

文章编号:1007-9629(2022)12-1313-08

基于 Burgers 模型的温拌胶粉沥青胶浆 低温流变特性

杨丽娟^{1,2}, 龙念泉³, 王 岚^{1,2,*}, 单鸣宇^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 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; 3. 北京城建道桥建设集团有限公司,
北京 100124)

摘要: 为了研究热氧老化作用对 SDYK 表面活性剂型温拌胶粉改性沥青胶浆 (SWCRM) 和 EM 降黏剂型温拌胶粉改性沥青胶浆 (EWCRM) 低温流变特性的影响, 对热氧老化后的 SWCRM、EWCRM 以及热拌胶粉改性沥青胶浆 (HCRM) 进行弯曲梁流变 (BBR) 试验, 以劲度模量 (S) 与蠕变速率敏感指数 (m) 的比值 S/m 及基于 Burgers 模型的松弛时间 (λ) 和低温综合柔量参数 (J_c) 为指标, 分析老化作用对 3 种沥青胶浆低温流变特性的影响。结果表明: 3 种沥青胶浆热氧老化后的低温流变性能均减弱; 采用 Burgers 模型研究沥青胶浆的低温流变性能是合理的; J_c 能很好地描述沥青胶浆的低温流变性能; 在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, EWCRM 的 S/m 值和 J_c 值相较于 HCRM 分别下降了 12.72%、8.58%, SWCRM 的 S/m 值和 J_c 值相较于 HCRM 分别下降了 30.09%、20.71%, 说明温拌剂的加入会改善沥青胶浆的低温流变性能, 且 SDYK 的改善效果优于 EM。

关键词: 温拌胶粉改性沥青胶浆; 弯曲梁流变试验; Burgers 模型; 低温综合柔量参数

中图分类号: U414

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.12.014

Low-Temperature Rheological Properties of Warm-Mixed Crumb Rubber Asphalt Mortar Based on Burgers Model

YANG Lijuan^{1,2}, LONG Nianquan³, WANG Lan^{1,2,*}, SHAN Mingyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
3. Beijing Urban Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the effect of thermo-oxidative aging on the low temperature rheological properties of SDYK surfactant warm mix crumb rubber modified asphalt mortar (SWCRM) and EM viscosity reducer warm mix crumb rubber modified asphalt mortar (EWCRM), the bending beam rheological (BBR) test was carried out on SWCRM, EWCRM and hot mix crumb rubber modified asphalt mortar (HCRM) after thermo-oxidative aging. The effects of aging on the low temperature rheological properties of three kinds of asphalt mortar were analyzed by using S/m (S is stiffness modulus, m is creep rate sensitivity index), relaxation time λ based on Burgers model and low temperature comprehensive compliance parameter J_c as indexes. The results show that the low-temperature rheological properties of the three asphalt mortars are weakened after thermal oxidative aging. It is reasonable to study the low temperature rheological properties of asphalt mortar by Burgers model. J_c can well describe the low-temperature

收稿日期: 2021-10-13; 修订日期: 2021-12-28

基金项目: 内蒙古自治区关键技术攻关项目 (2019GG031)

第一作者: 杨丽娟 (1996—), 女, 甘肃会宁人, 内蒙古工业大学硕士生。E-mail: 2469331398@qq.com

通讯作者: 王 岚 (1966—), 女, 北京人, 内蒙古工业大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wanglan661018@163.com

rheological properties of asphalt mortar. At $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, the S/m value and J_c value of EWCRM decreases by 12.72 % and 8.58 % compared with HCRM. And the S/m value and J_c value of SWCRM decrease by 30.09% and 20.71 %. It follows that the addition of warm mix agent will improve the low temperature rheological properties of asphalt mortar, and SDYK is better than EM.

Key words: warm-mix crumb rubber modified asphalt mortar; bending beam rheological test; Burgers model; low temperature comprehensive compliance parameters

近年来,胶粉改性沥青混合料以其优越的高低温性能被广泛应用到路面铺筑中,温拌技术能有效解决施工过程中的高能耗、高排放等问题.根据沥青胶浆理论,沥青胶浆的性能很大程度上决定着沥青混合料的路用性能.相关研究表明:沥青胶浆的低温性能与路面低温性能的相关度较沥青更高^[1].

沥青胶浆是沥青混合料中的实际胶结材料,由沥青与矿粉按照一定比例组合而成.吴正光等^[2]研制了一种沥青胶浆纤维专用的拉拔试验机,此试验机能够定量测定纤维与沥青胶浆的相容性.温彦凯等^[3]分析了粉胶比对泡沫温拌沥青胶浆高低温性能的影响,发现随着粉胶比的增加,泡沫温拌沥青胶浆的高温性能逐渐增强,低温性能逐渐降低,但其粉胶比不宜大于1.0. Tao等^[4]以钢渣代替石灰岩矿粉来制备沥青胶浆,发现钢渣作为矿物填料可以提高沥青胶浆的抗变形能力,但其低温开裂性能略有降低.王岚等^[5]研究了热氧老化条件下热拌、温拌胶粉沥青胶浆的低温抗裂性能,发现温拌胶粉改性沥青胶浆具有更好的抗开裂性能.

当前越来越多的学者采用弯曲梁流变(BBR)试验来研究沥青的低温性能,并取得了诸多成果^[6-9],但对沥青胶浆的研究并没有像研究沥青及沥青混合料那么深入.因此,本文通过BBR试验研究温拌胶粉改性沥青胶浆的低温流变特性,采用劲度模量(S)与蠕变速率敏感指数(m)的比值 S/m 及基于Burgres模型的低温指标来研究热氧老化作用对SDYK表面活性剂型温拌胶粉改性沥青胶浆(SWCRM)和EM降黏剂型温拌胶粉改性沥青胶浆(EWCRM)低温流变特性的影响.

1 试验材料与方案

1.1 原材料

基质沥青(BA)为盘锦90#石油沥青,改性剂为

600 μm (30目)橡胶粉颗粒.在基质沥青中掺加20% (质量分数,下同)的橡胶粉颗粒,经湿法制成胶粉改性沥青(CR).基质沥青与胶粉改性沥青的性能如表1所示.其中:CR-EM为EM型胶粉改性沥青,CR-SDYK为SDYK型胶粉改性沥青.温拌剂为SDYK型表面活性剂和EM型降黏剂,根据课题组相关研究^[10],SDYK和EM的掺量分别为基质沥青质量的0.6%和1.0%时,胶粉改性沥青的性能最佳.矿粉由石灰岩磨制而成,按照JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》测量其各技术指标,如表2所示.

将矿粉放置于 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中4 h以上,接着按质量比1:1的粉胶比^[11]逐次加入到温拌胶粉改性沥青中,并在 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右下高速搅拌30 min左右,待其自然冷却,即可制得温拌胶粉改性沥青胶浆.

1.2 试验方法

1.2.1 热氧老化试验

将温拌胶粉改性沥青胶浆分别注入4个已称质量的盛样皿中,然后置于旋转薄膜烘箱(RTFO)中,在 $(163\pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(5.5\pm 1)\text{ r/min}$ 条件下保持5 h,以模拟沥青胶浆的短期老化.将短期老化后的胶粉改性沥青胶浆置于压力老化仪(PAV)中,保持 $(95\pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、空气压力 $(2.1\pm 0.1)\text{ MPa}$ 20 h,以模拟沥青胶浆的长期老化.

表1 基质沥青与胶粉改性沥青的性能
Table 1 Properties of base asphalt and crumb rubber powder modified asphalt

Asphalt type	Penetration($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)/ (0.1 mm)	Softening point/ $^{\circ}\text{C}$	Ductility ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$)/cm
BA	91.5	51.5	9.4
CR	43.3	72.2	13.4
CR-EM	39.4	78.5	17.1
CR-SDYK	37.5	79.6	17.8

表2 矿粉的技术指标
Table 2 Technological indexes of mineral powder

Index	Result	Technical standard	Test method
Water content(by mass)/%	0.5	≤ 1	T0103
Percentage of particle($\leq 0.075\text{ mm}$)/%	100	75-100	T0351
Apparent density/ $(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	2.7	≥ 2.5	T0352
Hydrophilic coefficient	0.5	< 1	T0353
Plasticity index/%	2.1	< 4	T0354

1.2.2 BBR试验

为了研究温拌和热拌胶粉改性沥青胶浆的低温流变性能,对未老化、短期老化和长期老化后的HCRM、WECRM和SWCRM分别进行BBR试验.试件尺寸为127.00 mm×12.70 mm×6.35 mm,试验温度(T)为-6、-12、-18℃.对梁施加0.980 N的荷载240 s,用位移传感器测量其挠度,240 s后卸去荷载.

1.3 Burgers模型

Burgers模型在沥青低温流变中的应用比较广泛,由1个Kelvin模型和1个Maxwell模型串联而成(见图1).该模型能够有效地表征黏弹性材料的蠕变回复和应力松弛等力学行为,因此可以更好地反映沥青材料的黏弹特性^[12].

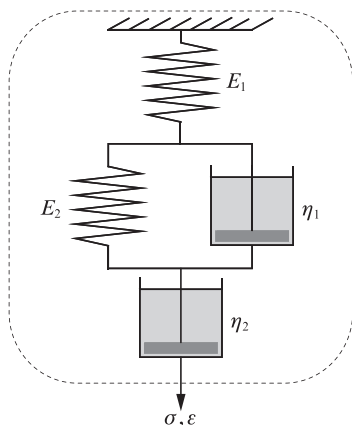


图1 Burgers模型示意图
Fig. 1 Burgers model

Burgers模型的本构方程如式(1)所示.

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} = q_1 \dot{\epsilon} + q_2 \ddot{\epsilon} \quad (1)$$

式中: σ 为应力,MPa; ϵ 为应变; $\dot{\sigma}$ 、 $\dot{\epsilon}$ 分别为应力、应变对时间的一阶微分; $\ddot{\sigma}$ 、 $\ddot{\epsilon}$ 分别为应力、应变对时间的二阶微分; $p_1 = (\eta_1 E_1 + \eta_1 E_2 + \eta_2 E_1) / E_1 E_2$; $p_2 = \eta_1 \eta_2 / E_1 E_2$; $q_1 = \eta_1$; $q_2 = \eta_1 \eta_2 / E_2$.其中: E_1 为瞬时弹性模量,MPa; E_2 为延迟弹性模量,MPa; η_1 为黏性流动系数,MPa·s; η_2 为延迟黏性流动系数,MPa·s.

将最大弯拉应力(σ_0)代入本构方程,通过数学推演,可以得到Burgers模型的蠕变方程如式(2)所示.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}) \quad (2)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为 t 时刻的应变; t 为时间,s.

两边同时除以 σ_0 ,可以得到式(3).

$$J(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}) \quad (3)$$

式中: $J(t)$ 为 t 时刻的蠕变柔量,MPa⁻¹.

1.3.1 松弛时间

沥青的松弛时间(λ)代表了沥青材料应力消散的能力,它作为沥青材料的内部时间参数,可以反映出沥青材料中应力随时间的变化情况.松弛时间越短,说明应力松弛速率越高,对沥青材料内部快速消散应力越有利,沥青材料的低温性能越好. λ 的计算如式(4)所示.

$$\lambda = \frac{\eta_1}{E_1} \quad (4)$$

1.3.2 低温综合柔量参数

低温综合柔量参数(J_c)是利用Burgers模型中黏弹变形比例来整体体现沥青胶浆黏弹特性的,能更加全面地评价沥青胶浆的低温流变性能^[13].沥青胶浆的 J_c 越小,其中黏性成分的占比越高,低温流变性能越好. J_c 的计算如式(5)所示.

$$J_c = \frac{1}{J_v} \left(1 - \frac{J_E + J_{DE}}{J_E + J_{DE} + J_v} \right) \quad (5)$$

式中: $J_E = \frac{1}{E_1}$; $J_{DE} = \frac{1}{E_2} (1 - \frac{-E_2 t}{\eta_2})$; $J_v = \frac{t}{\eta_1}$.

2 结果与分析

2.1 低温指标

谭忆秋等^[14]研究发现,仅以单一的 S 或者 m 指标来评价橡胶沥青的低温性能,存在着一定的局限性,兼顾二者评价橡胶沥青的低温性能会更加全面.为了防止沥青路面低温开裂并确定允许的极限温度,Superpave规范规定 $S \leq 300$ MPa, $m \geq 0.3$,故可采用 $t=60$ s时胶粉改性沥青胶浆的 S/m 值作为评价其低温性能的指标.BBR试验的 S 值越小, m 值越大,即 S/m 值越小,沥青胶浆的低温流变性能越好.不同老化条件下温拌、热拌胶粉改性沥青胶浆的 S/m 值如图2所示.

在-6℃时,由于SDYK型表面活性剂的加入显著提高了胶粉改性沥青胶浆的流动性,未老化SWCRM小梁试件的跨中形变大于4 mm,试验结果无效.

由图2可见:

(1)随着温度的降低,3种胶粉改性沥青胶浆的 S/m 值均增大,说明3种胶粉改性沥青胶浆的低温流变性能均变差.随着温度的降低,沥青胶浆中的黏性成分减少而弹性成分增加,导致其 S 值增大, m 值减小,低温流变性能减弱.

(2)无论哪种沥青胶浆,老化后的 S/m 值均大于老化前,说明老化作用会使沥青胶浆的低温流变性能变差.这是因为老化使沥青中的油性成分减少^[15],

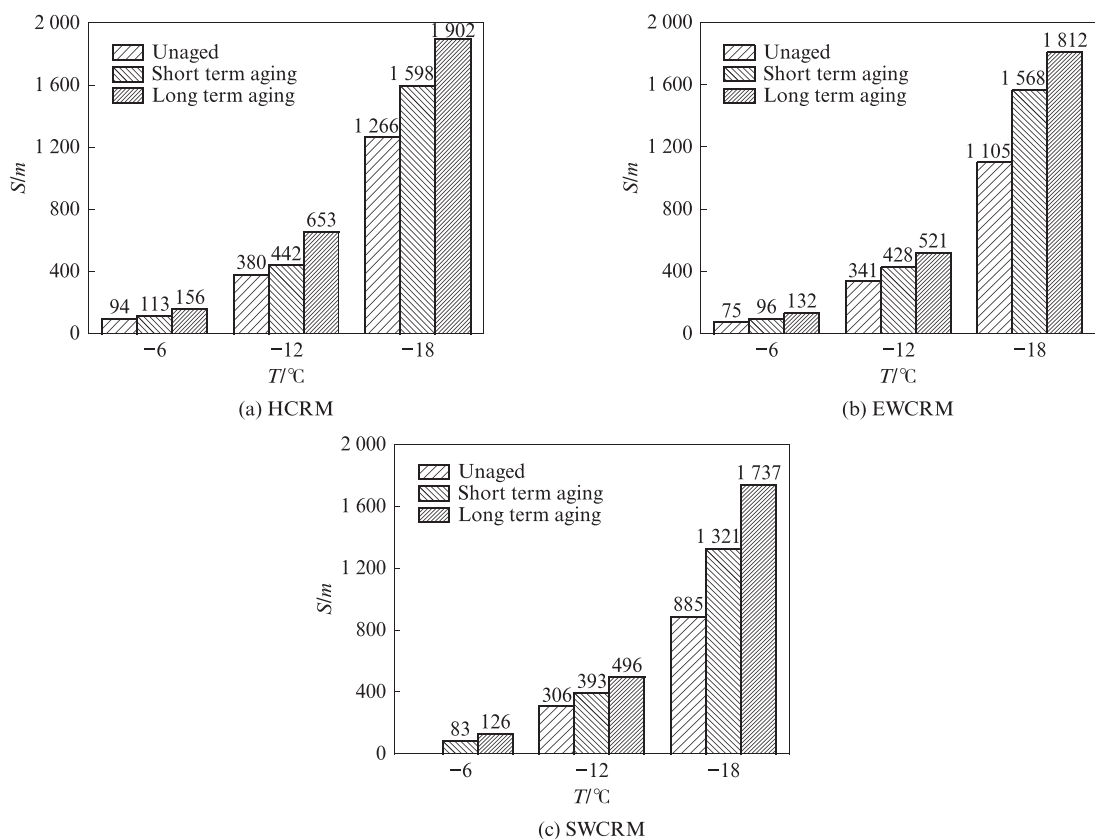


图2 不同老化条件下温拌、热拌胶粉改性沥青胶浆的 S/m 值
Fig. 2 S/m values of HCRM, EWCRM and SWCRM under different aging conditions

沥青质所占的比例相对升高,使沥青胶浆的塑性与延性降低。

(3)温拌剂的加入会降低沥青胶浆的 S/m 值,在 -12 、 -18 °C 时,EM 温拌剂的加入使 EWCRM 的 S/m 值较 HCRM 分别降低 10.26%、12.72%,SDYK 温拌剂的加入使 SWCRM 的 S/m 值较 HCRM 分别降低 19.47%、30.09%,说明温拌剂的加入能提高胶粉沥青胶浆的低温流变性能.SWCRM 的 S/m 值下降大于 EWCRM,说明 SWCRM 的低温流变性能强于 EWCRM.这主要是由于2种温拌剂的作用机理不同,EM 的加入降低了沥青胶浆的黏度,SDYK 的加入改善了沥青在集料表面的铺展性能,使沥青在较低温度下就能更好地与集料进行裹附^[16]。

2.2 基于 Burgers 模型的低温指标

以 -18 °C 时未老化的 SWCRM 的 BBR 试验数据为例,结合 Burgers 模型的蠕变方程,利用 Origin 软件对蠕变柔量与加载时间曲线进行拟合.图3为 SWCRM 蠕变模型的拟合图.由图3可见:拟合效果很好,相关系数为 0.997 95;不同温度及老化条件下,温拌胶粉改性沥青胶浆和热拌胶粉改性沥青胶浆的拟合效果都很好,表明 Burgers 黏弹模型能够很好地描述和分析沥青胶浆 BBR 试验中的蠕变过程。

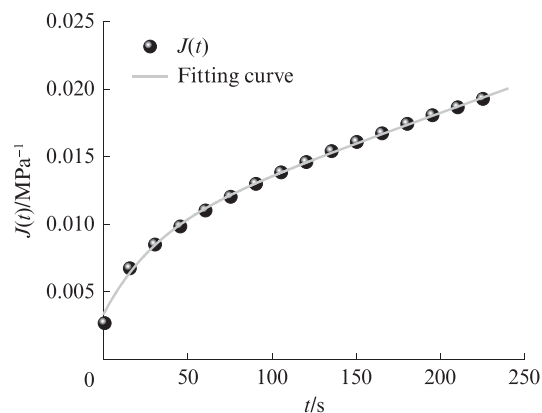


图3 SWCRM 蠕变模型的拟合图
Fig. 3 Fitting diagram of SWCRM creep model

2.2.1 黏弹性指标

表3为 HCRM、EWCRM、SWCRM 在 -18 °C 时的 Burgers 模型参数和黏弹性指标.其中: τ 为延迟时间.由表3可见:

(1)对于3种沥青胶浆而言,随着老化程度的加深,黏弹性参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 大体均呈增大的趋势,松弛时间 λ 增大,延迟时间 τ 大体呈减小的趋势,说明沥青材料中弹性成分的比例增大.这主要是因为老化作用使沥青胶浆中轻质成分减少,沥青质所占的比例相对增加,使沥青胶浆变硬变脆,黏结性降低,故

表 3 HCRM、EWCRM 和 SWCRM 在 -18°C 时的 Burgers 模型参数和黏弹性指标
Table 3 Parameters and viscoelasticity indexes of Burgers model of HCRM, EWCRM and SWCRM at -18°C

Asphalt mortar	Aging degree	E_1/MPa	E_2/MPa	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	λ/s	τ/s	J_c/MPa^{-1}
HCRM	Unaged	352.9	216.3	29 320.9	352.9	83.1	30.9	113.2
	Short term aging	346.5	264.3	40 618.4	346.5	117.2	25.1	128.2
	Long term aging	387.0	281.9	46 460.0	387.0	120.0	28.6	143.1
EWCRM	Unaged	299.1	198.8	30 642.9	299.1	102.5	29.7	103.4
	Short term aging	346.3	242.7	37 313.5	346.3	107.7	27.5	122.7
	Long term aging	364.5	268.4	43 225.4	364.5	118.6	25.8	133.5
SWCRM	Unaged	294.1	169.3	22 383.4	294.1	76.1	30.8	89.7
	Short term aging	375.1	229.1	29 835.9	375.1	79.5	30.4	118.6
	Long term aging	366.7	258.0	36 934.1	366.7	100.7	29.3	129.4

其低温流变性能降低。

(2) 无论哪种老化方式下, SWCRM 的松弛时间明显小于其余 2 种沥青胶浆, 延迟时间大于其余 2 种, 说明 SWCRM 的应力松弛能力更强, 低温流变性能更优。这与前面 S/m 值所表现出来的规律是一致的, 也说明采用 Burgers 模型的黏弹指标来评价沥青胶浆的低温流变性能是合理的。

2.2.2 低温综合柔量参数

不同种类胶粉改性沥青胶浆 J_c 值随温度的变化如图 4 所示。由图 4 可见:

(1) 不论是否老化, 随着温度的降低, 3 种胶粉改性沥青胶浆的 J_c 值均有增大的趋势。总体而言, 3 种胶粉改性沥青胶浆 J_c 值的大小顺序为: HCRM >

EWCRM > SWCRM, 说明温拌剂的加入会改善沥青胶浆的低温流变性能。

(2) 在 -12°C 、 -18°C 时, EWCRM 的 J_c 值较 HCRM 分别下降 10.14%、8.58%, SWCRM 的 J_c 值较 HCRM 分别下降 17.85%、20.71%。说明 SDYK 表面活性剂型的改善效果优于 EM 降黏剂型。这主要是由于二者与沥青的作用机理不同, SDYK 表面活性剂中的极性基易被沥青胶质吸附, 致使沥青质聚集结构比较松散, 所以在低温下具有一定的流动性^[17], EM 降黏剂的加入会使沥青化学官能团发生变化, 形成降黏剂溶剂化层, 阻碍沥青四组分重新聚集在一起, 有利于降低沥青黏度^[18], 提高沥青胶浆的流动性。

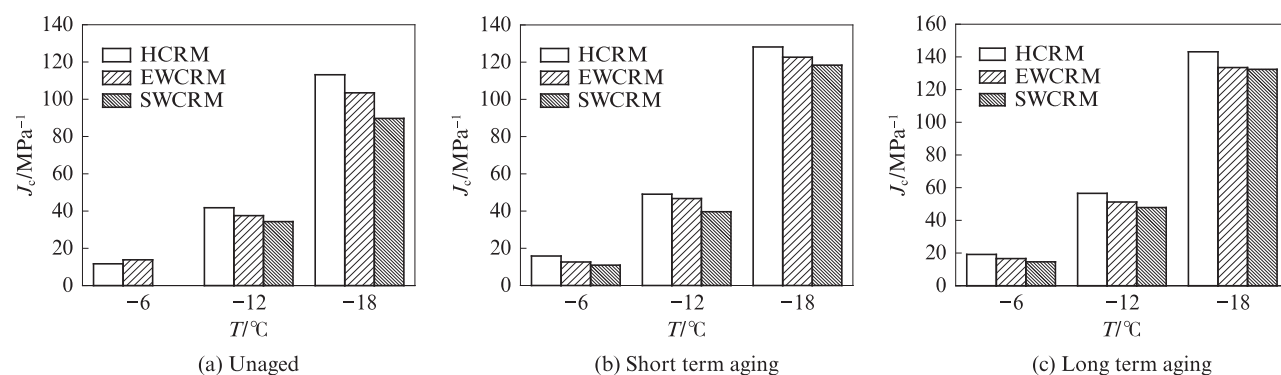


图 4 不同种类胶粉改性沥青胶浆 J_c 值随温度的变化

Fig. 4 Variation of J_c values of different types of crumb rubber modified asphalt mortar with temperature

图 5 为不同老化方式下胶粉改性沥青胶浆 J_c 值随温度的变化。

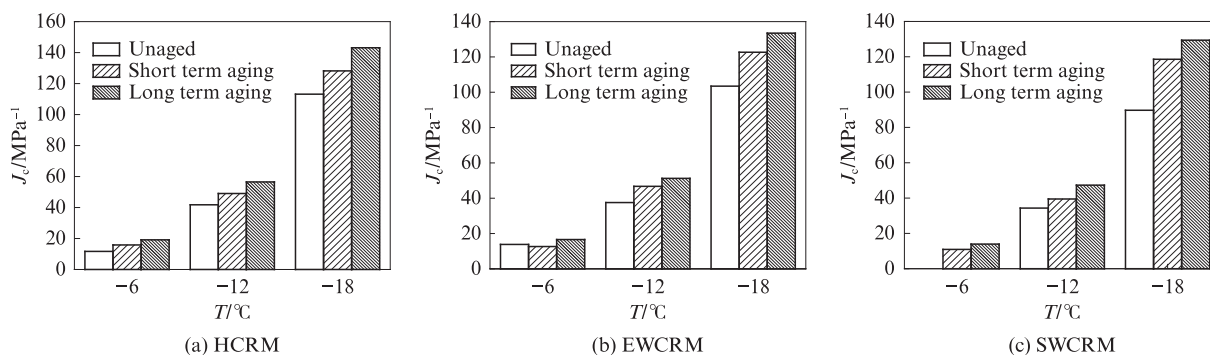
由图 5 可见:

(1) 随着老化程度的加深, 3 种胶粉改性沥青胶浆的 J_c 值均呈增大趋势, 说明老化作用使沥青胶浆的低温流变性能变差。这主要是因为老化作用使沥青胶浆中的轻质组分减少, 弹性成分占比增加。

(2) 综合来看, -12°C ~ -18°C 区间, J_c 值的增大速率大于 -6°C ~ -12°C 区间的增大速率。说明温度越低, 对沥青胶浆的低温流变性能影响越大, 这与前面 S/m - T 图表现出的规律是一致的。

2.3 相关性分析

低温连续分级温度反映的是沥青材料满足使用要求时的一个临界开裂温度。该温度越低, 表明沥青材料抗开裂的能力越强。由于沥青低温 PG 分

图5 不同老化方式下胶粉改性沥青胶浆 J_c 值随温度的变化Fig. 5 Variation of J_c values of crumb rubber modified asphalt mortar with temperature under different aging types

级区间为 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$,跨度较大,可能导致不同沥青材料在同一低温分级下的性能有显著差异,所以将PG分级进行细化得出低温连续分级温度(T_{LC}),可以更好地描述沥青材料的低温性能.参照ASTMD7643-10《Standard practice for determining the continuous grading temperatures and continuous grades for PG graded asphalt binders》,可采用 T_{LC} 对试验沥青进行评价. T_{LC} 是根据沥青PG分级推导得到的沥青低温性能评价指标,可以根据BBR试验得出的 S 值与 m 值,通过式(6)、(7)线性回归得出.

$$\lg S = A + BT_s \quad (6)$$

$$\lg m = C + DT_m \quad (7)$$

式中: T_s 为不同的 S 值所对应的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_m 为不同的 m 值所对应的温度, $^{\circ}\text{C}$; A 、 B 、 C 、 D 均为拟合参数,与材料属性有关.

经过线性拟合发现,老化前后3种沥青胶浆 $\lg S$ 与 T_s 、 $\lg m$ 与 T_m 的拟合效果都很好.以长期老化为例,线性回归结果如表4所示.其中 T_{LS} 为 S 值达到300 MPa时的临界温度, T_{Lm} 为 m 值达到0.3时的临界温度,取两者中温度较大者为低温连续分级温度,这种方式同时考虑 S 值和 m 值对沥青低温分级的作用,可以综合评价沥青的低温性能.3种沥青胶浆的低温连续分级温度如表5所示.

表4 长期老化下沥青胶浆的线性回归结果

Table 4 Linear regression results of asphalt mortar under long term aging

Asphalt mortar	Relation between $\lg S$ and T_s	Relation between $\lg m$ and T_m
HCRM	$\lg S = 0.0723T_s + 1.509$, $R^2 = 0.933$	$\lg m = 0.0181T_m - 0.165$, $R^2 = 0.996$
EWCRM	$\lg S = 0.0757T_s + 1.409$, $R^2 = 0.997$	$\lg m = 0.0191T_m - 0.151$, $R^2 = 0.999$
SWCRM	$\lg S = 0.0759T_s + 1.389$, $R^2 = 0.997$	$\lg m = 0.0189T_m - 0.152$, $R^2 = 0.998$

表5 不同老化条件下沥青胶浆的低温连续分级温度

Table 5 T_{LC} values of asphalt mortar under different aging conditions

Asphalt mortar	Aging degree	$T_{LS}/^{\circ}\text{C}$	$T_{Lm}/^{\circ}\text{C}$	$T_{LC}/^{\circ}\text{C}$
HCRM	Unaged	-15.20	-25.97	-15.20
	Short term aging	-14.45	-22.36	-14.45
	Long term aging	-13.34	-19.77	-13.34
EWCRM	Unaged	-15.73	-24.81	-15.73
	Short term aging	-14.67	-21.47	-14.67
	Long term aging	-14.10	-19.49	-14.10
SWCRM	Unaged	-16.54	-34.19	-16.54
	Short term aging	-15.14	-25.38	-15.14
	Long term aging	-14.34	-19.59	-14.34

将BBR试验 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 S/m 值及基于Burgers模型得到的黏弹指标(λ 、 J_c)分别与 T_{LC} 进行相关性分析.以长期老化条件下的沥青胶浆为例,低温指标(S/m 、 λ 、 J_c)与 T_{LC} 之间的相关性如图6所示.

表6为不同老化条件下沥青胶浆各低温指标与 T_{LC} 的相关系数(R^2).

由表6可以看出,老化前后沥青胶浆的 S/m 值与 J_c 、 T_{LC} 的相关性都很高,说明 S/m 值与 J_c 都是评

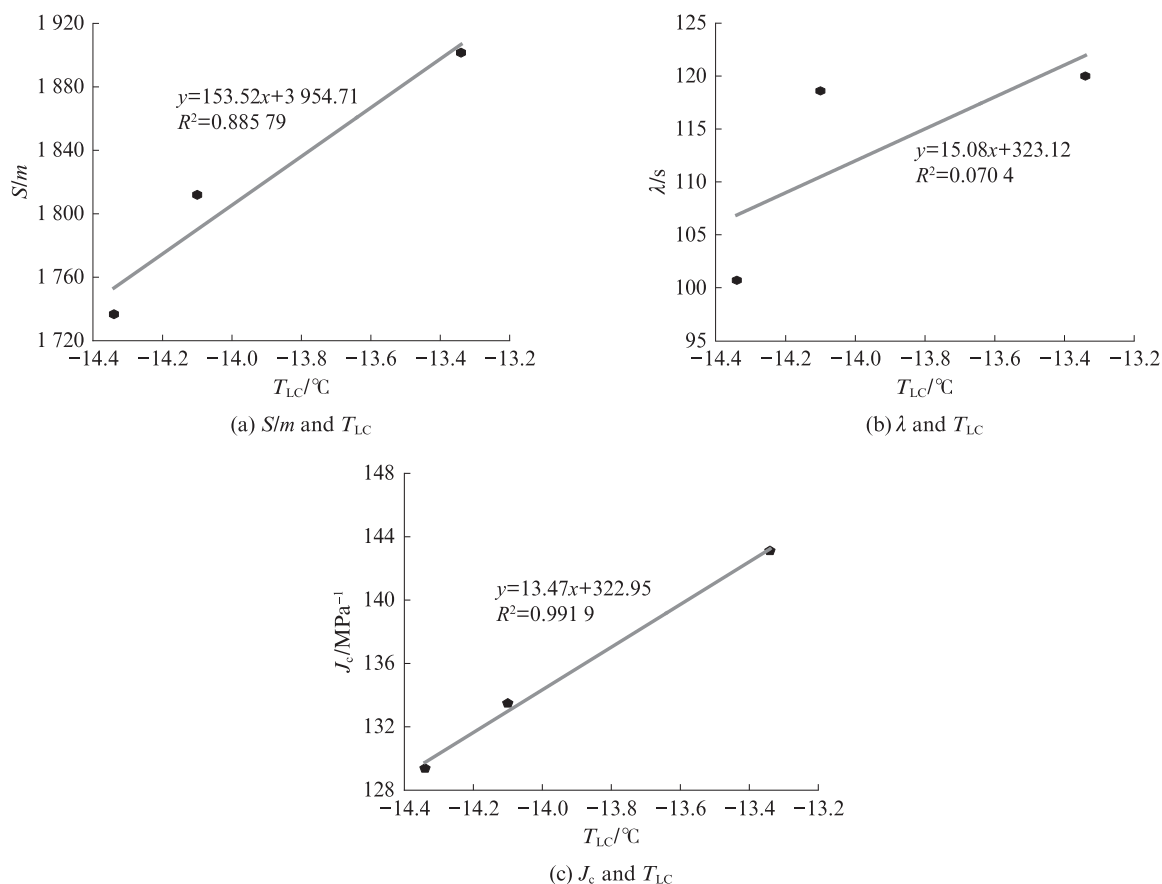
图 6 长期老化条件下沥青胶浆低温指标与 T_{LC} 的相关性Fig. 6 Correlation between low temperature index and T_{LC} of asphalt mortar under long term aging condition

表 6 不同老化条件下沥青胶浆各低温指标与 T_{LC} 的相关系数
Table 6 Correlation coefficient between low temperature index and T_{LC} of asphalt mortar under different aging conditions

Aging degree	Index	R^2
Unaged	S/m	0.998
	λ	0.726
	J_e	0.999
Short term aging	S/m	0.906
	λ	0.989
	J_e	0.836
Long term aging	S/m	0.886
	λ	0.070
	J_e	0.992

价沥青胶浆低温流变性能的很好指标.相对来说,老化前的相关系数高于老化后的,说明这 2 个指标对于评价老化前的沥青胶浆低温流变性能更加准确. λ 与 T_{LC} 的相关性总体上较差,但短期老化后 λ 与 T_{LC} 的相关性又比较好,没有固定的规律.根据相关系数大小可知: J_e 和 T_{LC} 的相关性最高,能更加准确地评价沥青胶浆的低温流变性能,但是计算量相对较大,在进行研究工作时可采用 J_e 来评价沥青胶浆低温流变性能. S/m 值与 T_{LC} 具有良好的相关性,

并且计算简单,适用于工程应用评价沥青胶浆的低温流变性能.

3 结论

(1)热氧老化作用会使胶粉改性沥青胶浆的低温流变性能变差. -18°C 时,EWCRM 的 S/m 值和低温综合柔量参数 J_e 值相较于 HCRM 分别下降了 12.72%、8.58%,SWCRM 的 S/m 值和 J_e 值相较于 HCRM 分别下降了 30.09%、20.71%,说明温拌剂的加入可以改善胶粉改性沥青胶浆的低温流变性能,且 SDYK 优于 EM.

(2)利用 Burgers 模型的黏弹指标评价胶粉改性沥青胶浆的低温流变性能是合理的, J_e 值能够很好地评价胶粉改性沥青胶浆的低温流变特性.

(3) J_e 值与低温连续分级温度 T_{LC} 的相关性最好,相关性系数达到 0.942,精确度高,但计算步骤复杂,可用于研究工作中评价沥青胶浆的低温流变性能. S/m 值与 T_{LC} 的相关性较好,相关系数为 0.930,计算简便,能够很好地评价沥青胶浆的低温流变性能,多用于工程中评价沥青胶浆的低温流变性能.

参考文献:

- [1] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社, 2001:1-64.
SHEN Jin'an. Pavement performance of asphalt and asphalt mixture[M]. Beijing:China Communications Press, 2001:1-64. (in Chinese)
- [2] 吴正光, 周俊, 肖鹏, 等. 沥青胶浆纤维拉拔试验机研制与应用[J]. 中国现代教育装备, 2020(3):12-14, 26.
WU Zhengguang, ZHOU Jun, XIAO Peng, et al. Development and application of asphalt mortar fiber drawing tester[J]. China Modern Education Equipment, 2020(3):12-14, 26. (in Chinese)
- [3] 温彦凯, 郭乃胜, 王淋, 等. 泡沫温拌沥青胶浆的流变特性及微观机制分析[J]. 材料导报, 2020, 34(10):10052-10060.
WEN Yankai, GUO Naisheng, WANG Lin, et al. Analysis of rheological properties and microscopic mechanism of foamed warm mix asphalt mortar[J]. Material Report, 2020, 34(10):10052-10060. (in Chinese)
- [4] TAO G Y, XIAO Y, YANG L F, et al. Characteristics of steel slag filler and its influence on rheological properties of asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:439-46.
- [5] 王岚, 单鸣宇, 常春清. 基于DIC技术的老化作用下温拌胶粉改性沥青胶浆低温抗裂性能研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10):265-275.
WANG Lan, SHAN Mingyu, CHANG Chunqing. Low-temperature crack resistance of warm-mixed crumb rubber asphalt mortar under aging effect based on DIC technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10):265-275. (in Chinese)
- [6] BELC A L, POP I O, BELC F, et al. Influence of warm mix additives on the low-temperature behavior of bitumen using the bending beam rheometer(BBR)[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273:121682.
- [7] 徐加秋, 阳恩慧, 王世法, 等. Sasobit温拌沥青的低温性能评价指标研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2):8-14, 39.
XU Jiaqiu, YANG Enhui, WANG Shifa, et al. Study on low temperature performance evaluation index of sasobit warm mix asphalt[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2020, 37(2):8-14, 39. (in Chinese)
- [8] 王勤, 杜镇宇, 毛菊良, 等. 基于剪切松弛试验的沥青低温劲度反演方法[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):294-299, 313.
WANG Qin, DU Zhenyu, MAO Juliang, et al. Back calculation method of asphalt low temperature stiffness based on shear relaxation test[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):294-299, 313. (in Chinese)
- [9] 胡富贵, 田小革, 胡宏立, 等. SBR胶乳掺量对改性乳化沥青性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):895-900.
HU Fugui, TIAN Xiaoge, HU Hongli, et al. Effect of SBR latex content on performance of modified emulsified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):895-900. (in Chinese)
- [10] 桂婉妹. 温拌胶粉改性沥青短期老化前后流变学特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2017.
GUI Wanmei. Study on rheological properties of warm mix rubber powder modified asphalt before and after short-term aging[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 郑传峰, 冯玉鹏, 郭学东, 等. 粉胶比对沥青胶浆低温黏结强度的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(2):426-431.
ZHENG Chuanfeng, FENG Yupeng, GUO Xuedong, et al. Effect of powder binder ratio on low temperature bonding strength of asphalt mortar[J]. Journal of Jilin University (Engineering), 2016, 46(2):426-431. (in Chinese)
- [12] 于江, 赵群, 叶奋, 等. 热老化作用下橡胶改性沥青的低温流变性能[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1):108-115.
YU Jiang, ZHAO Qun, YE Fen, et al. Low temperature rheological performance analysis of rubber modified asphalt under heat aging process[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1):108-115. (in Chinese)
- [13] 李波, 张喜军, 李剑新, 等. 基于Burgers模型的硬质沥青低温性能研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5):1110-1116.
LI Bo, ZHANG Xijun, LI Jianxin, et al. Study on low temperature performance of hard asphalt based on Burgers model[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):1110-1116. (in Chinese)
- [14] 谭忆秋, 符永康, 纪伦, 等. 橡胶沥青低温评价指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3):66-70.
TAN Yiqiu, FU Yongkang, JI Lun, et al. Low temperature evaluation index of rubber asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3):66-70. (in Chinese)
- [15] 黄明奎. 公路工程材料流变学[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010:68-70.
HUANG Mingkui. Rheology of highway engineering materials[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010:68-70. (in Chinese)
- [16] 林轶. 油溶性表面活性温拌剂的温拌机理研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2020.
LIN Yi. Study on warm mixing mechanism of oil soluble surfactant[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020. (in Chinese)
- [17] 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 Zhaohui, 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)
- [18] 张争奇, 宋亮亮, 陈飞. 不同温拌剂对沥青混合料性能影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3):53-58.
ZHANG Zhengqi, SONG Liangliang, CHEN Fei. Study on the influence of different warm mix agents on the performance of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(3):53-58. (in Chinese)