

基于临界裂纹尖端张开位移的改性沥青 低温抗开裂性能评价

陈长坤¹, 杨富社², 王建军¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了评价改性沥青的低温抗开裂性能,应用带有数据采集功能的测力延度仪及自制硅橡胶模具,对 7 种不同改性沥青进行了预制裂纹紧凑拉伸试验,测试低温脆性条件下沥青的断裂行为;以裂纹尖端张开位移作为改性沥青低温抗开裂性能的评价指标,并通过室内沥青混合料约束试件温度应力试验(TSRST)研究了各断裂力学参数与沥青混合料冻断温度的相关性。研究表明:沥青紧凑试验可用于对沥青的低温性能进行更严格的区分;采用的临界裂纹尖端开口位移指标反映了沥青材料本身低温脆性状态下的抗裂纹扩展能力,适合作为沥青低温抗开裂性能的评价指标;室内沥青混合料冻断试验结果也验证了所提出方法及指标的合理性。

关键词:道路工程;改性沥青;低温抗开裂性能;断裂行为;裂纹尖端张开位移;抗裂纹扩展

中图分类号:U411

文献标志码:A

Evaluation on low temperature anti-cracking performance of modified asphalt based on critical crack tip opening displacement

CHEN Chang-kun¹, YANG Fu-she², WANG Jian-jun¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To evaluate the low temperature anti-cracking performance of modified asphalt, force ductility testing machine with data acquisition system and self-made silicone rubber mold were used to carry out the precracked compact tensile test on seven different types of modified asphalts so as to test the fracture behavior of asphalt under low temperature conditions, and crack tip opening displacement was considered as the index of measuring the low temperature anti-cracking performance of modified asphalt to examine the relationship between the fracture mechanics parameters and the freezing temperature of asphalt mixture through indoor TSRST test. The results show that the precracked compact tensile test can discriminate low temperature of asphalt more exactly; the proposed index can reflect the asphalt's resistance to crack propagation under brittle low-temperature conditions, which is more suitable to be the evaluation index of low temperature anti-cracking performance of asphalt; the results of indoor asphalt mixture TSRST test also proves the rationality of the proposed method and index. 3 tabs, 6 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; modified asphalt; low temperature anti-cracking performance; frac-

ture behavior; critical crack tip opening displacement; resistance to crack propagation

0 引言

北方气候条件下的沥青路面常常在低温和荷载组合条件下发生破坏。中国新疆和吉林地区冬季气温可能极低,引起沥青路面面层较大的拉伸应力。当该应力超过材料的强度,可能导致路面纵向开裂。采用合理的测试方法对沥青的低温性能进行评价以排除质量低劣的沥青,可以减少由于沥青材料现场低温性能较差而引起的路面开裂问题。

目前中国在沥青低温评价方面通常采用脆点作为评价指标,但沥青脆点为一个经验性的指标,很难与路面实际断裂情况建立联系,且相关研究也表明其并不适合改性沥青的低温性能评价^[1-7]。国外常用的沥青低温分级方法为使用弯曲梁流变仪(BBR)与直接拉伸试验(DTT)相结合的测试方法,两者试验都是在美国公路战略研究计划(SHRP)期间开发出来的。国内外的研究者通过观察室内和现场沥青胶结料性能已经注意到具有相同低温等级的沥青结合料在现场服役期间表现出的抗低温开裂破坏能力可能有极大的不同,特别是对改性沥青而言,SHRP开发的沥青试验并不能准确预测其低温性能。产生这种现象的原因有多种,但其中一个可能原因是目前 BBR 和 DTT 分级确定选择温度下的沥青蠕变劲度或破坏应变,而忽略了沥青结合料脆性断裂特性的变化,因此需要一个方便的、精确的及具有较高再现性的结合料评价试验,从而能够量化这些脆性状态特性。沥青低温性能测试方面,美国威斯康星大学麦迪逊分校 Tabatabaee 等过去 10 年开发了基于断裂力学的单边缺口梁(SEN)试验^[8-9];此外法国的 Chailleux 等^[10-11]、加拿大皇后大学 Zhao 等^[12-13]、美国明尼苏达大学 Marasteanu 等^[14-15]均提出了基于预制缺口三点弯曲断裂力学测试沥青低温性能的优越性,这些断裂试验结果表明基质沥青和不同改性沥青之间的断裂性能存在较大的差异,然而试件自重对断裂性能的影响较为显著,且试验采用的加载设备较为复杂,难以大面积推广。美国俄亥俄大学的 Kim 教授提出采用“沥青结合料开裂设备(ABCD)”评价沥青的低温性能^[16],然而由于设备的特殊性,目前为止仅有 Kim 教授对此进行了深入研究,其他研究机构研究较少,因此对于评价的有效性还有待进一步确认。此外,中国学者曹丽萍等提出了采用玻璃化转变温度 T_g 作为评价沥青的低温

性能^[17];Tan 等近期提出基于动态流变试验得出的动态粘弹指数(D_{vi})作为沥青高温、低温性能的评价指标^[18],这些参数的提出具有一定的合理性,然而与现场性能的相关性有待进一步研究。

本文为了最大程度地减小预制裂纹三点弯曲试验附加弯矩的作用,根据现有延度设备合理的改装及模具设计,开发了沥青结合料的紧凑拉伸试验,选取合适的试验参数以最大限度地降低试验方法引起的误差,以期对沥青结合料的低温断裂性能进行更加合理的测试,便于工地现场对沥青低温性能的实时检测。此外,通过提供除单边缺口梁以外的沥青低温断裂性能测试方法,为提出基于断裂性能的沥青低温性能分级方法提供参考。

1 临界裂纹尖端张开位移

一般来说,沥青路面层具有自身缺陷(存在施工缝),而且由于沥青和矿物集料温度收缩系数不同会导致沥青-集料界面微裂缝发展。低温下沥青混合料沥青薄膜内受到拉伸应力的作用,微裂缝的存在引起沥青混合料内不连续处附近的局部应力集中,过大的应力导致沥青路面早期破坏。目前国内外沥青规范并没有考虑材料由于这些局部应力集中而导致破坏的受力模式,实际现场沥青混合料性能通常与设计所期待的性能具有显著的差异,因此需要一个合理的测试方法,通过该方法可以合理、有效地评估各种沥青抵抗局部引起过早开裂的能力。大量文献已经表明,断裂力学原理可以有效地用于控制沥青材料的低温断裂^[10-16]。

20 世纪 60 年中期,Wells 认为理想弹塑性材料的裂纹尖端经过塑性变形达到屈服后,裂纹尖端前方韧带部位的应力值不会再继续扩大,因此不适宜再应用应力或直接与应力有关的量来描述裂纹的断裂行为。同时 Well 提出了临界裂纹尖端张开位移(CTOD)的概念,指出当裂纹尖端附近的某个塑性应变超过 CTOD 时,裂纹开始扩展,适宜采用一个与应变有关的参数来表征弹塑性材料抗裂纹扩展能力^[19-20]。CTOD 的物理含义为裂纹尖端处受张开型荷载后两表面所张开的相对距离(如下页图 1 所示),用 δ 表示, δ 大小反映了裂纹尖端材料抗开裂的能力, δ 越大抗开裂性能越好,即韧性越好。

Chattopadhyay 等也曾指出,对于高分子材料而言,CTOD 是评价材料抗裂性能潜在较好的指标,但

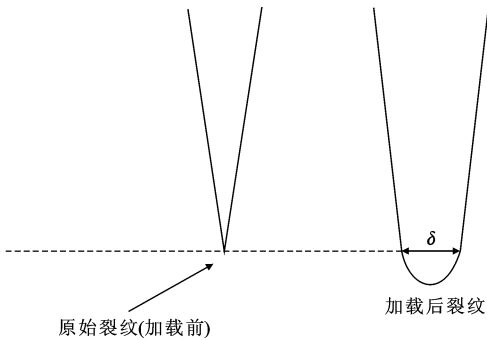


图 1 裂纹尖端张开位移示意

Fig. 1 Crack tip opening displacement diagram

现有的预制裂纹三点弯曲试验方法只能通过间接的计算得出CTOD,由于几何形状的缺陷无法直接测量^[21]。本文旨在通过合理设计试件的几何形状以达

到直接测试沥青材料临界裂纹张开位移,通过临界裂纹张开位移评价改性沥青低温抗裂性能。

2 材料和试验方法

2.1 沥青

选用市面上可以得到的常用于寒冷地区 7 种稳定的聚合物改性沥青进行了常规性能指标试验,其中 A、B 为 SB 类(苯乙烯-丁二烯二嵌段共聚物)改性沥青;C、D 为线型 SBS 类(线型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物)改性沥青;E、F 为星型 SBS 类(星型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物)改性沥青;G 为 SBR 类(苯乙烯-丁二烯橡胶)改性沥青,改性剂掺量均为 4%,试验结果如表 1 所示。

表 1 7 种改性沥青的基本特性

Tab. 1 Basic characteristic of the seven kinds of modified asphalt

沥青类别		A	B	C	D	E	F	G
针入度/ 0.1 mm	5 ℃	8.3	9.6	10.6	12.5	8.2	10.7	11.2
	15 ℃	22.4	25.6	26.2	33.2	22.4	31.6	31.4
	25 ℃	60.7	61.9	54.3	79.3	51.2	81.7	80.1
软化点/℃		66.2	72.3	74.8	71.2	70.6	57.8	68.2
5 ℃延度/cm		62.5	56.3	46.5	56.8	66.5	95.3	62.7
针入度指数		−0.7	0.0	0.7	−0.2	0.2	−0.1	−0.3
当量软化点 $T_{800}/℃$		50.5	56.8	54.6	49.5	52.4	57.5	49.5
当量脆点 $T_{1.2}/℃$		−14.3	−17.7	−14.2	−20.2	−17.6	−22.1	−20.4

2.2 沥青混合料

使用 9.5 mm 的 Superpave 混合料进行 TSRST 试验。对每种改性沥青结合料,设计转数为 100 转,按照 Superpave 混合料设计方法进行混合料的配比

设计。每种沥青混合料的体积参数见表 2。注意所有 7 种沥青混合料有相同的集料和相同的级配,仅有沥青的不同,级配选用中国规范中 AC-10 级配范围的中值。

表 2 本文使用的 7 种改性沥青混合料的体积参数

Tab. 2 Volumetric parameters information of the seven asphalt mixes used in this study

沥青类别	A	B	C	D	E	F	G
沥青用量/%	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
空隙率/%	3.9	4.3	4.1	3.5	4.0	4.1	3.9
矿料间隙率(VMA)/%	15.5	15.9	16.2	15.1	18.5	15.7	15.6
粉胶比	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
拌和温度/℃	164.3	162.9	170.0	168.8	174.1	175.7	165.3
压实温度/℃	154.1	152.6	159.5	158.3	163.7	165.8	155.9

2.3 约束试件温度应力试验(TSRST)

采用 TSRST 试验确定改性沥青混合料的低温性能。采用 150 mm×75 mm 的圆柱体试件取代标准尺寸,其余的按照《美国国家公路与运输协会标准》(AASHTO TP10—93)进行试验。试验中以 0.58 ℃的间隔连续记录温度数据用于分析。下页图 2 说明了试验测得的 3 个参数。断裂强度和冻断

温度为系统在试样破坏前记录的最终应力和温度。转变温度为材料从粘弹性变为弹性的温度。在其温度下,温度引起的应力不再松弛,且拉应力与温度呈线性关系。同时确定了转变温度后应力-温度曲线的斜率,曲线的二阶导数从 0 改变的点用于定义转变温度。根据相关研究,本文选择冻断温度作为沥青混合料的低温评价指标。

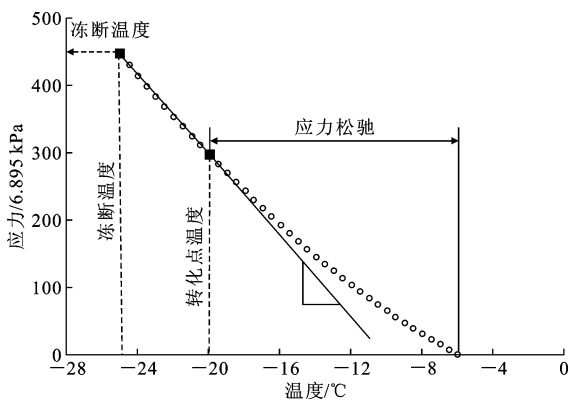


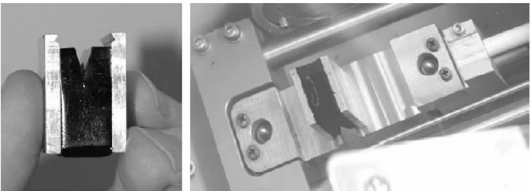
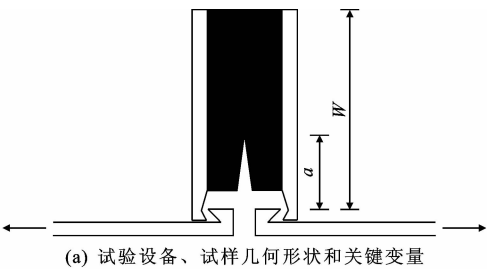
图 2 典型应力随温度的变化曲线

Fig. 2 Temperature curve with typical stress versus

2.4 沥青紧凑拉伸试验

拉伸试验设备为常规配备有数据采集系统的延度仪,数据采集系统可以实时地获得对试样施加的拉力大小,选取的仪器可施加的拉力极限值一般为 500 N 即可满足试验条件,因为试验中的破坏荷载大多低于 100 N,水浴温度能够恒定在试验温度 0.1 ℃ 的范围内,参考 Bahia 等的 SENB 试验,测试温度选为 -12 ℃^[9]。

试验设备的原理图和试样的几何形状如图 3 所示。自制 2 个带有 V 形端钳制刀口的平行板,将平行板套在延度仪槽端固定板的金属柱上以对沥青试样施加力。该测试方法与《金属材料水平变形断裂强度的标准试验方法》(ASTM E1304-97)描述的试验过程类似。



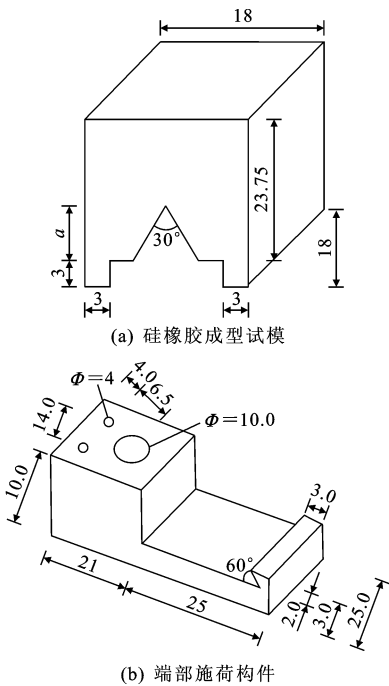
注:a为缺口深度;W为试样高度。

图 3 试验设备原理图,试样几何形状和关键变量

Fig. 3 Principle diagram of test equipment, specimen geometry and the key variables

通过图 4(a)所示的硅橡胶模具成型所需形状的沥青,形成尖锐的试样。每个试验中拉伸速率恒

定在 0.01 mm/s。试样测试前在测试温度下恒温 2 h。记录荷载与位移的关系曲线用于获得峰值荷载和破坏能(曲线下方的面积)。



单位:mm

图 4 试模及端部构件的具体尺寸

Fig. 4 Test and the end size of components

峰值荷载根据以下方程计算断裂韧度 K_{Ic}

$$K_{Ic} = \frac{P_f}{BW^{1/2}} f(x) \tag{1}$$

$$f(x) = (2+x)(0.866+4.64x-13.32x^2+14.72x^3-5.6x^4)/(1-x)^{3/2} \tag{2}$$

式中: P_f 为破坏荷载(N); B 为试件宽度(m)。

从拉伸荷载与位移曲线下的面积计算一般断裂能 G_f ,通过记录断裂时的位移获得 CTOD。

3 结果和讨论

3.1 试验再现性

试验是为了规范程序而用,因此试验方法需要具有良好的再现性。下页图 5 显示了 2 种沥青荷载与位移关系曲线(为了观察 4 组平行的结果再现性,对曲线进行了平移)。从图 5 可以看出,不同组合下的峰值荷载均具有很高的再现性,2 种结合料之间具有很大的差别。因此,通过采用所设计的试模成型的紧凑拉伸试验,能够较为准确地区分出不同沥青之间低温断裂性能之间的差异。但也应当注意到并不是所有的试样均具有很好的再现性,因此需要进一步对试验方法改进以降低试验的变异性。此外

通过计算合并样本标准差也可以看出所设计的试验具有较高的再现性,不同测试的沥青结合料种类对断裂韧度计算得到的标准差范围在 5% 到 10%,而对断裂能结果为 8% 到 11%,而 CTOD 结果为 4% 到 7%。

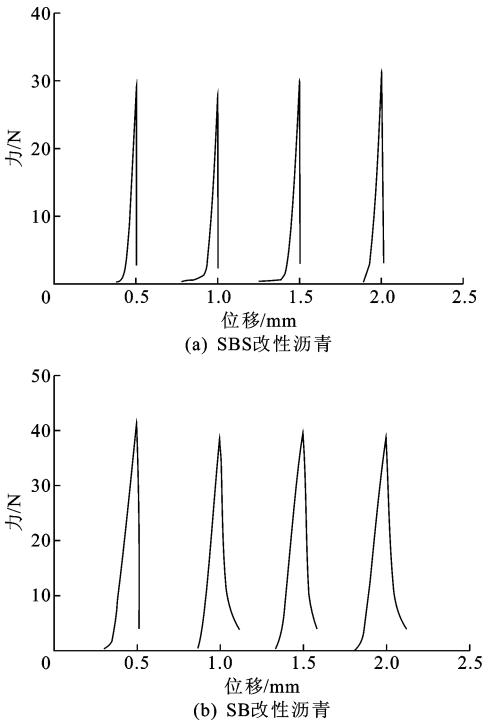


图 5 2 种代表性的紧凑拉伸试验中荷载-位移关系曲线
Fig. 5 Two kinds of typical load-displacement curve in the compact tensile test

3.2 沥青与沥青混合料低温试验结果

7 种改性沥青的断裂韧度 K_{IC} 、断裂能 G_f 、临界裂纹尖端张开位移(CTOD)及对应沥青混合料的冻断温度如表 3 所示。

由表 3 中可知,从沥青混合料冻断温度来看,7 种改性沥青混合料低温性能排序为: $G>F>E>D>C>B>A$;根据断裂韧度对改性沥青低温性能排序的结果为: $G>F>E>B>A>D>C$ 。从结果上来看,沥青的断裂韧度与沥青混合料冻断结果具有较为明显的差异,即 SBS(苯乙烯-丁二烯三嵌段共聚物)类改性沥青的低温性能优于 SB 类(苯乙烯-丁二烯二嵌段共聚物),而通过断裂韧度指标无法体现出这种区别。采用断裂能参数对改性沥青低温性能排序的结果为: $G>F\approx E>C>D>B\approx A$,总体而言与沥青混合料低温性能排序一致,但对不同厂家生产的同类沥青具有较差的区分度,甚至可能得到与对应沥青混合料低温性能相反的排序结果;此外对所有研究的改性沥青最大断裂能与最小断裂能之差较小,区分度较不明显。采用临界裂纹尖端张开位移对改性沥青的低温性能排序的结果为: $G>F>E>D>C>B>A$,此结果与沥青混合料低温性能排序相同,且对所研究的改性沥青最大的临界裂纹尖端张开位移约为最小裂纹尖端张开位移的 3 倍,因此对不同沥青的低温性能具有很强的区分度;此外采用临界裂纹尖端张开位移可以区别出不同厂家生产同种材料的改性沥青之间的差异。

表 3 7 种改性沥青断裂参数及对应混合料的冻断温度

Tab. 3 Seven kinds of fracture parameters and corresponding modified asphalt mixture of freezing temperature

沥青类别	A	B	C	D	E	F	G
断裂韧度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2}$)	175.1	180.8	170.3	165.9	191.3	192.4	201.5
断裂能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)	62.0	62.9	82.9	72.8	93.9	94.5	103.4
临界裂纹尖端张开位移/mm	6.3	7.1	10.4	11.5	13.2	14.8	18.2
冻断温度/ $^{\circ}\text{C}$	-12.0	-13.6	-23.1	-25.0	-40.4	-46.2	-48.0

沥青结合料断裂参数(断裂韧度、断裂能和临界裂纹尖端张开位移)与对应沥青混合料冻断温度之间的相关性如下页图 6 所示。从图 6 可以看出,3 个断裂力学指标用于聚合物改性沥青低温性能评估均有一定的可行性,但临界裂纹尖端张开位移与沥青混合料的冻断温度具有最佳的相关性,判定系数 R^2 高达 0.924 8。

4 结 语

(1)通过自制模具尺寸及夹具配合现有延度仪设备所开发的紧凑拉伸试验能较好获得聚合物改性沥青的断裂力学参数,即断裂韧度 K_{IC} 、断裂能

G_f 及临界裂纹尖端张开位移 CTOD,合并标准差范围分别为 5%~10%、8%~11% 及 4%~7%,试验结果具有良好的再现性,CTOD 具有最小的波动范围。

(2)对于低温脆性状态下的沥青材料,在裂纹尖端经历塑性变形达到屈服后,裂纹尖端前方韧带部位应力值不再增加,因此不适合再用应力或应力相关量来描述裂纹的断裂行为。裂纹尖端张开位移是裂纹尖端塑性变形的一个度量,当裂纹开始扩展时,裂纹尖端张开位移 δ 达到一个临界值 CTOD,因而 CTOD 可以作为低温沥青材料的抗低温断裂性能的度量。

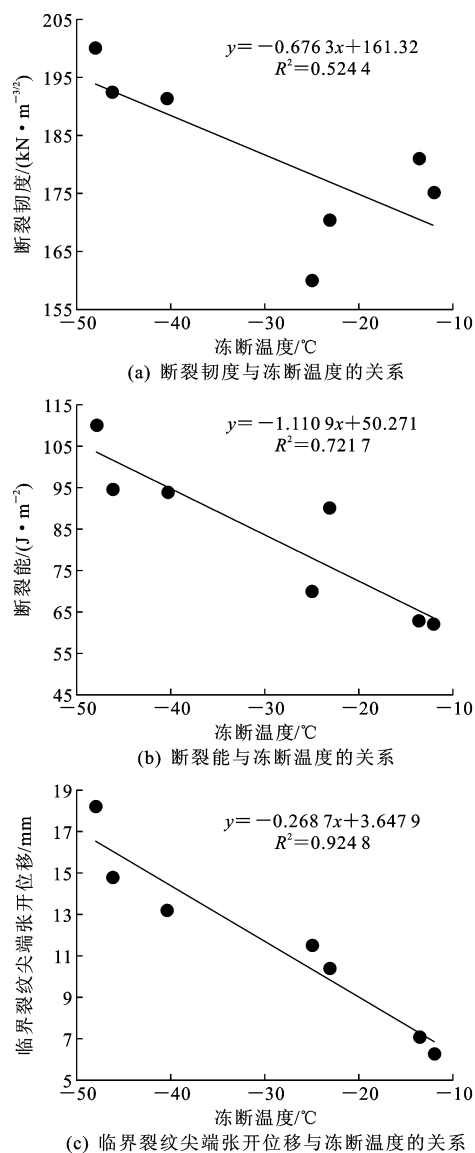


图6 改性沥青断裂参数与沥青混合料冻断温度的关系

Fig. 6 Fracture parameters and the asphalt mixture modified asphalt cold break the relationship between the temperature

(3) 临界裂纹尖端张开位移 CTOD 与断裂韧度 K_{Ic} 和断裂能 G_f 相比能够更加准确地区分出不同改性类别、不同生产工艺制得的改性沥青低温断裂性能之间的差异,且具有很强的区分度。

(4) 通过设计的紧凑拉伸试验可以很容易直接测得裂纹尖端开口位移 CTOD,且相关沥青混合料的结果表明,聚合物改性沥青的临界裂纹张开位移 CTOD 与对应的沥青混合料冻断温度具有很高的相关性,相关系数 R^2 高达 0.924 8。

(5) 下一步将研究更多的改性沥青,以验证 CTOD 区分聚合物改性沥青低温性能差异的有效性。

(6) 虽然室内沥青材料表明 CTOD 评价沥青低温性能方面具有足够的优势,然而需更多现场的数

据和实际铺筑的路面以验证方法的正确性。

参考文献:

References:

- [1] 于天来,唐涛,吴思刚.改性沥青伸缩缝结合料与混合料低温性能研究[J].中国公路学报,2005,18(2): 18-23.
YU Tian-lai, TANG Tao, WU Si-gang. Research on low temperature performance of modified asphalt and mixture of bridge expansion joints[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 18-23. (in Chinese)
- [2] LU X H, ISACSSON U. Effect of binder rheology on the low-temperature cracking of asphalt mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2001, 2(1): 29-47.
- [3] ZBOROWSKI A, KALOUSH K E. A fracture work approach to model the thermal cracking performance of asphalt rubber mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, 12(2): 5-12.
- [4] WEN Hai-fang. Use of fracture work density obtained from indirect tensile testing for the mix design and development of a fatigue model[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2012, 40(4): 1-8.
- [5] WAGONER M P, BUTTLAR W G, PAULINO G H, et al. Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1929(1): 183-192.
- [6] LI X J, MARASTEANU M O, KVASNAK A, et al. Factors study in low-temperature fracture resistance of asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(2): 145-152.
- [7] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, LYTTON R L. Neural networks modeling of stress growth in asphalt overlays due to load and thermal effects during reflection cracking[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 23(3): 221-229.
- [8] TABATABAEE H A, VELASQUEZ R, BAHIA H U. Predicting low temperature physical hardening in asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34(4): 162-169.
- [9] VELASQUEZ R, TABATABAEE H, BAHIA H. Low temperature cracking characterization of asphalt binders by means of the single-edge notch bending (SENB) test[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2011, 80(4): 583-614.