文章编号: 1002-0268 (2011) 05-0017-06

沥青混合料低温冻断试验设备的研发及试验验证

谭忆秋[1], 张 磊[1], 薛忠军[2]
(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 北京市交通委员会路政局, 北京 100053)

摘要: 通过模拟沥青路面温度裂缝产生原理, 自行研发了沥青混合料低温冻断试验设备, 并进行了试验验证。通过应用位移实时补偿系统和耐低温高精度传感器, 开发试件对心装置, 采用不同的试件安放方式, 这些措施使得该设备具有试验精度高、试验结果准确等特点。该设备可以完成沥青混合料温度应力试验、应力松弛试验、直接拉伸试验和收缩系数试验。利用该设备评价了几种沥青混合料的低温抗裂性能, 试验结果表明, 该设备试验复现性好、可以有效地区分不同沥青混合料的低温性能。由该设备得到的冻断温度和转化点温度可作为评价沥青混合料低温性能的指标。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 低温性能; 评价方法; 冻断温度
中图分类号: U416.217 文献标识码: A

Research and Development of Asphalt Mixture Freezing Test Equipment and Experimental Verification

TAN Yiqiu[1], ZHANG Lei[1], XUE Zhongjun[2]
(1. Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China;
2. Highway Administration Bureau of Beijing Transportation Committee, Beijing 100053, China)

Abstract: Self-developed freezing test equipment was developed and experimental verified based on the theory of simulated asphalt pavement cracking at low temperature. With displacement real-time compensation system, low-temperature hypersensitive displacement sensor, new developed centering device, and specific part mounting methods, this equipment provides high precision and great accuracy. This equipment is capable of testing temperature stress of asphalt mixture, experimenting on stress relaxation, stretching and testing constriction factor. Anti-cracking performance of several asphalt mixtures at low-temperature was evaluated by this equipment. The test result shows that this equipment has good reproducibility and capability of differentiating low-temperature performances of different asphalt mixtures effectively. The cracking temperature and inversion point from the result could be used to evaluate low-temperature performance of asphalt mixtures.

Key words: road engineering; asphalt mixture; low-temperature performance; evaluation method; cracking temperature

0 引言

沥青路面在温度骤降或温差较大地区, 会由于温度应力的作用而产生裂缝, 低温缩裂是世界各国普遍存在的问题, 它的产生严重危害道路的使用寿命和质量, 是沥青路面的主要破坏形式之一[1-3]。

收稿日期: 2010-03-08
基金项目: 国家自然科学基金项目 (50808058); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-06-0340)
作者简介: 谭忆秋 (1968-), 女, 吉林德惠人, 教授, 博士生导师, 博士后, 从事路面材料研究. (yiqiutan@163.com)

因此，如何准确评价出沥青混合料的低温性能是目前亟待解决的问题。美国公路研究战略计划（SHRP）通过对现场条件的模拟性、试验结果在力学模型中的应用性、老化和潮湿状态下的适用性、易操作性以及仪器成本等指标的比选，认为约束试件温度应力试验（冻断试验）和热膨胀系数试验能正确地模拟现场状况[4-5]。但沥青混合料低温抗裂性能受到材料多方面性能的影响，如材料的强度特性和变形特性等[6-7]，收缩能力只是影响因素之一。因此，用收缩系数并不能全面反映出沥青混合料的低温抗裂性能。而冻断试验能全面地反映沥青混合料的强度特性、变形特性以及松弛特性。并且冻断试验能够直接测出试件低温开裂时的温度和开裂时的温度应力，由测得的温度－应力曲线可以直接得到沥青混合料转化点温度，这些指标直观、容易相互比较。但是，目前国内外类似的设备存在试验精度不高、易产生偏心力、操作繁琐、功能单一等不足之处，因此，研发一台精度高、准确性好、易于操作、功能完善的沥青混合料低温冻断设备有着重要的科研意义和应用价值。本文所研发的沥青混合料低温冻断设备能够实时实现以下 4种试验：（1）沥青混合料约束试验温度应力试验；（2）沥青混合料应力松弛试验；（3）沥青混合料直接拉伸试验；（4）沥青混合料收缩系数试验。这些试验对深入研究沥青混合料低温开裂机理具有重要的意义。

1 沥青混合料低温冻断试验设备原理及设备简介

1.1 试验原理

沥青路面在温度降低时，沥青混凝土将发生收缩，当收缩受到基础的约束而无法自由发展时，在沥青混凝土内部将产生温度应力，一旦该应力超出了材料自身的抗拉强度时，路面就会出现裂缝。

为了模拟上述情况，在温控箱内，固定沥青混合料试件两端，在保持其固定端的间距不变的条件逐渐降低温度，直至试件断裂。由此可以得到沥青混合料试件的温度－应力曲线，由该曲线可以得到冻断温度、冻断强度、转化点温度和温度－应力曲线斜率等指标，这些指标可以用来评价沥青混合料的低温抗裂性能。

但是，各种材料都不可避免地会随着温度的降低而发生变形。在低温冻断系统中试件、试件夹具、试验机传力系统所用的材料，都随温度变化而发生变形，此外系统中各构件也都会随着力的产生和增大而发生变形，同时由于位移传感器本身和传感器夹具材料都有一定的线膨胀系数，因此位移量测系统受温度变化的影响也是不可忽略的[4,8-11]。图 1为实测位移量测系统的温度－变形曲线，由图可知，其最大变形量可达 80 μm。

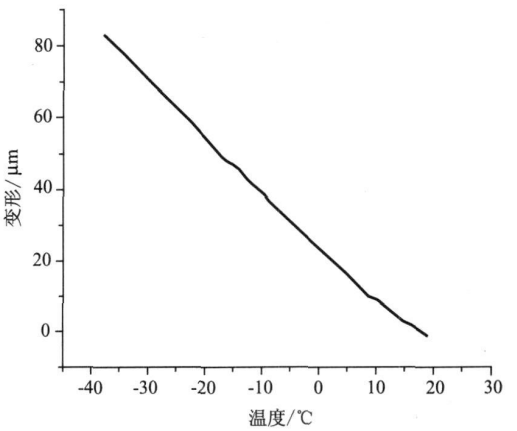


图 1 实测量测系统温度－变形曲线

Fig 1 The actual temperature- deformation curve of measurement system

如果不消除上述各种影响，所得到的结果就会失去科学性，影响试验的精度。为了避免上述情况的发生，使测量结果真实有效，提出了实时位移补偿控制原理，以保证沥青混合料试件在量测范围内的长度在降温过程中始终保持不变。

实时位移补偿控制包括：（1）对量测系统的温度变形进行补偿，（2）对试件的温缩变形进行补偿。

对量测系统的温度变形补偿是这样实现的：由于因瓦合金的收缩系数极小（1.6 × 10^{-6} /℃），选其作为基准器。将位移传感器和位移传感器支座装在因瓦合金基准器上，量测距离为 L，按试验要求的降温速度降温，得到位移量测系统的温度－变形曲线，将此曲线回归即可得到位移量测系统的修正函数 $y=f(t)$，式中，y 为位移量测系统的变形量，单位 μm，t为温度，单位为℃。将此函数输入计算机，由计算机自动修正。

图 2为通过实时补偿后量测系统的变形。对比图 1和图 2可得表 1。

表 1 修正前、后量测系统变形量

Tab 1 Deformation of measurement system before and after revision

温度/℃	20	10	0	-10	-20	-30	-35
修正前量测系统变形量/μm	0	9.5	23.4	39.3	53.1	71.5	78.6
修正后量测系统变形量/μm	0	3	2.4	1.2	0.9	0.6	-0.6
差值/μm	0	6.5	21	38	53	70.9	78

由图 2和表 1可知，通过实时补偿，量测系统

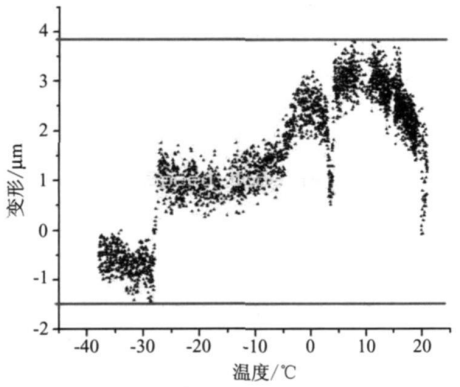


图 2　实时补偿后的量测系统变形

Fig 2　Defomation of measurement system after real-time compensation

的变形得到了很好的控制，如在 -20 ℃的条件下，修正前量测系统变形量为 71.5 μm，修正后量测系统变形量为 0.9 μm，比未进行补偿的工况下提高的试验精度约为 94%。

试件的温缩变形补偿是这样实现的：试验时，将位量测系统固定在试件上，放入装置中。试验过程中，位移传感器采集到的变形数据为 ΔL，ΔL 包括 2部分：一部分是由于试件本身收缩引起的变形 $\Delta L_{试}$，另一部分则是由于位移传感器及其支座受温度影响引起的变形 $\Delta L_{修}$，即：

$$\Delta L = \Delta L_{试} + \Delta L_{修},$$

则试件的真实变形为：

$$\Delta L_{试} = \Delta L - \Delta L_{修}。$$

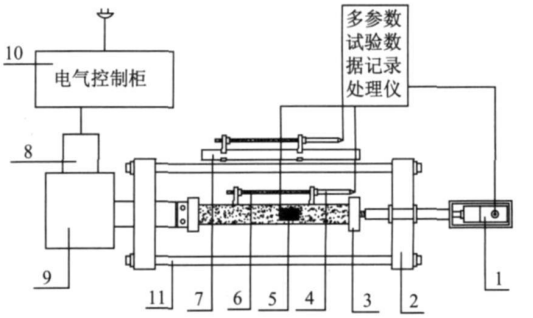
由于变形、温度和应力都是实时采集，并且 $\Delta L_{修} = y = f(t)$，因此可以实时计算出试件的真实变形（$\Delta L_{试}$）。当试件本身的变形量大于预先设定的值 m 时，由计算机发出指令控制电机运动，将试件拉回原长，实现了实时位移补偿。

此外，本试验系统中试件采用水平放置方式，可以有效地避免试件及试件夹具的自重所引起的蠕变对测量结果的影响，提高了试验的精度。

1.2　沥青混合料低温冻断试验设备简介

冻断试验装置由温控箱、冻断试验机、量测系统、控制器、采集装置、软件及计算机组成，试验装置如图 3所示。

（1）温控箱：温控箱的工作空间为 900 mm × 400 mm × 400 mm，用于改变冻断试验机的环境温度，其温度控制范围为 -60～20 ℃，控制精度 ±0.5 ℃。该环境箱可以恒温至某一温度，也可按一定的



1.拉压传感器；2.顶板；3.拉伸夹具；4.位移传感器；5.温度传感器；6.铟钢位移测具；7.石英基准；8.调速电机；9.主传动箱；10.电气控制柜；11.立柱

图 3　冻断试验装置

Fig. 3　Freezing test equipment

速率降温（升温）。降温（升温）速率可调，最大降温速率可达到 30 ℃/h。

（2）冻断试验机：由 4根导轨和 2个固定端、2个滑动端组成的机架，允许沥青混合料的最大变形量为 4 cm。电机通过行星减速器和丝杠与机架的滑动端相连，通过电机的运动可以改变 2个滑动端的距离以实现实时位移补偿控制。电机的运动由控制器控制，其控制信号由计算机发出。

（3）量测系统：量测系统由温度传感器、拉压传感器、位移量测系统、因瓦合金基准器组成。温度传感器量程为 -150～+50 ℃，测量精度为 0.5 ℃；拉压传感器量程为 0～20 kN，测量精度为 10 N；工作温度 -50～40 ℃；位移传感器采用 LVDT传感器，其量程为 ±1.27 mm，精度为 3 μm，工作温度 -55～-150 ℃；

（4）数据采集装置以 10次/s的速率采集数据；采集装置和软件能够实现数据的实时采集和显示，并画出温度-时间曲线、变形-时间曲线、应力-时间曲线和温度-应力曲线。采集控制程序界面如图 4所示。

1.3　试验方法

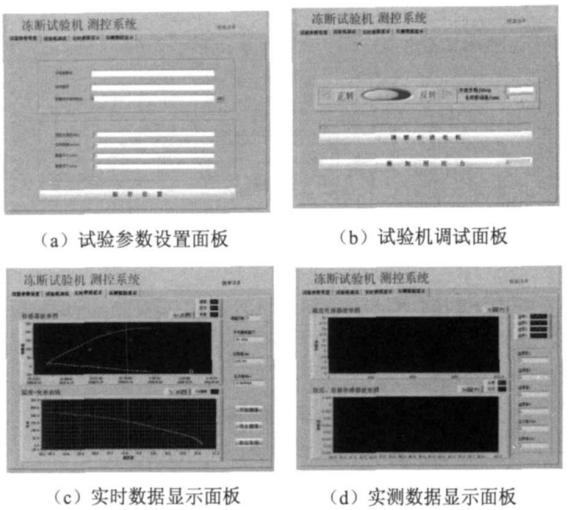
1.3.1　试件成型

按《公路工程沥青混合料试验规程》中的 T0703-1993的方法成型试件，并切割成尺寸为 30 mm × 35 mm × 220 mm 的试件，试件表面光洁。试件准备好后，测定其重度、孔隙率。

1.3.2　试件装配

（1）使用试件对心装置粘接试件与夹具，确保试件在试验过程中不会产生弯拉应力。如图 5所示。

（2）用粘结剂使试件与试件夹具相连。粘结剂



（a）试验参数设置面板 （b）试验机调试面板

（c）实时数据显示面板 （d）实测数据显示面板

图 4 采集控制程序界面

Fig. 4 Interface of acquisition control program

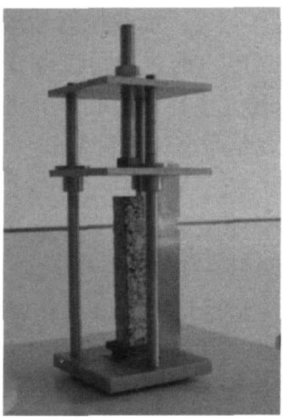


图 5 装配试件

Fig. 5 Specimen assembly

应适于在低温下工作。根据粘结剂的类型，将粘接在一起的试件和夹具放置一定的时间。放置试件时应避免试件发生蠕变。

1. 3. 3 试验步骤

（1）测定位移量测系统的温度－变形曲线，回归得到该曲线的函数，并将此函数写入程序中。在进行试验时，程序会自动修正位移量测系统随温度产生的变形，使测得的值为试件真实变形。

（2）在粘有夹具的试件上安放并固定位移传感器，使传感器支座间距离 $L = 150\ \mathrm{mm}$。

（3）将此试件放入低温冻断试验装置中，并恒温（20 ℃）60 min，为了防止试件在较高温度下发生蠕变，应在试件底部做好支撑。

（4）试件恒温后，给试件一个很小的初应力。然后按要求的降温开始时，同时启动程序进行数据的采集与记录（本试验采用的温度条件为：初始温度 20 ℃，降温速率 10 ℃/h）。

（5）当应力突然降低到很小时（此时试件已断裂），试验结束。此时的温度即为试件的断裂温度。根据试验过程中记录的温度和应力变化情况绘制出温度－应力曲线，并确定该试件的冻断应力、转化点温度等评价指标。

2 约束试件温度应力试验验证及结果分析

2 1 试验评价指标

沥青混合料约束试件温度应力试验结果见图 6，由图 6可以得到冻断温度、冻断强度、转化点温度和温度应力曲线斜率 4个评价指标。

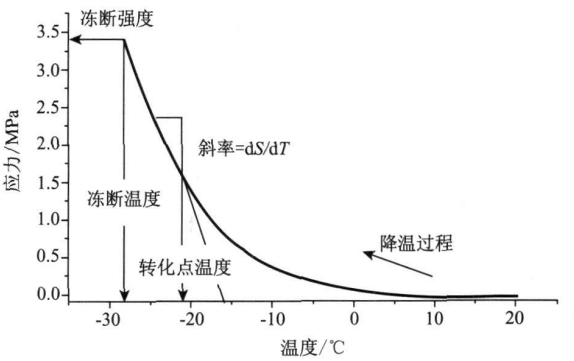


图 6 沥青混合料温度应力曲线

Fig 6 Temperature stress curve of asphalt mixture

（1）冻断温度：试件达到破坏断裂的温度，它比较直观地反映混合料可能承受的最低温度。

（2）冻断强度：试件破坏时的最大应力，反映混合料在温度收缩过程中的破坏强度。

（3）转化点温度：转化点温度将温度应力曲线分成 2部分：（1）应力随温度降低增长较慢，或者呈微微的曲线，这部分直线反映了沥青混合料的应力松弛性能。（2）随后有一个明显的转折，成了一条比较陡的曲线，温度应力随温度下降而迅速增长，直至破坏，这部分已经基本上没有了应力松弛。该指标反映了沥青混合料由粘弹性材料转化为弹性材料的临界温度。

（4）温度应力曲线斜率：主要是指后一部分直线增长的斜率，它反映温度应力增长的速率。温度应力曲线斜率越大，表明应力增长得越慢。

2 2 试验材料

2 2 1 沥青

本研究采用的沥青为 70#道路石油沥青、SBS成品改性沥青和复合改性沥青（TLA 湖沥青：SBS改

性沥青为 1∶3)。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)规定的方法测定这几种沥青的针入度、软化点、延度、闪点和密度等指标。表 2给出了这几种沥青的试验结果及规范值。

表 2　沥青试验结果汇总

Tab. 2　Summary of asphalt test results

检测项目		70#基质	SBS改性	复合改性	试验方法
5 s, 100 g, 25℃针入度 /(×0.1 mm)		60.3	67.4	42.4	T0604
针入度指数 *PI*		-1.38	0.51	-0.95	T0604
15℃延度 /cm		>100	-	123.2	T0605
10℃延度 /cm		30.4	-	-	T0605
5℃延度 /cm		-	38.0	28.6	T0605
软化点 $T_{R\&B}$ /℃		47.1	82.7	70.6	T0606
闪点 (COC) /℃		271	280	253	T0611
25℃弹性恢复 /%		-	97.7	84.0	T0662
135℃布氏旋转粘度 /(Pa·s)		-	1.7	1.462	T0625
沥青旋转薄膜烘箱试验 RTFOT					
质量损失 /%		-0.29	-0.37	-0.32	T0610
针入度比 /%		74.0	90.5	85.3	T0604
延度 /cm	25℃	-	-	96.7	T0605
	15℃	-	-	15.7	T0605
	10℃	8.4	-	-	T0605
	5℃		30.3	-	T0605

2.2.2　沥青混合料

沥青混合料的矿料级配为 AC-16和 SMA-13，图 7给出了这 2种矿质混合料级配曲线图。

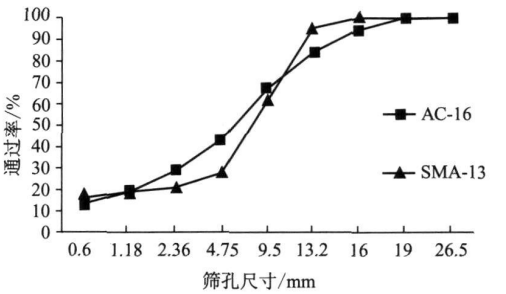


图 7　矿质混合料级配曲线图

Fig. 7　Gradation curve of mineral mixtures

用上述沥青及级配在最佳油量条件下，拌制如表 3所示的 4种沥青混合料。

表 3　沥青混合料类型及编号

Tab. 3　Types and serial numbers of asphalt mixture

级配类型	沥青品种	编号
AC-16	成品 SBS改性沥青	①
	70#基质沥青 + 肯特莱搞车辙剂	②
SMA-13	成品 SBS改性沥青	③
	SBS改性沥青 + TLA湖沥青	④

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)规定的轮碾方法成型这 6种沥青混合料，并切割成尺寸为 30mm×35mm×220mm的试件。

2.3　试验结果及分析

相关文献表明：冻断温度和转折点温度作为沥青混合料低温抗裂性能评价指标更稳定、能更好地评价出沥青混合料的低温性能[12]。因此本文选用冻断温度和转化点温度作为验证设备准确性的指标。

沥青混合料约束试件温度应力试验结果及统计分析结果如表 4所示。

表 4　试验分析数据汇总

Tab. 4　Summary of experimental analysis data

级配类型	AC-16						SMA-13					
混合料编号	①			②			③			④		
冻断温度 /℃	-20.9	-21.8	-21.5	-17.2	-18.5	-18.0	-21.4	-23.1	-22.4	-24.4	-24.7	-25.0
冻断温度均值 /℃	-21.4			-17.9			-22.3			-24.7		
冻断温度变异系数	0.021			0.036			0.038			0.012		
转化点温度 /℃	-18.3	-19.6	-18.8	-15.4	-13.9	-14.8	-18.7	-18.2	-18.6	-22.3	-21.3	-21.8
转化点温度均值 /℃	-18.9			-14.7			-18.5			-21.5		
转化点温度变异系数	0.034			0.051			0.014			0.023		
沥青品种对冻断温度的影响 (*P* 值)	0.00163						0.01010					
沥青品种转化点温度的影响 (*P* 值)	0.00190						0.00054					

分析表 4可知: (1) 该设备测得的冻断温度和转化点温度的变异系数很小, 表明该设备在进行试验时具有良好的复现性; (2) 对编号 AC-16和 SMA-13沥青混合料的冻断温度和转化点温度进行方差分析可知, 在 0.05水平下, 沥青品种对 AC-16和 SMA-13沥青混合料的冻断温度和转化点温度有显著性影响。也即该设备能有效地区分出不同沥青混合料低温抗裂性能。

3 结论

(1) 自主研发的冻断设备所测得的试验数据变异性小、重复性高, 具有实际应用价值。

(2) 由自行开发的冻断设备得到的冻断温度和转化点温度对沥青品种和沥青混合料类型变化很敏感, 可以有效地区分出不同沥青品种和不同混合料类型的低温性能。因此可选用冻断温度和转化点温度作为沥青混合料低温抗裂性能的评价指标。

参考文献:

References

[1] KANERVA H K, VINSON T S, ZENG H. Low Temperature Cracking Field Validation of the Thermal Stress Rest Rained Specimen Test, SHRP-A-401 [R]. Washington, D.C.: National Research Council, 1994.

[2] 张登良. 沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
ZHANG Dengliang. Asphalt Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.

[3] 郝培文, 张登良, 胡西宁. 沥青混合料低温抗裂性能评价指标 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20 (3): 1-5.
HAO Peiwen, ZHANG Dengliang, HU Xining. Evaluation Method for Low Temperature Anti-cracking Performance of Asphalt Mixture [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 0 (3): 1-5.

[4] 田小革, 应荣华, 郑健龙. 沥青混凝土温度应力试验及其数值模拟 [J]. 土木工程学报, 2002, 35 (3): 25-30.
TIAN Xiaoge, YING Ronghua, ZHENG Jianlong. Tests on Thermal Stress in Asphalt Cement Sample and Its Numerical Simulation [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35 (3): 25-30.

[5] JUNG D H, VINSON T S. Low Temperature Tracking Test Selection, SHRP-A-400 [R]. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, 1994.

[6] 谭忆秋, 邵显智, 张肖宁. 基于低温流变特性的沥青低温性能评价方法研究 [J]. 中国公路学报, 2002, 15 (3): 1-5.
TAN Yiqiu, SHAO Xianzhi, ZHANG Xiaoning. Research on Evaluations Approach to Low \ temperature Performance of Asphalt Based on Rheology Characteristic of Low Temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15 (3): 1-5.

[7] 张肖宁, 韩传岱, 朱希岭. 沥青混合料低温抗裂性能评价方法研究 [J]. 中国公路学报, 1993, 6 (1): 3-9.
ZHANG Xiaoning, HAN Chuandai, ZHU Xiling. On the Evaluation of Low Temperature Cracking Resistance of Bitumen Mixtures [J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, 6 (1): 3-9.

[8] 刘涛, 郝培文. 沥青混合料低温抗裂性评价方法研究 [J]. 同济大学学报, 2002, 20 (12): 1468-1473.
LIU Tao, HAO Peiwen. Comparison Study of Evaluation Method for Low Temperature Anti-cracking Performance of Hot Mix Asphalt [J]. Journal of Tongji University, 2002, 20 (12): 1468-1473.

[9] 陈敬文. 沥青混凝土低温冻断试验 [J]. 石油沥青, 1991 (1): 46-50.
CHE Jingwen. TSRST of Asphalt Cement [J]. Petroleum Asphalt, 1991 (1): 46-50.

[10] 余梁蜀, 许庆余, 王文进, 等. 沥青混凝土低温性能试验和工程应用 [J]. 水利学报, 2006, 37 (5): 634-639.
YU Liangshu, XU Qingyu, WANG Wenjin, et al. Study on Behaviors of Asphalt Concrete under Low Temperature [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (5): 634-639.

[11] 谭忆秋, 张磊, 柳浩, 等. 基于约束试件温度应力试验评价几种沥青混合料的低温性能 [J]. 公路, 2010 (1): 171-174.
TAN Yiqiu, ZHANG Leil, LIU Hao, et al. Evaluate the Low-temperature Performance of Several Kinds of Asphalt Mixture Based on TSRST [J]. Highway, 2010 (1): 171-174.

[12] SEBAALY P E, LAKE A, EPPS J. Evaluation of Low Temperature Properties of HMA Mixtures [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 2001, 128 (6): 578-586.