

文章编号:1671-1637(2021)05-0094-10

EBBR 试验下沥青结合料低温性能评价指标

冯德成¹, 崔世彤^{1,2}, 易军艳¹, 王东升¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 聚焦沥青结合料低温性能评价指标, 基于流变学的弯曲梁流变仪试验、改进弯曲梁流变仪试验, 分别分析了实际路面回收沥青、老化后的基质沥青、改性沥青低温流变性能规律; 利用传统劲度模量及模量变化率指标展开了沥青的低温性能评价, 提出了等效低温设计温度指标与温度差异值指标; 在不同养护环境下进行模拟, 利用低温等级损失指标对新制备、回收沥青展开了低温物理硬化影响因素研究; 利用不同来源、不同品种沥青试验结果相互验证, 从抗干扰能力、稳定性、评价准确度、直观性与指标获取难易程度等方面对上述指标进行分析, 确立了 4 类指标对沥青低温性能的区分与评价能力。研究表明: 回收沥青的实验室流变分析能够反映路面结构的低温抗裂水平, 开裂严重路段沥青的模量明显高于其他路段, 其数值差异可达 130 MPa; 新制备的 SBS 改性沥青与回收沥青低温加载规律一致性高, 模量偏差低于 15%, 可有效搭建起实验室研究同实际路面病害处理需要的关系; 传统指标数据稳定性偏弱, 置信度仅为 64.7%~82.3%, 难以满足研究需要, 温度差异值指标及低温等级损失指标在应用方面同样受到制约, 对此仍需开展更多深入的研究。

关键词: 道路工程; 评价指标; 弯曲梁流变仪试验; 改进 BBR 试验; 沥青结合料; 低温抗裂性能

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.05.008

Low temperature performance evaluation indexes of asphalt binder based on EBBR test

FENG De-cheng¹, CUI Shi-tong^{1,2}, YI Jun-yan¹, WANG Dong-sheng¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Focusing on the evaluation indexes of the low temperature performance of asphalt binders, based on rheological bending beam rheometer (BBR) and extended bending beam rheometer (EBBR) tests, the low temperature rheological properties of the extracted asphalt, aging base asphalt and modified asphalt on actual pavements were analyzed. The low temperature performance evaluations of the asphalts were carried out using the traditional stiffness modulus and modulus changing rate. The equivalent low temperature design temperature index and the temperature difference value index were proposed. Simulations in different curing environments were conducted, and the influencing factors of physical hardening of newly prepared and extracted

收稿日期: 2021-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878229)

作者简介: 冯德成(1967-), 男, 河南新县人, 哈尔滨工业大学教授, 工学博士, 从事路面材料与结构研究。

引用格式: 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. EBBR 试验下沥青结合料低温性能评价指标[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 94-103.

Citation: FENG De-cheng, CUI Shi-tong, YI Jun-yan, et al. Low temperature performance evaluation indexes of asphalt binder based on EBBR test [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 94-103.

asphalt at low temperature were studied using low temperature grade loss index. Different sources and types of asphalt test results were used to verify each other, the above indexes were compared and analyzed in terms of anti-interference ability, stability, evaluation accuracy, intuitiveness, and difficulty in obtaining indexes. The abilities of four indexes in distinguishing and evaluating the low temperature performance of asphalt were established. Research results show that the laboratory rheological analysis of the extracted asphalt can reflect the low temperature crack resistance level of the pavement structure. The modulus of the asphalt in the severely cracked section is significantly higher than those in the other sections, and the value difference can reach about 130 MPa. The newly prepared SBS modified asphalt and the extracted asphalt have a high consistency at low temperature loads, and the modulus deviation is lower than 15%. It can effectively establish the relationship between laboratory research and actual pavement disease treatment needs. The stability of traditional index data is weak, and the confidence is only 64.7%-82.3%, which is difficult to satisfy the research needs. The applications of temperature difference value index and low temperature grade loss index is also restricted, which still needs more in-depth research. 4 tabs, 10 figs, 32 refs.

Key words: road engineering; evaluation index; bending beam rheometer test; extended bending beam rheometer test; asphalt binder; low temperature crack resistance

Author resume: FENG De-cheng(1967-), male, professor, PhD, fengdecheng@hit.edu.cn.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51878229)

0 引言

为了准确预测沥青路面低温开裂能力,道路研究者提出了大量试验测试方法^[1-4]。美国公路合作研究计划(National Cooperative Highway Research Program)指出,沥青结合料的弯曲梁流变仪(Bending Beam Rheometer, BBR)试验及直接拉伸试验(Direct Tensile Test, DTT)力学原理明确,适用于沥青路面的低温性能控制^[5-6]。中国近年引入前者进行PG低温分级(一种沥青性能等级分级方法)工作,利用劲度模量及模量变化率进行季冻区沥青路面低温抗裂评价。但工程实际表明,基于BBR的模量指标稳定性不足,其同松弛指标联系仍不够充分^[7]。研究指出,模量指标对实际开裂预测的准确度不高^[8],部分地区甚至不足55%,难以满足沥青低温性能评价要求,因此,如何建立合理的低温抗裂评价方法与指标,仍是研究人员努力的方向^[9]。

国内学者针对BBR试验传统指标开展了部分研究,进一步印证了传统指标的局限性。袁迎捷^[10]通过Superpave胶浆研究认为,PG分级体系相较于中国采用的针入度体系性能区分度有所提高,但由于其基本假设的局限性,未能有效反映改性沥青的流变特性,对不同性质,相同PG等级下的沥青材料

差异未做出有效区分;张兴友等^[11]提出当前研究主要停留在单一的劲度模量分析或松弛分析层面,但随着改性沥青的大量使用,既往研究难以满足这些断裂过程复杂的材料案例分析;冯中良等^[12]针对劲度模量及其变化率指标也提出了一种新的拟合关系,为后续研究提供了一种新的思路;谭忆秋等^[13]通过指标对比指出,以橡胶粉改性沥青为首的改性沥青虽PG低温等级相同,但低温性能存在明显差异,利用PG分级体系无法区分橡胶粉改性沥青低温性能差异。

受益于美国公路战略研究计划(Strategic Highway Research Program, SHRP)与美国机场沥青路面技术计划(Airport Asphalt Pavement Technology Program, AAPT)的实施,学者们提出了基于模量及其变化率的全新指标^[14-15]。SHRP-1.0提出了沥青高低温性能连续分级温度指标,并于2016年编入ASTM规范^[16],之后谭忆秋等^[13]又开展了基于该指标的深入研究,通过其与传统指标及劲度模量主曲线面积值指标等对比分析,在工程上推荐对橡胶粉改性沥青使用连续分级温度指标。2011年,美国机场沥青路面技术计划(AAPT 06-1)提出了评价沥青低温断裂性能的指标——温度差异值,并通过试验路研究验证了其对于基质沥青松弛、延展特性的反映能力^[17]。近年来,基于该指标的研究在美国

大量涌现。可以预见,未来对该指标的了解将会更加深入^[18]。另有研究指出,沥青材料的物理硬化过程对季冻区路面的早期开裂与过度开裂具有显著影响^[19]。Hesp 等^[20]发现,对于连续低温时段较长的地区,物理硬化过程会随着连续低温时长的增加而加剧材料低温性能的衰减。同年,加拿大印发并推广了基于物理硬化的改进弯曲梁流变仪(Extended Bending Beam Rheometer, EBBR)试验方法(MTO LS-308)。2016年,AASHTO将 EBBR 试验方法列入试行标准范围。2018年,聂忆华等^[19]利用 10 种沥青完成了 EBBR 实用性研究,验证了该试验更好的低温性能表征能力。

本文基于长吉高速既有沥青路面不同裂缝间距段落的芯样,开展回收沥青的 EBBR 试验;进而选择北方地区常用的沥青类型,考虑不同老化模拟条件,同样进行 EBBR 试验。参考连续分级温度指标归纳提出沥青低温当量设计温度指标。对劲度模量、模量变化率、低温当量设计温度、温度差异值(新指标)及低温等级损失指标展开分析与对比,分别判定上述指标对基质沥青、改性沥青、回收沥青的低温评价能力与适用效果。通过全面对比回收沥青与实验室老化沥青的低温流变性能,验证上述指标与现场开裂间距的关联性,并提出适宜的低温性能评价方法。对四类指标进行评价能力分析,对比优缺点,找出一种力学原理明确、数据同现场开裂相关度高的指标及方法。

1 沥青材料

1.1 高速取芯及抽提

基于长吉高速龙嘉段改扩建工程,在 4 个典型开裂路段展开 100 mm 直径芯样的选取,路段横向开裂间距(整幅横向裂缝之间的距离)分别为 5~10、10~20、20~30、30~50 m,取样点均为外侧行车道中线,距离裂缝 50 cm 处,各路段平行试件取 6 个。资料显示,该段沥青路面上面层沥青为 SBS 改性沥青。利用 Infratest 抽提仪展开沥青回收,并配以特制滤纸以减少矿粉及残余三氯乙烯的影响。同时,参考 Alavi 等^[21-22]的研究,对抽提后的沥青进行二次短期老化处理,将残留三氯乙烯降至极低水平。

1.2 沥青老化及 PG 分级

为验证 EBBR 试验对常用沥青的评价能力,利用中海油等产源的沥青,分别制备 6 种北方地区常用的基质、改性沥青。其针入度、软化点如表 1。

表 1 新制备沥青老化前后针入度及软化点

Table 1 Penetrations and softening points of newly prepared asphalt before and after aging

沥青品种	针入度/0.1 mm		软化点/℃	
	老化前	老化后	老化前	老化后
盘锦 70 [#]	62.4	55.5	49.5	69.8
大连 70 [#]	77.3	48.7	49.7	54.3
中大 90 [#]	86.3	80.2	45.3	56.2
SBS 改性	75.6	55.5	75.0	69.8
橡胶粉改性	58.6	43.1	75.8	79.9
SBS 橡胶	54.0	22.4	81.6	89.7

为便于后续研究,各类沥青均用简写表示,例如:盘锦 70[#] 沥青记为 P70,橡胶 SBS 复合改性沥青记为 SR,短期老化、紫外老化、压力老化状态分别用 T、Z、P 表示。具体分类见表 2。

表 2 新制备沥青分类

Table 2 Newly prepared asphalt classification

沥青品种	未老化	短期老化	紫外老化	压力老化
盘锦 70 [#]	P70-	P70-T	P70-Z	P70-P
大连 70 [#]	D70-	D70-T	D70-Z	D70-P
中大 90 [#]	Z90-	Z90-T	Z90-Z	Z90-P
SBS 改性	SBS-	SBS-T	SBS-Z	SBS-P
橡胶粉改性	R-	R-T	R-Z	R-P
SBS 橡胶	SR-	SR-T	SR-Z	SR-P

对新制备沥青分别进行短期老化(薄膜烘箱试验)、240 h 紫外老化及压力老化处理,其中紫外老化温度设定为 65 ℃,时长为 10 d,模拟真实情况 90 d 产生的老化影响。将老化后的沥青分别在 -12 ℃、-18 ℃、-24 ℃、-30 ℃ 下进行 PG 分级工作。分级过程利用 Cannon 公司生产的弯曲梁流变仪进行,24 类沥青的 PG 低温等级如图 1 所示。

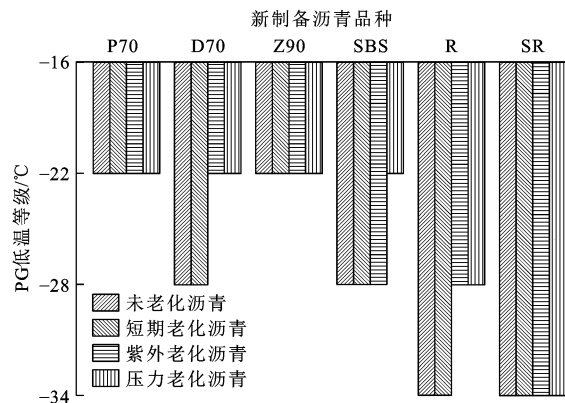


图 1 各老化状态下 PG 低温等级

Fig. 1 Low temperature grades of PG in various aging states

从图 1 可以看出,基于 PG 分级的沥青低温性能评价,是对沥青性能的粗分方法。其未能有效区分各老化状态下 P70、Z90、SR 沥青的低温性能差异,由此可侧证传统方法的局限性。

2 养护加载

2.1 EBBR 养护

EBBR 试验通过改变 BBR 试件养护条件,考虑了物理硬化过程对沥青小梁抗裂性能的影响^[23]。BBR 试验的养护时间是 1 h,养护温度与试验温度相同;而 EBBR 试验设置了 3 个养护时间,分别是 1、24、72 h,养护温度为 PG 低温等级温度加 10 °C 和 20 °C,试验温度为 PG 低温等级温度加 10 °C、16 °C,各养护温度、养护时间、加载温度穿插设置,因此,1 套 EBBR 试验需要 2×2×3 次加载^[24]。

EBBR 试验的设置方式如图 2,图中 Y 为沥青 PG 低温等级温度绝对值; T_{LC} 为低温下养护温度; T_{HC} 为高温下养护温度; t_c 为养护时间; T_{LT} 为低温下加载温度; T_{HT} 为高温下加载温度。

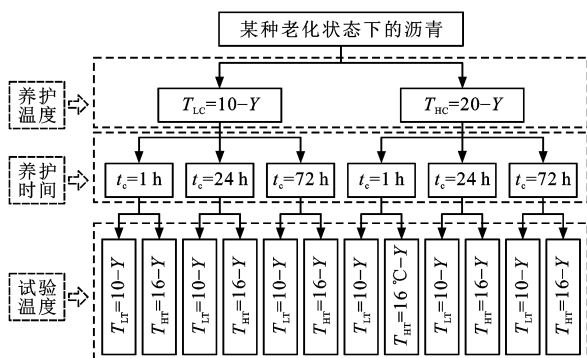


图 2 EBBR 养护加载条件

Fig. 2 EBBR maintenance loading conditions

养护需要在负温度酒精浴下进行,如图 3。将各类沥青分装于 25 ml 小烧杯内,避免因多次加热导致的性能变化。

2.2 加载

新制备沥青按照 PG 分级温度及 EBBR 温度要求选取试验梁加载温度,回收沥青则统一为 -12 °C、-18 °C,由弯曲梁流变仪完成控温、加载及数据采集工作。每种沥青选取 2 个平行试件。

现行规范规定,BBR 试验应以 60 s 时的劲度模量 $S(t)$ 及其对数指标下的变化率 $m(t)$ 作为低温性能评价依据,并要求模量不应大于 300 MPa;模量变化率不小于 0.3。本文中研究的所有指标均以该规定为依据,利用 60 s 时刻模量及 $m(t)$ 进行换算处理,因此,其力学依据与传统指标相同。



图 3 EBBR 试验养护过程

Fig. 3 EBBR test maintenance process

3 试验结果分析

研究基于上述回收沥青、老化沥青,分析了基于 BBR 系统的模量及其变化率指标、当量低温设计温度指标、温度差异值指标,以及基于 EBBR 体系的低温等级损失指标,并对此 4 类指标展开评价能力探究。

3.1 劲度模量 $S(t)$ 及模量变化率 $m(t)$

利用现有数据,归纳出回收沥青及新制备沥青的模量及松弛指标规律。

3.1.1 回收沥青模量

图 4 反映了不同开裂间距下回收沥青的低温流变规律,由图易得, $S(t)$ 与 $m(t)$ 均能反映出实际路面各开裂程度下的低温性能差异,开裂间距为 5~10 m 处的沥青与 10~20 m 处性能差异不大, $S(t)$ 与 $m(t)$ 变化均在 5% 以内;随着开裂间距增大, $S(t)$ 大幅下降, $m(t)$ 快速上升。

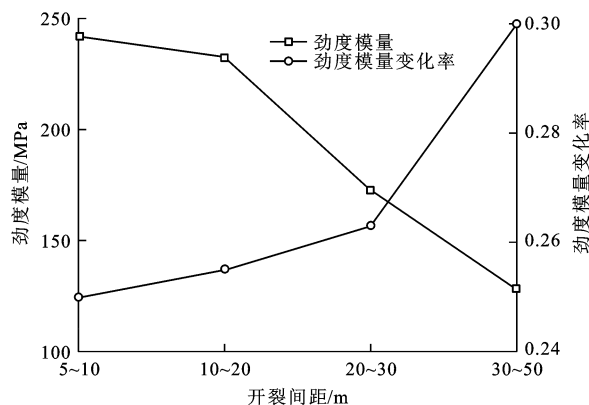


图 4 回收沥青劲度模量及其变化率

Fig. 4 Stiffness moduli of extracted asphalt and its changing rates

3.1.2 新制备沥青模量及置信度分析

再对 24 类新制备沥青展开数据分析,将 3 个低温等级温度下的数据放于同一图中,如图 5、6。由于规范对模量取值范围的要求,部分试件未完成某些温度下的取值。

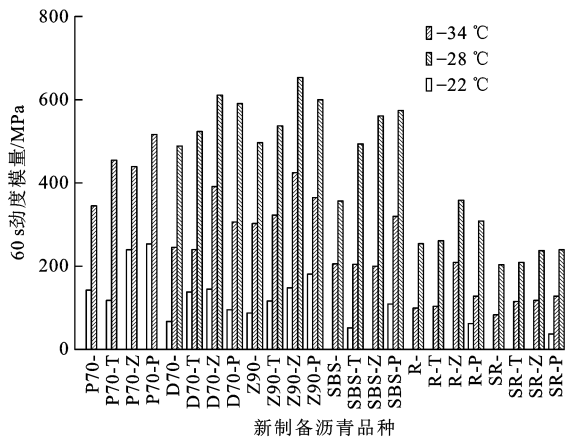


图 5 新制备沥青劲度模量变化规律

Fig. 5 Variation rules of stiffness modulus of newly prepared asphalt

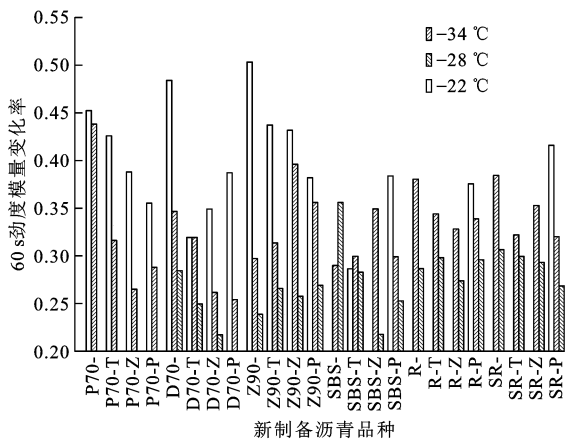


图 6 新制备沥青劲度模量变化率规律

Fig. 6 Changing rate rules of stiffness modulus of newly prepared asphalt

从图 6 中可以得出:老化对沥青胶结料低温劲度的影响显著,不同老化状态的沥青小梁 $S(t)$ 、 $m(t)$ 差异较大,原样沥青的劲度模量 $S(t)$ 最低,短期老化沥青次之,随后紫外老化沥青和压力老化沥青的 $S(t)$ 逐次升高, $m(t)$ 的变化规律与此相反;各类品种沥青的低温性能排序由小到大为基质沥青、SBS 改性沥青、橡胶粉改性沥青。此结论与业界对沥青低温性能的一般研究规律相符,基本能够验证 $S(t)$ 与 $m(t)$ 对新制备沥青性能的评价水平。

再对 284 个加载梁数据展开可靠度分析,结果表明:原样沥青劲度模量与短期老化沥青低温性能关系的置信度为 77.7%,模量变化率置信度同样为 77.7%;短期老化与紫外老化的低温性能关系结论置信度分别为 82.3% 和 64.7%;紫外老化与压力老化关系的置信度分别为 72.3% 和 64.7%。上述规律的置信度不够高,因此,可以认为传统指标计算得到的数据,易受到试验误差等条件影响,可靠性一般。

对比回收沥青与新制备沥青的数据发现:经过压力老化的 SBS 沥青 PG 低温等级为 PG-22,其在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $S(t)$ 为 110 MPa,与开裂间距 30~50 m 处的回收沥青(SBS 改性)表现相似(128 MPa)。这一结果反映了试验室制备沥青同路面回收沥青性能的一致性,验证了利用回收沥青与试验室新制备沥青进行对比研究的可行性。

3.2 当量低温设计温度指标

参考 SHRP 连续分级温度指标的设置方法^[16],提出使用当量低温设计温度 T_{dx} 。该指标要求进行多个 PG 试验温度下的 BBR 测试,通过对 $S(t)$ 、 $m(t)$ 进行内插,计算得到 $S(t)=300\text{ MPa}$ 及 $m(t)=0.3$ 时对应的当量温度。接着取内插温度中的较大值为当量加载温度,减去 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即为低温当量设计温度。由于 $S(t)$ 随时间变化的规律接近对数函数,考虑到工程计算方便,使用对数函数曲线对 $S(t)$ 进行插值,同理, $m(t)$ 则改用线性插值,具体见式(1)~(3)

$$T_s = T_a - \frac{[\text{Lg}(S_a) - \text{Lg}(300)][\text{Lg}(T_a) - \text{Lg}(T_b)]}{\text{Lg}(S_a) - \text{Lg}(S_b)} \quad (1)$$

$$T_m = T_c - \frac{(m_c - 0.3)(T_c - T_d)}{m_c - m_d} \quad (2)$$

$$T_{dx} = \max\{T_s, T_m\} - 10 \quad (3)$$

式中: T_s 为模量为 300 MPa 时的温度; T_m 为模量变化率为 0.3 时的温度; T_a 、 T_b 分别为温度从高到低排列 $S(t)$ 通过与未通过 300 MPa 要求的第一档温度; S_a 、 S_b 分别为 T_a 、 T_b 下对应模量; T_c 、 T_d 分别为温度从高到低排列 $m(t)$ 通过与未通过 0.3 要求的第一档温度; m_c 、 m_d 分别为 T_c 、 T_d 下对应模量变化率。

3.2.1 回收沥青 T_{dx}

4 个开裂路段计算得到的 T_{dx} 规律明显,如表 3。 T_{dx} 随开裂程度增大而增大,其中开裂间距为 30~50 m 处当量温度为 $-27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,开裂间距为 5~10 m 处的当量温度仅为 $-23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,其适用温度范围缩小了 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,差距较为明显。这反映了沥青材料低温性能的提升,同时也证明了该指标对回收沥青的良好评价能力。

表 3 回收沥青的当量低温设计温度

Table 3 Equivalent low temperature design temperatures of extracted asphalt

开裂间距/m	5~10	10~20	20~30	30~50
$T_{dx}/^{\circ}\text{C}$	-23.3	-23.6	-26.1	-27.8

3.2.2 新制备沥青 T_{dx}

对 24 类老化沥青进行当量设计温度计算,得到其低温状态的性能规律,如图 7,直观地反映了各类

新拌沥青在 BBR 加载中的表现。由图 7 可知:不论是不同品种沥青的纵向对比,还是同种沥青不同老化状态的横向比较,当量低温设计温度指标均能够切实反映出其低温性能规律。3 类基质沥青当量设计温度较高,SBS 改性沥青及橡胶粉改性沥青 R 当量温度逐次降低,反映了改性剂对沥青低温性能的提升;同时掺加了 SBS 改性沥青和橡胶粉的沥青 SR 低温等级最低,反映了复合改性剂对低温性能提升的叠加效果。6 类沥青在不同老化状态下性能规律明确,即未老化低温状态最佳,其低温设计温度最低,紫外老化和压力老化对低温性能影响较大,其低温设计温度上升明显。其中 R 在压力老化下性能下降最为突出。对 24 种沥青的当量设计温度指标进行统计学分析,认为现有数据与 3.1.2 节提出的“沥青品种、老化类型对性能影响规律”契合度大于 95%,可信度高于传统指标(65%~80%)。

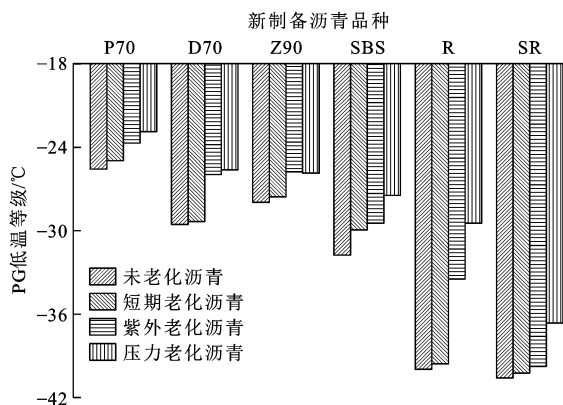


图 7 新制备沥青等效低温等级分布
Fig.7 Equivalent low temperature grade distributions of newly prepared asphalts

压力老化后的 SBS 改性沥青低温设计温度为 $-27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\sim 50\text{ m}$ 间距的回收沥青为 $-27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两者的差异为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,可认为模拟长期老化状态下的新制备沥青与实际路面回收沥青的低温性能相近。该结果佐证了低温等级损失指标数据的准确性,反映出该指标对路面开裂控制的指导意义。

综上,不论是实际路面的回收沥青,还是实验室新拌的老化沥青,当量低温设计温度指标均能展现出良好的低温评价能力。

3.3 温度差异值指标

2011 年,美国机场沥青路面技术计划(AAPTP 06-1)提出了评价沥青断裂性能的全新指标^[25-26]——温度差异值指标 ΔT_c 。起初,该指标被用于分析老化沥青在机场道面中的耐久性,后经 Christensen 等^[27-29]扩大研究后发现:其同样适用于

沥青开裂能力的评价。近十年来,大量研究验证了该指标在沥青开裂性能预测中的优异能力,发现其与延度、DSR 低温测试中的 R 指标等高度相关,与沥青的延展能力最佳相关,能够在低温及块状裂缝的预测中具有良好的表现。目前,ASTM 以及 ASSHTO 规范均已收录该指标,大量研究人员正在开展其深度研究。

ΔT_c 的计算需要依托 BBR 试验,将 T_s 与 T_m 做差,即

$$\Delta T_c = T_s - T_m \quad (4)$$

ΔT_c 的正负反映了该种沥青主要受 $S(t)$ 还是 $m(t)$ 影响,其绝对值的大小表示结合料受蠕变刚度或蠕变速率所控制的程度。Buncher^[25]提出, $\Delta T_c > 0$ 表示结合料受 $S(t)$ 控制, T_s 温度下沥青仍然具有较好的应力释放率,开裂主要是由材料自身的硬化所导致的,反之亦然。

3.3.1 回收沥青 ΔT_c

对于本研究所取路段,回收沥青的 ΔT_c 总体能够反映开裂间距为 $5\sim 10$ 、 $10\sim 20\text{ m}$ 处的材料断裂过程主要受其变形能力不足影响,其他两路段受变形能力及松弛能力影响程度接近。

表 4 回收沥青的 ΔT_c

Table 4 ΔT_c of extracted asphalt

开裂间距/m	5~10	10~20	20~30	30~50
$\Delta T_c / ^{\circ}\text{C}$	3.2	3.4	0.5	-0.8

3.3.2 新制备沥青 ΔT_c

由图 8 易得,24 类沥青的 ΔT_c 均处在 $-10.4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

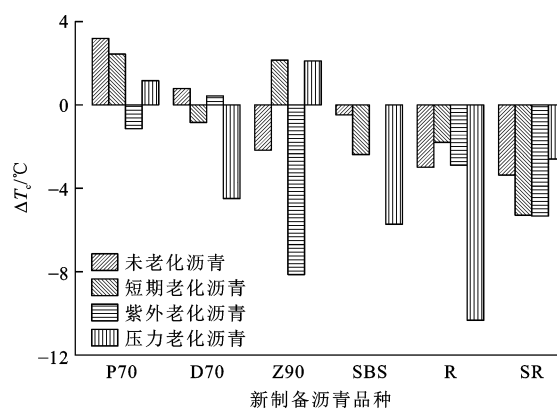


图 8 新制备沥青的 ΔT_c

Fig.8 ΔT_c of newly prepared asphalt

基质沥青的温度差异值绝对值较小,其中大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有 7 类,小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的则有 5 类,总体数据未呈现出某种特定规律,常规老化对该指标的影响趋势不明显。从 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下的沥青个数可以看出,基质沥

青在低温状态下受 $S(t)$ 及 $m(t)$ 影响程度接近, 断裂过程同时受制于材料柔韧性及松弛特性的共同影响。前文已经分析得到, 3 类改性沥青的低温抗裂性能均优于 70[#]、90[#] 沥青, 由 ΔT_c 正负值可看出, 12 类改性沥青均受到 $m(t)$ 影响。因此, 在温度降低时, 其延展性损失较小, 但松弛能力下降快, 材料中的多余应力难以得到有效释放, 从而导致结构产生裂纹直至破坏。

3.4 考虑物理硬化的低温等级损失

相较于 BBR 试验, EBBR 增加了低温等级损失这一依据。低温等级损失是指沥青材料在经历物理硬化过程后低温设计温度的损失, 其数值是指沥青在某种养护状态下当量设计温度与 1 h 养护时间, PG 低温等级温度加 10 °C 养护温度的 BBR 养护条件当量温度的差值。对于某一种沥青, 应当分别计算其 6 种养护状态(3(养护时间)×2(养护温度))的当量设计温度, 择最大值与最小值做差, 即为该种沥青的低温等级损失^[30-31]。若该数值大于 6 °C, 则称该沥青在低温状态下产生等级下降, 若小于 6 °C, 则利用数值大小评判物理硬化对沥青低温抗裂能力的影响^[32]。

3.4.1 回收沥青损失

基于第 2 节设置的加载与计算方式, 得到 4 种开裂间距下沥青胶结料低温等级损失, 见图 9, 图中下限为物理硬化前沥青低温设计温度, 上限为考虑物理硬化后沥青的低温设计温度。

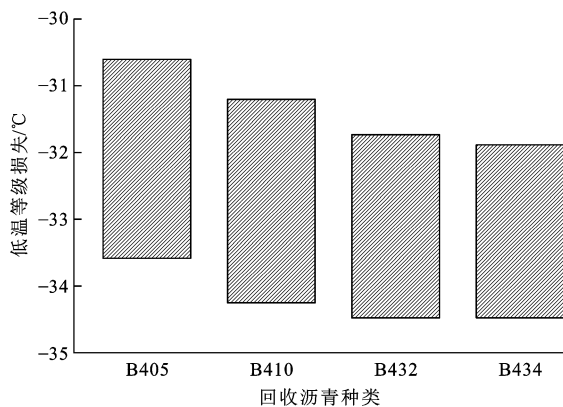


图 9 回收沥青的低温等级损失

Fig. 9 Low temperature grade losses of extracted asphalts

上述 4 类沥青的低温等级损失均为 2 °C~3 °C, 相当于半个 PG 温度区间。由此可以认为, EBBR 试验所设置的物理硬化条件对回收沥青性能产生了显著影响。

按照常规 BBR 试验条件测试得到的 4 种沥青低温设计温度分别为 -33.58 °C、-34.25 °C、-34.48 °C、-34.49 °C, 经历物理老化后分别损失至

-30.62 °C、-31.21 °C、-31.74 °C、-31.90 °C。利用 BBR 试验检测过的回收沥青大都能够满足 PG-34 的性能要求, 若仅按照 BBR 结果进行指导, 则上述沥青可以用于 -34 °C~-28 °C 内的所有地区。显然这是容易产生误判的, 沥青材料在长时间低温状况下产生物理硬化, 使得其不再满足原有设计温度的要求, 本文中的回收沥青物理硬化后便不再满足 PG-34 的要求, 降级为 PG-28。在中国的吉林、黑龙江等地区, 冬季一月份时常伴随长达数日的极低温严寒天气, 因此, 在这些地区, 建议应当考虑低温等级损失带来的影响。

3.4.2 新制备沥青损失

对于 24 类新制备的沥青, 计算了其低温等级损失值, 由图 10 可知: 在经历 72 h 物理硬化后, 各类老化沥青均发生不同程度的性能下降。

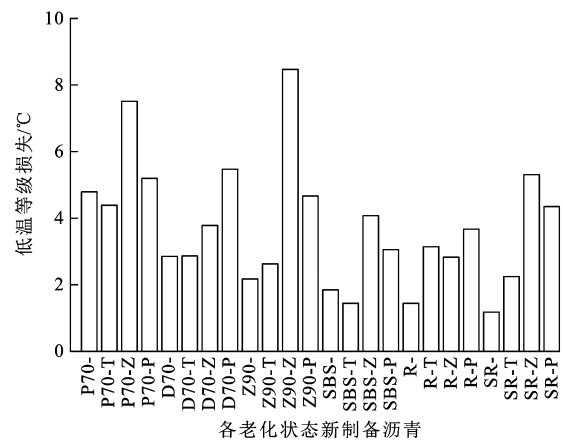


图 10 新制备沥青的低温等级损失

Fig. 10 Low temperature grade losses of newly prepared asphalts

总体而言, 基质沥青的低温等级下降更为明显, SBS 改性沥青次之, 橡胶粉改性沥青的低温损失最小。基质沥青的低温等级损失约为 2.5 °C~8.0 °C, 低温物理硬化对其蠕变性能的影响显著, 3 类改性沥青的低温等级损失大都在 1.5 °C~5.0 °C, 普遍优于基质沥青 20%~40%。

通过低温设计温度的损失, 同样可以看出老化程度对物理硬化过程的影响。对于前 4 类沥青, 其原样沥青与沥青薄膜烘箱老化试验老化沥青的低温等级损失是相似的, 紫外老化与压力老化沥青等级下降明显, 紫外老化的等级损失均为 3 °C~5 °C, 压力老化沥青的等级损失约为 3 °C~8 °C。

4 指标对比与分析

本文分析提出的几种指标均以 $S(t)$ 与 $m(t)$ 为计算依据, 因此, 指标包含了该 2 个传统指标的所有

信息。具体分析其优缺点如下。

4.1 传统 $S(t)$ 及 $m(t)$ 优缺点

现行 AASHTO-T-303-2004 规范下的 BBR 分析以 60 s 时 $S(t) \leq 300$ MPa, 模量变化率 $m(t) \geq 0.3$ 为沥青结合料性能评判依据。这样的判别方式基本符合多指标设计体系的要求,同时具有变异性小,数据易于采集的优势。十余年来,国外学者对其展开了大量研究。

但也要认识到,上述指标取自美国开裂标准(AASHTO 体系),取值依据依托于 PG 分级,实际上仅能够作为判别标准,而非评价方法。换言之,该指标仅能评价出沥青是否能够满足某一温度区间性能要求,对待测沥青模量具体数值并未展开有效分析。同时,PG 分级将沥青低温性能按 6 °C 区间区分,仅利用几个特定温度去评判某种沥青是否满足设计要求是不够准确的。

在数据分析时,往往要将 $S(t)$ 与 $m(t)$ 分别绘图,未考虑该两指标间的有机联系,数据表征直观性也较弱。

从另一个角度考虑:中国对沥青采用针入度分级,照搬 PG 分级来进行沥青胶结料的低温等级分析,难以同工程实际相适应,与中国沥青路面低温设计温度的选取不匹配。

4.2 当量低温设计温度指标

本设计参考 ASTM D7643-10,利用沥青弯曲线 $S(t) = 300$ MPa 或 $m(t) = 0.3$ 时的当量温度进行低温性能的辅助评判。该指标主要有以下四方面特点。

(1) 指标易获取,仅利用线性插值即可得到。

(2) 指标更加综合,不易受到试验误差影响。该指标相当于综合了劲度模量 $S(t)$ 及模量变化率 $m(t)$ 的共同影响,减少了单一因素对试验结果的干扰。

(3) 指标准确性更高。比较本文中传统指标及当量温度指标,发现 $S(t)$ 及 $m(t)$ 指标未反映出“大连 70# 沥青原样与短期老化沥青”的关系、“橡胶粉改性粉改性沥青紫外和压力老化沥青”等多组沥青间低温性能关系,但 T_{dx} 则如实反映出了这些规律。由此,后者对沥青材料低温性能评价的可靠度便由 70% 左右提升至 95%。

(4) 使用当量设计温度更加直观。不同于 PG 分级,当量设计温度指标可以直接对比同一 PG 区间下沥青小梁的低温性能,也能够对比不同 PG 区间下的材料差异。

该指标的不足之处在于其试验量略大于传统

指标,指标采集时需要同时进行 2 个温度下的 BBR 加载。

4.3 ΔT_c 指标

近十年来,越来越多路面研究者的目光聚集在 ΔT_c 这个全新的指标上。现有文献表明,其与沥青材料低温延展性相关度高,对沥青路面块状开裂、低温开裂能力具有良好的预测效果。

从本文的数据分析,仅能看出温度差异值指标在基质与改性沥青中存在明显差异,基质沥青受到低温延展性和松弛性能的影响基本持平,3 类改性沥青低温开裂性能主要受材料松弛能力影响。但该种规律对实际工程中判断沥青材料质量并无较大帮助。

总体来说, ΔT_c 能够反映结合料开裂性能,是一个十分优异的指标,但目前针对其开展的研究仍有待深入,因此,现阶段还不具备推荐该指标作为结合料低温性能评判依据的条件。

4.4 等级损失指标优缺点

低温等级损失指标考虑了物理硬化对沥青胶结料的影响。从结果来看,考虑了低温等级损失的沥青低温性能与路面实际低温开裂关系的可靠度高,其评价效果优于 BBR 试验的劲度模量及模量变化值评价。本次试验结果可以反映出:考虑了物理硬化的 EBBR 试验对沥青质量的要求更高,某些沥青在 PG 设计温度下能够满足 BBR 试验的设计要求,但难以通过 EBBR 试验,因此 EBBR 试验是一种更有效的方法,其对沥青路面低温开裂控制效果更好。

但 EBBR 试验存在试验周期长,试验量大的问题,试验方法仍需进一步精简。由上可以看出,传统指标对沥青低温性能评判的准确性不高,综合性较弱。 ΔT_c 指标目前暂未具备推荐使用的条件。当量低温设计温度指标以 $S(t)$ 与 $m(t)$ 为基础,继承了传统指标的优势,又作为 ΔT_c 等指标计算的必要步骤,能够直观、高效地反映了不同沥青低温状态下抵抗变形及应力松弛的能力,减少了单一因素造成的误差,具有良好的应用前景。

5 结 语

(1) 分析得出 $S(t)$ 、 $m(t)$ 等传统指标对改性沥青低温性能的区别效果及评价能力。整理提出当量低温设计温度指标及其计算方式,解决了传统指标直观性差、置信度不高等问题。认为当量低温设计温度指标适用性更强,具备推广使用的条件。

(2)新制备的 SBS 改性沥青与工程回收沥青低温性能具有良好的对应关系,研究得到的结论既适用于实验室研究,也适用于工程指导应用。

(3)分析得到老化方式、沥青品种对结合料低温性能影响,认为老化沥青低温性能由大到小排序应为:未老化沥青、短期老化沥青、240 h 紫外老化沥青、压力老化沥青。试验选用的基质沥青低温性能劣于 SBS 改性沥青、橡胶粉改性沥青。

(4)定量分析出物理硬化对沥青结合料低温性能的影响程度。认为该变化同样能够在不同取芯路段沥青、不同种类沥青、不同老化程度沥青中得到差异化表达。回收沥青的等级损失约为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,新制备沥青则为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(5)BBR 试验作为目前国内首推的沥青胶结料低温性能测试试验,在许多方面拥有无可比拟的优势。但现阶段 PG 分级体系与针入度体系的巨大差异,仍然导致对该试验的了解尚不充分。后续将开展针对该试验多指标体系的深入研究,以期大幅提高对沥青低温开裂水平的控制。

参 考 文 献 :

References :

[1] 权戈冰. 沥青混合料低温抗裂性能评价方法研究[J]. 绿色环保建材, 2017(8): 1-2.
QUAN Ge-bing. Research on evaluation method of asphalt mixture's low temperature anti-cracking performance[J]. Green Building Materials, 2017(8): 1-2. (in Chinese)

[2] 汲平, 徐朝. 沥青混合料低温抗裂性能评价方法的验证研究[J]. 石油沥青, 2017, 31(4): 50-54.
JI Ping, XU Chao. Validation of evaluation methods for low-temperature anti-cracking performance of asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2017, 31(4): 50-54. (in Chinese)

[3] 刘贵应, 戴俊巍, 刘勇, 等. 集料均匀性对沥青混合料低温劈裂强度影响数值研究[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(11): 12-16.
LIU Gui-ying, DAI Jun-wei, LIU Yong, et al. Numerical study on the influence of aggregate uniformity on the low-temperature splitting strength of asphalt mixture[J]. Low Temperature Construction Technology, 2018, 40(11): 12-16. (in Chinese)

[4] 杨光, 王旭东, 张晨晨. 一种基于实时温度-应变采集的沥青混合料温缩特性测试方法[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 259-262.
YANG Guang, WANG Xu-dong, ZHANG Chen-chen. A test method for temperature shrinkage characteristics of asphalt mixture based on real-time temperature-strain acquisition[J]. China and Foreign Highway, 2015, 35(1): 259-262. (in Chinese)

[5] MATASTEAN M, VEALSQUEZ R, FALCHETTO, et al. Development of a simple test to determine the low temperature creep compliance of asphalt mixtures[R].

Washington DC: TRB, 2009.

[6] 马宏岩. AASHTO 沥青路面低温开裂预估模型的验证与改进[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
MA Hong-yan. Verification and improvement of AASHTO asphalt pavement low temperature cracking prediction model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

[7] 董雨明. 硬质沥青及其混合料流变特性与低温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
DONG Yu-ming. Research on rheological properties and low temperature performance of hard asphalt and its mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[8] ZHAO M O, HESP S A M. Performance grading of the Lamont, Alberta C-SHRP pavement trial binders[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(3): 199-211.

[9] 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 De-cheng, CUI Shi-tong, YI Jun-yan, et al. Research on evaluation index of low temperature performance of asphalt mixture based on SCB test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 50-57. (in Chinese)

[10] 袁迎捷. 基于 Superpave 的沥青胶浆流变特性与集配优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
YUAN Ying-jie. Research on rheological properties and optimization of asphalt mortar based on Superpave system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)

[11] 张兴友, 胡光艳, 谭忆秋. 硅藻土改性沥青混合料低温抗裂性能研究[J]. 公路交通科技, 2006(4): 11-13.
ZHANG Xing-you, HU Guang-yan, TAN Yi-qiu. Research on low temperature anti-cracking performance of diatomite modified asphalt mixture[J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2006(4): 11-13. (in Chinese)

[12] 冯中良, 曹荣吉, 贾渝, 等. 采用特征温度指标评价沥青胶结料低温性能的研究[J]. 中外公路, 2009, 29(1): 245-247.
FENG Zhong-liang, CAO Rong-ji, JIA Yu, et al. Research on evaluation the low-temperature performance of asphalt binder using characteristic temperature index[J]. China and Foreign Highway, 2009, 29(1): 245-247. (in Chinese)

[13] 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 Yi-qiu, FU Yong-kang, 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)

[14] FROMM H J. Study of temperature cracking of bituminous pavements[J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 1972, 36(5): 255-258.

[15] READSHOW E E. Asphalt specifications in British Columbia for low temperature performance[J]. Asphalt Paving Technologists, 1980, 43(15): 562-581.

[16] HEUKELOM W. An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties[J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 1973, 42(3):

- 252-260.
- [17] KANDHAL P S. Past, present, and future of asphalt binder rheological parameters[C]//TRB. The 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2019: 15-21.
- [18] ANDERSON R M, KING G N, HANSON D I, et al. Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking[J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 2011, 80: 40-45.
- [19] 聂忆华,孙世恒,丁海波,等. 沥青胶结料低温物理硬化及结晶动力学分析[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 683-688.
NIE Yi-hua, SUN Shi-heng, DING Hai-bo, et al. Low-temperature physical hardening and crystallization kinetic analysis of asphalt binder[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 683-688. (in Chinese)
- [20] HESP S A M, LLIUTA S. Reversible aging in asphalt binders[J]. Energy and Fuels, 2007, 21(2): 1112-1121.
- [21] ALAVI M Z, HE Y, JONES D. Investigation of the effect of reclaimed asphalt pavement and reclaimed asphalt shingles on the performance properties of asphalt binders; interim report[R]. Davis: University of California, 2017.
- [22] 布海玲,刘涛,杨三强. 新疆地区常用沥青短期老化低温性能的评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 50-53.
BU Hai-ling, LIU Tao, YANG San-qiang. Evaluation of short-term aging and low temperature performance of common asphalt in Xinjiang[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2015, 34(2): 50-53. (in Chinese)
- [23] 刘明鹏. 物理硬化对沥青材料低温性能影响机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LIU Ming-peng. Research on the mechanism of physical hardening on the low-temperature performance of asphalt materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [24] 聂忆华,胡静轩. 加拿大改进的沥青弯曲梁流变试验(EBBR)介绍[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 242-247.
NIE Yi-hua, HU Jing-xuan. Introduction to Canada's improved asphalt bending beam rheological test (EBBR)[J]. China and Foreign Highway, 2017, 37(5): 242-247. (in Chinese)
- [25] BUNCHE M. Use of the Delta T_c parameter to characterize asphalt binder behavior[R]. New York: Asphalt Institute Technical Advisory Committee, 2019.
- [26] KLUTZ R Q. Prepared discussion on relationships between mixture fatigue performance and asphalt binder properties[J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 2019, 88: 108-112.
- [27] CHRISTENSEN D W, TRAN N. Relationships between mixture fatigue performance and asphalt binder properties[C]// Association of Asphalt Paving Technology. Asphalt Paving Technology 2019. Washington DC: Association of Asphalt Paving Technology, 2019: 431-473.
- [28] LI Xin-jun, GIBSON X N, ANDRIESCU A, et al. Performance evaluation of REOB-modified asphalt binders and mixtures[J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 2016, 85: 92-95.
- [29] LIU Y, SU P, LI M, et al. Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(5): 573-599.
- [30] KANABAR A. Physical and chemical aging behavior of asphalt cements from two northern Ontario pavement[D]. Kingston: Queen's University, 2010.
- [31] ILIUTA S, ANDRICSCU A, HESP S A M. Improved approach to low temperature and fatigue fracture performance grading of asphalt cements[C]//CTAA. 2004 Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association. Kelowna: CTAA, 2004: 589-594.
- [32] HESP S A M, ILIUTA S. Reversible ageing in asphalt at low temperatures[J]. Energy and Fuels, 2007, 21: 1112-1121.