

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220327002

文章编号: 1672-9331(2024)01-0030-09

引用格式: 查旭东, 谭仕杰, 邹博, 等. 上面层改性沥青混合料低温性能综合对比评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 30-38.

Citation: ZHA Xudong, TAN Shijie, ZOU Bo, et al. Comprehensive comparative evaluation of low-temperature performance for modified asphalt mixtures in upper surface layer[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 30-38.

上面层改性沥青混合料低温性能综合对比评价

查旭东¹, 谭仕杰¹, 邹博², 王旭东³

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410011;

3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要:【目的】分析足尺路面试验环道所用7种上面层细粒式改性沥青混合料的低温性能。【方法】通过小梁低温弯曲、中梁线收缩系数和法国M2F梯形梁动态模量3种室内试验开展研究及相关性分析, 并应用多指标试验结果的无量纲归一化赋权求和法进行综合对比评价。【结果】最大弯拉应变、应变能密度、线收缩系数、复模量和相位角均可作为改性沥青混合料低温性能的合理评价指标; 对比改性沥青类型, 采用低温延性强的SBS改性沥青制备的混合料低温性能最优, 橡胶沥青混合料的次之, 掺抗车辙剂能增强SBS改性AC类混合料的低温性能; 对比矿料合成级配, SMA类的低温性能最优, SBS改性AC类中粗集料含量越低, 其低温性能越好; 多孔排水式高黏SBS改性PAC类具有优良的黏弹性和低温收缩性能。【结论】评价结果可为环道沥青路面低温性能长期监测对比提供参考。

关键词: 道路工程; 上面层; 改性沥青混合料; 低温性能; 评价指标

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Comprehensive comparative evaluation of low-temperature performance for modified asphalt mixtures in upper surface layer

ZHA Xudong¹, TAN Shijie¹, ZOU Bo², WANG Xudong³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410011, China; 3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to analyze the low-temperature performance of seven kinds of fine grained modified asphalt mixture for upper surface layer used in the full-scale pavement test track. [Methods] Three kinds of laboratory experimental research and correlation analysis were carried out, including low-temperature bending test with small beam, linear shrinkage coefficient test with middle beam, and dynamic modulus test with French trapezoidal beam. Then the dimensionless normalized weighted summation method of multi-index test results was used for comprehensive comparative evaluation. [Findings] The maximum flexural strain, strain energy density, linear shrinkage coefficient, complex modulus and phase angle can be used as the reasonable evaluation indexes for the low-temperature performance of the modified asphalt mixture. For the effect of the type of modified asphalt, Compared with the types of modified asphalt, the

收稿日期: 2022-03-27; 修回日期: 2022-04-24; 接受日期: 2022-04-30

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])

通信作者: 查旭东(1970—)(ORCID: 0000-0002-1655-0635), 男, 教授, 主要从事道路工程方面的研究。

E-mail: 1756023135@qq.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

mixture prepared by SBS modified asphalt with strong low temperature ductility has the best low-temperature performance, followed by the rubber asphalt mixture, and the addition of anti-rutting agent can enhance the low temperature performance of SBS modified AC type mixture. For the effect of the gradations of mineral aggregate, SMA type has the best low-temperature performance, while the lower the coarse aggregate content of SBS modified AC type, the stronger the low-temperature performance. Porous drainage high-viscosity SBS modified PAC type has excellent viscoelasticity and low-temperature shrinkage performance. [Conclusions] The evaluation results can provide reference for long-term monitoring and comparison of low-temperature performance in the test track asphalt pavement.

Key words: road engineering; upper surface layer; modified asphalt mixture; low-temperature performance; evaluation index

Foundation item: Project (51878077) supported by the National Natural Science Foundation; Project (2020 [12]) supported by Science and Technology of China Railway NO.5 Engineering Group Co., Ltd.

Corresponding author: ZHA Xudong (1970—) (ORCID: 0000-0002-1655-0635), male, professor, research interest: road engineering. E-mail: 1756023135@qq.com

0 引言

合理评价沥青混合料的低温性能对提高沥青路面的低温抗裂能力和耐久性,以及延长其使用寿命具有十分重要的意义,国内外学者为此采用多种室内试验方法及相应指标开展了大量的分析研究^[1-2]。

对于低温弯曲试验,张东等^[3]对比试验指标后,建议以断裂能来评价沥青混合料的低温抗裂性能;刘建芳等^[4]采用破坏应变评价了反应型冷拌沥青混合料的低温抗裂性能;白励^[5]则以劲度模量和破坏应变评价玄武岩纤维对高模量沥青混合料低温性能的影响;彭文耀等^[6]采用最大弯曲应变和弯曲应变能密度评价高掺量厂拌热再生改性沥青混合料的低温性能。对于冻断试验,TAN等^[7]认为冻断温度和转折点温度两个指标对混合料低温性能的评价结果更稳定。对于弯曲蠕变试验,蒋洪涛等^[8]采用 Burgers 模型黏弹性参数指标评价了植物基复配沥青混合料的低温性能。对于半圆弯拉试验,李彩霞等^[9]、冯德成等^[10]及熊爱明等^[11]通过该试验评价了混合料的低温性能,结果表明断裂能密度的评价结果更为合理。闫科伟等^[12]通过模拟圆盘拉伸试验,引入断裂应变容限值来评价混合料低温抗裂性能。对于综合多种试验方法,付国志等^[13]结合线收缩系数试验及间接拉伸的强度和蠕变试验,确定了混合料的低温临

界开裂温度;ZAUMANIS等^[14]研究得出冻断试验和半圆弯拉试验的低温抗裂性能指标之间具有合理的相关性,且前者是混合料配合比设计的首选方法;曹海波等^[15]通过冻断试验的冻断温度、冻断应力和转化点温度,以及低温弯曲试验的抗弯拉强度和最大弯拉应变等指标研究了在高寒、大温差条件下沥青混合料低温性能的变化规律;张飞等^[16]采用低温弯曲试验的最大弯拉应变和弯曲破坏能密度,以及低温弯曲蠕变试验的蠕变速率和黏弹性等参数,评价了温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能,并对其开裂温度进行了预估;彭建湘^[17]以低温弯曲试验的最大弯拉应变和弯曲劲度模量,以及半圆弯拉试验的断裂能和柔性指数等参数,评价了玄武岩纤维长度对沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13 低温抗裂性能的影响。

总之,沥青混合料种类多样,其低温性能的试验评价方法及指标众多,且评价结果和适用性各异,故有必要对多种低温性能试验及指标进行综合评价。为此,本研究以交通运输部公路科学研究院足尺路面试验环道(full-scale test track in research institute of highway, RIOHTrack)实际所用的7种上面层集料公称最大粒径为13.2 mm的细粒式改性沥青混合料为研究对象^[18-19],采用小梁低温弯曲、中梁线收缩系数和法国 M2F 梯形梁动态模量3种室内试验方法进行低温性能综合对比评价^[20],以为环道沥青路面的长期性能监测验证提供参考。

1 材料与试验

1.1 原材料检验

本试验结合料包括三种成品 SBS 改性沥青(秦皇岛 I-D、I-DS10、I-DHV4[#])和一种胶粉质量分数为 22% 的 AR 橡胶沥青,分别简记为 S1、S2、S3 和 A,这几种改性沥青的主要技术指标检验结果见表 1;矿料由玄武岩粗集料、石灰岩细集料及石

表 1 改性沥青主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of modified asphalt

改性沥青 种类	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	软化点/°C	5 °C 延度/ mm
S1	63.4	72.7	285
S2	62.6	75.5	294
S3	52.3	77.6	163
A	37.8	70.0	67

表 2 矿料合成级配

Table 2 Composite gradations of mineral aggregate

混合料 级配类型	通过下列筛孔的集料的质量分数/%									
	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
AC-13(C1)	100.0	98.0	60.6	34.8	25.4	17.7	13.4	9.9	8.8	7.1
AC-13(C2)	100.0	97.9	58.1	30.3	21.2	15.3	12.0	9.4	8.5	7.0
SMA-13(S)	100.0	97.7	54.7	24.9	16.7	13.9	12.5	11.4	11.0	9.7
PAC-13(P)	100.0	97.5	51.4	19.4	10.4	7.0	5.2	3.8	3.3	2.7

据此,将上述 4 种改性沥青和 4 种矿料级配进行优化组合,并按“改性沥青-矿料级配”的格式分别简记为 S1-C1、S1-C2、S2-C2、A-C2、R-C2、S1-S 和 S3-P,通过马歇尔试验确定了这 7 种改性沥青混合料的配合比。其中,R-C2 混合料为在 S1-C2 混合料中另外掺加了质量分数为 0.8% (按矿料质量计)的 RA 抗车辙剂后的混合料;S1-S 混合料中掺加了质量分数为 0.3% (按混合料质量计)的木质素纤维。这 7 种混合料的最佳油石比分别为 5.05%、5.16%、5.05%、6.22%、5.40%、5.82% 和 4.54%。在这 7 种混合料中,除多孔排水式沥青混合料 S3-P 的设计空隙率以 20% 控制外,其余密实级配混合料的设计空隙率均以 4% 控制。

1.3 试验方法

1.3.1 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 T0715 的规定进行小梁低温弯曲试验,设定 0、-10、-20 和 -30 °C 4 种试验温

灰岩矿粉组成;添加剂有木质素纤维稳定剂和 RA 抗车辙剂(简记为 R)两种。经检验,原材料各项性能指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的技术要求。

1.2 配合比设计

根据中国高速公路沥青路面的典型结构和材料,在对 RIOHTrack 上面层细粒式改性沥青混合料设计时,按粒径 4.75 mm 以上粗集料含量的不同,优选了其质量分数为 65% 和 70% 的两种 C 型密级配 AC 类混合料 AC-13(悬浮密实级配),一种质量分数为 75% 的 SMA 类沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13(骨架密实级配),以及一种质量分数为 80% 的 PAC 类排水式沥青混合料 PAC-13(骨架空隙级配),分别简记为 C1、C2、S 和 P,相应的矿料合成级配见表 2。

度,测得各温度下的混合料抗弯拉强度 R_B 、弯曲劲度模量 S_B 和最大弯拉应变 ε_B ;同时,根据实测的跨中弯拉应力-应变曲线,对其上升阶段按 3 次多项式拟合,通过积分可求得弯曲破坏的临界应变能密度 E_B ,如式(1)所示。

$$E_B = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon = a_1 \varepsilon_0 + \frac{a_2}{2} \varepsilon_0^2 + \frac{a_3}{3} \varepsilon_0^3 + \frac{a_4}{4} \varepsilon_0^4 \quad (1)$$

式中: E_B 为应变能密度, kJ/m^3 ; σ 为弯拉应力, kPa ; ε 为弯拉应变, 10^{-6} ; ε_0 为弯拉应力峰值对应的弯拉应变, 10^{-6} ; a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 为 3 次多项式的拟合系数。

上述 4 个指标中, R_B 和 S_B 主要反映沥青混合料的强度和刚度,受混合料类型的影响较为显著;而 ε_B 和 E_B 表征混合料抵抗低温弯曲破坏的能力,可很好地反映混合料低温性能,故取 ε_B 和 E_B 两个指标的试验结果进行分析。

1.3.2 中梁线收缩系数试验

将轮碾成型的混合料板式试件切割成尺寸为 380 mm×51 mm×64 mm 的棱柱体中梁试件,再

将3片应变片中心分别对应中梁长度方向4等分的中间3个等分点并沿梁长方向粘贴于长宽顶面;然后将试件置于实时温度-应变采集系统之中,并在其底部对称放置3根玻璃棒,以尽可能地减少试件底面的摩阻影响。试验时,设定温度范围为 $-30 \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,并在此温度范围内循环两次,升降温速率均为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,每升降 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温1 h,据此测定每升降整 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试件的应变值,并计算对应温度区间的混合料线收缩系数 C ,如式(2)所示。

$$C = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_i}{T_i - T_i} \quad (2)$$

式中: C 为线收缩系数, $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; ε_i 和 ε_i 分别为对应温度区间的初始应变和终止应变, 10^{-6} ; T_i 和 T_i 分别为对应温度区间的初始温度和终止温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.3 法国M2F梯形梁动态模量试验

将轮碾成型的混合料车辙板试件切割成上底、下底、高和厚分别为25、56、250和25 mm的梯形梁试件,再将试件的上、下底面分别粘贴固定于法国M2F梯形梁动态模量与疲劳试验机加载平台的护冠和底座上;然后将其置于环境箱中,按设定温度、频率和应变水平对梯形梁上底面沿垂直于厚度方向施加水平向正弦波荷载,使其呈悬臂梁两点弯曲模式并交变加载,从而测定混合料的动态模量。试验时,温度在 $0 \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内按 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等间隔划分共取10种方案,加载频率在 $10 \sim 40\text{ Hz}$ 范围内按 5 Hz 等间隔划分共取7种方案,并以应变控制方式加载,应变水平在 $30 \times 10^{-6} \sim 180 \times 10^{-6}$ 范围内按 30×10^{-6} 等间隔共取6种方案。

根据M2F梯形梁动态模量试验的加载频率扫描结果,基于时温等效原理,可以得到各混合料的复模量 E^* 、储能模量 E' 、耗能模量 E'' 和相位角 φ 及相应的主曲线。由于沥青混合料低温性能取决于其黏弹性,故对仅表征弹性的 E' 和仅表征黏性的 E'' 不做分析。 E^* 和 φ 的主曲线分别按Boltzmann函数和GaussAmp函数进行非线性拟合获得。

$$\lg E^* = \frac{b_1 - b_2}{1 + \exp[(T - b_3)/b_4]} + b_2 \quad (3)$$

$$\varphi = c_1 + c_2 \exp[-(T - c_3)^2/(2c_4^2)] \quad (4)$$

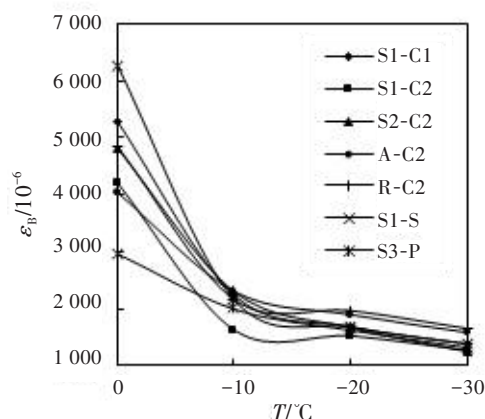
式中: E^* 为复模量, GPa; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; b_1 、 b_2 、 b_3 和 b_4 为 E^* 主曲线的拟合参数; φ 为相位角, $(^{\circ})$; c_1 、 c_2 、 c_3 和 c_4 为 φ 主曲线的拟合参数。

2 结果分析

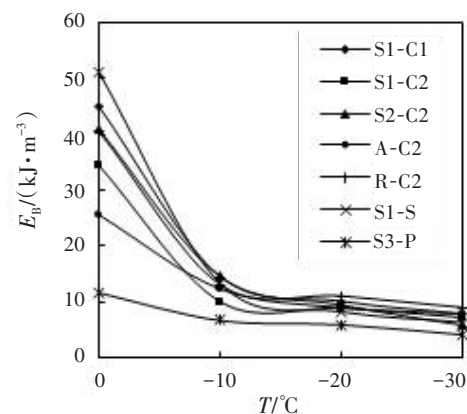
2.1 试验结果分析

按照前述三种试验方法及方案,可测得7种上面层细粒式改性沥青混合料的各试验指标随温度 T 的变化曲线如图1~3所示。其中,中梁线收缩系数 C 取 $-30 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对低温区间的试验结果,对应温度为各整 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间的中值。M2F梯形梁动态模量试验只取 90×10^{-6} 应变水平下 $-10 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温区间内复模量 E^* 和相位角 φ 的主曲线进行分析,并取基准频率为 10 Hz 。

从图1可以看出,随着温度的降低,小梁低温弯曲的最大弯拉应变 ε_B 和应变能密度 E_B 均呈先快速减小而后趋于平稳的变化规律,具有良好的一致性,较好地表征了改性沥青混合料在低温下变



(a) 最大弯拉应变



(b) 应变能密度

图1 小梁低温弯曲试验结果

Fig. 1 Test results of low temperature bending by small beam test

硬发脆的特性,故两者均可作为沥青混合料低温性能的合理评价指标。然而,不同混合料的两个指标随温度变化曲线均存在一定的交叉现象,这表明采用不同温度对比评价各混合料的低温性能会得出不同的结果。为此,考虑到两者曲线均在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近出现明显拐点,即此温度接近混合料由黏弹性向脆性过渡的脆化点温度,故优选 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为低温性能对比评价的基准温度。

从图2可以看出,随着温度的降低,不同混合料的中梁线收缩系数 C 均呈先升后降的单峰曲线变化规律,且峰值均出现在 $-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,同样也很好地表征了改性沥青混合料在基准温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近处于性态过渡状态,故可取该温度区间内 C 的平均值作为混合料低温收缩性能的评价指标。同时,在 C 峰值两侧,当温度高于峰值温度时,每提高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,这7种混合料的 C 值平均降低 12.6% ;而低于峰值温度时,每降低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, C 值平均降低 6.8% ,前者是后者的 1.85 倍。这表明混合料性态过渡区高温侧的温缩性能比低温侧的温缩性能随温度的变化更敏感,这主要是在温度较高的黏弹性状态下,改性沥青具有较强的蠕变性,使得混合料的温缩性能显著降低;而在低温脆性状态下,改性沥青逐渐变硬发脆,混合料的温缩性能受矿料级配主导,使得温缩性能的温度敏感性降低。

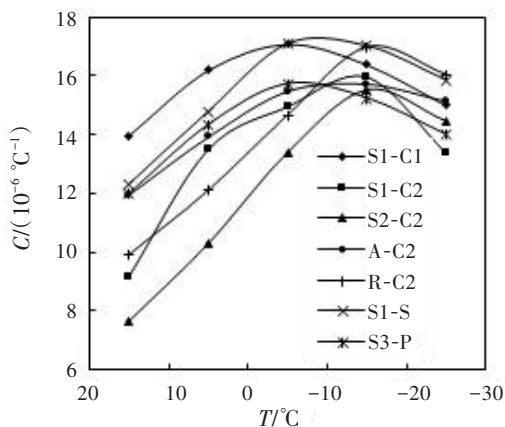
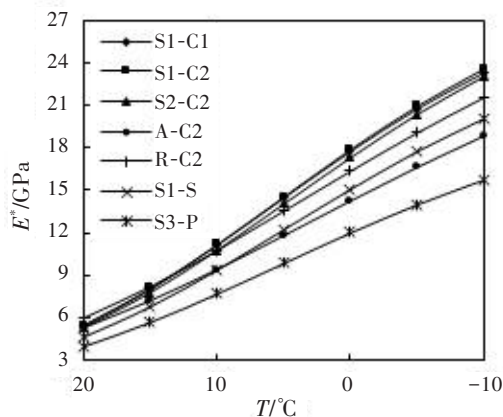


图2 中梁线收缩系数试验结果

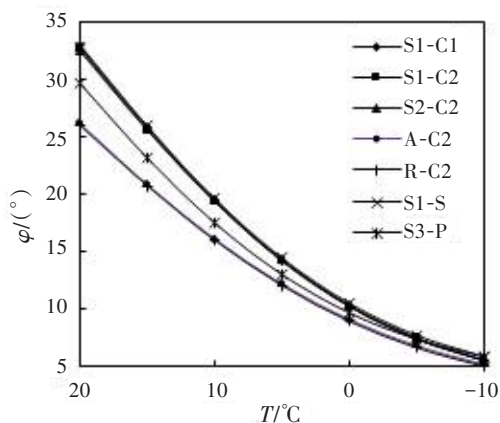
Fig. 2 Test results of linear shrinkage coefficient by middle beam test

从图3可以看出,随着温度的降低,各改性沥青混合料的复模量 E^* 均逐渐增大,而相位角 φ 均逐渐减小,呈现出良好的一致性。这表明温度降低使混合料的脆性增强,刚度提升,相应地使其黏

性减弱,蠕变性能降低,这合理地反映了动态模量随温度的变化特性,故 E^* 和 φ 均可作为合理的低温性能评价指标。同时,在各加载应变水平下7种混合料的 E^* 和 φ 的主曲线在不同温度下虽然存在一定的交叉,但相对线位总体保持一致,且 E^* 主曲线在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下未发生交叉。这表明在各加载应变水平下的M2F梯形梁动态模量试验结果具有显著的一致性,可相互替代。为便于不同混合料的低温性能对比评价,取中值 90×10^{-6} 作为基准加载应变水平,并同样取 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为基准温度。



(a) E^* 主曲线



(b) φ 主曲线

图3 M2F梯形梁动态模量试验结果

Fig. 3 Test results of dynamic modulus by trapezoidal beam test for sample M2F

2.2 对比评价

根据3种试验方法在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 基准温度下优选的5个评价指标,即小梁低温弯曲的最大弯拉应变 ε_B 和应变能密度 E_B ,中梁线收缩系数 C ,以及梯形梁 90×10^{-6} 基准加载应变水平下的复模量 E^* 和相位角 φ ,对7种上面层细粒式改性沥青混合料的低

温性能进行对比评价,评价结果见表3。其中,排序依据中的“大”和“小”分别表示“越大越优型”和

“越小越优型”两类评价指标,括号中数字为排序位次。

表3 各混合料低温性能对比评价结果

Table 3 Comparative evaluation results of low-temperature performance for each mixture

混合料	小梁低温弯曲		中梁线收缩系数 $C/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	M2F梯形梁动态模量	
	$\varepsilon_B/10^{-6}$	$E_B/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$		E^*/GPa	$\varphi/(^\circ)$
S1-C1	2 228(3)	14.50(2)	16.75(6)	23.34(6)	5.47(5)
S1-C2	1 625(7)	9.96(6)	15.46(2)	23.60(7)	5.57(3)
S2-C2	2 312(1)	14.52(1)	14.47(1)	23.07(5)	5.51(4)
A-C2	2 296(2)	12.34(5)	15.62(4)	18.87(2)	5.19(6)
R-C2	2 159(5)	13.03(4)	15.83(5)	21.57(4)	5.06(7)
S1-S	2 162(4)	13.21(3)	17.07(7)	20.11(3)	5.91(1)
S3-P	2 009(6)	6.74(7)	15.49(3)	15.79(1)	5.89(2)
排序依据	大	大	小	小	大

由表3可知,不同试验方法和指标对以上7种改性沥青混合料低温性能对比评价的排序结果存在着较明显的差异,为此对5个指标的试验结果进行相关性分析,可得到各指标之间的Pearson相关系数,见表4。

表4 评价指标间的Pearson相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients among different evaluation indexes

评价指标	ε_B	E_B	C	E^*	φ
ε_B	1.000	0.625	0.059	-0.111	-0.291
E_B		1.000	0.195	0.664	-0.430
C			1.000	-0.035	0.225
E^*				1.000	-0.336
φ					1.000

显然,“越大越优型”及“越小越优型”指标本身之间应成正相关,而两类指标之间应成负相关,若满足这些要求,则表明不同指标之间的对比评价结果具有一致性,否则不符合评价一致性的要求。据此,由表4可知: ε_B 与 E_B 之间的相关系数大于0.6,正相关性较显著; E^* 与 φ 之间的相关系数绝对值虽然较小,但仍成弱负相关性。这表明同一试验方法不同指标之间的低温性能对比评价结果具有较好的一致性。

ε_B 与 E^* 之间成负相关,符合评价一致性要求,但其分别与 C 、 φ 两个指标之间的相关性不符合一致性要求;而 E_B 分别与 C 、 E^* 、 φ 三个指标之间的相关性均不符合一致性要求。因此,从小梁低温弯曲试验与其他两种试验方法的评价一致性来看,

ε_B 优于 E_B ,即 ε_B 是小梁低温弯曲试验适宜的对比评价指标。同理,可得到 E^* 优于 φ ,即 E^* 是M2F梯形梁动态模量试验适宜的对比评价指标。同时, C 与其他4个指标之间的相关性均不符合评价一致性要求,这表明采用不同的试验方法对比评价改性沥青混合料的低温性能具有显著的差异。

2.3 综合对比评价

为了更合理地对不同改性沥青混合料低温性能进行综合对比评价,本研究对各指标结果进行无量纲归一化处理,并将所有评价指标均转换为“越大越优型”指标:

$$X_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_{i, \min}}{x_{i, \max} - x_{i, \min}}, & \text{越大越优型} \\ \frac{x_{i, \max} - x_{ij}}{x_{i, \max} - x_{i, \min}}, & \text{越小越优型} \end{cases} \quad (5)$$

式中: X_{ij} 为经无量纲归一化的指标结果; x_{ij} 为第*i*个指标的第*j*种混合料实测结果; $x_{i, \max}$ 和 $x_{i, \min}$ 分别为第*i*个指标结果的最大值和最小值。

据此,考虑到以上三种试验方法及其指标均能合理反映混合料的低温性能,对这三种试验方法均分赋权,即各取1/3的权值,再对同一试验方法不同指标之间均分赋权,并按式(6)计算各指标的加权和 Y_j ,从而以其值大小对各混合料的低温性能进行优劣排序,结果见表5。

$$Y_j = \sum_{i=1}^n W_i X_{ij} \quad (6)$$

式中: Y_j 为第*j*种混合料低温性能的各指标评价结果加权和; W_i 为第*i*个指标的权值; n 为指标数。

表5 各混合料低温性能综合对比评价结果

Table 5 Comprehensive comparative evaluation results of low-temperature performance for each mixture

混合料	ε_B	E_B	C	E^*	φ	加权和	排序
S1-C1	0.878	0.997	0.121	0.034	0.485	0.439	6
S1-C2	0.000	0.414	0.618	0.000	0.605	0.376	7
S2-C2	1.000	1.000	1.000	0.068	0.525	0.765	1
A-C2	0.977	0.720	0.559	0.606	0.146	0.594	3
R-C2	0.777	0.808	0.478	0.261	0.000	0.467	5
S1-S	0.782	0.832	0.000	0.446	1.000	0.510	4
S3-P	0.559	0.000	0.609	1.000	0.981	0.626	2
权值	1/6	1/6	1/3	1/6	1/6		

由表5并结合混合料配合比设计结果可知:

1) 采用5℃延度较大的SBS改性沥青制备的混合料S2-C2的综合低温性能最优,然后依次为多孔排水式高黏SBS改性混合料S3-P、橡胶沥青混合料A-C2、SBS改性SMA-13混合料S1-S、掺抗车辙剂的SBS改性混合料R-C2、粗集料含量较低的SBS改性混合料S1-C1,最差为粗集料含量为中等的SBS改性混合料S1-C2。

2) 在改性沥青相同而矿料级配不同的情况下,S1改性沥青混合料按其低温性能优劣排序依次为:S1-S、S1-C1、S1-C2,这表明SMA-13的综合低温性能最优,而SBS改性AC-13中粗集料越少,结构越密实,相应的其低温性能越强。在改性沥青不同而矿料级配相同的情况下,C2级配的改性沥青混合料按其低温性能优劣排序依次为:S2-C2、A-C2、R-C2、S1-C2,这表明SBS改性沥青低温延性强的混合料综合低温性能最优,其次为橡胶沥青混合料,而掺抗车辙剂后也能增强SBS改性沥青混合料的低温性能。

3) 对于排水式SBS改性混合料S3-P,其综合低温性能仅次于S2-C2的低温性能,比其他5种改性沥青混合料的低温性能均优。这表明虽然多孔排水式的高黏SBS改性PAC-13混合料的低温弯曲变形能力相对较弱,但其低温收缩性能和黏弹性较优,仍整体表现出良好的低温性能。

3 讨论

沥青混合料低温性能的影响因素众多,包括原材料组成和性质、混合料配合比和体积参数,以及试验方法、指标和条件等,对于沥青路面,还受

结构组合、施工质量、交通条件、气候环境和使用年限等因素的影响。本研究采用的7种细粒式改性沥青混合料均为RIOHTrack上面层实际使用的混合料,也是中国高速公路沥青路面上面层广泛应用的混合料类型,本研究旨在通过三种室内试验方法及其指标对各混合料低温性能的优劣进行综合对比评价,以期为环道沥青路面的长期性能监测验证提供对比依据。结合7种混合料的配合比设计及低温性能综合对比评价结果,后续需要开展的研究如下:

1) 本研究能较好地综合反映改性沥青类型和矿料合成级配对混合料低温性能的总体影响规律,但对一些重要的单一因素如空隙率、改性剂掺量等对低温性能影响的敏感性及其作用机理有待进一步开展针对性的分析研究。

2) RIOHTrack目前仍处于长期加载监测过程中,这7种改性沥青混合料低温性能的实际表现,以及三种室内试验方法及其指标评价结果的普适性,有待结合后续沥青上面层低温抗裂性能的现场监测数据进一步验证,并指导混合料优化设计和试验方法的改进。

4 结论

应用小梁低温弯曲、中梁线收缩系数和法国M2F梯形梁动态模量三种室内试验方法,研究了RIOHTrack上面层所用7种细粒式改性沥青混合料的低温性能,并通过多指标试验结果相关性分析,采用无量纲归一化赋权求和法对混合料的低温性能进行了综合对比评价,得到以下结论:

1) 随着温度的降低,小梁低温弯曲的最大弯拉应变和应变能密度先快速衰减而后趋于平缓,中梁线收缩系数呈单峰曲线变化,法国M2F梯形梁的复模量逐渐增大而相位角逐渐减小,且 ε_B 、 E_B 、 C 、 E^* 、 φ 这5个指标在基准温度-10℃附近均能反映改性沥青混合料的低温性态过渡特征,故均可作为低温性能的合理评价指标。同时,最大弯拉应变 ε_B 和复模量 E^* 分别为各自试验方法的最优评价指标。

2) 相同试验方法不同指标之间的各改性沥青混合料低温性能对比评价结果具有较好的一致性,而不同试验方法指标之间的对比评价结果存在较明显的差异,故有必要综合多试验及其指标

结果对不同改性沥青混合料的低温性能进行对比评价。

3) 改性沥青类型和矿料合成级配对混合料的综合低温性能影响显著。对于改性沥青,采用低温延性强的SBS改性沥青制备的混合料的低温性能最优,其次为橡胶沥青混合料,另外,掺抗车辙剂也能增强SBS改性AC类混合料的低温性能;对于矿料级配,SMA类的低温性能最优,而SBS改性AC类混合料中粗集料含量越低,其低温性能越强;多孔排水式高黏SBS改性PAC类混合料低温弯曲性能较弱,但其黏弹性和低温收缩性能较优,综合低温性能良好。

[参考文献]

- [1] 胡超,徐希忠,田腾辉,等.沥青路面低温性能评价指标研究进展[J].石油沥青,2021,35(5):60-66. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7450.2021.05.012.
- HU Chao, XU Xizhong, TIAN Tenghui, et al. Research progress on the low temperature performance evaluation indexes of asphalt pavement[J]. Petroleum Asphalt, 2021, 35(5): 60-66. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7450.2021.05.012.
- [2] 陈飞,张林艳,封基良,等.沥青混合料低温抗裂性能试验方法研究进展[J].材料导报,2021,35(增刊2):127-137.
- CHEN Fei, ZHANG Linyan, FENG Jiliang, et al. Research progress on test methods of asphalt mixture's low-temperature anti-cracking performance [J]. Materials Reports, 2021, 35(sup 2): 127-137.
- [3] 张东,黄晓明,赵永利.沥青混合料抗裂性能评价指标对比研究[J].建筑材料学报,2012,15(2):222-226. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.02.014.
- ZHANG Dong, HUANG Xiaoming, ZHAO Yongli. Comparative study on the evaluation methods of the fracture resistance of asphalt mixtures [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 222-226. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.02.014.
- [4] 刘建芳,李九苏,杨帆,等.反应型冷拌沥青混合料制备及性能研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):16-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.004.
- LIU Jianfang, LI Jiuse, YANG Fan, et al. Research on reactive liquid asphalt mixture[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 16-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.004.
- [5] 白劭.玄武岩纤维对高模量沥青混合料路用性能影响研究[J].公路与汽运,2022(1):57-60. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.016.
- BAI Mai. Study on influence of basalt fiber on road performance of high modulus asphalt mixture [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(1): 57-60. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.016.
- [6] 彭文耀,李婷玉,陈宇亮,等.高掺量厂拌热再生改性沥青混合料路用性能研究[J].公路工程,2022,47(4):155-159. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2022.04.024.
- PENG Wenyao, LI Tingyu, CHEN Yuliang, et al. Study on road performance of high volume hot recycling modified asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2022, 47(4): 155-159. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2022.04.024.
- [7] 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. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000509.
- [8] 蒋洪涛,朱德武,孙春阳,等.植物基复配沥青混合料的蠕变性能[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(1):36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.01.007.
- JIANG Hongtao, ZHU Dewu, SUN Chunyang, et al. Preparation of bio-binder compound modified asphalt HMA creep property [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(1): 36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.01.007.
- [9] 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. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.04.047.
- LI Caixia, ZHANG Ke, LUO Yaofei. Research on improving low-temperature performance of poly-phosphoric acid modified asphalt mixture based on semi-circular flexural-tensile test [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(4): 234-239. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.04.047.
- [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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.07.005.
- 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.07.005.
- [11] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7450.2020.04.008.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7450.2020.04.008.
- [12] 闫科伟, 苏鑫, 朱月风, 等. 沥青混合料低温抗裂性能分析及断裂过程模拟[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(1): 89–97. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2021.0089.
- YAN Kewei, SU Xin, ZHU Yuefeng, et al. Low temperature crack resistance analysis and fracture process simulation of asphalt mixture [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2021, 46(1): 89–97. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2021.0089.
- [13] 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. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180614.001.
- 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. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180614.001.
- [14] 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. DOI: 10.1080/10298436.2018.1549323.
- [15] 曹海波, 李智, 丁彪. 高寒大温差条件下沥青混合料低温性能研究[J]. *公路*, 2021, 66(7): 234–239. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2017.11.012.
- CAO Haibo, LI Zhi, DING Biao. Research on low temperature performance of asphalt mixture under cold and large temperature difference [J]. *Highway*, 2021, 66(7): 234–239. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2017.11.012.
- [16] 张飞, 王岚, 邢永明. 温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J]. *中外公路*, 2022, 42(3): 174–179. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.031.
- ZHANG Fei, WANG Lan, XING Yongming. Low temperature performance of warm mix rubber powder modified asphalt mixture [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(3): 174–179. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.031.
- [17] 彭建湘. 玄武岩纤维长度对SMA-13各项性能的影响研究[J]. *湖南交通科技*, 2022, 48(3): 33–37. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2022.03.007.
- PENG Jianxiang. Research on effect of basalt fiber length on performances of SMA-13 [J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2022, 48(3): 33–37. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2022.03.007.
- [18] 王旭东. 足尺路面试验环道路面结构与材料设计[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(6): 30–37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.06.005.
- WANG Xudong. Design of pavement structure and material for full-scale test track [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(6): 30–37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.06.005.
- [19] 查旭东, 罗涛, 刘安辉, 等. 基于SPT试验的RIOHTrack上面层沥青混合料高温性能评价[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 17(2): 18–25. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.004.
- ZHA Xudong, LUO Tao, LIU Anhui, et al. Evaluation of high temperature performance for upper surface layer asphalt mixture in RIOHTrack based on SPT [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2020, 17(2): 18–25. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.004.
- [20] 查旭东, 李聪, 邹博, 等. RIOHTrack下面层沥青混合料低温性能试验评价[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(6): 1–8. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.06.001.
- ZHA Xudong, LI Cong, ZOU Bo, et al. Experimental evaluation of low temperature performance of asphalt mixture in bottom surface layer of RIOHTrack [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(6): 1–8. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.06.001.

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:李岳林)