6] FAN Y, SIMON S, SJÖBLOM J. Interfacial shear rheology of asphaltenes at oil-water interface and its relation to emulsion stability; Influence of concentration, solvent aromaticity and nonionic surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 366(1/2/3):120-128.
- [7] KANG W, XU B, WANG Y, et al. Stability mechanism of W/O crude oil emulsion stabilized by polymer and surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, 384(1/2/3):555-560.
- [8] AL-SABAGH A M. The relevance HLB of surfactants on the stability of asphalt emulsion[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2002, 204(1/2/3):73-83.
- [9] MERCADO R A, SADTLER V, MARCHAL P, et al. Heteroflocculation of a cationic oil-in-water emulsion resulting from Fontainebleau's sandstone powder addition as a model for asphalt emulsion breakup[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(36):1688-1694.
- [10] MARASTEANU M O, CLYNE T R. Rheological characterization of asphalt emulsions residues [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18:398-407.
- [11] KIM Y, LEE H D. Performance evaluation of cold in-place recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(4):586-593.
- [12] 裴强, 杜素军, 庞瑾瑜. 乳化沥青的界面黏弹性及 Zeta 电位研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36(1):42-45.
- PEI Qiang, DU Su-jun, PANG Jin-yu. The study on the interfacial viscoelasticity and Zeta potential of emulsified asphalt[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University; Natural Science, 2017, 36(1):42-45.
- [13] SZTUKOWSKI D M, YARRANTON H W. Rheology of asphaltene-toluene/water interfaces[J]. Langmuir, 2005, 21(25):11651-11658.
- [14] LUCASSEN-REYNDERS E H, CAGNA A, LUCASSEN J. Gibbs elasticity, surface dilational modulus and diffusional relaxation in nonionic surfactant monolayers[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2001, 186(1/2):63-72.
- [15] FREER E M, SVITOVA T, RADKE C J. The role of interfacial rheology in reservoir mixed wettability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 39(1/2):137-158.
- [16] SCHULTE J, ENDERS S, QUITZSCH K. Rheological studies of aqueous alkylpolyglucoside surfactant solutions[J]. Colloid and Polymer Science, 1999, 277(9):827-836.
- [17] PANG J Y, DU S J, CHANG R T, et al. Effect of emulsifier content on the rheological properties of asphalt emulsion residues[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132:41806.
- [18] RAVERA F, FERRARI M, SANTINI E, et al. Influence of surface processes on the dilational visco-elasticity of surfactant solutions[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2005, 117(1/2/3):75-100.
- [19] STUBENRAUCH C, FAINERMAN V B, AKSENEV-KO E V, et al. Adsorption behavior and dilational rheology of the cationic alkyl trimethylammonium bromides at the water/air interface [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2005, 109(4):1505-1509.
- [20] HE F, XU G, PANG J, et al. Effect of amino acids on aggregation behaviors of sodium deoxycholate at air/water surface: Surface tension and oscillating bubble studies[J]. Langmuir, 2010, 27(2):538-545.
- [21] WU D, XU G, FENG Y, et al. Aggregation behaviors of gelatin with cationic gemini surfactant at air/water interface[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2007, 40(4):345-350.
- [22] STUBENRAUCH C, MILLER R. Stability of foam films and surface rheology: An oscillating bubble study at low frequencies[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2004, 108(20):6412-6421.
- [23] MIGLIORI F, RAMOND G, BALLIE M, et al. Correlations between the thermal stress cracking of bituminous mixes and their binders' rheological characteristics[R]. Luxemburg; Eurobitume Workshop on Performance Related Properties for Bituminous Binders, 1999.
- [24] ROBERTS D W. Application of octanol/water partition coefficients in surfactant science: A quantitative structure-property relationship for micellization of anionic surfactants[J]. Langmuir, 2002, 18(2):345-352.