

文章编号: 1673-5196(2019)02-0143-06

# 冻融循环条件下沥青混合料强度衰减的评价方法

南雪丽<sup>1,2</sup>, 王超杰<sup>1,2</sup>, 杨蓝蓝<sup>1,2</sup>, 韩 博<sup>1,2</sup>  
唐维斌<sup>1,2</sup>, 李晓民<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属现金加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 对沥青混合料在不同冻融循环条件下的破坏机理及其强度衰减评价方法进行研究. 通过比较不同温度、不同频率及不同冻融循环条件下沥青混合料动态模量及其损伤变量的变化规律, 探讨沥青路面冻融破坏机理, 并确定冻融循环条件下其强度衰减的评价方法及指标. 研究结果表明: 当温度在 5~15 °C 之间时, 沥青混合料的动态模量迅速变化, 温度继续升高之后趋于稳定; 比较直接冻融、饱水加载后冻融和加载冻融同时作用 3 种不同冻融循环试验方法, 以加载冻融同时作用的条件最为苛刻; 确定在 25 °C 和 10 Hz 下, 进行 900 N 边加载边冻融试验作为沥青混合料强度衰减评价方法, 损伤变量达到 10% 时作为沥青混合料的损伤破坏评价指标.

**关键词:** 沥青混合料; 冻融循环; 动态模量; 强度衰减

**中图分类号:** TU502; TU57 **文献标志码:** A

## Evaluation method of asphalt mixture strength attenuation under condition of freeze-thaw cycles

NAN Xue-li<sup>1,2</sup>, WANG Chao-jie<sup>1,2</sup>, YANG Lan-lan<sup>1,2</sup>, HAN Bo<sup>1,2</sup>  
TANG Wei-bin<sup>1,2</sup>, LI Xiao-min<sup>3</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 3. Gansu Provincial Communications Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The failure mechanism of asphalt mixture and the evaluation method of its strength attenuation were studied under condition of different freeze-thaw cycle. The damage mechanism of asphalt pavement due to freeze-thaw cycle was explored and the evaluation method and indices of its strength attenuation were determined by comparing the change rule of dynamic modulus and damage variable of asphalt mixture under condition of different temperature, frequency, and freeze-thaw. The investigation result indicated that dynamic modulus of asphalt mixture would change rapidly at first, and then tend to be stable when the temperature increased from 5 to 15 °C. It was found by comparing three kinds of method for freeze-thaw cycle test, i.e. direct freeze-thaw, freeze-thaw cycle after water-saturating, and freeze-thaw accompanied by loading, that the last one would be the most severe. It would be determined that the test method of freeze-thaw accompanied by loading at 25 °C and under 900 N 10 Hz would be taken as the evaluation method of strength degradation of asphalt mixture and the damage variable reaching 10% would be taken as the evaluation index of damage.

**Key words:** asphalt mixture; freeze-thaw cycle; dynamic modulus; strength attenuation

受气候的影响, 中国北方地区沥青路面都经受着不同程度的冻融破坏, 导致路面的使用寿命和服

务质量受到影响, 而且危及交通安全<sup>[1]</sup>. 沥青路面主要材料沥青混合料是一种典型的黏弹性材料, 受温度、行车速度影响及水损害的破坏, 其冻融破坏过程十分复杂. 为研究并控制路面冻融破坏现象, 国内外学者主要从路面结构设计和材料组成方面对其进行

收稿日期: 2018-04-28

作者简介: 南雪丽(1978-), 女, 甘肃定西人, 副教授.

了大量的实践探索,但效果并不明显,沥青路面冻融破坏病害问题依然突出.随着对路面结构行为的深入研究,学者们逐渐认识到必须从路面材料抵抗冻融破坏能力及道路设计方法上进行控制,才能减少冻融破坏发生,即需建立有效合理的沥青路面强度衰减评价方法,据此提出路面材料抵抗冻融破坏能力的评价指标.目前对于沥青混合料冻融破坏的研究,大多从室内试验出发,研究沥青混合料经历冻融循环后的静态参数变化,如郑健龙等<sup>[2]</sup>分析了有水条件下冻融不同次数后沥青混合料的空隙率、抗压强度和冻融劈裂强度的变化,得出在冻融初期(尤其是小于 15 次冻融时)强度衰减速率较快,水稳定性受冻融影响显著;王抒音等<sup>[3]</sup>将空隙率和饱水率作为评价混合料耐久性的指标,得出路面出现水损害的临界空隙率应控制在 7%~8%,饱水率应控制在 55%~80%.李东庆等<sup>[4]</sup>研究发现,在最初的冻融循环中,沥青混合料的劈裂抗拉强度随着冻融次数增加而明显减小,循环 7 次以后,混合料强度趋于稳定.张勤玲等<sup>[5]</sup>研究发现,随着冻融循环次数的增加,再生橡胶颗粒沥青混合料冻融劈裂抗拉强度比呈现下降趋势,孔隙率呈现上升趋势.然而在路面实际使用过程中车辆对路面所施加荷载往往是动态载荷,早期研究中通过静态荷载得到的力学响应很难真实地反映出路面的破坏情况<sup>[6-9]</sup>.为准确分析沥青路面在实际行车荷载作用下的力学响应,有学者引入了动态模量的概念.目前关于冻融循环条件下对沥青混合料的动态模量研究还较少,已往关于动态模量的研究也主要集中在主曲线的拟合上<sup>[10]</sup>.所以,为了准确地评价沥青混合料抵抗冻融破坏的能力,关于沥青混合料的动态模量变化,以及以动态模量为评价参数预估冻融破坏的研究十分必要<sup>[11]</sup>.

本项目针对冻融循环条件下沥青混合料的强度衰减变化规律进行研究.基于甘肃实际气象资料,确定冻融循环条件,在试验基础上分析不同荷载频率和试验温度下沥青混合料动态模量的变化规律,并探讨试验条件对沥青混合料动态模量的影响,通过对比找到基于动态模量的沥青混合料强度衰减评价方法,确定强度损伤评价指标.

## 1 实验

### 1.1 原材料

沥青是影响混合料动态模量的关键参数.通过比较选择甘肃地区常用的中海油 90# 基质沥青,其主要性能指标见表 1.所用集料取自永登龙源石料厂,规格为:10~15 mm 碎石、5~10 mm 碎石、3~5

mm 碎石、0~3 mm 机制砂.矿粉来自景泰县宏源建材有限公司,基本性能指标见表 2.通过性能检测,以上原材料均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的基本技术指标要求.

表 1 中海油 90# 基质沥青主要性能指标

Tab.1 Main performance indices of Zhonghaiyou 90# matrix asphalt

试验项目	试验结果	
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	83	
延度(5 cm/min,5℃)/cm	>100	
延度(5 cm/min,15℃)/cm	>100	
动力黏度 60℃/(Pa·s)	170	
软化点 $T_{R\&B}/℃$	46	
旋转薄膜加热后残留物	质量变化率/%	0.01
	残留针入度比/%	63
	残留延度(10℃)/cm	12

表 2 矿粉基本性能指标

Tab.2 Basic performance indices of mineral powder

亲水系数	外观	加热安定性	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	表观相对密度
0.74	无团粒 结块	无颜色 变化	2.703	2.708

### 1.2 配合比

参照甘肃地区路面沥青混合料目标配合比,采用常见 AC-13C 型密集配沥青混凝土,其技术指标满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》.其中原料配合比设计结果及主要指标见表 3.

表 3 原料配合比设计结果及主要指标

Tab.3 Design result and main index of raw material mixture ratio

混合料类型	油石比/%	试件毛体积相对密度	理论最大相对密度
AC-13C	5.1	2.242	2.573
VV/%	VFA/%	油膜厚度/ $\mu\text{m}$	初始次数 压实度/%
7.0	42.1	10.0	80.2

注:VV 表示孔隙率,VFA 表示有效沥青饱和度.

### 1.3 试件制备

动态模量试验采用直径 100 mm,高 150 mm 的圆柱体标准试件,试件成型采用旋转压实法成型.具体制样过程如图 1 所示.首先,使用旋转压实仪高度控制模式成型直径 150 mm、高度 170 mm 的大试样,并通过体积法测试其空隙率,所制试件孔隙率为  $7.0\pm 0.5\%$ ;然后对其进行取芯及切割得到直径 100 mm、高度 150 mm 的动态模量试验芯样,并采用体积法测试空隙率.试件经钻芯切割后空隙率为  $6.5\pm 0.5\%$ ,相对有所下降,但对保证空隙率的一致性没有明显影响.动态模量试验在澳大利亚 IPC UTM-100 伺服液压多功能材料试验机上进行.

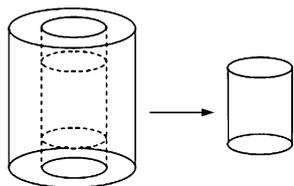


图 1 动态模量芯样的制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparation process of core sample for dynamic modulus test

## 1.4 试验条件及试验方法

### 1.4.1 动态模量试验条件的确定

试验温度对沥青混合料的动态模量的影响较大。为分析不同温度条件对动态模量的影响,采用 5、15、25、35、50 °C 5 个实验温度进行试验。同时,在分析冻融循环方式对动态模量影响时,将 25 °C 作为基本温度,分析经历冻融循环后动态模量的变化规律,并最终确定 25 °C 为评价方法中动态模量试验温度。

### 1.4.2 频率的选择

根据实际路面行车情况并综合实验频率要求,确定试验加载频率分别为 0.1、0.5、1.0、5.0、10.0、25.0 Hz。在分析冻融循环方式对动态模量影响时,考虑兰州地区行车速度,将 10.0 Hz 作为基本频率分析经历冻融循环后动态模量的变化规律,最终确定 10.0 Hz 为评价方法中动态模量的试验频率。

### 1.4.3 冻融条件的确定

分析兰州市春冬两季气象资料得出:本地区的气温变化范围为 -8~20 °C。因此,确定冻融循环试验温度为 -8~20 °C,即试件置于 -8 °C 冻结 4 h 后置于室温(20 °C)融化 2 h 为 1 次冻融循环试验。冻融循环试验次数设计分别为 0、4、8、12、16 次。

### 1.4.4 试验方法的确定

结合路面实际承受荷载情况,对试件采用以下 4 种试验方式:

- 1) 原样试验:不对试样进行冻融循环,直接测试其动态模量,记为 G1;
- 2) 直接冻融循环试验:在冻融前不对试件进行任何处理,待冻融循环次数达到后测试其动态模量,记为 G2;
- 3) 饱水加载后冻融循环试验:先将试样在 25 °C 水中真空饱水 30 min,再利用 UTM 将试样在 0.7 MPa 动荷载下加载 1 000 次后进行冻融循环,待达到冻融循环次数后测其动态模量,记为 G3;
- 4) 加载与冻融同时作用试验:将 UTM 试验机环境箱温度设置为 -8 °C,对试件进行加载(900 N),持续 4 h 之后将环境箱温度调至 20 °C,继续加载 2 h,即为 1 次循环过程。待加载与冻融同时作用的试验循环次数达到设计要求后,取出试件晾干并测其动态模量,记为 G4。

当试件在设定温度及频率下试验的累计塑性变形超过 1 500 微应变,该试件应废弃。为保证试验结果准确性,每组试验环境取 3 组平行试件进行试验。

## 2 结果分析

### 2.1 温度对动态模量的影响

图 2 为不同频率下,沥青混合料动态模量与温度的关系,频率不同表示行车速度不同。由图可知,

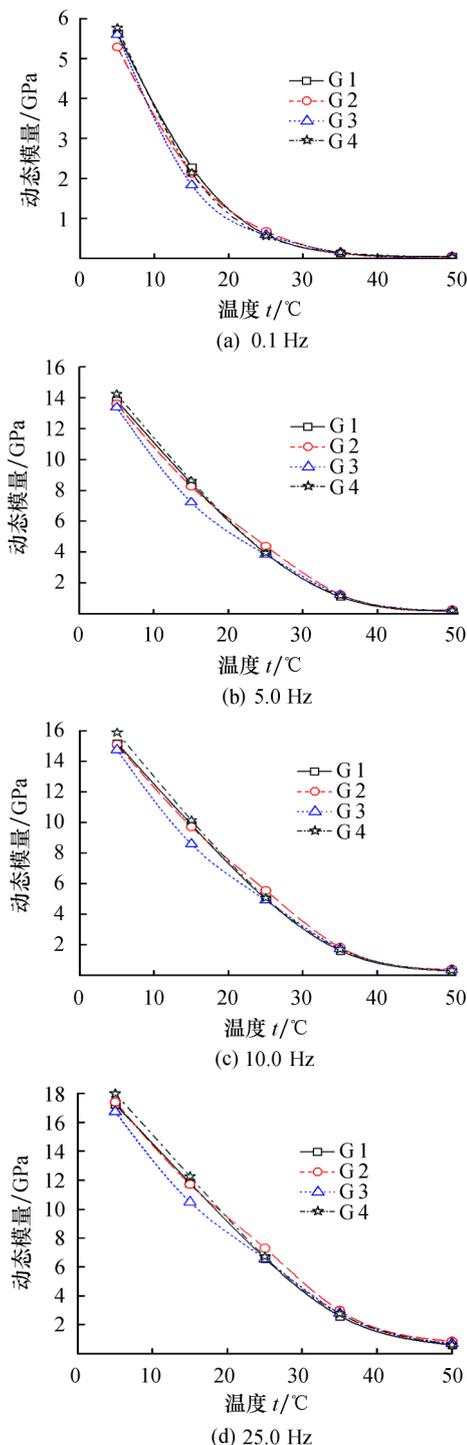


图 2 不同频率下动态模量与温度的关系

Fig.2 Relationship of dynamic modulus to temperature under condition of different frequency

在不同频率下动态模量均随着温度的升高逐渐下降,尤其在 5~15 °C 之间,模量值下降较快,35 °C 后模量减小幅度逐渐趋于平缓,此时温度继续升高,混合料的动态模量基本不再变化.这充分说明沥青混合料对温度有较高的敏感性.在较低温度时,随着温度的变化,动态模量下降速度较快;但随着温度的升高,动态模量的变化趋势逐渐趋于平缓,即随着温度升高沥青混合料逐渐从弹性体向黏性体过渡,模量、强度等均产生明显的下降,蠕变和应力松弛现象也更加明显.此时温度进一步上升则会发生沥青路面的软化,使沥青路面容易产生较大程度的永久变形,形成路面车辙.当温度较高时不同冻融条件下的模量值非常接近,说明温度对经历冻融破坏后的沥青混合料与未经冻融循环破坏的混合料影响一致,且温度越高越无法凸显冻融循环对动态模量值的影响,其原因主要是温度较高时混合料的动态模量较小,导致不同作用条件下其变化值不大.

图 3 为 0.1 Hz 和 25.0 Hz 频率下动态模量随温度变化的微分图.由图所示,当施加频率为 25.0 Hz,动态模量的变化速度与低频(0.1 Hz)并不完全相同,特别是 35 °C 后,低频下沥青混合料的动态模量微分基本趋向于 0,动态模量已经基本不再变化,而高频下动态模量仍有变化趋势,继续随着温度的升高而降低.这进一步说明,沥青混合料的动态模量主要受温度和频率的共同影响.

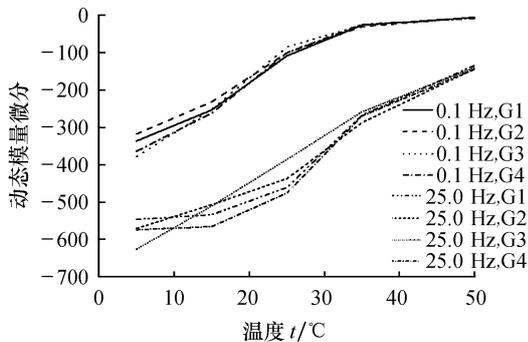


图 3 0.1 Hz 和 25.0 Hz 频率下动态模量微分  
Fig.3 Differential of dynamic modulus under frequency of 0.1 Hz and 25.0 Hz

### 2.2 频率对动态模量的影响

图 4 为不同温度下沥青混合料动态模量与频率的关系.由图可知,在不同温度下,随着频率的增加,沥青混合料的动态模量也逐渐增加,当频率在 0.1~5.0 Hz 时,动态模量增长较为迅速,且不同冻融循环条件下的动态模量值非常接近;在 5、25 °C 的温度条件下,当频率在 5~25 Hz 之间时,动态模量增长较为平缓.这是由于频率较低时,相当于汽车低速行

驶,对路面施加应力时间较长,属于低速重载,会对沥青路面造成较大的应变;当频率较高时,相当于瞬时高速,变形并未发生应力就消失了,所以在高频下模量值逐渐增大直到趋于稳定.在持续的极端高温 50 °C 条件下,动态模量仍在持续上升,并未表现出平缓的趋势,即在高温下随着频率的增加,沥青混合料逐渐偏向弹塑性而并非由于高温的影响偏向黏塑性.

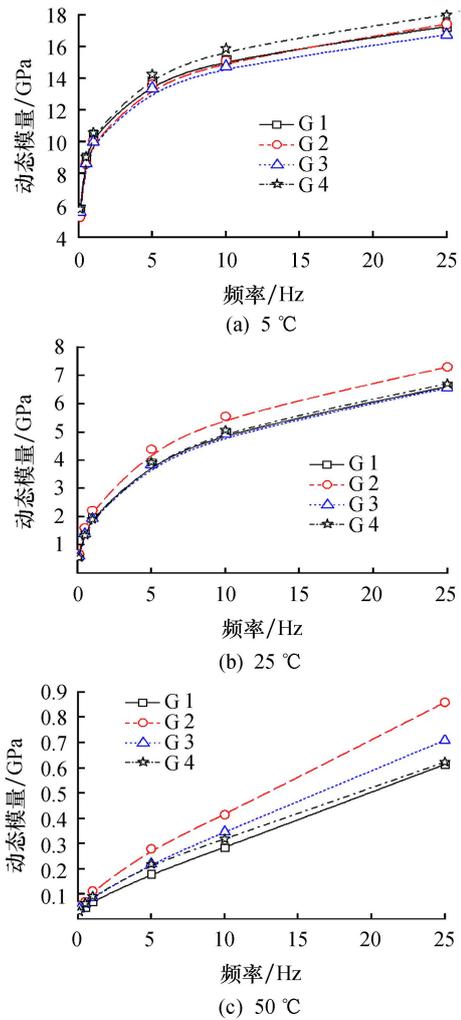


图 4 不同温度下动态模量与频率的关系  
Fig.4 Relationship of dynamic modulus to frequency at different temperature

### 2.3 冻融循环试验方式对动态模量的影响

#### 2.3.1 直接冻融循环试验

直接冻融循环试验结果如图 5 所示.根据兰州所处环境与车辆荷载,选取 25 °C 和 10 Hz 为动态模量试验条件.在 25 °C、10 Hz 的试验条件下,动态模量呈现出先升高后下降的趋势,在经历较少冻融次数(4 次)时模量值有所增加.出现这种现象的原因:一方面是经历了冻融破坏后的混合料本身性能是下降的,但是由于沥青硬化却引起了模量和强度增加;

另一方面当沥青及沥青混合料位于脆化点以上时,一般会呈现出复杂的黏弹性,并在冰荷载作用下具有一定的自愈性和损伤记忆功能<sup>[12]</sup>.故而,在较小的冻融循环次数下,动态模量值会出现增加的现象.此后随着冻融次数的不断增加模量值逐渐减小.根据冻融循环破坏机理,造成破坏的主要因素是水的结晶溶胀,尤其是留在空隙中的水分.在经历冻融循环过程中,水在沥青混合料中的作用非常复杂,水分不仅能够逐渐渗入到集料和沥青的界面上,使得黏附力下降、沥青膜脱落,同时因相变引起的体积应变可直接使混合料内部产生内应力,从而导致开裂并最终被破坏.

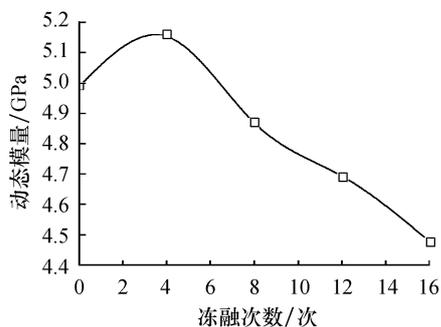


图 5 直接冻融循环试验结果

Fig.5 Experimental result of direct freeze-thaw cycle

### 2.3.2 饱水加载冻融循环试验结果与分析

图 6 为经过饱水加载后对沥青混合料进行冻融循环,其动态模量与冻融循环次数的关系.与直接冻融循环相似,25 °C、10 Hz 的试验条件下,随着冻融循环次数增加,动态模量呈现出先升高后下降的趋势.根据 ASTM 规程 D3497-79 可知,在对沥青混合料进行 0.7 MPa、1 000 次加载后一定程度上提高了试件压实度,部分开口空隙变为闭口空隙(提高压实度的过程实质上是孔隙率减小、开口空隙变闭口空隙的过程),并将水分保留在空隙中.随着冻融循环次数的增加,这部分残留在闭口空隙的水发生相变时产生的内应力全部被沥青混合料吸收,从而导致

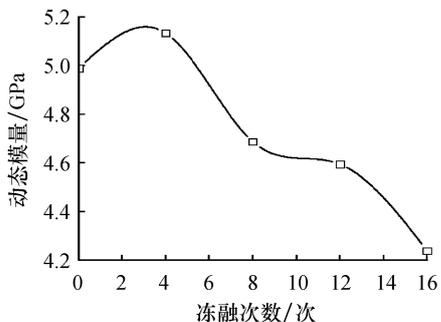


图 6 饱水加载冻融循环试验结果

Fig.6 Experimental result of freeze-thaw cycles under condition of saturation and loading

严重的冻胀破坏,导致动态模量迅速降低.

### 2.3.3 加载与冻融同时作用试验结果与分析

图 7 为在 UTM 试验机内通过控制环境箱的温度对正在加载的沥青混合料进行冻融循环的试验结果.在 900 N 动载及冻融循环耦合作用下,在试件经历较少冻融循环次数时,其模量值迅速从 4 900 MPa 下降至 4 500 MPa 左右,该过程为快速冻融破坏阶段;在经历 4~8 次冻融循环后,其模量值均在 4 500 MPa 左右,基本保持平稳,处于冻融循环稳定破坏期;此后随着冻融循环次数的进一步增加模量值逐渐减小,为冻融破坏损伤继续发展阶段.相对于直接冻融及饱水加载冻融试验,该实验条件更接近于实际路面加载环境且更加严苛,对路面遭受冻融破坏时的模拟也更加真实可靠.

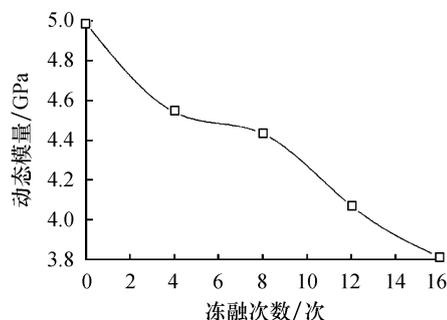


图 7 加载冻融同时作用试验结果

Fig.7 Experimental result of freeze-thaw accompanied by loading

## 2.4 不同试验条件对损伤变量的影响

可以通过测试冻融过程中试件力学性能指标的变化来表征材料内部损伤程度<sup>[13]</sup>.根据下式可得到不同冻融循环条件下的损伤变量:

$$D = 1 - \frac{E_n^*}{E_0^*}$$

式中:  $D$  表示损伤变量;  $E_n^*$  表示经历  $n$  次冻融后动态模量;  $E_0^*$  表示未经冻融动态模量.

表 4 和图 8 为不同冻融循环条件和冻融次数下损伤变量的试验结果.

表 4 不同冻融循环条件及冻融次数下的损伤变量结果  
Tab.4 Experimental result of damage variable under different conditions and times of freeze-thaw cycles

冻融次数	直接冻融损伤变量	饱水加载冻融损伤变量	边加载边冻融损伤变量
0	0	0	0
4	-0.033 1	-0.029 1	0.089 6
8	0.024 1	0.060 5	0.119 4
12	0.059 3	0.078 9	0.184 2
16	0.102 6	0.150 5	0.235 9

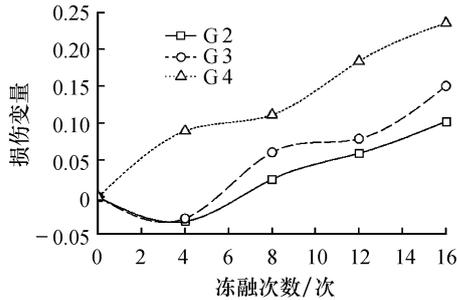


图 8 不同冻融循环条件损伤变量比较

Fig.8 The comparison of damage variable under different freeze-thaw cycles

由表 4 可知,经历较少次数(4 次)的直接冻融和饱水加载后冻融的试件损伤变量略有增加,随后呈逐渐下降趋势.这是因为沥青硬化引起了模量和强度增加,以及饱水加载提高了混合料的压实度;而经历边加载边冻融的试件损伤变量持续下降,说明该试验条件更加苛刻,对沥青混合料的破坏作用也相对严重.同时,沥青混合料的损伤变量与动态模量变化趋势相同,完全对应损伤发展的 3 个阶段.

由表 4 及图 8 可知,处于稳定时期,荷载与冻融同时作用的条件下,沥青混合料动态模量的损伤变量在 8%~11%;在损伤发展阶段,其模量损失在 20%左右.因而可以确定当动态模量损失 10%时,混合料达到破坏的临界点.

通过比较 900 N 加载与冻融同时作用试验、饱水后加载冻融试验、直接冻融试验 3 种方法可知:900 N 边加载边冻融条件最为苛刻.900 N 边加载边冻融的过程相当于给沥青路面不断在进行冻融劈裂试验,而且持续不断地加载,使得水在混合料中的侵害作用更加明显,存在于空隙中的水在动载的作用下不断地产生动水压力或真空负压抽吸的反复循环作用,使得水逐渐渗入集料表面进而导致沥青膜脱落,并出现掉粒现象.因此,选择 25 °C、10 Hz 条件下,900 N 加载与冻融同时作用的试验方法作为冻融循环条件下强度衰减的评价方法,且以动态模量损失超过 10%作为混合料冻融破坏评价指标.

### 3 结论

1) 沥青路面在不同温度和频率下力学响应不同,但存在一定的规律性.沥青混合料的动态模量值

随试验温度的增加而急剧减少,随荷载频率的增加而逐步增大.

2) 通过比较直接冻融、饱水后加载冻融循环和加载与冻融循环同时作用 3 种冻融试验条件发现,以加载与冻融同时作用试验条件最为苛刻:其相当于给沥青路面不断进行冻融劈裂试验,同时持续不断地加载,使得水在混合料中的侵害作用更加明显.

3) 中国现行规范有关沥青混合料抵抗冻融破坏能力的评价方法存在局限性.通过对比试验,选取 25 °C、10 Hz 条件下,900 N 加载与冻融同时作用时沥青混合料动态模量作为评价方法,并建议以 10% 损伤变量作为混合料在经历冻融循环后的破坏评价指标,可为工程实际路面材料的选用提供重要依据.

#### 参考文献:

- [1] 谭忆秋.雪灾中的路面除冰技术 [J].交通建设与管理,2008,2(3):86-87.
- [2] 郑健龙,张洪刚,钱国平,等.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,2010,7(1):7-11.
- [3] 王抒音,谭忆秋,包秀宁.用冻融循环劈裂比评价沥青混合料抗水损害能力 [J].哈尔滨建筑大学学报,2002,35(5):123-126.
- [4] 李东庆,孟庆洲,房建宏,等.沥青混合料抗冻融循环性能的试验研究 [J].公路,2007(12):145-147.
- [5] 张勤玲,杨保存,王成,等.再生橡胶颗粒沥青混合料水稳定性试验 [J].兰州理工大学学报,2017,43(2):143-147.
- [6] 张光海.北方滨海地区沥青路面损伤机理及使用寿命研究 [D].大连:大连理工大学,2013.
- [7] 张锋.深季节冻土区重载汽车荷载下路基动力响应与永久变形 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [8] 黄振,胡森.基于沥青混合料性能的水损害研究 [J].石油沥青,2015,29(5):15-21.
- [9] SOULIMAN M I, PIRATHEEPAN M, HAJJ E Y, et al. Impact of lime on the mechanical and mechanistic performance of hot mixed asphalt mixtures [J].Road Materials and Pavement Design, 2015,16(2):421-444.
- [10] 周键炜,王大明,白琦峰.沥青混合料动态模量主曲线研究 [J].公路工程,2009,34(5):60-63.
- [11] 李瑞霞,郝培文.布敦岩沥青混合料动态模量及主曲线研究 [J].武汉理工大学学报,2011,33(10):42-45.
- [12] 余寿文,冯西桥.损伤力学 [M].北京:清华大学出版社,1997.
- [13] 吴霞.沥青混合料水稳定性试验应用研究 [D].南京:东南大学,1999.