

# 冻融循环下沥青混合料损伤特性研究

谭忆秋<sup>1</sup>,徐慧宁<sup>1</sup>,赵春丽<sup>2</sup>,叶万里<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150006;

2. 黑龙江省交通投资集团有限公司,黑龙江 哈尔滨 150060)

**摘要** 目的 探究季节冻土地区温差和冻融循环等气候特点对沥青混合料使用性能的影响,为我国不同地区的沥青路面设计、养护、寿命评估和冻融损伤评估提供依据。

**方法** 采用室内冻融循环模拟试验,根据不同温度配置和不同循环次数下沥青混合料的弯拉强度、疲劳寿命和单轴压缩动态模量的衰减,研究冻融循环作用前后沥青混合料的损伤特征,明确冻融循环下沥青混合料的性能衰变特征,最终提出沥青混合料冻融损伤温度等效效应。**结果** 冻融循环对沥青混合料低温抗裂性能造成严重破坏,冻融循环30次后性能的衰减幅度总体上超过50%。融化温度和冻结温度对沥青混合料损伤的影响存在差异,且归因于结冰过程、经典热力学和膨胀力三个方面。在仅冻融循环作用下,沥青混合料的性能衰减表现出先快速下降,后缓慢下降的特征。**结论** 冻融循环对沥青混合料性能的影响程度受循环次数和温度条件影响,其中融化温度较冻结温度对性能的影响更为显著。不同温度配置下冻融30次后的沥青混合料性能表现出相似分布规律,明确了温度等效效应。建立了混合料冻融循环后的残余抗裂性能的等效模型,将损伤程度简化为三个等级。

**关键词** 道路工程;冻融循环;损伤特征;抗裂性能;衰变规律

中图分类号 U416.217

文献标志码 A

**引用格式:**谭忆秋,徐慧宁,赵春丽,等.冻融循环下沥青混合料损伤特性研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):778-788.(TAN Yiqiu, XU Huining, ZHAO Chunli, et al. Research on asphalt damage characteristics under freeze-thaw cycling [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(5): 778-788.)

## Research on Asphalt Damage Characteristics under Freeze-thaw Cycling

TAN Yiqiu<sup>1</sup>, XU Huining<sup>1</sup>, ZHAO Chunli<sup>2</sup>, YE Wanli<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150006;

2. Heilongjiang Transport Development Co. Ltd., Harbin, China, 150060)

收稿日期:2024-02-28

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A20315)

作者简介:谭忆秋(1968—),女,教授,博士,主要从事路基路面、建筑材料等方面研究。

**Abstract:** To provide a basis for the design, maintenance, service life evaluation, and frost damage assessment of asphalt pavement in different regions of China, the influence of temperature and freeze-thaw cycles on asphalt performance was investigated. The damage characteristics of asphalt before and after freeze-thaw cycling were discussed based on indoor freeze-thaw simulation experiments by examining the bending-tensile strength, fatigue life, and dynamic modulus under different temperature configurations and cycle numbers. The performance degradation characteristics of asphalt under freeze-thaw cycling were clarified. The temperature equivalent effect of freeze-thaw damage to asphalt was proposed. Freeze-thaw cycling caused severe damage to the low-temperature crack resistance of asphalt, with an overall performance degradation exceeding 50% after 30 cycles. The influence of thawing and freezing temperatures on asphalt damage differed and can be attributed to ice formation processes, classical thermodynamics, and expansion forces. Under freeze-thaw cycling alone, the performance degradation of asphalt exhibited a rapid decline followed by a slower deterioration. The impact of freeze-thaw cycling on asphalt performance was dominated by the cycle numbers and temperature, with the melting temperature having a more significant effect than the freezing temperature. Asphalt exhibited similar patterns in performance after 30 freeze-thaw cycles under different temperature configurations, and the temperature equivalent effect was elucidated. An equivalent model for the residual anti-cracking performance of asphalt after freeze-thaw cycling was established and the damage severity was simplified into three levels.

**Key words:** pavement engineering; freeze-thaw cycle; damage characteristics; crack resistance; deteriorate process

高速公路是现代交通的重要一环,沥青路面由于行车舒适度高、噪音小、稳定性好,在高速公路的建设中被广泛应用。大量工程实践经验表明,由于气候、交通状况(交通量、超载)等原因,沥青路面在早期服役过程中往往会出现严重的病害,损害沥青路面的使用性能和使用寿命<sup>[1]</sup>。其中,季节冻土地区由于温差过大和冻融循环等气候特点,水分与温度共同作用进一步加剧了冻胀融沉及温缩裂缝的发展<sup>[2-3]</sup>,其沥青路面产生的早期病害较其他地区而言更为严重,路面的服务性能急剧下降,严重影响了高速公路服役性能与服役寿命<sup>[4-6]</sup>。

沥青路面的破坏是由于外界恶劣气候、荷载和自身结构等综合因素对材料本身造成的损伤逐渐积累导致的。现有冻融损伤评估方法包括材料性能测试、加速劣化试验和实验路观测等方法。尽管已经采用了各种评估方法来研究沥青路面的冻融损伤,但其存在着诸多限制,尚未形成完整的评估体系。在

现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)<sup>[7]</sup>中,采用冻融劈裂试验测得的冻融劈裂强度比评估沥青混合料抵抗冻融损伤破坏的能力,但局限于单次冻融循环,无法评估长期的路面服役状况,缺乏参考价值。与此同时,尽管已经明确冻融作用将显著降低沥青混合料的疲劳寿命<sup>[8]</sup>、显著增大疲劳试验的应力敏感性<sup>[9]</sup>,但对疲劳寿命在冻融循环过程中的衰变特征仍尚未可知。此外,D. Feng等<sup>[10]</sup>研究表明,沥青混合料抗冻融损伤性能受到冻融循环次数、空隙率、沥青种类以及级配等多种因素的影响,但其忽略了冻融循环中最关键的变量,即温度(包括冻结温度和融化温度)对冻融作用的影响。李震<sup>[11]</sup>同时考虑了冻结温度(-30~0℃)和融雪盐浓度对沥青混合料性能的影响,表明盐冻循环下,冻结温度的降低、循环次数的增加以及盐溶液浓度的过高和过低将显著降低沥青混合料的劈裂强度、稳定性、低温变形能力。可见,虽然开展了大量的研究

试图从宏观性能方面评估混合料的冻融损伤特征,但对冻融循环结果受冻结/融化温度的影响和对沥青混合料在冻融循环条件下的衰变过程的认识仍然不够深入,因此还需要进一步深入研究。

近年来,考虑到裂缝的扩展机理和实际沥青路面结构的受力特点<sup>[12-14]</sup>,开发出了一种半圆弯拉(Semi-Circular Bending, SCB)测试手段,该方法利用制备自身有切缝的半圆形试件,通过对其进行弯拉从而测试其弯拉强度以表征沥青混合料的抗裂能力,受到了广泛的关注。笔者将借助 SCB 试验和单轴压缩动态模量试验作为沥青混合料低温抗裂性能的评价手段,重点研究冻结/融化温度对沥青混合料冻融损伤的影响和低温抗裂性能的衰变规律,总结冻融循环损伤温度等效效应,为后续进行沥青混合料长期冻融循环研究和荷载-冻融耦合作用研究提供基础,为我国不同地区的沥青路面设计、养护、寿命评估和冻融损伤评估提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料及配合比设计

笔者所用安山岩集料,石灰岩矿粉,高黏高弹改性沥青和木质素纤维,分别按照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)<sup>[15]</sup>、《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)<sup>[4]</sup>和《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)<sup>[16]</sup>进行检测,各项指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的要求。采用《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)规定的 SMA-13 中值级配,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制备沥青混合料试件,并按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的方法确定最佳沥青用量为 6.2%。

### 1.2 试验方案

考虑我国各地区气候特性,以冻融循环

作为主要研究对象,通过设置不同的冻结温度、融化温度和冻融循环次数,针对性研究冻融循环下沥青混合料的损伤特性。对于冻融循环频繁发生或需要重点关注的区域,低温气候特征决定了沥青混合料的低温抗裂性能为设计重点之一。同时,低温抗裂性能的衰减直接影响了该类地区沥青路面的服役寿命。因此,选取沥青混合料的低温抗裂性能以代表冻融循环下混合料的损伤程度。

试验参数设置以《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T0729—2000 的冻融循环条件为基础,在冻融循环前对试件进行真空饱水,首先在 97.3~98.7 kPa 条件下饱水 15 min,随后在常压下泡水 30 min。通过全自动可编程式冻融试验箱控制冻结温度、融化温度和冻融次数,从而实现不同条件下的冻融循环。具体参数设置见表 1。试验总体分为融化组和冻结组,其中融化组的冻结温度固定为 -15℃,融化温度设置为 30~60℃,并以 10℃为间隔;冻结组则相反,融化温度固定为 60℃,冻结温度设置为 -5~-35℃,并以 10℃为间隔。所有试验组均经历 1 次、3 次、5 次、10 次、15 次、25 次和 30 次冻融循环,并与对照组(经历 0 次冻融循环的试件)进行对比。

表 1 冻融循环参数设置方案

Table 1 Parameter scheme of freeze-thaw cycling

分组	冻结温度 / ℃	融化温度 / ℃	冻融循环/次
融化组	-15	30	1, 3, 5, 10, 15, 25, 30
	-15	40	
	-15	50	
	-15	60	
冻结组	-5	60	1, 3, 5, 10, 15, 25, 30
	-15	60	
	-25	60	
	-35	60	

笔者采用原位水冻水融的方式进行冻融

循环,原因如下:①由于试件需要连续经历冻融循环,人工操作难以控制时间统一,且极易引入操作误差;②在探究冻融循环的过程中,笔者主要考虑孔隙内部水分引起的冻结和融化对沥青混合料性能的影响,因此采用水冻水融的方式,且在第一次冻结前,利用真空饱水的方式将水充分填入混合料的开口孔隙。具体试验流程及试验参数如图1所示。其中经旋转压实成型的沥青混合料试件按照试验要求依次进行试件切割、真空饱水、常压泡水、冻融循环和常温风干后,利用 UTM-250 和定制加载套件对其进行半圆弯拉试验、半圆弯拉疲劳试验和单轴压缩动态模量试验。

半圆弯拉试验参考文献[12]进行设计。试件直径为 100 mm,厚度为 50 mm,中心开

缝缝长为 15 mm,缝宽为 1.5 mm。测试前将试件置于 15 ℃保温 4 h。加载过程控制支座间距 80 mm,加载速度为 50 mm/min。根据式(1)计算弯拉强度:

$$R = 4.8 \frac{P}{Dt} \quad (1)$$

式中: $R$  为弯拉强度,MPa; $p$  为峰值荷载,N; $D$  为试件直径,mm; $t$  为试件厚度,mm。

半圆弯拉疲劳试验在前述条件下,采用应力控制模式,采用半正弦波荷载,加载频率为 10 Hz,应力比水平为 0.3,以样品的最终断裂确定疲劳寿命。

单轴压缩动态模量试验根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T0738—2011 进行。



图1 试验方案

Fig. 1 Test plan

## 2 结果与分析

### 2.1 循环温度对低温抗裂性能影响分析

不同冻结温度和融化温度组合条件下,经过 30 次冻融循环前后的沥青混合料试件的弯拉强度、疲劳寿命和动态模量的对比结果如图 2 所示。从图中可以看出,固定冻结温度为  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,混合料的弯拉强度随着融化温度的升高呈线性降低,当融化温度从  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  升高到  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,弯拉强度从 2.12 MPa

降低到 1.65 MPa(相对于未进行处理的对照组分别下降了约 42% 和 55%)。在固定融化温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,混合料的弯拉强度随着冻结温度的降低呈线性降低,当冻结温度从  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  降低到  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,弯拉强度从 1.77 MPa 降低到 1.42 MPa(分别下降了约 51% 和 61%)。在控制变量条件下,融化温度变化  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  导致的弯拉强度下降较冻结温度变化  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  更为显著。疲劳寿命方面,冻融循环 30 次前后表现出类似于弯拉强度的特

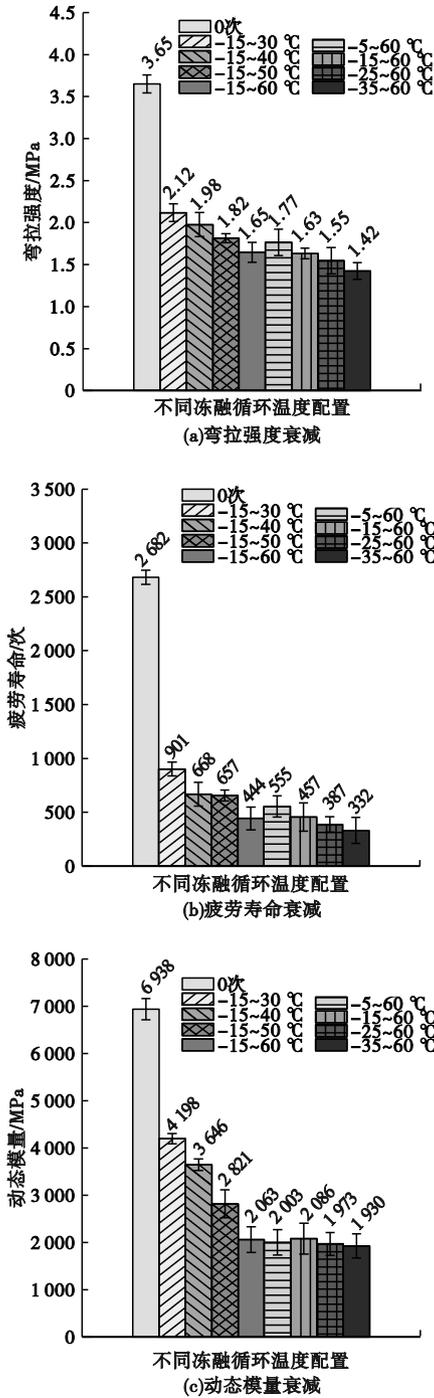


图2 30次冻融循环前后沥青混合料低温抗裂性能对比

Fig. 2 Comparison of low-temperature crack resistance of asphalt mixtures before and after 30 freeze-thaw cycles

征,即混合料的疲劳寿命随着融化温度的升高或冻结温度的降低呈线性降低,且融化温

度变化导致的疲劳寿命下降较冻结温度变化更为显著。例如,当融化温度从30℃升高到60℃时,疲劳寿命从901次降低到444次(相对于未进行处理的对照组分别下降了约66%和83%),而当冻结温度从-5℃降低到-35℃时,疲劳寿命从555次降低到332次(相对于未进行处理的对照组分别下降了约79%和88%)。动态模量方面,固定冻结温度为-15℃时,混合料的动态模量随着融化温度的升高呈线性降低,当融化温度从30℃升高到60℃时,动态模量从4198 MPa降低到2063 MPa(相对于未进行处理的对照组分别下降了约39%和70%)。不同的是,固定融化温度为60℃时,混合料的动态模量并不受冻结温度的影响,当冻结温度从-5℃降低到-35℃时,动态模量始终维持在2000 MPa左右。

综合弯拉强度、疲劳寿命和动态模量这三个指标不难看出,在30~60℃的融化温度和-35~-5℃的冻结温度组合条件下,30次的冻融循环将会对沥青混合料的低温抗裂性能带来严重的破坏,各项指标的下降幅度总体上超过50%。可见冻融循环对于寒区沥青路面的损害是十分严重的,这与近几十年寒区沥青路面工程的实践结果相吻合。有必要进一步研究沥青混合料抗裂性能的衰变规律及特点,为寒区沥青路面的管理和养护提供更多的决策依据。此外,笔者通过控制变量的方式分别研究了融化温度和冻结温度对沥青混合料抗裂性能的影响,其结果表明融化温度的增幅较冻结温度的减幅对沥青混合料抗裂性能降低起着更加关键的作用。

上述现象可能与水的结冰过程和热力学方程有关。通常情况下,水结冰的过程被分为三个阶段,水分子开始形成冰晶,冰晶生长/变大,冰晶聚合形成冰块<sup>[17-18]</sup>。在水从液态转变为固态的过程中,水分子失去热能,静电分子力从而更容易将它们以刚性形式保持在一起从而形成固体冰。而参考经典热力

学方程<sup>[19]</sup>:

$$Q = cm\Delta T. \quad (2)$$

式中: $Q$ 为热量, $J$ ;  $c$ 为比热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $m$ 为质量, $kg$ ;  $\Delta T$ 为温度差, $K$ 。

传热速率通常表现为随着温差的增加而增加。在试验中,随着融化温度的升高或冻结温度的降低,温度差  $\Delta T$  变大,从而导致释放的热量  $Q$  也越大,因此水结冰的速度就越快。研究表明,冰温变化主要取决于外部温度,冰层内部自上而下呈现出一定的温度梯度,即表层受外部温度的影响最显著;而随着深度的增加,冰温的温度梯度减小并趋于稳定<sup>[20]</sup>。试验配置中冻结温度的改变将会影响降温速率,而融化温度的改变则会改变升温速率。其中,降温速率的提高能够提高沥青混合料孔隙中水的结冰速度,但是其影响范围主要局限于表层,因此由孔隙水结冰导致的膨胀力对混合料试件内部的破坏较为有限。然而,冰体的膨胀力在温度升高的过程中表现出先增加后减小的规律,且升温速率越快,其峰值膨胀力越大<sup>[21]</sup>。因此,当提高融化温度,即提高升温速率,沥青混合料孔隙内部的冰体将产生更大的膨胀力从而破坏内部结构,造成混合料抗裂性能的急剧下降。这解释了冻结温度从  $-35 \sim -5 \text{ } ^\circ\text{C}$  的变化对弯拉强度、疲劳寿命和动态模量的影响要小于融化温度从  $30 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$  的变化。这一现象在动态模量方面最为显著,融化温度从  $30 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$  展现出了明显的动态模量梯度变化,而冻结温度从  $-35 \sim -5 \text{ } ^\circ\text{C}$  对动态模量的影响是微弱的,测试误差的存在使得动态模量的变化并不显著。

此外,需要注意的是,尽管试验中的融化温度(最高为  $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ )不至于导致沥青流淌和强烈氧化,但已接近路面的最高使用温度。相关研究表明,沥青的老化存在一定的时温等效效应,长时间的中温老化作用与短时间的高温氧化作用对沥青的蠕变特性具有相似的作用<sup>[22]</sup>。因此,综合考虑融化温度对沥

青的老化作用和孔隙冰的膨胀力作用,融化温度固定冻结温度渐降组所得到的沥青混合料抗裂性能更差,但是抗裂性能随冻结温度的变化幅度要小于冻结温度固定融化温度渐升组中抗裂性能随融化温度的变化幅度。

## 2.2 沥青混合料性能的衰变特征分析

为了进一步研究冻融循环下沥青混合料性能的衰变特征,笔者对比了不同冻融循环次数(1次、3次、5次、10次、15次、25次和30次)下沥青混合料的弯拉强度、疲劳寿命和动态模量,结果如图3所示。从图3(a)和图3(b)可以发现,不论是固定冻结温度还是固定融化温度,随着冻融次数的增加,沥青混合料的弯拉强度均表现出先快速下降,后缓慢下降的两阶段特征。如前文所述,融化温度的变化对弯拉性能的影响较冻结温度更为显著。在缓慢下降阶段,冻结温度固定而融化温度渐升组中弯拉强度保持持续的降低;冻结温度渐降而融化温度固定组中弯拉强度在经历快速下降后基本保持恒定。在疲劳寿命方面,冻结温度或融化温度的变化均未在冻融循环次数增加的过程中展现出显著的差异。随着冻融次数的增加,疲劳寿命呈现出先快速下降,后缓慢下降的两阶段特征(见图3(c)和图3(d))。这可能是因为在不论是改变冻结温度还是改变融化温度,尽管其对结冰过程和膨胀力有影响,但都无法改变混合料内部孔隙中的水-冰循环过程对结构的破坏和或坏的累积。对动态模量而言,融化温度和冻结温度之间表现出显著的差异(见图3(e)和图3(f))。尽管当冻结温度固定而融化温度渐升和冻结温度渐降融化温度固定时,沥青混合料的动态模量均呈现出先快速下降后趋于稳定的两阶段特特征。但对于前者而言,融化温度的变化导致了动态模量稳定值的显著差异;对于后者而言,冻结温度的变化并未显著影响动态模量。

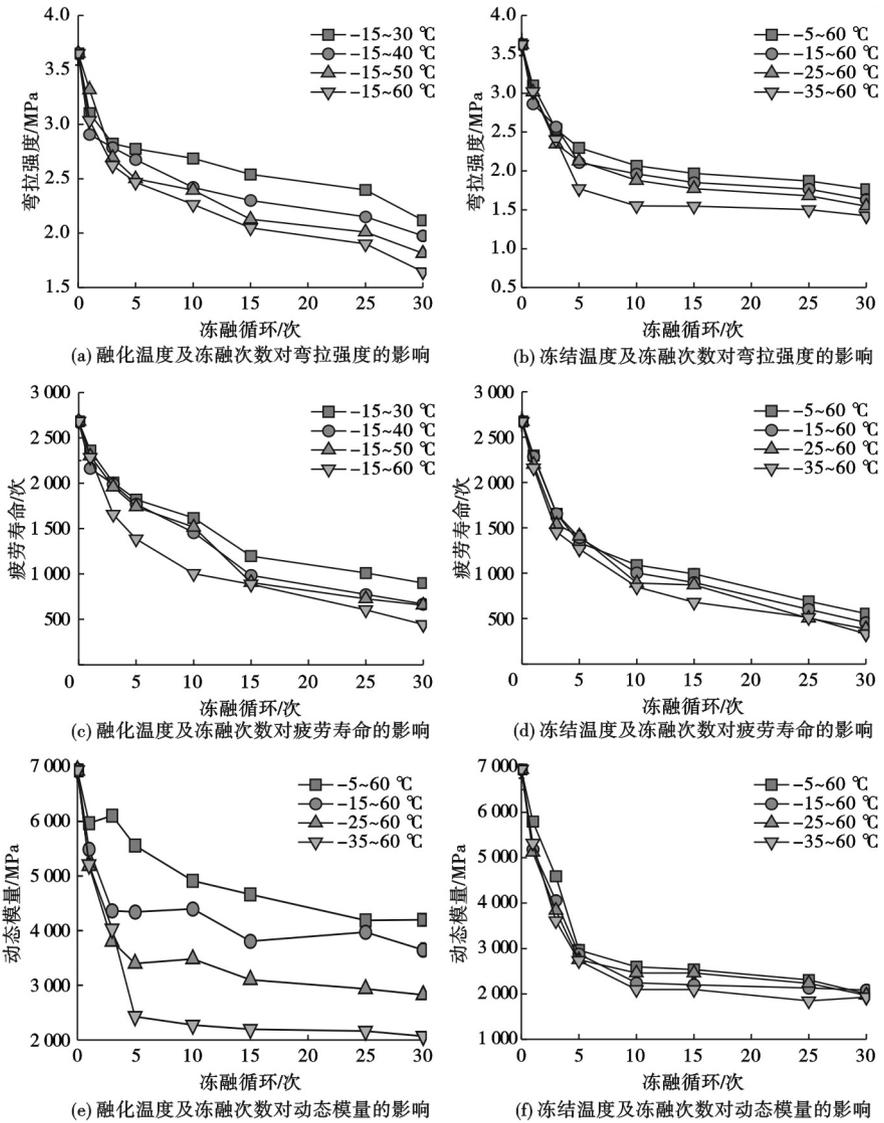


图3 沥青混合料性能的衰变特征

Fig. 3 Decay characteristics of asphalt mixture properties

分析图3可以得出:①不论固定冻结温度还是固定融化温度,随着冻融循环次数的增加,沥青混合料的低温抗裂性能均呈现显著的降低(降低幅值达到甚至超过50%)。可见反复的冻融对沥青混合料和沥青路面而言,具有相当大的破坏力,这与寒区道路的工程实践经验相吻合。②冻融循环对沥青混合料低温抗裂性能的影响主要可以分为两个阶段,即0~5次冻融循环和5次以上冻融循环。在0~5次冻融循环中,沥青混合料的低温抗裂性能出现快速的劣化,而在随后的5次以上冻融循环中,沥青混合料的低温抗裂

性能劣化速度显著放缓或趋于稳定。③与2.1节分析所得的结果一致,即融化温度的变化带来的性能变化差异较冻结温度变化更为显著。

但是,上述第二条结论与寒区实际道路工程经验有所出入。在实际工程中,沥青路面的性能劣化呈现出加速趋势,而不会出现像试验中那样劣化减缓甚至趋于稳定的结果。这是因为实际道路情况下耦合了车辆荷载的作用。在模拟试验中,试件处于原位水冻水融的条件下,且仅在冻融循环开始前进行真空饱水,因此试验中沥青混合料抗裂性

能的下降主要由孔隙水分在反复冻融过程中产生膨胀和收缩从而破坏混合料内部结构所导致。尽管反复的冻融循环能够形成一定程度的冰劈作用从而使得破坏愈加严重,但是由于荷载作用的缺席,孔隙水仅能够通过重力进入冰劈产生的新损伤中,同时仍受到表面张力等客观因素的制约从而最终达到一个平衡状态,因此单纯的冻融循环作用并不能使混合料呈现出加速破坏的状态。而实际路面则不同,其经受着冻融循环和车辆荷载的耦合作用:一方面,在冻融循环孔隙冰的冰劈作用基础上,车辆行驶导致的动荷载将水/冰挤压入冰劈作用产生的新损伤中,从而在随后的冻融循环中加剧冰劈作用;另一方面,车辆施加的动荷载将传导至冻融作用产生的内部缺陷处并形成应力集中,从而进一步破坏混合料的内部结构<sup>[23-24]</sup>。因此,实际道路在冻融循环中往往呈现出加速劣化的特征。尽管笔者受限于技术手段和试验方法,没有考虑冻融循环和车辆荷载的耦合作用,但通过对沥青混合料在冻融循环条件下的损伤特性进行总结,为后续的研究提供了基础、经验和研究方向,即在条件允许的情况下,应设计冻融循环与车辆荷载的耦合试验,从而对沥青混合料抗裂性能的衰变进行进一步的研究。

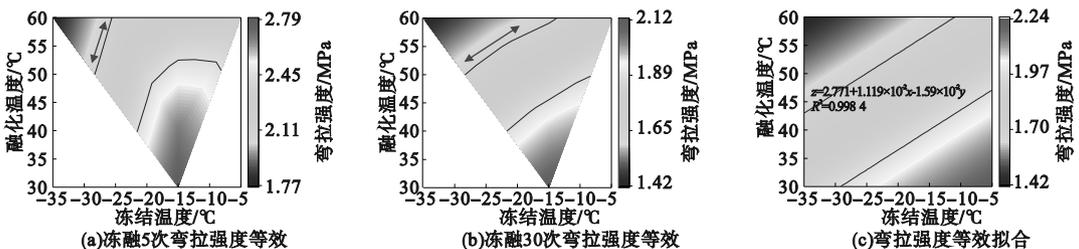
### 2.3 冻融循环温度等效效应分析

由于我国幅员辽阔,地域之间呈现出显著的气候差异性。仅依赖于降水量的差异而忽略了冻融温度的影响对冻融损伤等级进行分区可能并不准确。因此,为了更好地泛化研究结论,使得研究结果能够适用于全国各地的公路工程设计、建设和养护中,有必要考虑冻融循环过程中的冻结温度和融化温度的等效转化,提出温度等效效应。笔者将从

三个方面(弯拉强度、疲劳寿命和动态模量)综合评估冻融循环温度等效效应。

图4(a)和图4(b)分别展示了冻融循环5次和30次后半圆弯拉试验测试结果的温度等效云图。从图中可以看出,将主要等级分为三档,并且呈现不同的分布特征。对于5次冻融循环后的温度等效云图,其总体分布近似为以 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为顶点,以冻结温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为脊线的扇状曲面,各档之间的分界线为近似为以 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为圆心的圆弧。而对于30次冻融循环后的温度等效云图,各温度配置条件下的弯拉强度分布近似为一个曲面,各档之间的分界线近似平行,具有明显的区分特征。结合2.2节中对沥青混合料抗裂性能衰变规律划分的两阶段特征,第5次冻融处于两阶段的交界处,变化趋势尚不明朗;而30次冻融循环后,沥青抗裂相关指标的变化趋于稳定,因此更加适合用于温度等效效应的拟合。因此,在冻融循环30次弯拉强度等效云图的基础上进行曲面拟合,借助其平面特征将拟合曲面降维至平面,得到弯拉强度温度等效拟合平面方程及拟合云图,拟合优度 $R^2$ 为0.9984,说明拟合程度良好(见图4(c))。

图4(d)和图4(e)分别展示了冻融循环5次和30次后半圆弯拉疲劳试验测试结果的温度等效云图,并将主要等级分为三档。从图中可以看出,疲劳寿命测试结果的温度等效云图和弯拉强度的温度等效云图呈现出相似的特征。因此采用相同的方法,对冻融循环30次的疲劳寿命云图进行拟合,借助其平面特征将拟合曲面降维至平面,得到疲劳寿命温度等效拟合平面方程及拟合云图,拟合优度 $R^2$ 为0.9602,说明拟合程度良好(见图4(f))。



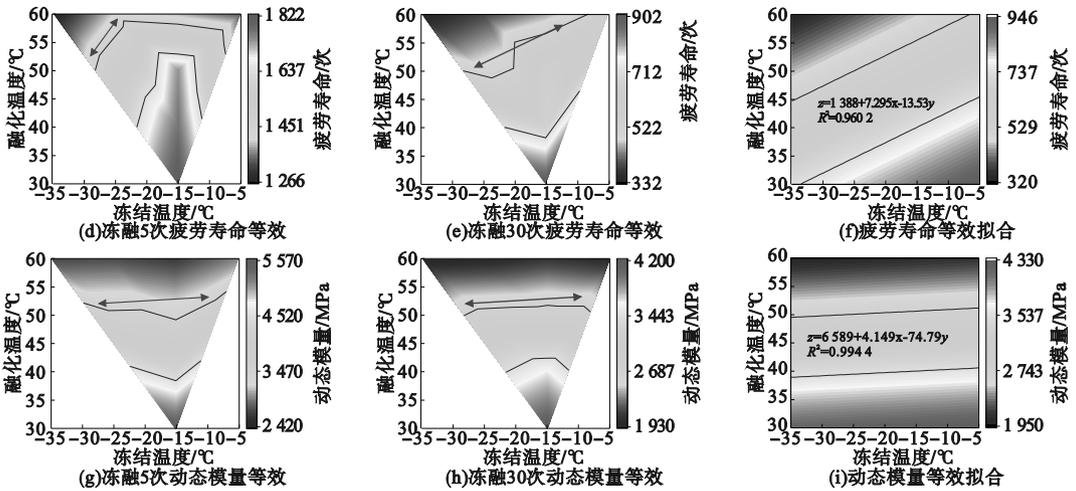


图4 沥青混合料低温抗裂性能的温度等效效应

Fig. 4 Temperature equivalent effect on low-temperature crack resistance of asphalt mixtures

与弯拉强度和疲劳寿命不同的是,混合料的动态模量在第5次冻融循环后和第30次冻融循环后的温度等效云图基本一致,表现为近似平面,且动态模量值基本与冻结温度无关,而是随着融化温度的增加而增加。参考图3(e)和图3(f)可知,动态模量在5次冻融循环之后便趋于稳定而不再显著下降,因此冻融循环5次和30次的结果基本一致。采用与前述弯拉强度和疲劳寿命相同的方法,对冻融循环30次的动态模量云图进行拟合,借助其平面特征将拟合曲面降维至平面,得到动态模量温度等效拟合平面方程及拟合云图,拟合优度  $R^2$  为0.994 4,拟合程度良好(见图4(i))。

由前述分析可知,沥青混合料在冻融30次时的弯拉强度、疲劳寿命和动态模量呈现出相似分布规律,但分布特征略有差异。因此,综合考虑这三个因素,在对三者数据进行如式(3)所示的归一化处理之后,平均分配权重,加和得到沥青混合料在不同温度配置下,30次冻融循环后的残余抗裂性能,如式(4)所示。残余抗裂性能用于代表冻融循环后沥青混合料的总体低温抗裂性能,其值越大,说明冻融循环导致的弯拉强度、疲劳寿命和动态模量损失越少,残余的抗裂性能更高。

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \tag{3}$$

式中: $x'$ 为归一化后的结果,取值范围为(0, 1); $x$ 为样本初始值; $\min(x)$ 为样本中的最小值; $\max(x)$ 为样本中的最大值。

$$y = \frac{1}{3}x_1 + \frac{1}{3}x_2 + \frac{1}{3}x_3 \tag{4}$$

式中: $y$ 为30次冻融循环后的残余抗裂性能; $x_1$ 为归一化后的弯拉强度,取值0~1; $x_2$ 为归一化后的疲劳寿命,取值0~1; $x_3$ 为归一化后的动态模量,取值0~1。

拟合得到沥青混合料冻融循环后残余抗裂性能的温度等效拟合平面方程及拟合云图(见图5)。从图中可以看出,在冻结温度和融化

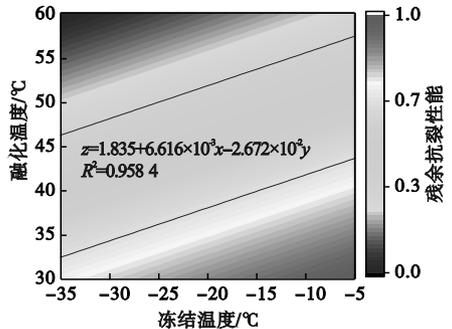


图5 冻融循环30次后残余抗裂性能的温度等效拟合方程及拟合云图

Fig. 5 Temperature equivalent fitting equation and fitting diagram of residual crack resistance after 30 freeze-thaw cycling

温度组合条件下,冻融损伤程度在冻结温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、融化温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最小,残余抗裂性能最大。冻融损伤程度在冻结温度为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、融化温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最大,抗裂性能残余最。基于残余抗裂性能云图,将冻融循环温度划为三个分区。

### 3 结 论

(1)在冻结温度 $-35\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和融化温度 $30\sim60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试验条件下,冻融循环会严重损害沥青混合料的低温抗裂性能,且越高的融化温度和越低的冻结温度将导致越严重的性能衰退。与此同时,由于融化温度变化导致的孔隙冰膨胀力增加和沥青温度老化作用加剧,沥青混合料的低温抗裂性能的衰变对融化温度的变化更加敏感。然而,对于更广泛范围的冻融温度仍需要进一步讨论。

(2)通过对冻融循环 $0\sim30$ 次过程中沥青混合料低温抗裂性能的衰变特征进行分析可以得出,冻融循环对抗裂性能的影响主要分为两个阶段,即快速劣化阶段(冻融循环 $0\sim5$ 次)和缓慢劣化阶段(冻融循环 $5\sim30$ 次)。然而由于试验中并未涉及车辆荷载和冻融循环的耦合作用,其衰变特征有待进一步的研究。

(3)在有限次数(30次)冻融循环下,冻融参数(融化温度和冻结温度)对沥青混合料的低温抗裂性能具有一定的等效作用。基于其云图分布特征,建立了简化的等效拟合方程和拓展的拟合云图,为后续进行沥青混合料长期冻融循环研究和荷载-冻融耦合研究提供了基础。

(4)综合考虑弯拉强度、疲劳寿命和动态模量,提出了无量纲化的残余抗裂性能,并建立温度等效平面方程及拟合云图,初步将沥青混合料的冻融损伤程度分为三级,为我国不同地区的沥青路面设计、养护、寿命评估和冻融损伤评估提供了依据。

### 参考文献

- [1] 陈维斌. 季冻大温差地区长寿命沥青路面疲劳损伤特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2022.  
(CHEN Weibin. Research on fatigue damage characteristics of long-life asphalt pavement in seasonally frozen regions with large temperature difference [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.)
- [2] 李润状,朱宇杰. 东北季冻区橡胶复合改性沥青适用性对比分析[J]. 公路, 2020, 65(6): 241-245.  
(LI Runzhuang, ZHU Yujie. Comparative analysis on the applicability of rubber composite modified asphalt in the seasonal frozen areas of northeast China [J]. Highway, 2020, 65(6): 241-245.)
- [3] 陈振超. 季冻区橡胶沥青及混合料的路用性能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2015.  
(CHEN Zhenchao. Research on road performance of rubber asphalt and mixture in seasonally frozen region [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.)
- [4] 李丹丹,郑传峰. 环境因素作用下季冻区沥青混合料早期性能衰减定量评价[J]. 公路, 2017, 62(11): 9-13.  
(LI Dandan, ZHENG Chuangfeng. Quantitative evaluation of early performance attenuation of asphalt mixtures in seasonally frozen areas under the influence of environmental factors [J]. Highway, 2017, 62(11): 9-13.)
- [5] 谭巍,禚炜安. 沥青混合料抗滑性能衰减规律试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 53-57.  
(TAN Wei, XUAN Weian. Attenuation regularity of skid resistance of asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2015, 34(6): 53-57.)
- [6] 田鹏. 季冻区吉草高速公路工程地质环境与沥青混合料适用性研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.  
(TIAN Peng. Study on the Engineering geological environment and asphalt practicality of Jicao expressway in seasonal frozen area [D]. Changchun: Jilin University, 2018.)
- [7] 交通运输部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京:人民交通出版社, 2011.  
(Institute of Highway Science in the Ministry of Communications. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2011.)
- [8] 侯曙光,王宏畅,黄晓明,等. 低温地区沥青混合料冻融疲劳特性分析[J]. 公路交通科技, 2006(4): 7-10.

- (HOU Shuguang, WANG Hongchang, HUANG Xiaoming, et al. Analysis of freeze-thaw fatigue performance for asphalt mixture in low temperature zone [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2006 (4): 7 - 10.)
- [9] 李兆生, 谭忆秋, 吴思刚, 等. 冻融循环对沥青混合料力学性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3): 378 - 382.  
(LI Zhaosheng, TAN Yiqiu, WU Sigang, et al. The effects of the freeze-thaw cycle on the mechanical properties of the asphalt mixture [J] Journal of Harbin engineering university, 2014, 35(3): 378 - 382.)
- [10] FENG D, YI J, WANG D, et al. Impact of salt and freeze-thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China [J]. Cold regions science and technology, 2010, 62(1): 34 - 41.
- [11] 李震. 盐冻循环对沥青混合料性能的影响[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2016.  
(LI Zhen. Performance effect of asphalt mixture under salt freeze-thaw cycles [D]. Inner Mongolia; Inner Mongolia University of Technology, 2016.)
- [12] 杨大田, 朱洪洲. 沥青混合料的半圆弯拉与小梁三点弯拉对比试验[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(6): 1224 - 1226.  
(YANG Datian, ZHU Hongzhou. Contrast test of semi-circular bending to small beam three-point bending for HMA [J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2010, 34(6): 1224 - 1226.)
- [13] WANG J, QIN Y, XU J, et al. Crack resistance investigation of mixtures with reclaimed SBS modified asphalt pavement using the SCB and DSCT tests [J]. Construction and building materials, 2020, 265: 120365.
- [14] JAHANBAKHS H, HOSSEINI P, NEJAD F M, et al. Intermediate temperature fracture resistance evaluation of cement emulsified asphalt mortar [J]. Construction and building materials, 2019, 197: 1 - 11.
- [15] 交通运输部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
(Institute of Highway Science in the Ministry of Communications. The methods of aggregate for highway engineering: JTG E42—2005 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2005.)
- [16] 交通运输部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
(Institute of Highway Science in the Ministry of Communications. Technical specification for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2004.)
- [17] VALI G. Ice nucleation—a review [C]// Nucleation and atmospheric aerosols 1996. Finland: Pergamon, 1996.
- [18] HELLMUTH O, SCHMELZER J W P, FEISTEL R. Ice-crystal nucleation in water; thermodynamic driving force and surface tension. part i; theoretical foundation [J]. Entropy, 2019, 22(1): 50.
- [19] JOULE J P. On the mechanical equivalent of heat [J]. Philosophical transactions of the royal society of London, 1850(140): 61 - 82.
- [20] 王加辉. 环北极多年冻土热力特性与采油井热融沉陷机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
(WANG Jiahui. Thermal and mechanical properties of circum-arctic permafrost and mechanisms for thaw subsidence of ambient soils of oil well [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [21] 冷玉鹏. 寒区平原水库冰温度膨胀力室内模拟与影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.  
(LENG Yupeng. Laboratory simulation and influence factors of ice temperature expansion force of plain reservoir in cold region [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.)
- [22] JIANG W, BAO R, LU H, et al. Analysis of rheological properties and aging mechanism of bitumen after short-term and long-term aging [J]. Construction and building materials, 2021, 273: 121777.
- [23] 余地. 冻融循环作用下玄武岩纤维沥青混合料性能衰变特性及机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
(YU Di. Research on performance decay characteristics and mechanism of basalt fiber-modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles [D]. Changchun: Jilin University, 2019.)
- [24] 贾晓东, 梁乃兴, 赵毅, 等. 水-温-荷载耦合作用下沥青路面疲劳寿命预估[J]. 公路, 2019, 64(11): 192 - 198.  
(JIA Xiaodong, LIANG Naixing, ZHAO Yi, et al. Prediction of fatigue life of asphalt pavement under water-temperature-load coupling effect [J]. Highway, 2019, 64(11): 192 - 198.)  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)