基于 Weibull-熵权法的沥青混合料水冻融损伤演化规律分析

廖松洋[1, 2]，李香玲[3]，董雨明[1, 2*]，邢鹏[2]，吴玉林[4]，陈相[2]
（1. 中交基础设施养护集团有限公司，北京 100010；2. 中交路桥检测养护有限公司，北京 101300；3. 内蒙古自治区交通运输事业发展中心，内蒙古 呼和浩特 010000；4. 青海省高速公路养护服务有限公司，青海 西宁 810000）

摘要： 为研究水冻融循环作用下沥青混合料抗裂性能的损伤演化规律，本文设计了有水与无水两种冻融环境，对 AC-13C 沥青混合料半圆弯曲试件分别进行 0、5、10、15、20、25 次冻融循环，通过半圆弯曲试验获取断裂能 G_f、抗裂指数 CRI 和断裂韧性指数 FTI 三项抗裂指标，采用 Weibull 分布模型分析单指标的损伤演化特征，并基于熵权法构建综合损伤指数。结果表明：水冻融环境对沥青混合料抗裂性能的劣化具有显著加速效应。水环境损伤加速系数 F_{WDA} 排序为 CRI＞G_f＞FTI。基于累积损伤演化曲线分析，水冻融环境下三指标的损伤度分布于 0.30~0.47 之间，无水环境下分布于 0.06~0.29 之间。基于熵权法构建的综合损伤指数显示，水冻融环境下 CRI 的权重达 52.5%，较无水环境提高 86.2%，25 次循环后水冻融综合损伤指数为无水冻融的 1.34 倍，表明水的存在使沥青混合料综合抗裂损伤程度提高了 34%。综合损伤指数通过多指标加权融合有效整合了水冻融损伤信息，为水冻融环境下沥青路面抗裂性能的定量评估提供了参考。

关键词： 道路工程；沥青混合料；冻融循环；半圆弯曲试验；Weibull 分布；熵权法
中图分类号： U416.217 **文献标识码：** X

Damage Evolution of Asphalt Mixture under Water Freeze- Thaw Cycles Based on Weibull Distribution and Entropy Weight Method

Liao Songyang[1, 2], Li Xiangling[3*], Dong Yuming[1, 2], Xing Peng[2], Wu Yulin[4], Chen Xiang[2]
(1. CCCC Infrastructure Maintenance Group Co., Ltd., Beijing, Beijing 100010, China; 2. CCCC Road & Bridge Inspection and Maintenance Co., Ltd., Beijing, Beijing 101300, China;3. Transportation Development Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China; 4. Qinghai Expressway Maintenance Service Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: To investigate the damage evolution of cracking resistance in asphalt mixtures subjected to water-freeze-thaw cycles, this study designed two freeze-thaw environments: with water and without water. Semi-circular bending specimens of AC-13C asphalt mixture were subjected to 0, 5, 10, 15, 20, and 25 freeze-thaw cycles. Three cracking resistance indices—fracture energy (Gf), crack resistance index (CRI), and fracture toughness index (FTI)—were obtained through semi-circular bending tests. The Weibull distribution model was employed to analyze the damage evolution characteristics of individual indices, and the entropy weight method was used to construct a comprehensive damage index (IDI). The results indicate that the water-freeze-thaw environment

收稿日期： 2026-06-26 **修回日期：** 2026-10-08
基金项目： 国家重点研发项目（编号：2022YFB2602600）；西藏科技厅重大课题（编号：XZ202402ZD0008）；国家材料服役安全科学中心开放课题基金（编号：MSAF-2025-114）
作者简介： 廖松洋，男，硕士，工程师. E-mail：728651498@qq.com
***通信作者：** 董雨明，男，博士，教授级高工. E-mail：12217952@qq.com

significantly accelerates the degradation of cracking resistance in asphalt mixtures. The water damage acceleration factor (FWDA) ranked as CRI >Gf> FTI, with all indices exceeding 1.0. Based on the cumulative damage evolution curves, the damage degrees of the three indices under water-freeze-thaw conditions ranged from 0.30 to 0.47, compared to 0.06 to 0.29 under dry-freeze-thaw conditions. The IDI, constructed via the entropy weight method, showed that the weight of CRI reached 52.5% under water-freeze-thaw conditions, representing an increase of 86.2% over the dry environment. After 25 cycles, the IDI under water-freeze-thaw conditions was 1.34 times that under dry-freeze-thaw conditions. The comprehensive damage index effectively synthesizes multi-indicator damage information through weighted integration, providing a reference for quantitative evaluation of cracking resistance in asphalt pavements subjected to water-freeze-thaw environments.

Keywords:road engineering; asphalt mixture; freeze-thaw cycle; semi-circular bending test; Weibull distribution; entropy weight method

0　引　言

沥青路面裂缝是困扰道路工程领域最为普遍的病害形式之一，裂缝类病害占路面总病害面积的比例通常介于 50%至 95%之间[1-2]。在新疆、西藏等大温差地区，由于极端气候条件的叠加效应，裂缝病害往往更为严重。裂缝的生成机理可归结为两个方面：其一，低温环境下沥青混合料的应力松弛能力显著降低，路用结构内部累积的温度应力一旦超越材料自身的极限抗拉强度，便引发大量横向温缩裂缝；其二，路表水经由既有裂缝渗入路面结构内部，在持续低温与反复冻融的协同作用下，加速了裂纹的扩展与结构整体性能的退化，显著缩短了沥青路面的服役寿命。值得注意的是，该地区内部不同区域的裂缝发育程度亦存在显著差异。以新疆为例，干旱少雨的哈密、吐鲁番等地区年降水量仅约 16 mm，蒸发量高达 2 845 mm，路面裂缝以温缩裂缝为主，裂缝间距较小但宽度相对均匀；而降水相对较多的北疆伊犁、塔城等地区年降水量可达 417.6 mm，春季升温快、昼夜温差大，昼融夜冻频繁，路面裂缝往往伴随更为严重的边角剥落和网状裂缝，发展速率更快[3-5]。两类区域在水分供给条件上的根本差异，暗示水分在冻融过程中的参与程度可能是影响裂缝形态与发展速率的关键因素。

冻融循环作用被公认为寒区交通基础设施长期服役过程中最具威胁性的环境因素之一[6-8]。围绕冻融环境下沥青混合料性能演化这一课题，国内外学者已开展了大量研究工作。早期研究主要关注冻融循环对材料体积特性与基本力学指标的影响。潘宝峰等[9]通过试验研究了冻融循环次数对沥青混合料空隙率的影响规律。在此基础上，部分学者将研究重心转向冻融作用下的力学性能响应。司伟和张洪刚等[10-12]采用间接拉伸试验，分析了冻融循环对沥青混合料弯拉特性的影响，并建立了拉弯性能损失率模型。随着研究的深入，学者们开始关注冻融对疲劳性能的劣化效应。谭忆秋等[13-14]系统分析了冻融作用下沥青混凝土高温性能、动态模量及疲劳性能的变化规律，提出了冻融损伤演化模型与寿命预估方法。侯曙光等[15]对比了冻融前后沥青混合料的疲劳性能，指出冻融循环对疲劳寿命具有显著的削减作用。

值得注意的是，现有研究在以下方面仍存在明显不足。第一，已有工作大多集中于冻融循环对沥青混合料体积参数、抗压强度及劈裂强度等基础指标的影响[15-17]，而对冻融条件下材料抗裂性能的系统研究相对匮乏。第二，现有研究中冻融循环多指“低温暴露”过程，而忽略了水分在冻融过程中的实际参与——即水冻融循环（试件浸水状态下进行冻融）与无水冻融循环（干燥状态下进行冻融）之间的本质差异。实际上，水分在冻融过程中扮演着远比“低温”更为复杂的角色：水结冰时的体积膨胀效应会在材料内部产生额外的冻胀应力，而冰融过程中水分的迁移与重新分布则进一步加剧了材料内部微观结构的不均匀劣化。然而，针对水-温耦合冻融循环作用下沥青混合料断裂能与断裂强度的研究仍鲜见报道。

鉴于此，本文基于大温差地区典型气候特征，以 AC-13C 沥青混合料为研究对象，设计水冻融与无水冻融两种环境，开展 0~25 次冻融循环后的半圆弯曲（SCB）试验，获取断裂能 Gf 、抗裂指数

CRI 和断裂韧性指数 FTI 三项抗裂评价指标。采用 Weibull 分布模型分析单指标在冻融作用下的损伤演化特征，通过形状参数 m 与水环境损伤加速系数 FWDA 定量表征水分对损伤形态与退化速率的影响。在此基础上，引入熵权法构建综合损伤指数（IDI），实现多指标损伤信息的客观融合，为水冻融环境下沥青路面抗裂性能的定量评估提供理论依据与试验支撑。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

本次试验采用 70#基质沥青，主要性能指标如表 1 所示，矿料均采用玄武岩碎石，主要性能指标如表 2 所示，级配组成接近《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40—2004）推荐的 AC-13C 中值，关键筛孔通过率 34.9，最佳油石比 4.8%，级配曲线如图 1 所示。

表 1　70#基质沥青基础性能

Table 1　Basic properties of 70# base asphalt

基本指标	试验结果	技术要求	试验方法
100g，5s，25℃的针入度/（0.1mm）	71	60~80	JTJ T0604
5cm/min，15℃的延度/cm	112	≥100	JTJ T0605
软化点/℃	47.2	≥45	JTJ T0606
车辙因子（G*sinσ，64℃）/kPa	2.89	—	AASHTO T315

表 2　集料力学指标

Table 2　Mechanical indices of aggregate

集料试验/mm	洛杉矶磨耗损失/%	表观相对密度/（g • cm^{-3}）	吸水率/%	针片状颗粒含量/%
10~15	14.2	2.671	0.31	5
5~10	16.6	2.668	0.35	7
3~5	19.5	2.682	0.77	—
0~3	—	2.675	—	—

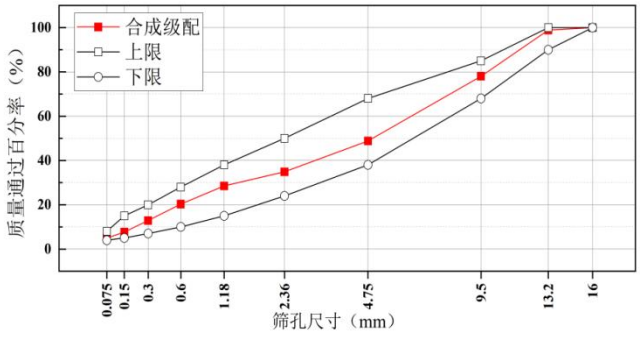


图 1　矿料级配曲线图

Figure 1　Aggregate gradation curve

1.2 试件制备

根据 AASHTO T 312 规范采用旋转压实试验方法成型 AC-13C 试件，压实参数参照 AASHTO T 312 确定，试件直径为 100±1 mm，高度为 160~165 mm，保证沥青混合料空隙率为 4.0±0.5%，试件切割方案如图 2 所示，切割出 4 个直径为 100±1 mm、厚度为 50±1 mm 的半圆试件，沿每个半圆形样品的对称轴切出一个凹槽，深度为 15±1 mm，宽度为 1.5±0.1 mm。SCB 试验加载及数据处理方法参照 AASHTO TP 105-13 标准执行。

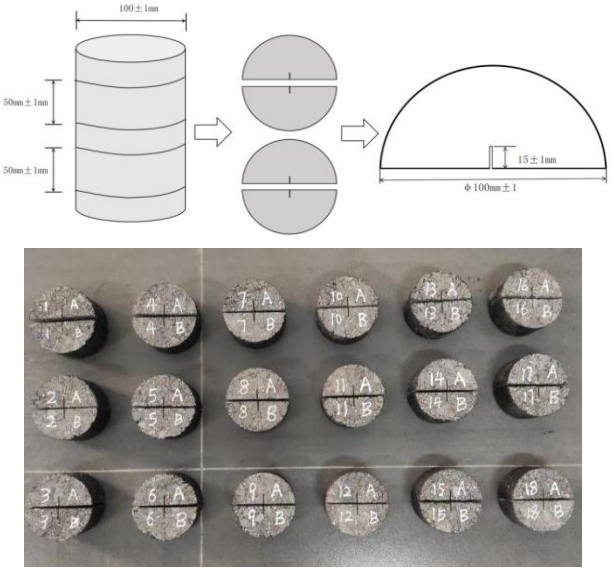


图 2　半圆弯曲试件及切割示意图

Figure 2　Semi-circular bending specimen and cutting schematic

1.3 试验方法

1.3.1 冻融循环试验

为区分水分对冻融损伤的独立贡献，本试验设置水冻融与无水冻融两组平行对照。其中，“水冻融”指试件在浸水饱和状态下进行的冻融循环，“无

水冻融”指试件在干燥状态下进行的冻融循环——后者作为基准对照组，用于分离纯低温效应与水-温耦合效应，使水分对冻融损伤的加速效应可被定量表征。

将一半预设裂缝的半圆形试件放入水冻融环境桶中，注水浸没；将另一半试件放入无水冻融环境桶中。将所有环境桶口封闭以防止水汽交换后，一并放入冻融箱中进行冻融循环，如图 3 所示。冻融方案如表 3 所示，分别进行 5、10、15、20 和 25 次冻融循环，每个循环次数下进行 4 次平行试验。

冻融循环温度设置为−25℃~25℃，温差 50℃，单次循环持续 8h，其中冷冻阶段与融化阶段各 4h。该温度制度依据新疆大温差地区的气候分区特征确定：水冻融工况对应 3-2-2 区（夏凉冬寒湿润区），模拟春季昼夜正负温交替、水分参与充分的冻融条件；无水冻融工况对应 1-3-4 区（夏炎热冬冷干旱区），模拟水分匮乏条件下纯低温热应力主导的冻融损伤。

表 3　试件循环次数

Table 3　Number of freeze-thaw cycles for specimens

试验类型	冻融循环次数（次）					
水冻融循环	0	5	10	15	20	25
无水冻融循环		5	10	15	20	25

1.3.2 半圆弯曲试验

将到达目标冻融次数的试件取出，在 5℃环境箱中保温 2 h 以后，进行半圆弯曲试验。根据 AASHTO TP 105 规范中半圆弯曲试验方法，采用万能试验机进行加载。试验荷载的接触力设置为 0.1 ±0.01 kN，荷载达到峰值后并降至 0.1 kN 以下，停止试验。记录试件加载过程中的荷载位移数据，并绘制荷载位移曲线。

1.4 断裂性能评价指标

传统的试验方法都是采用应力-应变准则评价沥青混合料的抗裂性能，但应力判据仅考虑了面层自身的收缩特性和黏弹力学行为，存在较大局限。沥青混合料在低温时可视为弹性材料，应力作功并产生能量，能量耗散或转化的过程中，弹性应变能将转化为表面能，路面便会产生开裂。因此，沥青混合料弹性应变能储量可作为评价低温抗裂性能的指标。目前，基于断裂力学的试验除以断裂能为主要评价指标，还包括以其延伸出的各种指标参数。本文通过荷载位移曲线计算得到沥青混凝土的低温抗裂性能评价指标。

1.4.1 断裂能

断裂能是单位面积裂缝扩展单位长度消耗的能量。断裂能越大，代表沥青混凝土在某一温度下低温抗裂性能越强。然而，一些研究表明断裂能作为单一的断裂指标不能全面反映沥青混凝土的开裂行为[18-20]。断裂能计算方法如式（1）所示：

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \tag{1}$$

式中：W_f—断裂功（J），A_{lig}—韧带区域面积(m^2)，A_{lig}=*(r-a)*×*t*。

1.4.2 抗裂指数

KASEER 等[21]在断裂能的基础上，提出一种评价沥青混合料低温性能的指标：抗裂指数（Crack Resistance Index）。计算公式如（2）所示。

$$CRI = \frac{G_f}{|P_{max}|} \tag{2}$$

该指标用断裂能与峰值荷载的比值作为沥青混合料抗裂评价指标，单位为 mm，可近似看作材料有效开裂距离，该指标能够区分具有相似断裂能但峰值荷载不同的沥青混凝土，反映材料的脆性（相同断裂能的材料，其峰值荷载越大，CRI 越小，材料越“脆”）。

1.4.3 断裂韧性指数

Kim 等[22]等人采用柔性指数（Flexibility Index）进行沥青混凝土抗裂性能评价，计算公式如（3）所示。

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \tag{3}$$

通过断裂能与峰值后荷载-位移曲线曲线拐点处的斜率（m）的比值来反映沥青混凝土裂缝扩展的速率，可以用于识别沥青混凝土早期脆性开裂，但由于峰后曲线难以拟合导致无法确定其拐点，并且拐点斜率 m 值变异性较大，特别是在低温环境下，导致采用柔性指数评价沥青混合料的低温性能时出现不稳定、不准确的情况[22]。本文在柔性指数的基础上，采用峰值力衰变至 75%处的斜率近似值代

替峰后曲线拐点处的斜率值，同时对试件尺寸进行修正，并考虑到开裂位移的大小，提出了一种评价沥青混凝土断裂韧性指数（Fracture Toughness Index），更好地评价沥青混合料断裂韧性，如式（4）所示，

$$FTI = \frac{t}{50} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \left(\frac{l_{75}}{r-a}\right) \quad (4)$$

式（4）中：*FTI* 为开裂韧性指数，无量纲；*t* —半圆试件厚度（mm）；如图 4 所示，m_{75}—为荷载—位移曲线峰值过程峰值力衰变至 75%处的斜率近似值，通过式（5）计算得到；l_{75}—峰值力衰变至 75%处的位移值（mm）；*r*—为试件半径；*a*—切口长度（m）。

$$m_{75} = \frac{P_{80}-P_{70}}{l_{80}-l_{70}} \quad (5)$$

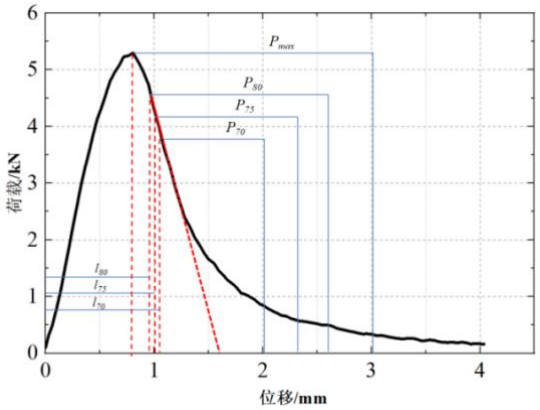


图 3　荷载-位移曲线示意图

Figure 3　Load-displacement curve schematic

1.5 Weibull 累积损伤模型构建

Weibull 分布是描述材料失效过程的统计模型，反映材料性能损伤的非线性特征，其累积分布函数形式为：

$$D_{(N)} = 1 - exp\left[-\left(\frac{N}{\eta}\right)^m\right] \quad (6)$$

式中：$D_{(N)}$ 为冻融 N 次后的损伤度（D=1−f(N)/f(0)）；m 为形状参数（Weibull 模量），表征损伤发展形态；η 为特征寿命（尺度参数），表示损伤累积至 63.2%时的冻融循环次数。

对模型进行双对数线性化处理：

$$ln\left[-ln\left(1-D\right)\right] = m\,ln\,N - m\,ln\,\eta \quad (7)$$

通过线性回归可得斜率 m 和截距（−mln η），进而求得η=exp(−截距/m) 。

m<1 ：早期损伤速率快，后期趋于平缓，表征脆性损伤主导（冻融脆化特征）

m=1 ：损伤速率恒定，退化为指数分布（理想老化状态）

m>1 ：早期损伤缓慢，后期加速，表征疲劳累积主导（荷载疲劳特征）

水环境损伤加速系数 F_{WDA}（Water Damage Acceleration Factor），表示水分介入导致的寿命折减倍数。

$$F_{WDA} = \frac{\eta_{无水冻融}}{\eta_{水冻融}} \quad (8)$$

1.6 熵权法原理与计算步骤

单一指标难以全面表征复杂损伤过程，且各指标对水-温耦合的敏感性存在差异。熵权法基于信息论原理，通过计算指标的信息熵确定客观权重：信息熵越小，指标变异程度越大，蕴含的信息量越丰富，权重越高。

计算步骤如下：

步骤 1：损伤度计算与标准化 对各指标计算损伤度 $D_{ij}=1-f_{ij}/f_{i0}$，构建损伤度矩阵 D。由于不同指标量纲各异，采用归一化处理：

$$p_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} D_{ij}} \quad (9)$$

步骤 2：信息熵计算

$$e_j = -\frac{1}{ln\,n}\sum_{i=1}^{n} p_{ij}\,ln\left(p_{ij}\right) \quad (10)$$

式中：ej 为第 j 个指标的信息熵，n=5 为样本数（N=5，10，15，20，25）。

步骤 3：差异系数与权重确定

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^{m} g_j} \quad (11)$$

式中：g_j为差异系数，w_j为最终权重（$\sum w_j$=1 ）。

步骤 4：综合损伤指数（IDI）计算

$$IDI_i = \sum_{j=1}^{k} w_j \times D_{ij} \quad (12)$$

2　试验结果与分析

2.1 不同冻融次数下沥青混合料的断裂性能分析

通过半圆弯曲试验，得到不同冻融次数（0、5、10、15、20、25 次）有水和无水两种冻融条件下的基本试验结果数据，如表 4、图 4 所示。

表 4　沥青混合料冻融后半圆弯曲试验结果

Table 4　Results of semi-circular bending test on asphalt mixture after freeze-thaw cycling

组别编号	冻融次数	荷载峰值 P_{max}（kN）		峰值位移（mm）	
		无水环境	有水环境	无水环境	有水环境
I	0	5.759	—	0.978	—
II	5	5.627	5.431	0.851	0.886
III	10	5.458	5.223	0.798	0.794
IV	15	5.538	5.125	0.777	0.674
V	20	5.22	4.931	0.702	0.625
VI	25	5.187	4.894	0.679	0.597

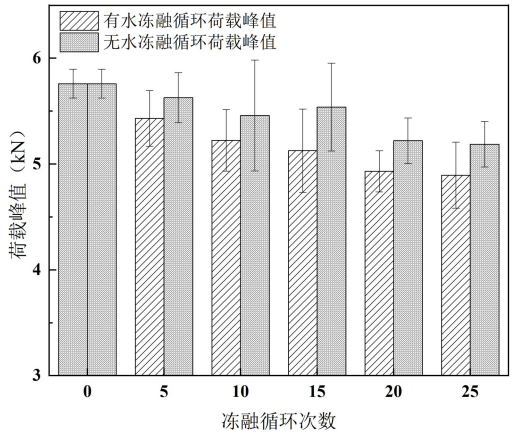


图 4　不同冻融次数下半圆弯曲试验峰值荷载

Figure 4　Peak load of semi-circular bending test under different freeze-thaw cycles

图 4 表明，随着沥青混合料半圆弯曲试验的峰值荷载随着冻融循环次数的增加整体上呈现下降趋势，沥青混合料在水冻融环境下，峰值荷载下降的更快，冻融循环 25 次后，峰值荷载由 5.759 kN 下降到 4.894 kN，下降了 15%，无水冻融循环 25 次后沥青混合料的峰值荷载下降了 9.9%。

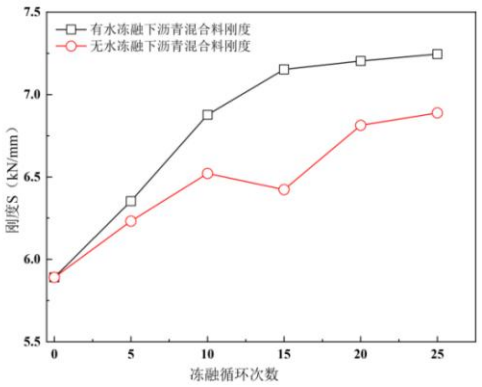


图 5　不同冻融次数下半圆试件刚度

Figure 5　Stiffness of semi-circular specimens under different freeze-thaw cycles

通过峰值荷载与峰值位移的比值计算试件开裂刚度，该值间接反映材料在低温下的脆性特征。刚度越高，材料在低温下越趋于硬脆，受荷时更易发生脆性断裂[23]。如图 5 所示，随着冻融循环次数的增加，沥青混合料的刚度整体呈现上升趋势，水冻融循环的刚度随着冻融循环次数的增长速率明显高于无水环境，在冻融循环 15 次时后，刚度增长了 47.5%，随后刚度的增长速率开始变得平缓，试验结果表明，有水环境下冻融循环对沥青混合料的刚度影响十分显著。

本文通过获取的荷载位移曲线，按照式（1）、（2）和式（4）计算得到断裂能（G_f）、抗裂指数（*CRI*）和断裂韧性指数（*FTI*），计算结果如表 5 所示。

表 5　不同冻融次数下半圆弯曲试验抗裂指标计算结果

Table 5　Calculation results of crack resistance indices from semi-circular bending test under different freeze-thaw cycles

编号	次数	断裂能 G_f（J/m²）		抗裂指数 *CRI*（10^{-3}m）		断裂韧性指数 *FTI*（无量纲）	
		有水	无水	有水	无水	有水	无水
I	0	3704.3	3704.3	643.2	643.2	227.9	227.9
II	5	3408.2	3426.5	627.5	615.9	175.9	204.2
III	10	2751.6	3222.6	526.8	590.4	170.6	179.1
IV	15	2793.9	3285.1	545.2	593.2	130.1	187.2
V	20	2555.5	2998.4	518.3	574.4	135.1	167.6
VI	25	2577.2	3003.8	526.6	579.1	120.5	162.2

沥青混合料在低温时可视为弹性材料，从能量准则的角度进行分析能更好的反映沥青混合料的低温性能抗裂性能。表 5 中，断裂能、抗裂指数以

及断裂韧性指数整体上均随冻融次数呈现负相关。在相同的冻融次数下，在有水环境下沥青混合料冻融后低温抗裂性能指标衰变更为显著。

2.2 基于 Weibull 模型单指标损伤演化分析

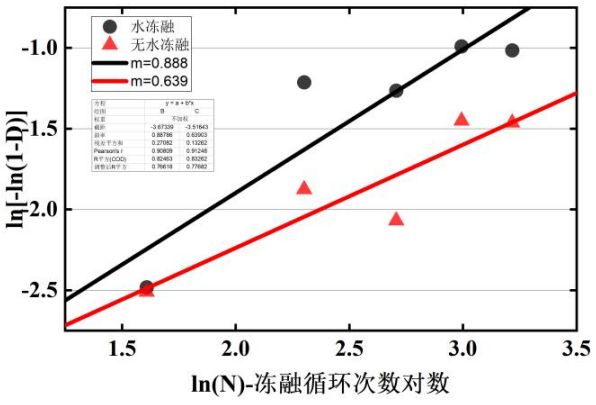
2.2.1 Weibull 模型参数拟合

基于半圆弯曲试验数据，按式（7）对三指标进行双对数线性回归，得到 Weibull 模型参数如表 6 所示。每组 4 个平行试件的样本量符合 AASHTO TP 105-13 标准中 SCB 试验 3～6 个试件的要求；已有研究表明[24,25]，Weibull 分布可有效处理小样本试验数据的随机性和离散性，能够较好地预估小子样条件下材料的失效分布。结果表明，所有工况下模型的判定系数 R^2 基本在 0.8 以上，显著性水平 $p<0.05$，表明 Weibull 模型能有效描述沥青混合料累积损伤演化行为，模型假设在统计学意义上成立。

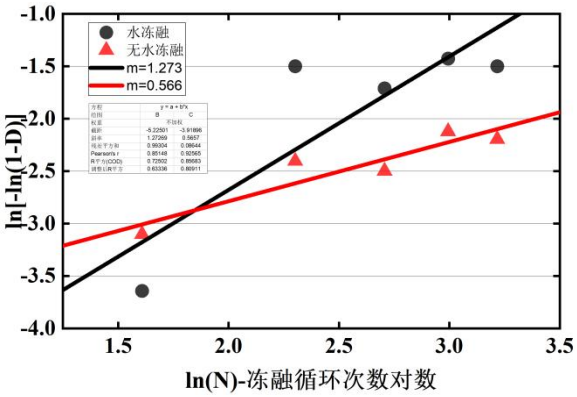
表 6　Weibull 累积损伤模型参数估计结果

Table 6　Parameter estimation results of the Weibull cumulative damage model

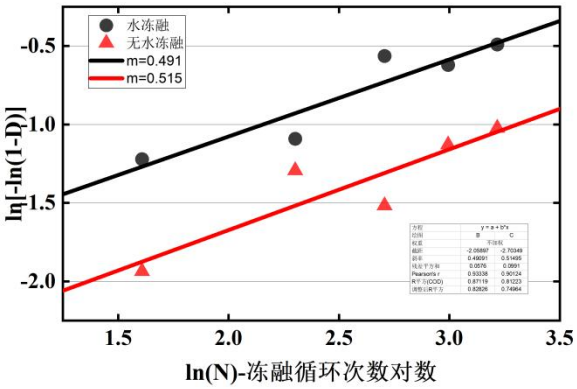
评价指标	冻融工况	形状参数 m	特征寿命η（次）	判定系数 R^2	显著性 p 值	F_{WDA}
G_f	水冻融	0.888	54.2	0.824	0.015	4.49
	无水冻融	0.639	243.2	0.832	0.019	
CRI	水冻融	1.273	60.0	0.725	0.043	16.51
	无水冻融	0.566	990.6	0.857	0.008	
FTI	水冻融	0.491	65.4	0.871	0.024	2.90
	无水冻融	0.515	189.5	0.812	0.015	



（a）断裂能G_f



（b）抗裂指数 CRI



（c）断裂韧性指数 FTI

图 6　累积损伤演化曲线

Figure 6　Cumulative damage evolution curves

由表 6 和图 6 可知，形状参数 m 的分布呈现明显的环境选择性特征。理论上，当 m<1 时，失效率随时间递减，对应“早期快速损伤–后期渐进稳定”的脆性劣化模式；当 m>1 时，失效率递增，反映“早期缓慢演化–后期加速破坏”的疲劳累积损伤特征。在无水冻融环境下，三指标的 m 值介于 0.515 至 0.639 之间，均值仅为 0.573，离散系数为 8.9%。这一高度聚集的统计结果表明，干燥状态下的冻融循环对不同抗裂性能指标施加了形态上高度一致的损伤模式一均以早期突发性劣化为主要特征。

水冻融环境下三指标的 m 值呈现显著分化：CRI 跃升至 1.273，G_f 为 0.888，FTI 为 0.491。从 m 值的变化幅度来看，CRI 较无水环境增加 124.9%，G_f 增加 39.0%，而 FTI 反而下降 4.7%。进一步分析同一指标在两种环境下的 m 值差异（$\Delta m=m_{水}-m_{无水}$）与 F_{WDA} 之间的关系。CRI 的Δm 达 0.707，F_{WDA} 为 16.51；G_f 的Δm 为 0.249，F_{WDA} 为 4.49；FTI 的 Δm 为-0.024，F_{WDA} 为 2.90。两者呈现明显的正相

关趋势，即水分导致 m 值增幅越大的指标，其损伤加速效应也越显著。另外，三指标中 CRI 对 m 值变化的响应最为强烈，这与其指标定义密切相关——CRI 为断裂能与峰值荷载的比值，兼受两者变化的共同影响，而 G_f 与 FTI 分别侧重于断裂能耗散和峰后韧性，对水分的响应机制存在差异。

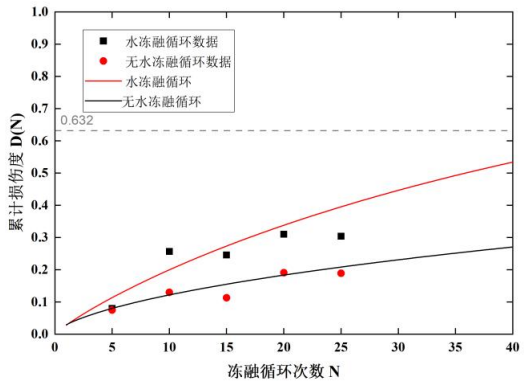
2.2.2 特征寿命与水环境损伤加速效应

特征寿命 η 在 Weibul 模型中反映损伤演化的时间尺度。需指出的是，无水冻融环境下 CRI 的 η 估计值高达 990.6 次，该外推值伴随较大统计不确定性，其意义主要在于通过 F_{WDA} 进行相对比较，而非提供绝对性能标尺。水冻融环境下三指标的 η 值集中于 54.2 至 65.4 次，极差仅 11.2 次，变异系数为 7.64%。这一高度收敛的分布表明，在水冻融环境中，无论以何种抗裂指标度量，材料性能的退化均趋近于统一的时标，反映了水-温耦合作用对沥青混合料性能劣化的主导性。

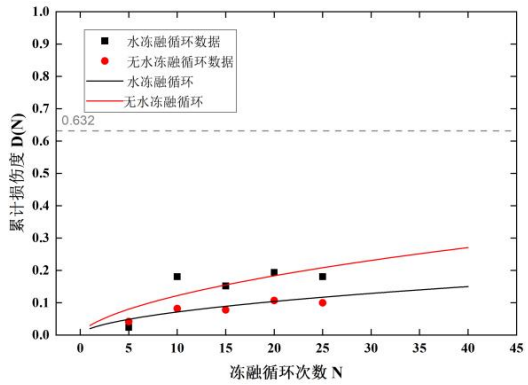
水环境损伤加速系数 F_{WDA} 的排序为 CRI>G_f>FTI，与前述 m 值变化幅度的排序完全一致。结合两者的联合分布可进一步归纳出三项规律：第一，各指标 F_{WDA} 均大于 1.0，表明水分的损伤加速效应是普适性的，不存在对水分“免疫”的抗裂指标；第二，最大与最小 F_{WDA} 之间的倍差达 5.7 倍，表明同一水冻融环境对不同抗裂指标的作用强度存在显著差异，以单一指标评价水冻融损伤可能产生偏差；第三，FTI 的 F_{WDA} 虽为三者最低，但其水冻融环境下的 η 值与 CRI 和 G 处于同一量级，说明即便对水分相对不敏感的指标，其在水冻融环境下的退化速率仍远远快于干燥状态。

2.2.3 累积损伤演化曲线对比分析

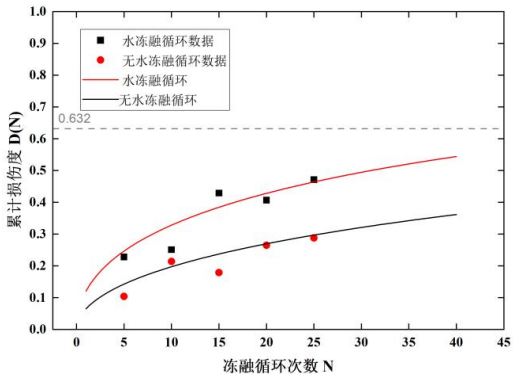
基于 Weibull 参数绘制累积损伤度 D(N)演化曲线如图 7 所示。



（a）断裂能G_f



（b）抗裂指数 CRI



（c）断裂韧性指数 FTI

图 7　累积损伤度曲线

Figure 7　Cumulative damage degree curves

从曲线整体形态来看，水冻融环境下三指标的损伤曲线均呈现明显的非线性上升趋势，经历 25 次循环后损伤度分布于 0.30 至 0.47 之间，且各曲线均未出现平台收敛迹象，表明 25 次循环尚未使材料进入损伤饱和阶段，后续冻融循环中性能仍将持续退化。无水冻融环境下，损伤曲线整体趋于平缓，相同循环次数下损伤度分布于 0.06 至 0.29 之间，曲线尾部呈现不同程度的收敛趋势，反映干燥状态下材料的损伤累积在经历早期释放后逐渐趋于稳定。

在损伤程度上，水分使所有指标的累积损伤度较干燥状态提高约 0.1 至 0.2，其中 CRI 的提升幅度最大，从干燥冻融状态的最低值跃升至水冻融状态的中位值。在损伤演化形态上，CRI 的曲线形态受水分影响最为显著——由近似线性演变为明显上凸的加速形态，而 G_f 与 FTI 的曲线形态在两种环境间则保持了较好的相似性。两组对比共同指向同一结论：在水分与冻融的耦合作用下，沥青混合料抗裂性能不仅其衰减速率被大幅加速，其损伤的时程分布也发生了根本改变。

2.3 基于熵权法的综合抗裂损伤指数（IDI）构建

单一评价指标难以全面表征水-温耦合作用下的复杂损伤过程，且各指标对冻融环境的敏感性存在显著差异。为客观量化多指标协同损伤效应，引入信息熵理论构建综合损伤指数（Integrated Damage Index， IDI）。熵权法基于指标变异程度确定客观权重，信息熵越小表明指标变异越大、蕴含信息量越丰富，相应权重越高。IDI 值越大，表示冻融循环对沥青混合料造成的综合损伤越严重。通过该指数可实现对多指标损伤信息的有效融合，为沥青路面抗裂性能的定量评估提供依据。

2.3.1 各指标损伤度计算与信息熵分析

依据式（9）~式（11），对不同冻融环境下各抗裂性能评价指标的损伤度进行熵权法计算，结果如表 7 所示。

表 7 熵权法计算结果

Table 7　Calculation results of the entropy weight method

冻融工况	评价指标	信息熵 e	差异系数 g	权重 w
水冻融	G_f	0.953	0.047	0.311
	CRI	0.921	0.079	0.525
	FTI	0.975	0.025	0.164
无水冻融	G_f	0.967	0.033	0.362
	CRI	0.974	0.026	0.282
	FTI	0.967	0.033	0.356

表 7 显示，水冻融环境下 CRI 的权重达 52.5%，而 FTI 仅为 16.4%，前者为后者的 3.2 倍；无水冻融环境下三指标权重分布趋于均衡，G_f 与 FTI 相当，CRI 略低。CRI 的权重在有/无水环境间的差异达 86.2%，为三指标中变化幅度最大者，表明水冻融环境显著放大了 CRI 所承载的损伤信息量。与此相对，G_f 的权重变异率仅为 16.4%，在不同环境中保持了相对稳定的信息贡献。由于 CRI、G_f 与 FTI 分别从断裂能耗散、峰值荷载修正和峰后韧性衰减等不同角度描述沥青混合料的抗裂性能，三者权重在两种环境下的重新分配，反映了水冻融作用对不同抗裂性能维度的差异化影响，也说明了采用多指标加权融合的方法能够更全面地捕捉水冻融损伤信息，有效弥补单一指标表征的局限性。

2.3.2 综合损伤指数（IDI）构建与验证

基于熵权的 IDI 计算公式（12）得到计算结果如表 8 所示，

表 8 综合损伤指数 IDI 计算结果

Table 8　Calculation results of the comprehensive damage index IDI

N	$IDI_{水冻融}$	$IDI_{无水冻融}$
5	0.075	0.076
10	0.216	0.146
15	0.227	0.126
20	0.265	0.193
25	0.267	0.199

由表 8 可知，两种环境下的综合损伤指数均随冻融循环次数的增加而增长。水冻融环境下 IDI 从 5 次循环时的 0.075 增至 25 次循环时的 0.267，无水冻融环境下 IDI 从 0.076 增至 0.199。前 5 次循环时两者几乎相等，此后水冻融环境下的 IDI 持续高于无水冻融环境，25 次循环时水冻融 IDI 为无水冻融的 1.34 倍，即水分的介入使沥青混合料的综合抗裂损伤程度较干燥状态提高 34%。

作为对比，25 次冻融循环后各单指标损伤度的水/无水比值分别为：Gf 为 1.26，CRI 为 1.81，FTI 为 1.64，极差达 0.55。而 IDI 的水/无水比值为 1.34，处于各单指标比值之间。IDI 通过加权融合三项单指标信息，有效避免了因指标选择差异导致评价结论波动的问题，为水冻融环境下沥青混合料抗裂性能劣化程度的综合评价提供了更为稳定的量化指标。

3　结论

本文通过半圆弯曲试验，研究了水冻融与无水冻融两种环境下沥青混合料抗裂性能的演化规律，基于 Weibull 分布模型分析了单指标的损伤形态与损伤加速效应，并引入熵权法构建了综合损伤指数。主要结论如下：

（1）水冻融环境对沥青混合料抗裂性能具有显著加速劣化效应。25 次循环后峰值荷载下降 15.0%，无水环境下降 9.9%。水环境损伤加速系数 F_{WDA} 的排序为 CRI＞G_f＞FTI，CRI 的 Weibull 形状参数 m 由 0.566 升至 1.273，表明水分的介入使 CRI 所表征的损伤模式由早期脆性劣化转变为加速累积破坏。

（2）基于累积损伤演化曲线分析，水冻融环境下三指标的损伤曲线均呈非线性上升，25 次循环后损伤度分布于 0.30~0.47 之间，各曲线均未出现明显的平缓趋势。无水冻融环境下损伤曲线整体趋于平缓，相同循环次数下损伤度分布于 0.06~0.29 之间，曲线尾部呈现不同程度的收敛趋势。CRI 的曲线形态受水分影响最为显著，由近似线性演变为加速上升形态。

（3）基于熵权法构建的综合损伤指数 IDI 实现了三个抗裂指标的信息融合。水冻融环境下 CRI 的权重为 52.5%，较无水环境提高 86.2%，反映水冻融作用显著放大了 CRI 所承载的损伤信息量。25 次循环后水冻融 IDI 为无水冻融的 1.34 倍，IDI 的水/无水比值介于三个单指标比值之间，有效避免了因指标选择差异导致的评价结论波动。

参考文献：

[1]雷超旭，王端宜．基于统计学原理的沥青混凝土路面病害分布规律研究[J]．公路，2009，(07)：359-363.

Lei Chaoxu, Wang Duanyi. Research on distribution law of asphalt concrete pavement distress based on statistical principles[J]. Highway, 2009, (07): 359-363.

[2]魏进，王晓谋，陈渊召．高等级公路沥青路面裂缝病害原因分析与养护技术[J]．筑路机械与施工机械化，2007，(08)：1-4.

Wei Jin, Wang Xiaomou, Chen Yuanzhao. Cause analysis and maintenance technology of crack distress on high-grade highway asphalt pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, (08): 1-4.

[3] 宋云连,高盼,蒋宇.盐冻条件下沥青混合料低温性能研究[J].中外公路,2023,43 (4):230-235.

Song Y.L., Gao P., Jiang Y. Study on low-temperature performance of asphalt mixtures under salt-freezing conditions. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 230–235.

[4]朱厚江，杨三强，李岩岩．新疆绿洲、荒漠区气候对沥青路面裂缝影响分析[J]．中外公路，2017，37 (01)：46-48.

Zhu Houjiang, Yang Sanqiang, Li Yanyan. Analysis of climate impact on asphalt pavement cracks in oasis and desert areas of Xinjiang[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (01): 46-48.

[5]多吉罗布．西藏地区沥青路面裂缝类病害特征研究[J]．筑路机械与施工机械化，2017，34 (03)：91-94.

Duojiluo Bu. Study on characteristics of crack distress of asphalt pavement in Tibet region[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017, 34 (03): 91-94.

[6]Wang N ,Zhang H ,Xiong H . Microstructure and mechanical behavior of asphalt mixture based on freeze-thaw cycle [J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2021, 17 (4): 760-774.

[7]Fan Z ,Xu H ,Xiao J , et al. Effects of freeze-thaw cycles on fatigue performance of asphalt mixture and development of fatigue-freeze-thaw (FFT) uniform equation [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242 118043-118043.

[8]吕松涛,陈淇,鲁巍巍,赵霈,王金平.沥青混合料低温半圆弯曲试验评价指标研究[J].中外公路,2025,45 (3):25-36.

Lyu S.T., Chen Q., Lu W.W., Zhao P., Wang J.P. Research on evaluation indexes for low-temperature semi-circular bending test of asphalt mixtures. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(3): 25–36.

[9]潘宝峰,王哲人,陈静云．沥青混合料抗冻融循环性能的试验研究[J]．中国公路学报，2003，(02)：2-5.

Pan Baofeng, Wang Zheren, Chen Jingyun. Experimental study on freeze-thaw cycle resistance of asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, (02): 2-5.

[10]李宁，司伟，马骉，周雪艳，田宇翔．冻融循环对高寒地区沥青混合料弯拉性能的影响[J]．江苏大学学报(自然科学版)，2015，36 (05)：610-614.

Li Ning, Si Wei, Ma Biao, Zhou Xueyan, Tian Yuxiang. Effect of freeze-thaw cycles on bending tensile performance of asphalt mixture in alpine region[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2015, 36 (05): 610-614.

[11]司伟，马骉，汪海年，虎见．沥青混合料在冻融循环作用下的弯拉特性[J]．吉林大学学报(工学版)，2013，43 (04)：885-890.

Si Wei, Ma Biao, Wang Hainian, Hu Jian. Bending tensile characteristics of asphalt mixture under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43 (04): 885-890.

[12]张洪刚, 黄慧, 钱国平. 反复冻融条件下沥青混合料的间接拉伸试验研究[J]. 公路, 2012, (04): 185-188.
Zhang Honggang, Huang Hui, Qian Guoping. Experimental study on indirect tensile test of asphalt mixture under repeated freeze-thaw conditions[J]. Highway, 2012, (04): 185-188.
[13]李兆生, 谭忆秋, 吴思刚, 杨福祺. 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 (03): 378-382.
Li Zhaosheng, Tan Yiqiu, Wu Sigang, Yang Fuqi. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties of asphalt mixture[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35 (03): 378-382.
[14]谭忆秋, 赵立东, 蓝碧武, 孟良. 沥青混合料冻融损伤模型及寿命预估研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28 (06): 1-7+31.
Tan Yiqiu, Zhao Lidong, Lan Biwu, Meng Liang. Study on freeze-thaw damage model and life prediction of asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (06): 1-7+31.
[15]侯曙光, 王宏畅, 黄晓明, 李志栋. 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, (04): 7-10.
Hou Shuguang, Wang Hongchang, Huang Xiaoming, Li Zhidong. Analysis of freeze-thaw fatigue characteristics of asphalt mixture in low-temperature regions[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, (04): 7-10.
[16]范卫红. 冻融循环条件下沥青混合料性能衰变规律研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13 (01): 67-69.
Fan Weihong. Study on performance deterioration law of asphalt mixture under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2017, 13 (01): 67-69.
[17]Hong Yu Xu, Song Yang Dang, De Yong Cui. Durability Test Research of Asphalt Mixture with Rubber Particles under the Condition of Freeze-Thaw Cycle[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3149 (919-921): 1096-1099.
[18]郑健龙, 张洪刚, 钱国平, 黄慧. 水温冻融循环条件下沥青混合料性能衰变的规律[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2010, 7 (01): 7-11.
Zheng Jianlong, Zhang Honggang, Qian Guoping, Huang Hui. Law of performance deterioration of asphalt mixture under water-temperature freeze-thaw cycles[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 7 (01): 7-11.
[19]OZER H,AL-QADI I L,LAMBROS J,et al.Development of the fracture-based flexibility index forasphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters[J].Construction andBuilding Materials,2016,115:390−401.
[20]OZER H,AL-QADI I L,SINGHVI P,et al.Fracturecharacterization of asphalt mixtures with high recycledcontent using Illinois semicircular bending test methodand flexibility index[J].Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2016,2575(1):130−137.
[21]KASEER F,YIN Fan,ARÁMBULA-MERCADO E,et al.Development of an index to evaluate the crackingpotential of asphalt mixtures using the semi-circularbending test[J].Construction and Building Materials,2018,167:286−298.
[22]KIM S S,YANG J J,ETHERIDGE R A.Effects of mixdesign variables on flexibility index of asphalt concretemixtures[J].International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(10):1275−1280.
[23]姜鑫龙, 杨树, 李庭予. 基于半圆弯曲试验的沥青混凝土低温性能指标研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (02): 428-434.
Jiang Xinlong, Yang Shu, Li Tingyu. Study on low-temperature performance index of asphalt concrete based on semi-circular bending test[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (02): 428-434.
[24]江照伟, 梁乃兴. 基于 Weibull 分布的沥青混合料疲劳性能分析[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 175-179.
Jiang Zhaowei, Liang Naixing. Fatigue performance analysis of asphalt mixture based on Weibull distribution[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4): 175-179.
[25]张广泰, 刘诗拓, 耿天娇, 等. 基于 Weibull 分布的冻融循环下纤维混凝土损伤模型[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29)
Zhang Guangtai, Liu Shituo, Geng Tianjiao, et al. Damage model of fiber-reinforced concrete under freeze-thaw cycles based on Weibull distribution[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12078-12084.