

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211018001

文章编号:1674-599X(2023)02-0023-08

引用格式:张思琴,查旭东,邹博,等.中面层沥青混合料低温性能的对比试验评价[J].交通科学与工程,2023,39(2):23-30.

Citation:ZHANG Siqin, ZHA Xudong, ZOU Bo, et al Comparative test evaluation of low-temperature performance for asphalt mixture in middle surface layer[J].J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2):23-30.

中面层沥青混合料低温性能的对比试验评价

张思琴¹, 查旭东¹, 邹博¹, 王旭东²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要:为评价中面层沥青混合料的低温性能,对7种AC-20沥青混合料进行M2F梯形梁动态模量试验、小梁低温弯曲试验和中梁线收缩系数试验,分析复模量、相位角、最大弯拉应变、应变能密度和线收缩系数5个试验指标的评价结果及相关性,选出最优的低温性能评价指标。研究表明:采用不同的试验方法及评价指标分析各沥青混合料低温性能,结果存在明显差异。在评价指标方面:在-10℃下的相位角是M2F梯形梁动态模量试验的最佳评价指标,最大弯拉应变是小梁低温弯曲试验的最适宜指标,线收缩系数是评价沥青混合料低温性能较为合适的指标。在各沥青混合料低温性能优劣方面:SBS改性沥青混合料的低温性能最优,橡胶沥青和抗车辙剂改性沥青混合料的较为接近,高标号沥青混合料的低温性能比低标号沥青混合料的更好。适当提高粗集料含量可提升沥青混合料的低温性能,热再生沥青混合料的低温性能相对较差。

关键词:沥青混合料;低温性能;评价指标;相关性分析;相位角;线收缩系数

中图分类号:U416.03

文献标志码:A

Comparative test evaluation of low-temperature performance for asphalt mixture in middle surface layer

ZHANG Siqin¹, ZHA Xudong¹, ZOU Bo¹, WANG Xudong²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To evaluate the low-temperature performance of middle layer asphalt mixtures, dynamic modulus tests of M2F trapezoidal beams, low-temperature bending tests of small beams, and line shrinkage coefficient tests of middle beams were conducted on seven AC-20 asphalt mixtures. The evaluation results and correlations of five test indexes, including complex modulus, phase angle, maximum bending strain, strain energy density, and line shrinkage coefficient, were analyzed to select the optimal evaluation indexes for low-temperature performance. The results show that there are significant differences in the evaluation results of low-temperature performance of each asphalt mixture using different test methods and evaluation indicators. Among them, the phase angle at -10℃ is the optimal evaluation index for the M2F trapezoidal beam dynamic modulus test, the maximum bending strain is the most suitable index for the low-temperature bending test of small beams, and the line shrinkage coefficient is a suitable index for evaluating the low-temperature performance of asphalt mixtures. SBS modified asphalt mixtures have the best low-temperature performance, followed by rubber asphalt and anti-rutting agent modified mixtures, and high-grade asphalt mixtures have better performance than low-grade ones. Increasing the coarse aggregate content appropriately can improve the low-temperature performance of asphalt mixtures, but the low-temperature performance of recycled asphalt mixtures is relatively poor.

收稿日期:2021-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878077);中铁五局集团有限公司科技项目(2020[12]);安徽省交通运输科技进步计划项目(201720)

通讯作者:张思琴(1997—),女,长沙理工大学硕士生。

Key words: asphalt mixture; low-temperature performance; evaluation index; correlation analysis; phase angle; linear shrinkage coefficient

在昼夜温差大和长期低温的地区,沥青路面由于内部温缩应力累积而产生低温开裂病害,其使用寿命和质量大大降低。沥青混合料的低温性能一直是道路工程领域研究的焦点之一,国内外学者提出了小梁低温弯曲^[1]、线收缩系数^[2]、间接拉伸^[3]、弯曲梁流变^[4]、半圆弯曲^[5]和约束试件温度应力(thermal stress restrained specimen test, TSRST)^[6]等试验方法和指标对沥青混合料的低温性能进行评价。齐琳等^[7]采用劈裂试验评价沥青混合料的低温抗裂性能,认为破坏应变和破坏劲度这两者可作为评价指标,但需综合考虑。冉武平等^[8]通过低温蠕变、低温弯曲和低温劈裂等试验及低温开裂温度的预估分析,建议以低温劈裂强度作为评价环氧沥青混合料低温抗裂能力的指标。熊爱明等^[9]采用半圆弯拉试验研究了断裂韧性、断裂能和 J 积分3个评价指标,认为断裂能指标更适用于评价沥青混合料的低温性能。冯德成等^[10]对比分析了沥青混合料的断裂能和断裂韧性,其研究结果表明断裂能作为沥青混合料低温性能的评价指标更为合理。孟庆营等^[11]、冯卡等^[12]通过TSRST试验研究了冻断温度作为沥青混合料低温开裂评价指标的合理性。TAN等^[13]推荐采用TSRST试验中的冻断温度和转折点温度作为评价指标。ZHANG等^[14]通过对低温弯曲和TSRST试验进行对比分析,发现低温弯曲应变能密度及TSRST冻断温度和转折点温度可作为沥青混合料低温性能的评价指标。《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)推荐使用小梁低温弯曲试

验作为沥青混合料低温性能的评价方法,但采用该试验方法得到的抗弯拉强度、最大弯拉应变和弯曲劲度模量指标评价沥青混合料的低温性能,有时会得到相互矛盾的结论。

目前,评价沥青混合料低温性能的试验方法和指标较多,但各试验方法的评价结果并不一定能准确地反映沥青路面实际的低温抗裂能力。因此,本研究通过法国M2F梯形梁动态模量试验、小梁低温弯曲试验和中梁线收缩系数试验对交通运输部公路科学研究院在足尺路面试验环道(full-scale test circular track in Research Institute of Highway of Ministry of Transport, RIOHTrack)中所用7种中面层AC-20沥青混合料的低温性能进行评价和相关性分析,以期选出合理的评价指标,并对比和评价这7种沥青混合料的低温性能。

1 沥青混合料配合比设计

RIOHTrack中所采用的7种中面层AC-20沥青混合料中的沥青共选用了3种道路石油沥青(30#、50#和70#)、两种SBS改性沥青(SBS1、SBS2)及一种胶粉的质量分数为22.00%的橡胶沥青(AR)。矿料为玄武岩粗集料、石灰岩细集料及石灰岩矿粉^[15]。经检验,各种原材料的性能指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的相关要求。其中,本试验所用沥青的主要性能指标试验结果见表1。

表1 沥青的主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of asphalts

沥青种类	25℃针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	不同温度下的延度/mm		
			5℃	10℃	15℃
30#	22.2	61.1	—	—	脆断
50#	51.9	52.7	—	119	1 326
70#	71.5	48.4	—	373	>1 500
SBS1	63.4	72.7	285	487	—
SBS2	62.6	75.5	294	479	—
AR	37.8	70.0	67	—	—

本研究对集料进行了级配Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ共3种合成级配组成设计,级配Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ集料中通过2.36 mm筛

孔的质量分数分别为21.10%、16.60%和26.10%,其间隔约为5.00%,具体合成级配曲线如图1所示。

从图1可以看出,级配II的集料最粗,级配I的次之,级配III的最细。其中,级配III集料中掺入了质量分数(按矿料质量计算)为40.00%的旧沥青混合料的回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP)。本研究将三种级配的集料与沥青结合料组合,共设计了7种AC-20混合料,按“沥青-级配”的格式分别简记为30#-I、50#-I、SBS1-I、SBS2-II、AR-II、70#-K-II和70#-R-III,其中,“70#-K”为在70#沥青中掺入了质量分数(按沥青总质量计算)为0.80%的RA抗车辙剂;“70#-R”为在70#普通沥青混合料中掺入了RAP的热再生混合料。这7种混合料的最佳油石比分别为4.60%、4.26%、4.48%、4.52%、5.71%、4.93%和3.11%。

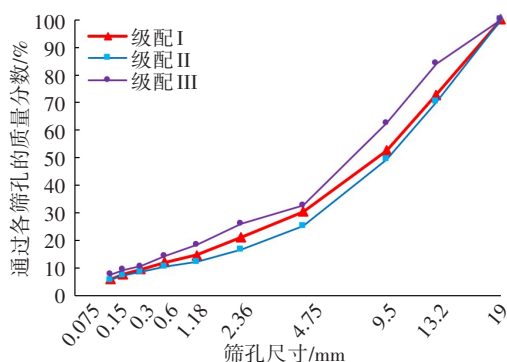


图1 AC-20沥青混合料合成级配曲线

Fig. 1 Grading curves of aggregates for AC-20 asphalt mixtures

2 试验方案及评价指标

2.1 法国M2F梯形梁动态模量试验

法国M2F梯形梁动态模量与疲劳试验机如图2所示,该试验采用两点弯曲加载模式对梯形梁试件的动态模量进行测定。其主要试验步骤为:①将轮碾成型的车辙板试件切割成上底宽、下底宽、高、厚分别为25、56、250、25 mm的梯形梁试件,如图3所示;②将试件底部和顶部分别与M2F梯形梁设备的底座和护冠粘结,并保持12 h以上,以确保黏结牢固;③将试件置于M2F梯形梁设备环境箱中,并在设定的温度条件下保温4 h,以确保试件内部温度分布均匀;④采用应变控制方式,按设定的振幅和频率对试件顶部沿上底宽度方向施加水平正弦应变,使试件呈悬臂梁弯曲状态,对其循环加载。

测试沥青混合料的低温性能的试验方案为:当温度为0~45℃时,以5℃为间隔选取10种温度水

平;当频率为10~40 Hz时,以5 Hz为间隔选取7种加载频率水平;当应变为 30×10^{-6} ~ 180×10^{-6} 时,以 30×10^{-6} 为间隔选取6种加载应变水平。每组试验采用两个平行试件。当频率较高时,混合料弹性好,只产生较小的累积变形,故按从高频到低频的顺序进行加载;当温度较低时,混合料刚度大,试件内部会产生较大的应力而易造成损伤,因此,应适当降低在0.5℃低温时的加载应变水平。



图2 M2F梯形梁设备

Fig. 2 M2F dynamic modulus test



图3 梯形梁试件

Fig. 3 Trapezoidal beam specimen

根据M2F梯形梁动态模量试验的应力-应变测试结果,可得到材料的复模量 E^* 、储能模量 E' 、耗能模量 E'' 和相位角 φ 。其中, E^* 和 φ 反映材料的黏弹性特征,而 E' 和 E'' 分别反映材料的弹性特征和黏性特征。由于沥青混合料的低温性能取决于其黏弹性,故采用 E^* 和 φ 作为低温性能的评价指标。同时,根据其温度和频率的扫描试验结果,可以采用Boltzman函数构造复模量 E^* 的主曲线,即:

$$\lg E^* = \frac{A - B}{1 + e^{(T - T_0)/T_x}} + B \quad (1)$$

式中: E^* 为复模量, GPa; T 为温度,℃; A 、 B 、 T_0 、 T_x 为

回归参数,其中 T_0 为主曲线拐点, $y=A$ 和 $y=B$ 为主曲线上、下两条渐近线。

φ 的大小取决于 E' 和 E'' 的比值,即在同一温度和频率下,沥青混合料所表现出的弹性和黏性成分的比例,其主曲线可用 GaussAmp 函数来构造,即:

$$\varphi = \varphi_0 + Ae^{-(T-T_c)^2/(2w^2)} \quad (2)$$

式中: φ 为相位角,°; T 为温度,°C; φ_0 、 A 、 T_c 、 w 为回归参数,其中 T_c 为主曲线峰值点对应的温度值。

2.2 小梁低温弯曲试验

小梁低温弯曲试验按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的规定进行,即将成型的沥青混合料车辙板试件切割成长、宽、高分别为250、30、35 mm的棱柱体小梁,并采用200 mm跨径进行三点弯曲加载测试。试验方案为:温度采用-30、-20、-10和0 °C 4种温度水平,加载速率为50 mm/min,每组试验采用7个平行试件。

根据小梁低温弯曲试验测得的最大破坏荷载 P_B 及其对应的挠度 d ,可计算得到沥青混合料试件的抗弯拉强度 R_B 、弯曲劲度模量 S_B 和最大弯拉应变 ε_B 。为进一步从能量角度对混合料的低温性能进行评价,还可采用弯曲应变能密度 E_B 试验指标,即将低温弯曲破坏过程的瞬时弯拉应力和对应的弯拉应变进行累积,对测得的应力-应变曲线的上升阶段先采用三次多项式拟合后再通过积分可求得相应的 E_B ,即:

$$E_B = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon = \frac{A}{4} \varepsilon_0^4 + \frac{B}{3} \varepsilon_0^3 + \frac{C}{2} \varepsilon_0^2 + D\varepsilon_0 \quad (3)$$

式中: E_B 为弯曲应变能密度,kPa; σ 为应力,kPa; ε_0 为应力峰值点对应的应变值,10⁻⁶;A、B、C、D为拟合常数,与材料类型有关。

2.3 中梁线收缩系数试验

将轮碾成型的沥青混合料车辙板试件用激光切割机切割成长、宽、高分别为380、51、64 mm的棱柱体中梁,并将3片应变片沿长度方向粘贴于中梁长宽顶面的中间,在每隔四分之一中梁长宽顶面的长度处各粘贴1片应变片,然后采用实时温度-应变采集系统测试不同温度下的应变数据,并以此确定线收缩系数。试验时,设定温度在-30~70 °C之间循环,升降温速率均为1 °C/min,每升降10 °C,恒温1 h,每组试验采用3个平行试件。由于本研究只需考虑沥青混合料的低温性能,所以选取温度循环中的30~-30 °C降温阶段来模拟实际路面的降温过程。据此,通过测得的试件随温度变化的应变结

果,根据每个温度循环中温度所对应的应变,可计算得到沥青混合料的线收缩系数 C ,即:

$$C = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

式中: C 为线收缩系数,(10⁻⁶ °C⁻¹); ε_1 为起始应变,10⁻⁶; ε_2 为终止应变,10⁻⁶; T_1 为起始温度,°C; T_2 为终止温度,°C。

3 试验结果分析

3.1 低温性能试验结果分析

根据这三种试验方法,对7种中面层AC-20沥青混合料进行低温性能对比试验。对于M2F梯形梁动态模量试验,加载频率10 Hz相当于60~70 km/h的行车速度,能较好地反映路面的实际受力情况,以此作为基准频率,选择30×10⁻⁶、90×10⁻⁶和150×10⁻⁶ 3种加载应变水平,由于30[#]-I混合料刚度较大,其试验结果变异性较大,故主要对其他6种AC-20混合料的M2F梯形梁动态模量试验结果进行分析,得到各试件的 E^* 和 φ 在-20~20 °C的主曲线,如图4所示。根据小梁低温弯曲试验和中梁线收缩系数试验,可得到7种AC-20沥青混合料的抗弯拉强度 R_B 、弯曲劲度模量 S_B 、最大弯拉应变 ε_B 和应变能密度 E_B ,以及线收缩系数 C 随温度的变化曲线,试验结果分别如图5~6所示。

从图4~6可以看出:

1) 在不同的加载应变水平下,随着温度的升高,各AC-20沥青混合料的 E^* 均逐渐减小,而 φ 则逐渐增大,即沥青混合料随温度的升高其刚度逐渐减小,黏性逐渐增大,蠕变性能增强;同时,6种AC-20沥青混合料的 E^* 和 φ 主曲线虽有少量交叉,但总体相对位置基本保持一致。这表明 E^* 和 φ 可以很好地表征沥青混合料的黏弹性,可作为低温性能评价指标,并且可取其1种加载应变水平下的试验结果来对比评价混合料的低温性能,本研究以应变为90×10⁻⁶作为基准加载应变水平。各AC-20沥青混合料的 φ 主曲线随着温度的降低均呈先快速衰减再趋于平缓的变化规律,并大都在-10 °C附近出现转折,即在该温度附近沥青由黏弹性向脆性转化。因此,可以将-10 °C作为沥青混合料低温性能评价的基准温度。

2) 各AC-20沥青混合料的 R_B 随着温度的降低有升有降,并未呈现整体一致的变化规律; S_B 受到

R_b 的影响,虽然其整体随着温度的升高而逐渐降低,但在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度以下波动较大,其中 $30^{\#}\text{-I}$ 和 $70^{\#}\text{-K-II}$ 两种沥青混合料在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现了峰值,因此, R_b 和 S_b 不宜作为沥青混合料的低温性能评价指标。 ε_b 和 E_b 随温度变化规律较为一致,均随着温度的降低而逐渐减小,且与 φ 主曲线的变化规律类似,均呈先快速降低而后趋于平缓的变化趋势,并也在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近出现拐点,这表明 ε_b 和 E_b 均能有效地评价沥青混合料的低温抗裂性能,可作为低温性能评价指标,并同样可取 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为基准温度。

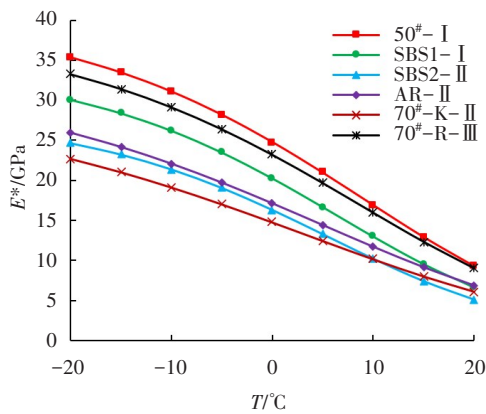
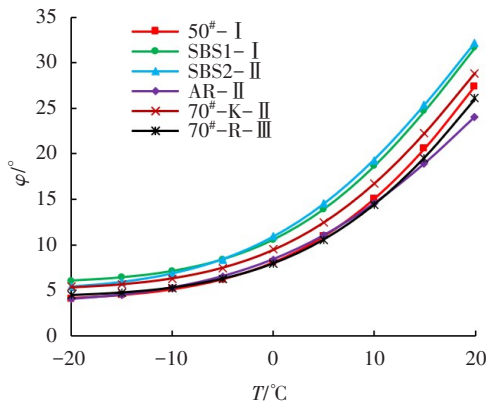
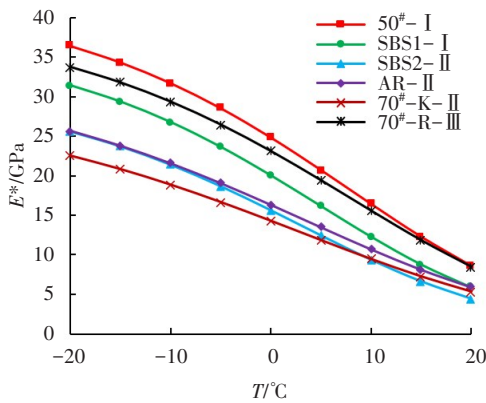
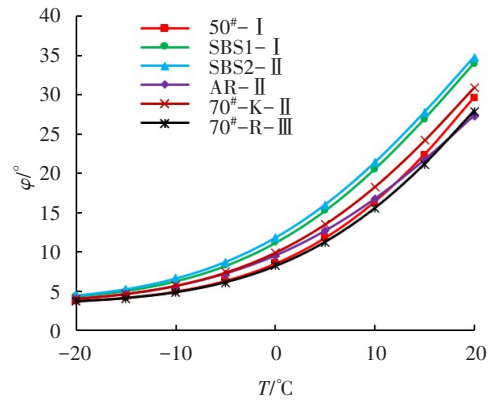
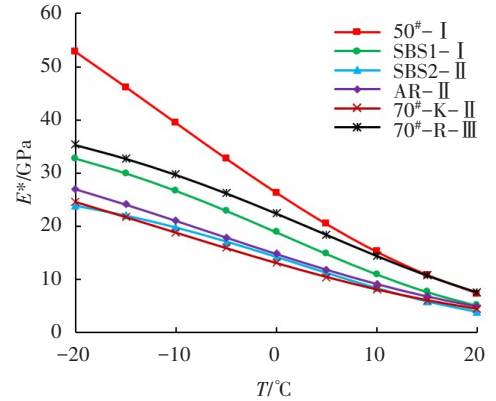
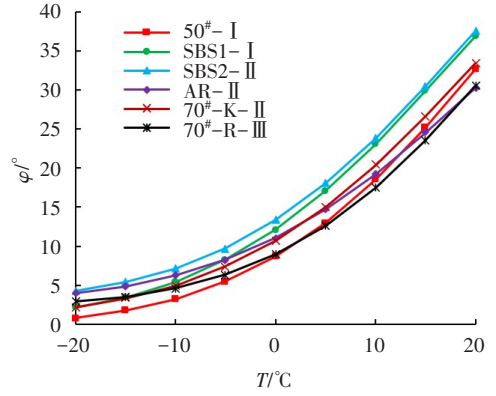
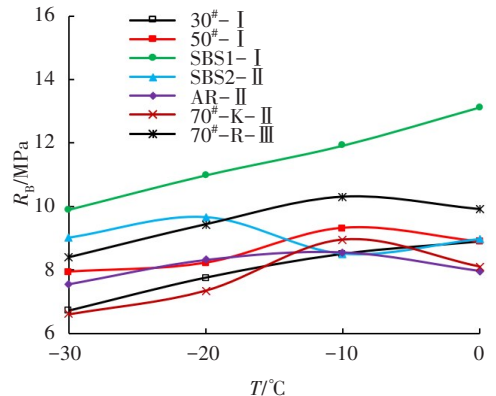
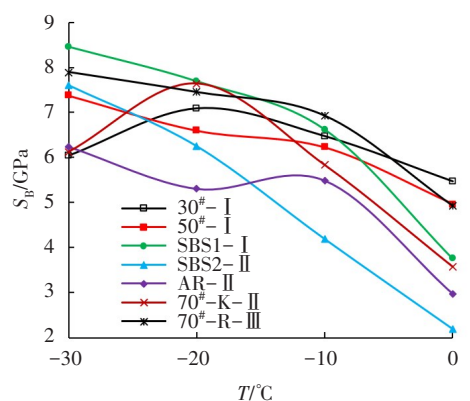
(a) 应变为 30×10^{-6} 下的复模量主曲线(b) 应变为 30×10^{-6} 下的相位角主曲线(c) 应变为 90×10^{-6} 下的复模量主曲线(d) 应变为 90×10^{-6} 下的相位角主曲线(e) 应变为 150×10^{-6} 下的复模量主曲线(f) 应变为 150×10^{-6} 下的相位角主曲线

图4 M2F梯形梁动态模量试验主曲线

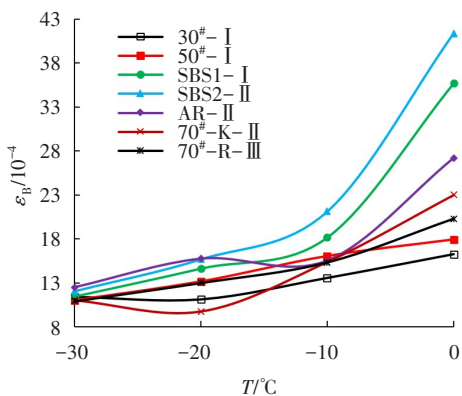
Fig. 4 Master curves of M2F dynamic modulus test



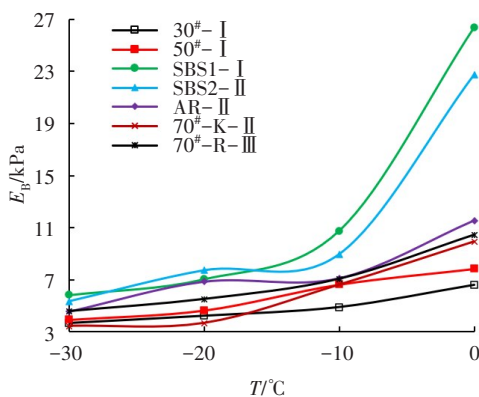
(a) 抗弯拉强度



(b) 弯曲劲度模量



(c) 最大弯拉应变



(d) 应变能密度

图5 小梁低温弯曲试验结果

Fig. 5 Test results of low temperature trabecular bending

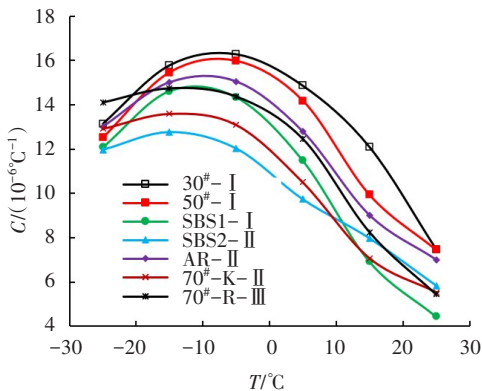


图6 中梁线收缩系数试验结果

Fig. 6 Test results of linear shrinkage coefficient of middle beam

3) 各 AC-20 沥青混合料的 C 均随着温度的降低呈先升高后降低的单峰曲线变化趋势,且峰值均出现在 -10°C 左右,这表明沥青混合料在该温度附近随着温度的降低由黏弹性转化为脆性,故 C 能较好地评价沥青混合料的低温性能,并同样以 -10°C 作为混合料低温性能评价的基准温度。

3.2 低温性能对比评价

为了对比评价 7 种中面层 AC-20 沥青混合料的低温性能,根据这三种试验方法得到的 E^* 、 φ 、 ε_B 、 E_B 和 C 等 5 个评价指标在 -10°C 下的试验结果见表 2,并对各沥青混合料的低温性能的优劣进行了排序。

由表 2 可知,采用不同的试验方法及不同的评价指标得到的各混合料低温性能优劣排序存在较明显的差异,反映了对比评价结果的不一致性,因此本研究采用皮尔逊相关系数 R 来分析各指标试验结果之间的相关性,结果见表 3。其中, $\overline{|R|}$ 为各指标与其他指标间的相关系数 R 绝对值的平均值。

由表 3 可知,各指标间 R 的正负性与其评价低温性能优劣之间具有良好的一致性,表明:采用各指标评价沥青混合料的低温性能都是可行的。 E^* 和 φ 间的 $|R|$ 大于 0.60, ε_B 和 E_B 间的 R 接近 0.80,表明:采用相同试验方法的不同指标得到的评价结果具有较好的一致性。通过对比同一试验不同指标的 $\overline{|R|}$ 发现, φ 的 $\overline{|R|}$ 值大于 E^* 的 $\overline{|R|}$, ε_B 的 $\overline{|R|}$ 大于和 E_B 的 $\overline{|R|}$ 值,表明: φ 和 ε_B 这两个指标分别是 M2F 梯形梁动态模量试验和小梁低温弯曲试验的适宜的评价指标; C 的 $\overline{|R|}$ 大于 0.65,表明 C 也是一个较为有效的中面层沥青混合料低温性能评价指标。因此,通过比较各指标的 $\overline{|R|}$ 值大小可知, φ 的 $\overline{|R|}$ 最大,超过 0.70,其综合相关性最显著,故本研究以 φ 为主,结合 ε_B 来对比评价各中面层 AC-20 沥青混合料的低温性能。故由表 2 可得结论:

1) 在级配相同、沥青结合料不同的情况下,对于三种级配 I 混合料, SBS1-I 的 φ 比 50#-I 的增大了 26.11%,其 ε_B 比 50#-I 和 30#-I 的分别提高了 13.35% 和 33.80%,这三种级配 I 混合料按低温性能优劣排序依次为: SBS1-I、50#-I、30#-I;对于三种级配 II 混合料, AR-II 的 φ 和 ε_B 大小与 70#-K-II 的基本接近,而 SBS2-II 的 φ 比 AR-II 和 70#-K-II 的分别增加了 17.94% 和 16.70%,其 ε_B 比 AR-II 和 70#-K-II 的分别提高了 35.82% 和 37.14%,这 3 种级配 II 混合料按低

温性能优劣排序依次为:SBS2-II、AR-II、70[#]-K-II,其中AR-II和70[#]-K-II的低温性能基本相当。这表明:SBS改性沥青混合料的低温抗裂性能最优,橡胶沥青和抗车辙剂改性沥青混合料的低温性能相差不大,高标号普通石油沥青混合料的低温性能优于低标号沥青混合料的,且总体上改性沥青混合料的低温性能更优。

2) 在级配不同、沥青结合料相同的情况下,对比两种SBS改性沥青混合料,SBS2-II的 φ 和 ε_B 分别比SBS1-I的增加了6.58%和16.24%,表明:较粗级配的沥青混合料也能获得良好的低温性能。对于两种70[#]沥青混合料,70[#]-K-II的 φ 和 ε_B 分别比70[#]-R-III的增加了17.32%和0.52%,表明:热再生沥青混合料的低温性能相对较差。

表 2 AC-20 沥青混合料低温性能对比评价结果

Table 2 Comparative evaluation results of low-temperature performance for AC-20 asphalt mixtures

序号	AC-20 混合料 类型	M2F 动态模量试验		小梁低温弯曲试验		线收缩系数试验
		E^*/GPa	$\varphi/(^\circ)$	$\varepsilon_B/10^{-6}$	E_B/kPa	$C/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
1	30 [#] -I	—	—	1 358 (7)	4.89 (7)	16.28 (7)
2	50 [#] -I	31.69 (6)	4.94 (5)	1 603 (3)	6.63 (5)	15.97 (6)
3	SBS1-I	26.75 (4)	6.23 (2)	1 817 (2)	10.75 (1)	14.34 (3)
4	SBS2-II	21.37 (2)	6.64 (1)	2 112 (1)	8.95 (2)	12.03 (1)
5	AR-II	21.57 (3)	5.63 (4)	1 555 (4)	7.11 (3)	15.04 (5)
6	70 [#] -K-II	18.87 (1)	5.69 (3)	1 540 (5)	6.62 (6)	13.10 (2)
7	70 [#] -R-III	29.34 (5)	4.85 (6)	1 532 (6)	7.07 (4)	14.37 (4)

注:括号前数据为指标试验结果,括号内数据为各混合料低温性能按相应评价指标从优到劣排序名次。

表 3 各指标试验结果之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of different indexes

评价指标	E^*	φ	ε_B	E_B	C
E^*	1.000 0	-0.615 4	-0.203 1	-0.009 1	0.690 3
φ	-0.615 4	1.000 0	0.833 3	0.725 8	-0.716 4
ε_B	-0.203 1	0.833 3	1.000 0	0.789 5	-0.734 8
E_B	-0.009 1	0.725 8	0.789 5	1.000 0	-0.525 1
C	0.690 3	-0.716 4	-0.734 8	-0.525 1	1.000 0
$ R $	0.379 5	0.722 7	0.640 2	0.512 4	0.666 7

4 结论

本研究通过开展 M2F 梯形梁动态模量、小梁低温弯曲和中梁线收缩系数 3 种试验,对比评价了RIOHTrack 所用 7 种中面层 AC-20 沥青混合料的低温性能,得到结论:

1) 各沥青混合料的 E^* 和 φ 主曲线变化规律及相对位置总体保持一致,且 φ 主曲线在-10℃附近出现转折,表明:在该温度下沥青混合料由黏弹性向脆性转化; ε_B 和 E_B 均随着温度的降低呈先快速降低后趋于平缓的变化趋势,并在-10℃附近出现转折; C 随着温度的降低先增大后减小,且峰值也出

现在-10℃左右,故 E^* 、 φ 、 ε_B 、 E_B 和 C 均能较好地表征沥青混合料的黏弹性,适合作为沥青混合料低温性能评价指标,并可用-10℃作为基准温度。

2) 不同试验方法和指标对各沥青混合料低温性能优劣的评价结果存在较明显的差异,但同一试验方法的不同指标的评价结果具有较好的一致性。其中, φ 和 ε_B 分别为 M2F 梯形梁动态模量试验和小梁低温弯曲试验的适宜评价指标; φ 的综合相关性最显著,故 φ 为最佳评价指标;同时, C 也是中面层沥青混合料低温性能较为有效的评价指标。

3) 沥青结合料类型和不同的矿料合成级配对沥青混合料的低温性能影响显著,改性沥青能有效增强混合料的低温性能。其中,SBS 改性沥青对混

合料低温性能的改善效果最为显著,而橡胶沥青和抗车辙剂的改善效果相差不大;另外,适当增大粗集料含量可提升沥青混合料的低温性能,但热再生沥青混合料的低温性能相对较差。

参考文献(References):

- [1] 查旭东,李洲,王宏祥,等.阿尔巴尼亚岩沥青改性混合料设计及性能试验[J].交通科学与工程,2019,35(1):1-7.
ZHA Xudong, LI Zhou, WANG Hongxiang, et al. Experiments of the design and the performance for the modified mixture with Albania rock asphalt[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(1):1-7.
- [2] 邹博.沥青混合料低温性能试验评价方法对比研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
ZOU Bo. Comparative research on test and evaluation methods of low temperature performance for asphalt mixture [D].Changsha: Changsha University of Science & Technology,2017.
- [3] 付国志,曹丹丹,赵延庆,等.沥青混合料低温临界开裂温度的确定[J].复合材料学报,2019,36(4):1001-1007.
FU Guozhi, CAO Dandan, ZHAO Yanqing, et al. Determination of critical thermal cracking temperature of asphalt concrete [J].Acta Materiae Compositae Sinica, 2019,36(4):1001-1007.
- [4] PSZCZOLA M, JACZEWSKI M, RYS D, et al. Evaluation of asphalt mixture low-temperature performance in bending beam creep test [J]. Materials, 2018,11(1):100.
- [5] HONG R B, WU J R, CAI H B. Low-temperature crack resistance of coal gangue powder and polyester fibre asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2020,238:117678.
- [6] ZAUMANIS M, VALTERS A. Comparison of two low-temperature cracking tests for use in performance-based asphalt mixture design [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020,21(12):1461-1469.
- [7] 齐琳,夏伟龙.劈裂试验评价沥青混合料低温性能指标研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(5):59-63.
QI Lin, XIA Weilong. Study on evaluation index of low temperature performance of asphalt mixture by splitting test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology), 2012, 8 (5):59-63.
- [8] 冉武平,凌建明,谷志峰.环氧沥青混合料低温性能及评价指标[J].西南交通大学学报,2017,52(5):935-942.
RAN Wuping, LING Jianming, GU Zhifeng. Low temperature performance and evaluation index of epoxy asphalt mixture [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2017,52(5):935-942.
- [9] 熊爱明,黄卫东,吕泉,等.半圆弯拉试验评价沥青混合料低温性能指标选取[J].石油沥青,2020,34(4):33-39.
XIONG Aiming, HUANG Weidong, LYU Quan, et al. Selection of low temperature performance index of asphalt mixture evaluated by semi-circular bending-tension test [J].Petroleum Asphalt,2020,34(4):33-39.
- [10] 冯德成,崔世彤,易军艳,等.基于SCB试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J].中国公路学报,2020,33(7):50-57.
FENG Decheng, CUI Shitong, YI Junyan, et al. Evaluation index of low-temperature asphalt mixture performance based on semi-circular bending test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (7): 50-57.
- [11] 孟庆营,张彩利.沥青混合料约束试件温度应力试验研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(12):33-36,73.
MENG Qingying, ZHANG Caili. Research on thermal stress restrained specimen test of asphalt mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32 (12):33-36,73.
- [12] 冯卡,徐世法,张丽宾,等.用低温约束冻断试验方法评价沥青混合料低温抗裂性能[J].公路交通科技,2008,4(S1):83-86.
FENG Ka, XU Shifa, ZHANG Libin, et al. Evaluation of low temperature cracking resistance of asphalt mixtures by means of TSRST method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008,4(S1): 83-86.
- [13] TAN Y Q, ZHANG L, JI L. Analysis of the evaluation indices from TSRST [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2012,24(10):1310-1316.
- [14] ZHANG C L, WEI L Y, MENG Q Y. The research of low temperature performance of asphalt mixture [J]. Advanced Materials Research, 2010, 168-170: 2507-2512.
- [15] 查旭东,樊小林,刘安辉,等.RIOHTrack中面层沥青混合料高温性能SPT试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):16-23.
ZHA Xudong, FAN Xiaolin, LIU Anhui, et al. SPT test of high temperature performance of asphalt mixture in middle surface layer of RIOHTrack [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021,18(1):16-23.

(责任编辑:刘平;校对:李脉;英文编辑:李岳林)