

文章编号:1007-9629(2021)05-1110-07

基于 Burgers 模型的硬质沥青低温性能评价

李 波¹, 张喜军¹, 李剑新², 杨克红³, 仝配配²

(1. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 中石油燃料油有限责任公司研究院, 北京 100195;

3. 中石油克拉玛依石化有限责任公司炼油化工研究院, 新疆 克拉玛依 834003)

摘要:针对以延度指标来评价硬质沥青低温性能的局限性,选取4种代表性的硬质沥青进行低温弯曲梁流变(BBR)试验,得到其蠕变劲度模量 S 、蠕变劲度变化速率 m 等参数.利用 Burgers 黏弹模型对低温蠕变柔量曲线进行拟合分析,构建了松弛时间 λ 、新指标 $m(t)/S(t)$ 和低温综合柔量参数 J_c 等沥青低温黏弹性评价指标,并与硬质沥青混合料的最大弯拉应力指标进行相关性分析.结果表明:采用单一的 S 或 m 指标评价硬质沥青的低温性能存在一定的片面性,兼顾模量、蠕变速率、松弛能力的 λ 、 $m(t)/S(t)$ 、 J_c 可以更加准确地反映和评价硬质沥青的低温流变性能;在进行研究时可以采用 $m(t)/S(t)$ 指标来评价硬质沥青的低温流变特性,但在工程应用中宜采用 λ 指标作为硬质沥青的低温评价指标.

关键词:硬质沥青;低温性能;Burgers 模型;评价指标

中图分类号:U416.4

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.029

Evaluation on Low Temperature Characterization of Hard Petroleum Asphalt Base on the Burgers Model

LI Bo¹, ZHANG Xijun¹, LI Jianxin², YANG Kehong³, TONG Peipei²

(1. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou

Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. PetroChina Fuel Oil Company Limited Research Institute, Beijing

100195, China; 3. PetroChina Karamay Petrochemical Co., Ltd., Karamay 834003, China)

Abstract: Due to the limitation of ductility index in evaluating the low temperature performance of hard petroleum asphalt, a better evaluation index of low temperature performance of hard asphalt was proposed. Bending beam rheological (BBR) test of four kinds of representative hard petroleum asphalt were carried out at different temperatures. The low-temperature parameters such as stiffness modulus and creep stiffness change rate of each asphalt sample were tested. Burgers viscoelastic model was used to fit and analyze the low temperature creep compliance curve, and the low temperature viscoelastic evaluation index of asphalt was constructed, including relaxation time λ , new index $m(t)/S(t)$, low temperature comprehensive compliance parameter J_c . At same time, the correlation analysis and comparison with the maximum bending tensile stress index of hard petroleum asphalt mixture were established. The results show that there are some limitations in using absolute index (S or m) to evaluate the low-temperature performance of hard petroleum asphalt. Considering the modulus, creep rate, λ , $m(t)/S(t)$ and J_c of hard petroleum asphalt modulus, creep rate and relaxation capacity can reflect and evaluate the low-temperature rheological properties of hard petroleum asphalt more accurately. It is suggested to

收稿日期:2020-06-23; 修订日期:2020-08-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51668038,51868042);甘肃省杰出青年基金项目(1606RJDA318);甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2020C-13);兰州市科技计划项目(2018-4-33)

第一作者:李 波(1981—),男,宁夏中卫人,兰州交通大学教授,博士生导师,博士. E-mail: libo@mail.lzjtu.cn

use index $m(t)/S(t)$ to evaluate the low-temperature rheological properties of hard petroleum asphalt during the research work, and λ should be used as the low-temperature evaluation index of hard petroleum asphalt in engineering application.

Key words: hard petroleum asphalt; low temperature performance; Burgers model; evaluation indicator

近年以来,由于车辆大型化、超载、渠化交通的影响,车辙成为沥青路面的主要病害之一^[1-2]。当前,改善沥青混合料的高温抗车辙性能主要是通过添加改性剂。但是,改性沥青一般价格都比较昂贵,贮存要求高。与改性沥青相比,硬质沥青不但价格更为低廉,而且也具有相对优良的高温抗车辙性能^[3-4]。现阶段,中国现行技术规范中并没有针对硬质沥青的低温评价方法,低温评价指标也不够完善,使得硬质沥青在中国低温地区的应用受到了极大的限制。目前,国内常用的评价硬质沥青低温性能的指标依然是延度。但是,研究表明延度并不能很好地表征硬质沥青的低温性能^[5-7],因而开展对硬质沥青低温评价指标的研究对于合理评价硬质沥青性能及其工程应用具有重要的理论和实践意义。

目前在沥青低温性能研究方面,低温弯曲梁流变(BBR)试验是研究沥青材料低温性能最常用、最有效的方法之一。许多学者利用BBR试验研究基质沥青和改性沥青的低温流变特性,并且取得了许多

成果^[8-9]。当前BBR试验研究中,低温性能主要是单指标评价,综合考虑蠕变劲度模量 S 与蠕变劲度变化速率 m 的研究较少。研究表明,沥青良好的低温性能需要同时兼顾良好的低温变形能力和低温应力松弛能力,所以有必要建立综合考虑硬质沥青变形能力和应力松弛能力的低温评价指标^[10-11]。

本文基于BBR试验,综合考虑硬质沥青低温变形和低温应力松弛,结合Burgers模型对硬质沥青的低温评价指标进行研究,以便更好地研究、评价硬质沥青的低温性能,为硬质沥青的合理使用及推广提供一定的参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

沥青为克炼30[#]、克炼50[#]、高富30[#]、高富50[#]4种硬质沥青,编号分别为K1、K2、G1、G2,其各项指标均符合JTGF40—2004《公路沥青路面施工技术规范》,基本性能如表1所示。

表1 沥青基本性能
Table 1 Basic performance of asphalt

Asphalt type	Penetration (25 °C)/ (0.1 mm)	Softening point/°C	Flash point/°C	Ductility (15 °C RTFOT)/cm	Density (25 °C)/ (g·cm ⁻³)
K1	33.5	56.2	325	7.0	1.020
K2	51.7	52.7	315	21.3	1.035
G1	30.5	58.6	306	3.7	1.034
G2	44.7	52.5	290	28.6	1.081

1.2 老化试验

根据AASHTO/T 240—13(2017)《Effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (rolling thin-film oven test)》,对K1、K2、G1、G2这4种沥青试样进行短期老化试验,4种老化硬质沥青编号分别为K1R、K2R、G1R、G2R。试验采用旋转薄膜烘箱试验(RTFOT),每个老化瓶中沥青质量为(35±0.5)g,老化时间为85 min,老化温度为(163±0.5)°C。

1.3 低温弯曲梁流变试验

美国SHRP计划在对沥青低温蠕变性能的研究中,引进了弯曲梁流变仪进行沥青低温蠕变特性测试。通过沥青在低温环境和恒定荷载作用下的变形来评价沥青的低温蠕变特性,沥青的低温流变性能通过蠕变劲度模量 S 和蠕变劲度变化速率 m 来表征,

S 表征沥青的低温变形能力, m 表征沥青的低温应力松弛能力。SHRP计划规定:为了保证沥青路面的抵抗低温开裂能力,在设计温度下 S 不得大于300 MPa, m 不得小于0.30。本文对老化前后4种硬质沥青分别进行-6、-12、-18 °C下的BBR试验,每种硬质沥青均进行3组平行试验,结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 弯曲梁流变试验结果

不同温度下 S 值和 m 值的测试结果如图1所示。由图1可见:(1)硬质沥青的 S 值随温度下降而不断上升, m 值随着温度的降低不断减小。这是由于随着温度的降低,沥青开始硬化,沥青中的弹性成分逐渐占

据主导,而沥青中的黏性成分含量与沥青的低温性能呈正相关。(2)老化使得硬质沥青的 S 值增大,延展性下降而更容易发生脆断;(3)硬质沥青标号越小,其低温性能越差,且由于油源的影响,相同标号的硬

质沥青低温性能差别较大;4种硬质沥青整体低温性能大小为 $K2>G2>K1>G1$ 。但是,从图1可以看出 S 、 m 值不一致的情况,即采用某个测试温度下的单一 S 、 m 值来评价硬质沥青的低温性能存在局限性。

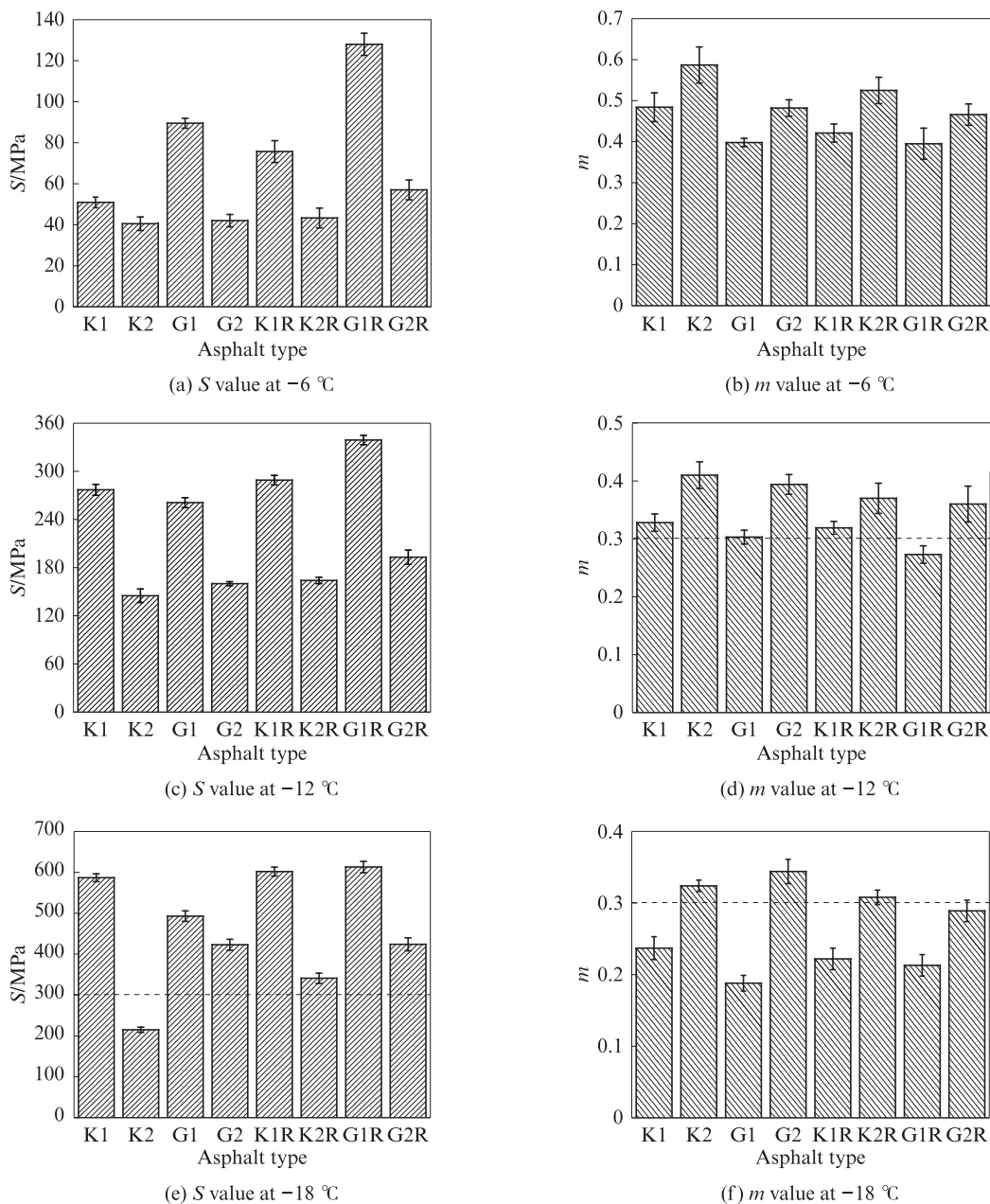


图1 不同温度下各硬质沥青的 S 值和 m 值

Fig. 1 S and m value of hard petroleum asphalts under different temperatures

2.2 Burgers模型在硬质沥青低温流变中的应用

2.2.1 Burgers模型

沥青组成比较复杂,相对分子质量分布范围较广,具有黏性和弹性特点.在沥青材料流变特性的研究中,常用Burgers模型描述在一定温度范围内沥青的力学行为.Burgers模型是由Maxwell模型与Kelvin模型串联组成,通过求解力学的黏弹性参数来确定本构方

程,从而预测材料的应力-应变关系^[12-13].Burgers模型结构如图2所示.

Burgers模型的本构方程见式(1).

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

式中: $p_1 = (\eta_1 E_1 + \eta_1 E_2 + \eta_2 E_1) / E_1 E_2$;

$$p_2 = \eta_1 \eta_2 / E_1 E_2; q_1 = \eta_1; q_2 = \eta_1 \eta_2 / E_2.$$

将本构方程按照黏弹性常数表示为:

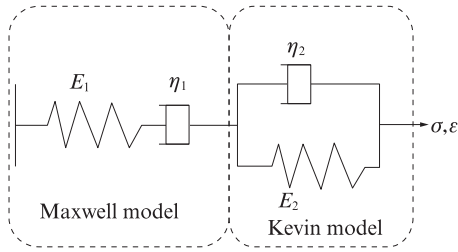


图2 Burgers模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the Burgers model

$$E_1 E_2 \sigma + (\eta_1 E_1 + \eta_1 E_2 + \eta_2 E_1) \dot{\sigma} + \eta_1 \eta_2 \ddot{\sigma} = E_1 E_2 \eta_1 \dot{\epsilon} + E_1 \eta_1 \eta_2 \ddot{\epsilon} \quad (2)$$

把应力 $\sigma = \Delta(t) \cdot \sigma_0$ 代入本构方程式(2)中,通过数学推演,得到 Burgers 模型的蠕变方程式(3).

$$\epsilon(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为 t 时刻的应变; σ 为应力; t 为时间; E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 为 Burgers 模型参数,其中 η_1 为黏性流动参数, η_2 为延迟黏性参数, E_1 为瞬间弹性参数, E_2 为延迟弹性参数.

2.2.2 Burgers模型的验证

以 K1 沥青在 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的试验数据为例,结合 Burgers 模型蠕变方程,利用非线性曲线拟合功能对

蠕变柔量-加载时间过程中的试验数据进行拟合,结果如图3所示.由图3可见,Burgers模型与沥青低温蠕变柔量拟合结果的相关系数为0.9987,说明 Burgers 模型可以准确地描述和分析沥青 BBR 试验中的蠕变过程.

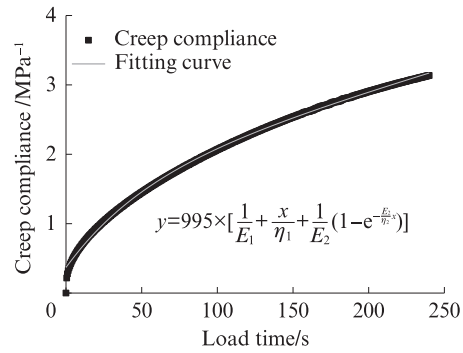


图3 硬质沥青蠕变模型的拟合结果

Fig. 3 Creep compliance fitting results of hard petroleum asphalt

2.2.3 Burgers模型中黏弹性参数的对比分析

表2为4种硬质沥青老化前后 Burgers模型拟合参数随温度变化情况.由表2可见:(1)就所占比例来看, η_1 和 η_2 所占比例要大于 E_1 和 E_2 ,即无论是否老化,各硬质沥青的 η_1 和 η_2 值要比 E_1 和 E_2 值高2个数

表2 4种硬质沥青老化前后 Burgers模型拟合参数随温度变化

Table 2 Variation of the fitting parameters of the Burgers model with temperature of four kinds of hard petroleum asphalts before and after aging

Asphalt type	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	E_1/MPa	E_2/MPa	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$
K1	-6	2 702.78	795.11	152 523.40	42 342.89
	-12	8 612.42	6 701.90	1 029 450.28	195 036.19
	-18	15 469.11	18 863.75	2 625 150.00	323 755.59
K2	-6	2 451.84	671.96	81 654.58	26 442.75
	-12	5 708.84	3 091.29	441 595.29	106 999.89
	-18	10 059.91	7 884.90	1 580 090.34	271 518.92
G1	-6	4 275.29	1 779.43	297 273.38	52 827.69
	-12	8 539.48	5 650.22	1 230 290.89	173 086.34
	-18	12 240.49	11 184.36	1 851 930.22	317 243.42
G2	-6	2 522.96	658.99	131 513.39	31 677.15
	-12	5 701.56	3 531.95	479 781.34	86 804.35
	-18	11 270.29	14 198.42	1 977 820.89	343 392.57
K1R	-6	6 636.44	3 002.10	105 427.63	26 405.64
	-12	8 260.68	6 852.50	1 142 060.01	185 883.58
	-18	16 499.47	19 268.65	3 142 820.62	272 179.67
K2R	-6	3 013.87	1 169.43	76 172.94	29 194.16
	-12	6 494.81	3 975.37	460 607.44	111 827.34
	-18	12 798.42	9 291.17	1 396 980.88	320 231.11
G1R	-6	6 338.08	3 258.92	341 373.33	54 175.73
	-12	9 766.79	8 839.12	1 669 600.50	258 695.63
	-18	14 446.37	19 932.45	3 482 700.36	382 294.42
G2R	-6	3 237.28	1 169.72	147 168.39	37 087.54
	-12	6 669.76	3 955.66	727 522.66	102 706.54
	-18	13 323.88	10 821.17	1 675 270.04	199 805.25

量级,这表明硬质沥青在由 Maxwell 模型和 Kelvin 模型组合而成的 Burgers 模型中,表现出沥青的黏性特征参数要高于弹性特征参数。(2)随着试验温度的上升,各硬质沥青的 η_1 、 η_2 、 E_1 、 E_2 均处于下降趋势;无论是否老化,各硬质沥青的 E_1 下降趋势均小于 η_1 、 η_2 、 E_2 ,这表明温度下降对硬质沥青的瞬间弹性影响较小。(3)随着温度的降低,各硬质沥青的 E_1 与 E_2 会出现交叉趋势,交叉的温度小于 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$;老化使得交叉温度发生改变,但并无规律。(4)相同温度下,老化使得各硬质沥青 Burgers 模型中的黏弹参数均增大。但随着温度的上升, η_1 、 η_2 、 E_1 、 E_2 下降的趋势减缓,导致黏性参数的增幅远大于弹性参数,这也验证了老化使得硬质沥青黏性成分增加,弹性成分下降。

2.3 基于 Burgers 模型参数的硬质沥青低温评价指标

2.3.1 松弛时间

沥青的松弛时间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,可反映出沥青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,对沥青内部快速消散应力越有利,表明沥青低温性能越好。沥青的松弛时间 λ 和延迟时间 τ 的计算见式(4)、(5)。

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

$$\tau = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (5)$$

表3为各硬质沥青老化前后的松弛时间随温度变化曲线。由表3可见:各硬质沥青的松弛时间随着温度上升而减小,表明温度降低使得硬质沥青分子链的运动速度下降,快速消散应力的能力减弱,从而使得沥青更容易产生低温开裂;在 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时老化对硬质沥青的影响较小,松弛时间基本不变;当温度低于 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硬质沥青老化后的松弛时间大于未老

表3 4种硬质沥青老化前后松弛时间随温度变化

Table 3 Change of relaxation time with temperature of four kinds of hard petroleum asphalts before and after aging

Asphalt type	$-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-18\text{ }^{\circ}\text{C}$
K1	56.43	119.53	169.70
K2	43.30	77.35	157.07
G1	69.53	144.07	183.97
G2	52.13	84.15	175.49
K1R	43.89	138.25	190.48
K2R	35.27	70.92	179.15
G1R	53.86	170.95	241.08
G2R	45.46	109.08	195.73

化时,这表明硬质沥青具有一定的低温变形能力;随着温度下降,硬质沥青老化后的松弛时间增长速率大于未老化时,表明松弛时间可以较好地反映硬质沥青的低温流变特性。

2.3.2 低温评价新指标

根据蠕变劲度模量与蠕变劲度变化速率来判断沥青低温性能优劣的过程中,一般认为蠕变劲度模量越小,蠕变劲度变化速率越大,则沥青低温性能越好。但是在分析不同沥青低温性能好坏时,单独使用 S 值或者 m 值来评价沥青的低温性能,有时候会出现结论不一致的情况。基于此, Liu 等^[14]提出,可以采用新指标 $m(t)/S(t)$ 来评价沥青的低温性能。将蠕变劲度模量-时间曲线在双对数坐标系中进行回归分析,可得到蠕变劲度模量-时间、蠕变劲度变化速率-时间的函数关系,如式(6)、(7)所示。

$$\lg[S(t)] = A + B(\lg t) + C(\lg t^2) \quad (6)$$

$$m(t) = \left| \frac{d\{\lg[S(t)]\}}{d(\lg t)} \right| = |B + 2C(\lg t)| \quad (7)$$

利用微积分以及结合 Burgers 模型蠕变方程,经过化简和求导计算可得式(8)。

$$\frac{m(t)}{S(t)} = \left(\frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} e^{\frac{-E_2}{\eta_2}} \right) \times t \quad (8)$$

表4为4种硬质沥青老化前后的 $m(t)/S(t)$ 随温度的变化。由表4可见:老化前后各硬质沥青的 $m(t)/S(t)$ 值均随着温度的降低而下降,且标号大的硬质沥青下降程度大于小标号的硬质沥青;老化后 $m(t)/S(t)$ 值小于未老化前,但 $m(t)/S(t)$ 随温度降低的下降速率却有所减缓,表明老化后硬质沥青的低温抗裂性能下降;在 $-6\sim-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内,老化前后各硬质沥青的 $m(t)/S(t)$ 的下降速率较快;当温度下降到 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时, $m(t)/S(t)$ 下降速率缓慢,表明 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是硬质沥青低温抗裂能力的一个临界点。

表4 硬质沥青老化前后 $m(t)/S(t)$ 随温度变化

Table 4 Change of $m(t)/S(t)$ with temperature of four kinds of hard petroleum asphalts before and after aging

Asphalt type	$-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-18\text{ }^{\circ}\text{C}$
K1	8.530	0.974	0.275
K2	12.300	2.350	0.767
G1	3.520	0.977	0.495
G2	10.000	1.850	0.450
K1R	5.720	0.879	0.226
K2R	9.730	1.940	0.758
G1R	2.060	0.658	0.241
G2R	6.520	1.400	0.475

2.3.3 低温综合柔量参数

低温综合柔量参数 J_c 利用 Burgers 模型中黏弹变形比例来整体把握沥青的黏弹特性,并能更加全面地评价沥青的低温性能^[15]. 沥青的 J_c 值越小,沥青的低温性能越好. J_c 的计算方法如式(9)所示.

$$J_c = 1/J_v \left(1 - \frac{J_E + J_{De}}{J_E + J_{De} + J_v} \right) \quad (9)$$

$$\text{式中: } J_E = \frac{1}{E_1}; J_{De} = \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{tE_2}{\eta_2}} \right); J_v = \frac{t}{\eta_1}.$$

表5为4种硬质沥青老化前后的 J_c 值随温度的变化. 由表5可见:各硬质沥青的 J_c 值随温度的降低而增大,同一温度下 K2 硬质沥青的 J_c 值远小于其他沥青,表明 K2 硬质沥青的低温抗裂性能最佳;老化使各硬质沥青在 $-6 \sim -12$ °C 区间内 J_c 值的变化幅度最大;当温度低于 -12 °C 时,各硬质沥青 J_c 值的差值减小.

表5 4种硬质沥青老化前后低温综合柔量参数随温度变化
Table 5 Change of J_c value with temperature of four kinds of hard petroleum asphalts before and after aging

Asphalt type	-6 °C	-12 °C	-18 °C
K1	10.40	89.70	261.00
K2	4.27	31.30	168.00
G1	22.70	134.00	263.00
G2	9.29	35.70	200.00
K1R	3.25	110.00	363.00
K2R	3.06	29.80	114.00
G1R	20.50	183.00	453.00
G2R	8.68	67.60	156.00

2.4 基于混合料小梁弯曲试验的硬质沥青低温评价指标比选

沥青混合料的低温抗裂性绝大部分由沥青的性质决定^[16],所以混合料的低温性能可以较好地反映沥青的低温性能. 研究表明,通过小梁弯曲试验得到的最大弯拉应变可以较好地评价沥青混合料的低温性能. 因此,本文采用小梁弯曲最大弯拉应变作为验证指标,与前述基于 Burgers 模型的硬质沥青低温性能指标进行相关性分析,并综合考虑各指标测试上的难度、测试精度、物理意义并与混合料低温指标相关系数进行比选,优选出较合适的硬质沥青低温评价指标.

选取常用的 AC-16 级配中值,确定各硬质沥青的最佳油石比,然后进行沥青混合料在 -10 °C 下的小梁弯曲试验,得到各沥青混合料的最大弯拉应变 ϵ_b ,结果如图4所示.

将基于 BBR 试验的硬质沥青低温评价指标

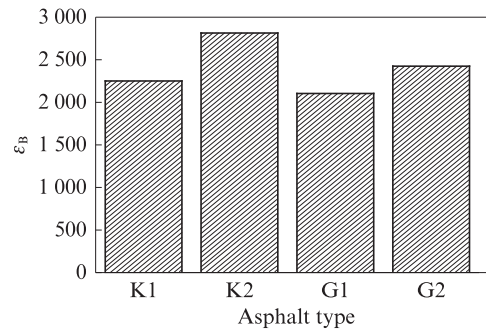


图4 4种沥青混合料的最大弯拉应变

Fig. 4 Maximum bending strain of four kinds of asphalt mixtures

(-12 °C)与混合料最大弯拉应力进行相关性分析,结果如表6、7所示.

表6 原样硬质沥青及其混合料低温评价指标的相关系数

Table 6 Correlation coefficient of low temperature evaluation index of original asphalt

λ	$m(t)/S(t)$	J_c	S	m
0.70	0.85	0.75	0.59	0.62

表7 老化硬质沥青低温评价指标的相关系数

Table 7 Correlation coefficient of low temperature evaluation index of aging asphalt

λ	$m(t)/S(t)$	J_c	S	m
0.94	0.96	0.79	0.77	0.66

由表6、7可见:老化沥青由 BBR 试验得到的低温评价指标与混合料最大弯拉应变的相关系数均大于原样沥青,说明采用老化沥青进行 BBR 试验能更好地表征硬质沥青的低温性能; S 、 m 与混合料最大弯拉应变的相关性相对较低,用来评价硬质沥青的低温性能效果较差,原因主要是采用单一的 S 或 m 来评价硬质沥青低温性能比较片面,应该兼顾二者考虑; λ 指标与混合料最大弯拉应力有较高的相关性,计算简单且物理意义明确; $m(t)/S(t)$ 指标与混合料最大弯拉应力的相关性最高,物理意义最为明确,但需要通过回归分析求得; J_c 指标与混合料最大弯拉应力有较好的相关性,但是计算量相对较大.

3 结论

(1) Burgers 模型与沥青低温蠕变柔量的拟合结果相关性很高,可以准确地描述和分析硬质沥青 BBR 试验中的蠕变过程. Burgers 模型中的黏性流动参数 η_1 、延迟黏性参数 η_2 、瞬间弹性参数 E_1 和延迟弹性参数 E_2 ,可以作为硬质沥青低温评价新指标的基础.

(2) 硬质沥青在老化后会损失一部分的低温性能,采用老化后的硬质沥青进行 BBR 试验,可以更好

地反映硬质沥青的低温流变性能, $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是硬质沥青低温抗裂能力的一个临界点。

(3)单一地采用S或 m 指标来评价硬质沥青的低温流变性能具有一定的局限性,利用Burgers模型构建的 λ 、 $m(t)/S(t)$ 、 J_c 等指标兼顾了硬质沥青低温变形能力和低温应力松弛能力,可以更好地评价硬质沥青的低温流变性能。

(4)在进行研究时可以采用 $m(t)/S(t)$ 指标来评价硬质沥青的低温流变特性,但在工程应用中可以采用 λ 指标作为硬质沥青低温评价指标。

参考文献:

- [1] 董雨明,谭忆秋.基于重复剪切蠕变的硬质沥青高温性能研究[J].公路,2015,60(2):160-164.
DONG Yuming, TAN Yiqiu. Research on high temperature performance of hard grade asphalt based on repeated shear creep test[J]. Highway, 2015, 60(2): 160-164. (in Chinese)
- [2] 李波,王静,曹贵,等.废旧胶粉特性对橡胶沥青高温性能的影响机理[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(2):347-353.
LI Bo, WANG Jing, CAO Gui, et al. Influence mechanism of crumb rubber characteristics on high-temperature performance for rubber modified asphalt binder[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(2): 347-353. (in Chinese)
- [3] 杨光,王旭东,时敬涛.基于耗散能方法评价硬质沥青混合料抗疲劳性能[J].建筑材料学报,2008,11(6):913-919.
YANG Guang, WANG Xudong, SHI Jingtao. Evaluation of anti-fatigue characteristic of hard asphalt mixture based on dissipated energy method [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(6): 913-919. (in Chinese)
- [4] 李立寒,孙艳娜,王飞.岩沥青对软硬沥青复配混合料的增强作用[J].建筑材料学报,2013,16(6):1087-1091.
LI Lihan, SUN Yanna, WANG Fei. Enhancement effect of rock asphalt on mixture of soft asphalt and hard asphalt compound binder[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 1087-1091. (in Chinese)
- [5] 秦育彬.30 $^{\#}$ 硬质沥青及其混合料性能研究[J].中外公路,2013,33(6):248-250.
QIN Yubin. Study on the 30 $^{\#}$ hard paving grade asphalt binder and mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(6): 248-250. (in Chinese)
- [6] 周纯秀,王璐,张中丽,等.超硬质沥青改性结合料流变性能分析[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):144-151.
ZHOU Chunxiu, WANG Lu, ZHANG Zhongli, et al. Hard paving grade asphalt binder and mixtures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 144-151. (in Chinese)
- [7] 张洪瑞.50 $^{\#}$ 硬质沥青在干旱高寒地区沥青路面下面层的适用性研究[D].西安:长安大学,2013.
ZHANG Hongrui. Research on applicability of 50 $^{\#}$ hard asphalt in asphalt bottom layer of drought alpine region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [8] YOU Z P, MILLS-BEALE J, FINI E, et al. Evaluation of low-temperature binder properties of warm-mix asphalt, extracted and recovered RAP and RAS, and bioasphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(11): 1569-1574.
- [9] 黄卫东,颜川奇,刘少鹏,等.溶解性胶粉/SBS复合改性沥青低温性能评价[J].建筑材料学报,2016,19(6):1088-1091.
HUANG Weidong, YAN Chuanqi, LIU Shaopeng, et al. Low temperature performance comparison of terminal blend rubberized/SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 1088-1091. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 徐加秋,阳恩慧,李奥,等.沥青胶结料低温临界开裂温度计算的改进方法[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):92-100.
XU Jiaqiu, YANG Enhui, LI Ao, et al. Improved method for calculating low temperature critical cracking temperature of asphalt binder[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 92-100. (in Chinese)
- [12] 王志臣,郭乃胜,赵颖华,等.沥青混合料黏弹性主曲线模拟及换算[J].工程力学,2017,34(2):242-248.
WANG Zhichen, GUO Naisheng, ZHAO Yinghua, et al. Viscoelastic master curve simulation and conversion of asphalt mixtures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 242-248. (in Chinese)
- [13] 李晓军,江丽华.沥青砂浆粘弹特性试验与模型参数分析[J].武汉理工大学学报,2011,33(3):82-86.
LI Xiaojun, JIANG Lihua. Test and model parameter analysis of asphaltic sand with viscoelasticity [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(3): 82-86. (in Chinese)
- [14] LIU S T, CAO W D, SHANG S J, et al. Analysis and application of relationships between low-temperature rheological performance parameters of asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4): 471-478.
- [15] 李晓琳.基于流变性能特性沥青高低温性能综合评价指标的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
LI Xiaolin. Unified evaluation index for high-and-low temperature properties of asphalt based on rheological theory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 葛折圣,黄晓明,许国光.用弯曲应变能方法评价沥青混合料的低温抗裂性能[J].东南大学学报(自然科学版),2002,32(4):653-655.
GE Zhesheng, HUANG Xiaoming, XU Guoguang. Evaluation of asphalt-mixture's low-temperature anti-cracking performance by curvature strain energy[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2002, 32(4): 653-655. (in Chinese)