

温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能

张飞¹, 王岚², 邢永明^{1*}

(1. 内蒙古工业大学 理学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:为研究温拌沥青混合料中橡胶粉目数及温拌剂对胶粉改性沥青混合料低温性能的影响,进行温拌前、后不同目数的胶粉改性沥青混合料的弯曲及弯曲蠕变试验。结果表明:温拌后胶粉改性沥青混合料的低温性能有所提高,且60目胶粉改性沥青混合料的低温性能总是优于对应的混合目胶粉改性沥青混合料。综合弯曲破坏能密度和温度应变能密度可预估沥青混合料的开裂温度。试验结果表明:温拌后胶粉改性沥青混合料的低温性能有所改善,温拌60目胶粉改性沥青混合料的低温性能最佳。

关键词: 道路工程; 低温弯曲试验; 弯曲蠕变试验; 低温性能; 开裂温度

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

胶粉改性沥青技术为解决废轮胎的处理问题提供了有效途径。但是热拌胶粉改性沥青混合料施工温度很高,施工过程会释放大量有毒、有害气体,结合温拌技术可解决该技术的缺陷。已有研究表明:温拌胶粉改性沥青混合料可以在保证沥青路面路用性能的基础上减少能源消耗、降低有害气体排放,符合中国“节约资源,保护环境”的基本政策^[1]。国外早已开展了温拌胶粉改性沥青的低温性能研究,并取得了一系列的成果^[2-3],但中国国内对这方面的研究相对较少,特别是针对内蒙古这样的特殊地区,冬季路面温度可降至-30℃甚至更低,低温抗裂性能需要引起高度重视。王岚^[4]采用小梁弯曲蠕变试验对比了胶粉改性沥青混合料及SBS改性沥青混合料在4个试验温度下的低温性能,结果表明:胶粉改性沥青混合料比SBS改性沥青混合料具有更好的低温性能;张占军^[5]等针对不同交联度的环氧沥青混合料进行不同温度下小梁三点弯曲试验,构建了混合料的弯拉强度、弯曲劲度模量、弯曲破坏应变及弯曲应变能密度与温度、交联度的关系方程;夏荣辉^[6]从小梁弯曲及弯曲蠕变的试验结果求出了开裂温度并将其作为评定橡胶颗粒环氧沥青混合料低温性能的合理性指标;Tan Yiqiu, Zhang Lei^[7]等通过对5种类型的沥青混合料进行小梁弯曲、间接拉伸、收缩系数、冻断试验,结果表明:弯曲应变能密度与沥青混合料的开裂温度具有较好的相关性;李彩

霞^[8]等采用半圆弯曲试验研究多聚磷酸改性沥青混合料的低温性能,并采用抗弯拉强度和断裂能密度作为低温性能的评价指标;李伟^[9]在间接拉伸试验中引入临界开裂温度的概念,研究Sasobit对AC-13混合料低温性能的影响。综述,之前的研究多采用弯曲试验或者弯曲蠕变试验研究胶粉改性沥青混合料的低温性能,尽管也有学者对开裂温度展开了研究,不过主要针对基质及普通改性沥青混合料,然而对比分析温拌前、后不同目数的胶粉改性沥青混合料的开裂温度的研究依然较少。为更加客观比较不同类型胶粉改性沥青混合料的低温性能,该文采用多个低温性能评价指标,进行温拌前后胶粉改性沥青混合料的弯曲及弯曲蠕变试验,同时也比较温拌前后胶粉改性沥青混合料的开裂温度,以进一步验证结果的可靠性。

1 试验材料及方法

1.1 材料性能

(1) 胶粉改性沥青。该文采用的胶粉改性沥青由90#基质沥青与橡胶粉制备而成。橡胶粉采用60目、混合目数两种细度且掺量均为基质沥青的20%(外掺),通过筛分发现混合目数的橡胶粉可视为40目、60目、80目胶粉按照3:3:1的比例掺和而成。考虑到表面活性剂具有抗老化能力强及降温能力突出的技术

收稿日期:2020-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:11762012);内蒙古交通科技建设项目(编号:NJ-2015-1)

作者简介:张飞,男,博士研究生。E-mail:1263391308@qq.com

* 通信作者:邢永明,男,教授。E-mail:xym@imut.edu.cn

优势^[10],该文采用SDYK型表面活性剂(掺加量为0.6%)。

(2)集料。集料应洁净、无风化具有足够的强度和耐磨性,试验集料采用玄武岩,矿粉由石灰岩磨细而成,各项指标均符合相关规范要求。

1.2 试验方案

(1)级配和最佳沥青用量。试验采用AC-16密级配沥青混合料,热拌沥青混合料拌和及压实温度为180、165℃,根据“等体积原则^[11]”确定温拌沥青混合料拌和及压实温度为161、146℃。且60目及混合目胶粉改性沥青混合料的最佳沥青用量为5.4%、5.6%。

(2)低温弯曲试验。将成型的车辙板切割成250 mm×30 mm×35 mm的小梁试件,采用UTM设备在0、-10、-20℃的试验温度下,按照JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[12]中T0715—2011的要求进行,并按照规程计算抗弯拉强度和最大弯拉应变。

(3)低温弯曲蠕变试验。低温弯曲蠕变试验所用试件及设备与低温弯曲试验完全一致,具体试验操作可参考JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》T0728—2011,为了便于试验结果的比较,在保证试验精度的前提下统一将试验时间设定为90 min,并最终按照规程计算蠕变速率。利用1Stopt软件的麦夸特法(LM)“标准+通用全局优化法”对得到的应变-时间曲线进行非线性拟合,即可求出Burgers的黏弹参数。

2 结果与讨论

2.1 低温弯曲试验结果分析

2.1.1 常规力学指标分析

图1、2为小梁弯曲试验中抗弯拉强度、最大弯拉应变随温度的变化情况。

从图1、2可知:①随着温度的升高,抗弯拉强度的变化规律性不强,在相同试验温度下,温拌后胶粉改性沥青混合料抗弯拉强度都有所降低,说明温拌后降低了胶粉改性沥青混合料的低温承载能力;②最大弯拉应变随着温度的升高不断增大,对热拌沥青混合料:60目胶粉改性沥青混合料的最大弯拉应变大于混合目胶粉改性沥青混合料,温度较高时效果更加明显,说明前者具有更好的变形能力,在严寒的冬季不易开裂。温拌后两种沥青混合料的最大弯拉应变都变大,说明

温拌后沥青混合料的低温抗裂性也得到改善,这主要是由于温拌沥青混合料的拌和温度较低,拌和过程中沥青的老化程度降低,与热拌相比温拌沥青混合料的胶浆黏度小,表现出较大的变形能力;③采用抗弯拉强度和最大弯拉应变评价温拌胶粉改性沥青混合料的结果不一致,因此须采用更加客观合理的指标来评价温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能。

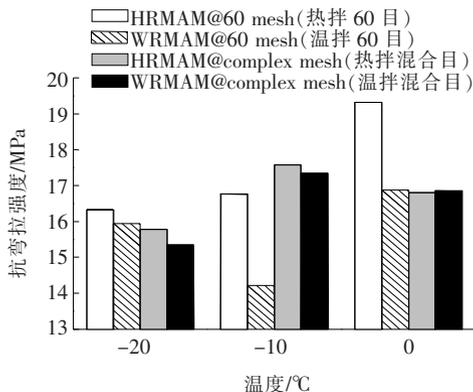


图1 抗弯拉强度

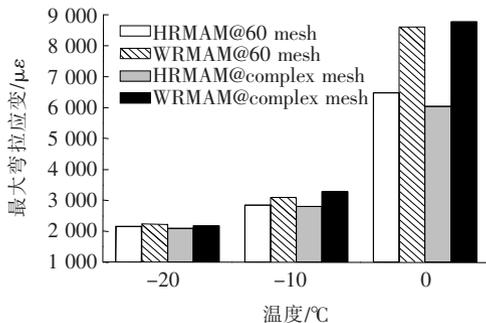


图2 最大弯拉应变

2.1.2 能量分析法

沥青混合料的低温性能是由材料的低温变形能力和低温承载能力共同决定,所以仅从一个方面评价沥青混合料的低温性能是不合理的。有资料^[13]研究表明,可用单位体积的破坏能来评价沥青混合料的低温性能,破坏时消耗的能量越大,说明其抗裂性越好,应变能密度计算公式见式(1),具体结果见表1。

表1 胶粉改性沥青混合料的弯曲破坏能密度

温度/ °C	弯曲破坏能密度/(kJ·m ⁻³)			
	HRMAM @60	WRMAM @60	HRMAM@ complex	WRMAM@ complex
0	74.90	91.46	60.20	64.79
-10	25.48	27.20	24.31	24.49
-20	13.59	14.95	13.08	14.88

$$\omega_f = \frac{d\omega}{dv} = \int_0^{\varepsilon_c} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

式中： ω_f 为应变能密度函数； $\sigma(\varepsilon)$ 为应力关于应变的函数； ε_c 为最大应力对应的应变。

从表 1 可知：弯曲破坏能密度随着温度的降低不断减小，这主要是温度降低材料的柔韧性降低，当温度低于某一值沥青混合料的黏弹性不再显著，相反表现出脆性材料的特性。对热拌及温拌沥青混合料：60 目胶粉改性沥青混合料的弯曲破坏能密度始终大于混合目胶粉改性沥青混合料，且温度越高越显著，这是由于前者沥青结合料所用胶粉偏细，橡胶粉颗粒与沥青的溶胀作用也比混合目胶粉改性沥青结合料显著，该作用使橡胶颗粒的体积发生膨胀并在橡胶颗粒周围形成凝胶体，作用力越强橡胶粉颗粒间的交联作用也越强^[14-15]，最终反映为前者柔性较后者大，变形能力强，故需要输入较高的能量才能破坏。对比温拌前、后的沥青混合料发现：温拌后沥青混合料的应变能密度都增大，只是 60 目胶粉改性沥青混合料的增大效果比混合目胶粉改性沥青混合料的更加显著，说明降低拌和温度可改善沥青混合料的低温性能。

2.2 低温弯曲蠕变试验结果分析

2.2.1 基于蠕变速率的结果分析

胶粉改性沥青混合料不同温度的蠕变速率见图 3。

由图 3 可知：温度越低蠕变速率越小，具体表现为温度每降低 10 °C，蠕变速率下降一个数量级，蠕变速率可以间接反映材料的松弛能力。蠕变速率小，松弛能力小，沥青混合料弹性性能强，在相同的温度条件下更容易引起低温开裂。对热拌及温拌沥青混合料：60 目胶粉改性沥青混合料的蠕变速率总是大于混合目胶粉改性沥青混合料的蠕变速率，说明前者的应力松弛能力比后者强，进一步证明前者的低温抗裂性能比后者强；对比温拌前、后的沥青混合料：温拌后沥青混合料的蠕变速率都增大了，说明温拌后沥青混合料的应力松弛能力增大，低温柔性增强，这主要是由于温拌沥青混合料拌和温度低，拌和过程沥青的老化程度降低，低温流动变形性能比热拌沥青混合料好。从低温松弛能力的角度考虑同样推荐采用温拌 60 目胶粉改性沥青混合料。

2.2.2 基于 Burgers 模型的黏弹参数分析

图 4 为胶粉改性沥青混合料的低温黏弹参数。由图 4 可知：不同试验温度下拟合得到的黏弹参数存在较大差异，随着温度的降低，Burgers 模型的 4 个黏弹

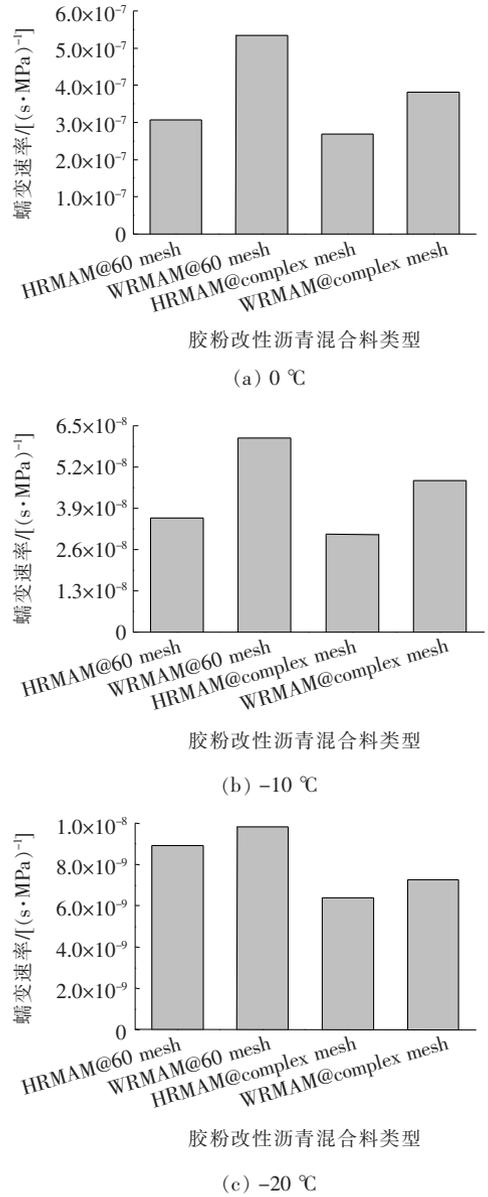


图 3 胶粉改性沥青混合料不同温度的蠕变速率

参数都增大，说明随温度的降低，胶粉改性沥青混合料的黏性不断衰减，弹性不断增强，低温下胶粉改性沥青混合料的弹性性能突出。对热拌及温拌沥青混合料：60 目胶粉改性沥青混合料的 4 个黏弹参数小于混合目胶粉改性沥青混合料的参数，说明前者的黏性性能也比后者显著，低温抗裂性也比后者强；对比温拌前、后的胶粉改性沥青混合料：温拌后两类沥青混合料的黏弹参数都减小了，说明温拌后沥青混合料的低温性能确实得到了改善，这同样由于温拌沥青混合料拌和温度低，拌和过程沥青老化程度降低，低温流变性能好。从材料的黏弹特性考虑推荐采用黏弹参数较小的温拌 60 目胶粉改性沥青混合料。

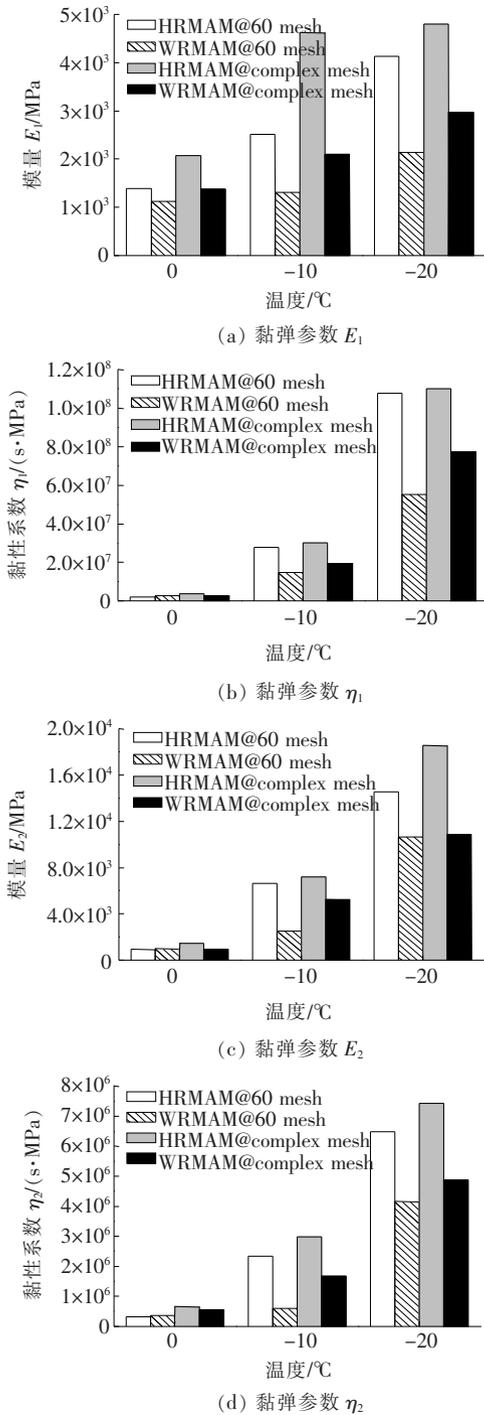


图4 Burgers模型黏弹参数

2.3 低温开裂温度预估

2.3.1 温度应变能计算

沥青混合料的温度应变能可定义为:在气温降低过程中,单位体积的沥青混合料内部由于温度收缩应力会累计产生一定的能量,并将此能量定义为温度应变能^[16],具体计算见式(2):

$$w'_\epsilon = \int_{\epsilon(T_0)}^{\epsilon(T)} \sigma(t) d\epsilon \quad (2)$$

式中: w'_ϵ 为沥青混合料温度应变能密度; $\sigma(t)$ 为降温过程中沥青混合料内部产生的温度应力; $\epsilon(T)$ 为从起始温度降温到 T 时沥青混合料内部产生的累计应变。

2.3.2 温度应力计算

在 Burgers 模型的本构方程的基础上结合相应的收缩应变试验结果^[17],考虑到呼和浩特地区温度收缩应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 4×10^{-4} /s,采取偏保守设计,假设降温速率为 $5^\circ\text{C}/\text{h}$,冬季起始温度为 10°C ,则有: $\sigma(0) = 0$, $\dot{\sigma}_{t=0} = E_1 \dot{\epsilon}$ 。

将上面的结果代入本构方程求出最终温度应力的计算表达式:

$$\sigma(t) = \frac{\dot{\epsilon} \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}} \left\{ \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M + \sqrt{\Lambda}) \right] \cdot e^{-\frac{M-\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot t} \right] - \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M - \sqrt{\Lambda}) \right] e^{-\frac{M+\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot t} + \frac{E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}}{\eta_2} \right\} + \eta_1 \dot{\epsilon} \quad (3)$$

$$\text{式中: } M = \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_1}, \Lambda = \left(\frac{\eta_1}{E_1} \right)^2 + \left(\frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2} \right)^2 + \frac{2\eta_1(\eta_1 - \eta_2)}{E_1 E_2}$$

由于式(3)中的黏弹参数是通过特定温度的弯曲蠕变试验得到的,对黏弹性材料来说不同温度、作用时间的力学性能有很大差异,要将这些参数应用于降温过程中的胶粉改性沥青混合料温度应变能的计算中,必须采用时温等效原理来解决不断降温过程中的材料参数的变化问题^[18],在沥青及沥青混合料低温性能与沥青路面低温开裂问题的研究中移位因子的计算可采用 Arrhenius 公式^[19]:

$$\alpha(T) = \exp \left[\frac{\Delta E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4)$$

式中: $\alpha(T)$ 为移位因子; ΔE_a 为表面活化能; R 为普适气体常数,取为 $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$; T_0 为参考温度,绝对温度,该文中为 273 K 。

则沥青混合料在降温过程的温度应力可表示为:

$$\sigma(t) = \frac{\dot{\epsilon} \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}} \left\{ \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M + \sqrt{\Lambda}) \right] \cdot e^{-\frac{M-\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot \frac{t}{\alpha(T)}} \right] - \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M - \sqrt{\Lambda}) \right] e^{-\frac{M+\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot \frac{t}{\alpha(T)}} + \frac{E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}}{\eta_2} \right\} + \eta_1 \dot{\epsilon} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),得到温度应变能的表达式,见

式(6):

$$W_\epsilon = \frac{\epsilon \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}} \int_0^{\epsilon(T)} \left\{ \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M + \sqrt{\Lambda}) e^{-\frac{M-\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot \frac{t}{\alpha(T)}} \right] \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M - \sqrt{\Lambda}) e^{-\frac{M+\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot \frac{t}{\alpha(T)}} + \frac{E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}}{\eta_2} \right] \right\} d\epsilon \quad (6)$$

从式(6)可知温度应变能是时间 t 的函数,被积函数的表达式非常复杂,同时移位因子是指数函数,这就使积分变得更加复杂,为了简化计算,对式(6)进行离散化处理,将时间步长设为 2 s,对积分进行离散处理,已知应变率为 4×10^{-4} /s, t_i 时刻 T_i 温度下对应的移位因子为 $\alpha(T)_i$,温度达到 T 时,其所用时间为 $(10 - T)/5$,则温度应变能密度的计算式最终离散化为式(7),具体计算结果见表 2。

$$W_\epsilon = \frac{(4 \times 10^{-4})^2 \eta_1 \eta_2}{1800 E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}} \sum_{i=0}^{\frac{10-T}{5} \cdot 1800} \left\{ \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M + \sqrt{\Lambda}) e^{-\frac{M-\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot \frac{t}{\alpha(T)}} \right] \left[E_1 - \frac{E_1 E_2}{2\eta_2} (M - \sqrt{\Lambda}) e^{-\frac{M+\sqrt{\Lambda}}{2\eta_1 \eta_2} \cdot \frac{t}{\alpha(T)}} + \frac{E_1 E_2 \sqrt{\Lambda}}{\eta_2} \right] \right\} \quad (7)$$

表 2 胶粉改性沥青混合料温度应变能密度

温度/ ℃	温度应变能密度/(kJ · m ⁻³)			
	HRMAM @60	WRMAM @60	HRMAM @complex	WRMAM @complex
0	0.448	0.362	0.668	0.442
-10	3.228	1.680	5.924	2.537
-20	11.910	6.180	13.870	14.370
-30	55.780	27.210	65.480	76.280

2.3.3 低温开裂温度预估

由表 1 得到低温弯曲破坏能密度随温度的变化规律,由表 2 得到温度应变能密度随温度的变化规律,将表 1、2 的结果绘于图 5。

由图 5 可知:弯曲破坏能密度随温度的降低而减小;相反,温度应变能密度随温度的降低而增大,说明一定存在一个临界温度,高于此温度前者大于后者,低于此温度后者大于前者,并将该临界温度定义为预估开裂温度。但是考虑到试验设备等因素限制,-30℃的测试结果精度较差且难以获取(该温度下试验试件变形小且线性差动式位移传感器极易结霜,导致传感器难以精确测量试件的变形);因此试验仅在 0、-10、

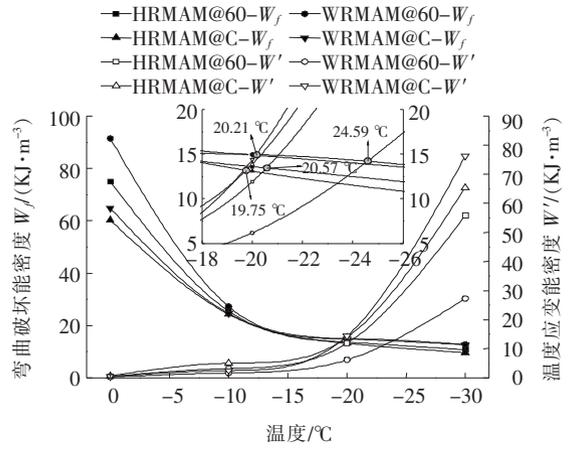


图 5 开裂温度预估

-20℃3个温度下进行了测试,为了找到低温弯曲破坏能密度和温度应变能密度两条曲线的交点(临界温度),不得不根据已有数据通过插值获取-30℃的弯曲破坏能密度。同时根据时温等效原理,采用 Arrhenius 公式将其他实测温度的黏弹参数转化为-30℃黏弹参数,从而计算-30℃的温度应变能密度。最终将得到的交点作为预估的开裂温度列于表 3。

表 3 胶粉改性沥青混合料预估开裂温度

胶粉改性沥青混合料	预估开裂温度/℃
HRMAM@60	-20.57
WRMAM@60	-24.59
HRMAM@complex	-19.75
WRMAM@complex	-20.21

从表 3 可知:对热拌沥青混合料:60 目胶粉改性沥青混合料的开裂温度为-20.57℃,混合目胶粉改性沥青混合料的开裂温度为-19.75℃,前者的开裂温度比后者低 0.82℃,说明热拌 60 目胶粉改性沥青混合料的低温适应性更强;同样,对温拌沥青混合料:60 目胶粉改性沥青混合料的开裂温度比混合目胶粉改性沥青混合料低 4.38℃,说明温拌 60 目胶粉改性沥青混合料的低温适应性更强。对比温拌前、后的沥青混合料:温拌后 60 目和混合目两类胶粉改性沥青混合料的开裂温度分别降低了 4.02、0.46℃,说明温拌后沥青混合料可以在更低的温度下工作而不致开裂。且温拌后 60 目胶粉改性沥青混合料的低温改善效果比混合目胶粉改性沥青混合料更加显著。预估的开裂温度计算结果也同样说明温拌 60 目胶粉改性沥青混合料的低温性能最佳。

尽管不同胶粉改性沥青混合料之间的低温开裂温度预估值之间的差异性比较小,但是依然存在差异,出

现这种现象的原因一方面是因为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的弯曲破坏能密度是根据 0 、 -10 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3个实测温度的试验结果采用插值法求得,事实上当温度较低时沥青混合料表现出弹性材料的特性,其弯曲破坏能密度可近似为一个常数,那么采用插值法预测的结果往往偏小;另一方面,因为在计算温度应变能密度过程中假设降温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。由式(7)及相关文献^[20]可知,降温速率越大,温度应变能密度也越大。实际沥青路面的降温速率往往小于假设的降温速率,因此实际的温度应变能密度也比理论计算值小。正是因为插值法得到的 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的弯曲破坏能密度偏小而理论计算的温度应变能密度又偏大,导致计算结果偏保守且其差异性也较小。尽管预估的开裂温度不等于实际的开裂温度,但可将其作为低温性能的一个重要参考指标。为了获得真实的开裂温度,建议采用约束试件的温度应力试验(TSRST)完成进一步验证。

3 结论

(1) 弯曲破坏能密度可作为评价温拌胶粉改性沥青混合料低温性能的重要指标。

(2) 低温弯曲蠕变试验结果表明:温度越低,蠕变速率也小。 60 目胶粉改性沥青混合料的低温性能始终优于对应的混合目胶粉改性沥青混合料,且温拌后混合料的低温性能有一定程度的提高。

(3) 以 Burgers 模型为基础预估的开裂温度同样显示出温拌 60 目胶粉改性沥青混合料优越的低温性能。

参考文献:

[1] YANG X, YOU Z P, PERRAM D, et al. Emission Analysis of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt in Hot and Warm Mix Conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365: 942-951.

[2] HICKS R G, LUNDY J R, LEAHY R B, et al. Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida[C]. Interim Report, 1995.

[3] HURLEY G C, PROWELL B D. Evaluation of Evotherm for Use in Warm Mix Asphalt[R]. NCAT Report, 2006.

[4] 王岚, 常春清, 邢永明. 胶粉改性沥青混合料弯曲蠕变试验研究[J]. 工程力学, 2011(s1): 40-43.

[5] 张占军, 闵召辉, 黄卫. 不同交联度环氧沥青混合料低温弯曲性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 35-39.

[6] 夏荣辉. 橡胶颗粒环氧沥青混合料性能研究[D]. 南京: 东

南大学, 2015.

[7] TAN Y Q, ZHANG L, XU H N. Evaluation of Low-Temperature Performance of Asphalt Paving Mixtures[J]. Cold Regions Science & Technology, 2012, 70: 107-112.

[8] 李彩霞, 张苛, 罗要飞. 基于半圆弯拉试验的多聚磷酸改性沥青混合料低温性能改善研究[J]. 中外公路, 2019, 39(4): 234-239.

[9] 李伟. 两类温拌剂 SBS 沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 293-298.

[10] 禚炜安, 刘斌清. 不同温拌剂对沥青及其混合料性能指标的影响分析[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 273-277.

[11] 李永麟, 陈雄飞, 缪幸龙, 等. 温拌沥青混凝土路用性能研究及应用[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 298-300.

[12] 交通部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.

[13] ZHOU J, CHEN X H, XU G, et al. Evaluation of Low Temperature Performance for SBS/CR Compound Modified Asphalt Binders Based on Fractional Viscoelastic Model[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 326-336.

[14] HILL B, BEHNIA B, BUTTLAR W G, et al. Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(12): 1 887-1 897.

[15] PUTMANB J, LYONS K R. Evaluation of Warm-Mix and Rubber-Modified Open-Graded Friction Course Test Sections Made without Fibers in South Carolina[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2 446(1): 70-77.

[16] LI X J, BRAHAM A F, MARASTEANU M O, et al. Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature[J]. Road Materials and Pavement Design, 2008, 9(sup1): 397-416.

[17] WU H, SUN B B, LI Z, et al. Characterizing Thermal Behaviors of Various Pavement Materials and their Thermal Impacts on Ambient Environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1 358-1 367.

[18] MONTGOMERY T. S., WILLIAM J. M.. Introduction to Polymer Viscoelasticity[M]. (Farth Edition). East China University of Science and Technology, 2012.

[19] YIN Y M, HUANG W K, LYU J B, et al. Unified Construction of Dynamic Rheological Master Curve of Asphalts and Asphalt Mixtures[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(9): 1 057-1 067.

[20] TAN Y Q, ZHANG L, JI L. Analysis of the Evaluation Indices from TSRST[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(10): 1 310-1 316.