

不同重复加载频率下老化沥青混凝土开裂性能

闫景晨^{1,2}, 马炎沛^{1,2}, 闫俊杰¹

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:基于数字散斑技术, 该文以沥青混凝土在重复加载下裂纹扩展为研究对象, 从宏、微观角度分析4种沥青混凝土在不同老化条件、加载频率下的裂纹扩展机理。通过分析裂纹长度扩展速率、损伤因子可知: 掺加玄武岩纤维的沥青混凝土小梁试件可延缓裂缝扩展进入失稳发展阶段, 从而提高沥青混凝土的使用寿命; 老化作用促使沥青混凝土加速进入裂纹长度扩展速率失稳点, 且将该点提前4%~5%; 5 Hz、10 Hz、15 Hz重复加载下沥青混凝土小梁试件的损伤因子均呈非线性递增趋势, 但在相同加载次数、5 Hz加载循环下小梁试件的损伤因子高于10 Hz、15 Hz, 故5 Hz重复加载对沥青混凝土的损伤更大。

关键词:沥青混凝土; 数字散斑; 裂纹长度扩展速率; 损伤因子

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

沥青混凝土路面结构在交通荷载的长期作用下, 材料内部萌生损伤并逐步演化, 导致结构整体强度衰减, 同时加速材料内部损伤致使出现损伤裂缝。结构强度衰减至失效阈值(低于外部荷载), 最终导致沥青混凝土出现局部开裂性破坏^[1-7]。沥青混凝土重复加载开裂破坏是沥青路面的主要破坏形式之一, 裂纹的存在不仅影响路面结构强度, 还会使路基、路面出现二次病害, 加速道路的损坏^[8-9]。沥青混凝土开裂的本质是沥青胶浆黏结性能降低, 集料与沥青胶浆之间产生分离破坏^[10-12]。道路环境中的光、氧、热等作用致使沥青发生热氧、紫外老化, 严重削弱了沥青的黏附性^[13-15], 在重复荷载作用下加快集料与沥青胶浆的剥离, 导致沥青混凝土路面出现荷载性裂缝。针对沥青混凝土循环加载形成的裂缝, 目前并没有很好的外部添加剂能够解决, 而玄武岩纤维具有强度高、耐酸碱等优良特性, 引起了专家学者高度关注, 且玄武岩纤维可提高沥青混凝土的高低温及水稳特性^[16-18]。于是可将玄武岩纤维作为外掺

剂, 分析其对沥青混凝土的抗重复加载开裂性能的影响。在实际交通工程中, 路面车辆荷载不存在匀速状态, 对于同一段路面, 不同的行驶速度会造成不同的损伤程度, 因此应对不同重复加载频率下的沥青混凝土开裂性能进行分析。

目前对于沥青混凝土抗重复加载开裂的研究主要有以线弹性损伤断裂力学为主的宏观试验方法, 该方法以试件最终断裂破坏时的相关应力-应变为疲劳能力的判定依据。并没有考虑裂纹由微裂纹发生、发展、最终扩展的全过程对于沥青混凝土的影响。而裂纹的全开裂过程却对工程养护节点及疲劳特征至关重要。数字散斑(DIC)技术恰巧弥补了这一缺陷。DIC具有非接触、全场全受力过程监测、高精度等优点, 广泛应用于航空航天材料设计领域, 并在近年来应用于沥青混凝土变形特性研究中。Górszczyk等^[19]使用DIC方法评估道路材料的变形能力, 并与张力测量法进行对比, 验证了数字散斑技术的可靠性; Li等^[20]、张倩等^[21]通过DIC技术和沥青混凝土半圆弯拉试验, 得出在荷载作用下沥青与粗骨料结合的界面区最容易发生开裂, 其界面开裂主要受界面临界应力、界面长度、界面倾角和界面位置的

收稿日期: 2022-12-23(修改稿)

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(编号: NJZY14058)

作者简介: 闫景晨, 男, 硕士, 副教授. E-mail: yjc@imut.edu.cn

影响;苑苗苗^[22]、李佳^[23]、穆岩^[24]等基于数字散斑相关方法对沥青混凝土的疲劳破坏机理进行了研究,获取了疲劳加载下混凝土的细观变形特征,并获取了混凝土的起裂时刻,计算了起裂应变。

针对上述问题,本文选定以基质沥青混凝土、SBS改性沥青混凝土、玄武岩纤维基质沥青混凝土、玄武岩纤维SBS改性沥青混凝土为研究对象,对其小梁试件经紫外老化、长短期老化作用后分别施加5 Hz、10 Hz、15 Hz频率的三点弯曲重复荷载,通过DIC监测其全受力过程的全场应变,分析其全受力过程的开裂特性。

1 材料及试验方法

1.1 试验材料

试验选用辽宁盘锦90#基质沥青和苯乙烯—丁二烯—苯乙烯三嵌段聚合物掺量为4.5%的SBS改性沥青,其基本性能指标见表1。粗、细集料均为玄武岩矿石,矿粉主要成分为石灰石。短切玄武岩纤维来自浙江某公司,其物理性能见表2,纤维掺量占质量分数的0.3%^[25]。

表1 沥青基本性能指标

技术指标	单位	90#基质 沥青	SBS 改性沥青	试验方法(JTG E20—2011)
针入度	0.1 mm	89	68	T0604
延度(5 cm/min)	cm	95(10℃)	40(5℃)	T0605
软化点	℃	45.9	80	T0606
相对密度(25℃)		1.003	1.028	T0603
闪点(COC)	℃	296	299	T0611

表2 玄武岩纤维的物理性质

长度/ mm	相对密度	弹性模量/ GPa	断裂强度/ MPa	断裂延 伸率/%
6±0.5	2.667	87	3 200~4 600	3.6

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制作AC-13型沥青混凝土试件。基质沥青混凝土、玄武岩纤维沥青混凝土、SBS改性沥青混凝土、玄武岩纤维SBS改性沥青混凝土(编号分别为A、B、C、D)的最佳油石比分别为:4.9%、5.2%、5.6%、5.7%。将用轮碾法制作完备的沥青混凝土切割为250 mm×30 mm×35 mm小梁试件。

1.2 试验方法

将试件分为4组进行长期老化、短期老化、紫外老化、未老化(分别用L、S、U、O代替),长、短期老化参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中T0734—2000方法对热拌沥青混合料加速老化方式进行,紫外老化依据能量等效原则,将试件放入紫外老化箱中模拟内蒙古自治区一年的太阳紫外辐射当量420 MJ/m²。紫外辐射灯具采用1 000 W高压汞灯,温度控制为(35±5)℃(避免温度过高造成热氧化)并强制通风,紫外辐射强度调制为22 kJ/cm³,辐射高度为35 cm,辐射时间146 h。

沥青混凝土小梁试件三点弯曲重复加载试验通过UTM-100试验机进行,重复加载力的最大值为0.25 kN(应力比为0.2),加载频率分别为5 Hz、10 Hz、15 Hz,加载波形为半正弦波,试验环境箱温度为10℃。记录沥青混凝土小梁试件破坏时对应的加载次数N。

利用DIC方法,实时记录沥青混凝土小梁在三点弯曲重复加载始末试件的全位移场、应变场。DIC的核心是相关性匹配,其作用是采集被测试件表面散斑点在荷载作用下位置从(x_0, y_0)到(x'_0, y'_0)的变化阈值,如图1所示,从散斑点位置的变化可知该点附近的位移 u 、 v 、应变 ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 等试件变形数据。此次试验DIC采集散斑变化时拍照速率与重复加载频率保持一致为5 Hz、10 Hz、15 Hz,使用随机推斑方式进行试件表面制斑,散斑点应随机分布并保持1 mm两个散斑。统计沥青混凝土试件裂缝附近散斑点的位移与应变,得到裂缝长度、裂纹的横向应变等数据随加载时间增加的变化趋势。

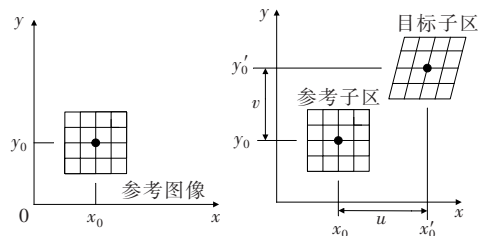


图1 加载前、后散斑点位置变化

2 沥青混凝土重复加载开裂性能分析

由于沥青混凝土自身的黏弹滞后特性,沥青混

凝土小梁试件在受到三点弯曲重复加载时裂纹长度与加载次数呈倒S形(图2)。

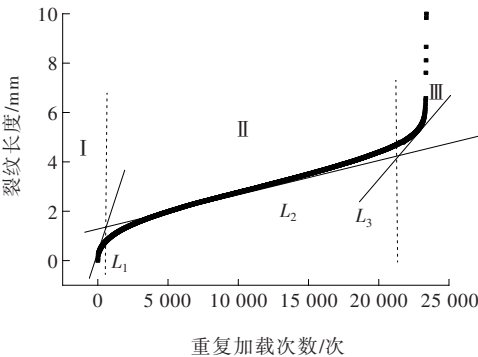


图2 裂纹发展3阶段与加载次数的关系

由图2可知:随着加载次数增加,沥青混凝土小梁试件的裂纹长度呈非线性递增趋势,且裂纹长度出现缓慢增加阶段,当重复加载达到一定次数后,小梁结构自身允许跨中挠度变形阈值不能承受荷载造成的裂缝长度从而发生断裂。

分析重复加载试验过程中沥青混凝土力学性能变化规律,可将沥青混凝土重复加载开裂过程划分为3个阶段:损伤初始阶段Ⅰ、损伤发展阶段Ⅱ及失稳破坏阶段Ⅲ。如图2所示,将3个阶段分别拟合直线 L_1 、 L_2 、 L_3 3条切线的两个交点即为3个阶段的分割点。损伤初始阶段Ⅰ:裂纹萌生;损伤发展阶段Ⅱ:裂纹稳定发展;失稳破坏阶段Ⅲ:裂纹失稳发展。

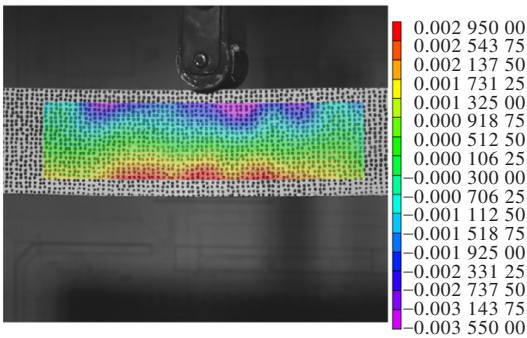
统计4种沥青混凝土3阶段的加载次数 N ,如表3所示,每种沥青混凝土小梁试件第Ⅲ阶段的加载次数占比均不超过15%,且裂纹在第Ⅲ阶段时发展为宏观裂缝,如图3所示。

表3 3阶段加载次数统计

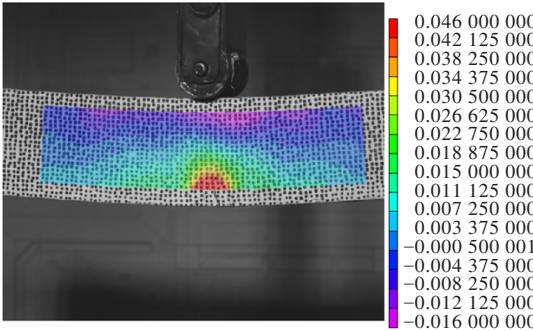
混凝土类型	重复加载次数/次			占比/%		
	第Ⅰ阶段	第Ⅱ阶段	第Ⅲ阶段	第Ⅰ阶段	第Ⅱ阶段	第Ⅲ阶段
A	243	9 463	1 348	2.2	85.6	12.2
B	341	11 727	1 976	2.4	83.5	14.1
C	375	17 126	2 251	1.9	86.7	11.4
D	760	23 511	2 978	2.8	86.3	10.9

2.1 基于裂纹长度扩展速率下的沥青混凝土开裂性能

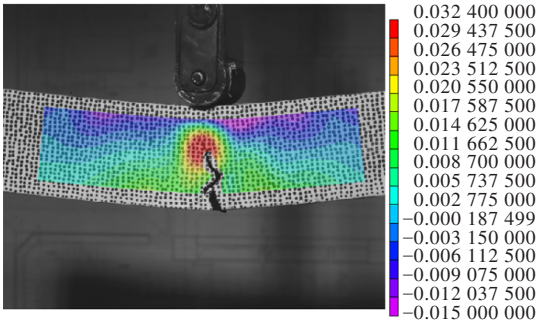
4种沥青混凝土在不同的老化条件、加载频率下,沥青混凝土小梁试件在重复加载时裂纹扩展形式不同。图4为沥青混凝土试件在重复加载下DIC监测到的裂纹从萌生到失稳扩展的趋势。



(a) 裂纹萌生



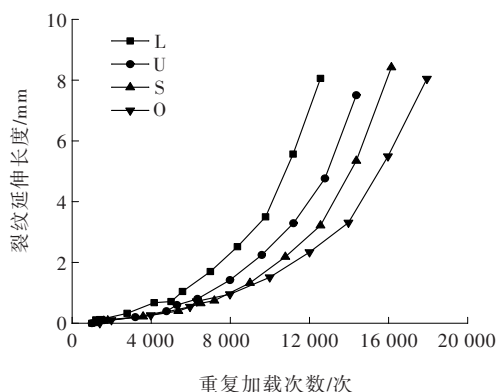
(b) 裂纹稳定发展



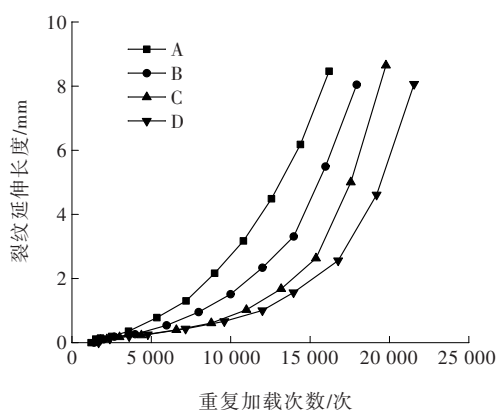
(c) 裂纹失稳发展

图3 试件裂纹发展3阶段(应变)

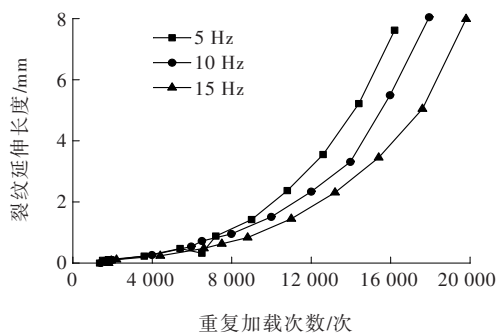
由图4可知:① 4种沥青混凝土小梁试件在重复加载直至破坏时,其裂纹长度均未超过10 mm,且玄武岩纤维丝在沥青混凝土内部形成空间网状结构,其桥接、增韧性约束了裂纹在沥青混凝土内部扩展的趋势,进而增强了沥青混凝土抵抗外部加载的能力;② 老化作用促使沥青硬化的同时,又降低其与粗、细集料间的黏结性,使得沥青混凝土小梁试件抵抗重复加载开裂的性能降低。沥青混凝土老化程度影响裂纹扩展的趋势,即在同一重复加载次数下裂纹扩展长度依次为:长期老化>紫外老化>短期老化>未老化;③ 5 Hz重复加载频率下,沥青混凝土小梁试件从裂纹萌生到失稳破坏均高于10 Hz、15 Hz。



(a) 不同老化条件下的裂纹扩展趋势
(玄武岩纤维SBS改性沥青混凝土、10 Hz)



(b) 不同沥青混凝土的裂纹扩展趋势(长期老化条件、10 Hz)



(c) 不同加载频率下的裂纹扩展趋势(玄武岩纤维
基质沥青混凝土、长期老化条件)

图 4 沥青混凝土试件裂纹发展趋势

这是由于沥青混凝土自身具备的黏弹特性,不同加载频率下沥青混凝土表现出的黏弹模量等力学行为存在差异,越高的加载频率下沥青混凝土的力学性能越接近弹性体。由于沥青混凝土自身结构和内部孔隙特征,其在外重复加载形成的裂纹延伸到沥青混凝土内部缺陷处、绕过粗大集料、通过应力集中部位扩展。为了进一步了解裂纹扩展与加载次数的关系,本文采用指数方程拟合裂纹扩展长度 Y 与加载次数 N 之间的关系,结果如式(1)及图 5 所示。研究发现裂纹长度在沥青混凝土内部扩展是动态连续的,将式(1)对重复加载次数 N 求导,得到裂纹长度扩展速率与加载次数间的关系如下:

$$Y = ae^{bN} \quad (1)$$

$$\frac{dY}{dN} = abe^{bN} \quad (2)$$

式中: a 、 b 为反映沥青混凝土裂纹扩展的参数; Y 为裂纹扩展长度; N 为重复加载次数。

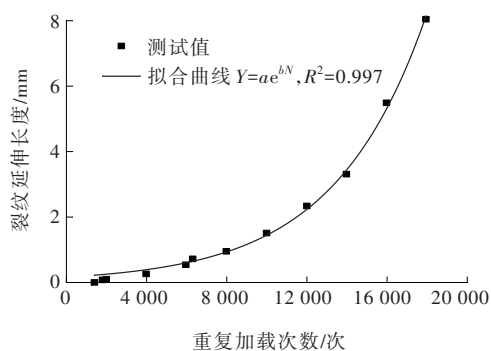


图 5 裂纹长度扩展趋势与拟合曲线

根据式(2)对基质沥青混凝土、玄武岩纤维基质沥青混凝土、SBS 改性沥青混凝土、玄武岩纤维 SBS 改性混凝土在不同老化环境、重复加载频率下的裂纹扩展长度与加载次数进行拟合,拟合结果见表 4、5。将式(2)中 e^{bN} 作为整体自变量,表 4、5 中 a 、 b 值越大,式(2)的斜率越大,沥青混凝土裂缝长度的扩展速率越大。

表 4 普通沥青混凝土裂纹长度扩展速率拟合结果

拟合方程	类型	基质沥青混凝土			玄武岩纤维基质沥青混凝土		
		a	$b/10^{-4}$	R^2	a	$b/10^{-4}$	R^2
$\frac{dY}{dN} = abe^{bN}$	L-15	0.182 3	2.295	0.978 6	0.234 7	3.012	0.997 9
	L-10	0.187 1	2.787	0.981 5	0.257 3	3.294	0.984 1
	L-5	0.192 4	2.938	0.983 6	0.285 3	3.618	0.997 7
	U-15	0.181 7	2.136	0.990 4	0.228 8	2.944	0.982 7
	U-10	0.182 1	2.485	0.989 4	0.249 9	3.197	0.978 4
	U-5	0.187 1	2.787	0.981 5	0.257 3	3.294	0.984 1

续表4

拟合方程	类型	基质沥青混凝土			玄武岩纤维基质沥青混凝土		
		<i>a</i>	<i>b</i> /10 ⁻⁴	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i> /10 ⁻⁴	<i>R</i> ²
$\frac{dY}{dN} = abe^{bN}$	U-5	0.189 9	2.546 0	0.978 3	0.274 9	3.589 0	0.997 5
	S-15	0.179 9	0.199 6	0.967 3	0.223 5	2.847 0	0.984 5
	S-10	0.180 1	2.193 0	0.990 1	0.248 4	3.095 0	0.986 2
	S-5	0.189 1	2.544 0	0.973 1	0.274 3	0.336 3	0.965 4
	O-15	0.174 9	1.379 0	0.989 5	0.193 3	2.348 0	0.972 3
	O-10	0.176 5	1.844 0	0.963 2	0.215 8	2.607 0	0.984 1
	O-5	0.187 2	2.169 0	0.975 9	0.243 4	3.018 0	0.968 2

注:L-15表示长期老化,加载频率为15 Hz,其他编号类型类似。下同。

表5 改性沥青混凝土裂纹长度扩展速率拟合结果

拟合方程	类型	SBS改性沥青混凝土			玄武岩纤维SBS改性沥青混凝土		
		<i>a</i>	<i>b</i> /10 ⁻⁴	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i> /10 ⁻⁴	<i>R</i> ²
$\frac{dY}{dN} = abe^{bN}$	L-15	0.238 5	3.212	0.978 4	0.264 3	2.572	0.984 7
	L-10	0.252 5	3.354	0.998 0	0.289 1	2.877	0.999 6
	L-5	0.273 2	3.989	0.989 6	0.303 4	3.388	0.986 4
	U-15	0.219 2	2.783	0.985 4	0.257 4	2.174	0.996 4
	U-10	0.224 1	2.992	0.995 0	0.278 2	2.700	0.997 4
	U-5	0.264 3	3.695	0.996 4	0.294 3	3.185	0.977 4
	S-15	0.197 2	2.573	0.985 6	0.221 3	1.948	0.992 3
	S-10	0.215 5	2.619	0.996 5	0.267 8	2.645	0.992 9
	S-5	0.230 3	3.183	0.986 3	0.274 3	3.096	0.984 5
	O-15	0.193 4	2.324	0.971 2	0.218 8	1.846	0.984 5
	O-10	0.208 3	2.384	0.996 5	0.252 9	2.116	0.997 8
	O-5	0.221 3	3.029	0.963 4	0.264 3	2.844	0.978 3

根据式(1)、(2)可知:沥青混凝土在重复加载下裂纹的扩展受参数*a*、*b*控制,且裂纹扩展又与重复加载频率、沥青混凝土老化程度直接相关(图6)。

由表4、5及图6可知:① 参数*a*、*b*随重复加载频率的增加而变小,故*a*、*b*之积作为式(2)的斜率也随着减小,沥青混凝土的裂缝长度扩展速率变缓;② 参数*a*、*b*随着老化程度的加深,其值逐渐增大,沥青混凝土的裂缝长度扩展速率也增加;③ 沥青混凝土在重复加载过程中,加载频率越小、老化程度越大,达到破坏用时越少。故在道路工程中应尽量降低沥青混凝土的老化程度,在限速路段应提倡使用高标号沥青混凝土,从而提高沥青混凝土道路的使用寿命。

沥青混凝土裂纹长度扩展是一个不均匀加速的过程,裂纹长度扩展速率与加载次数的对应关系如图7所示,现将裂纹长度扩展速率变化的初始阶段与最后阶段进行线性拟合得到*L*₁、*L*₂两条直线,定义两

条裂缝长度扩展速率变化拟合直线交点为裂缝长度扩展速率失稳点,该点对应的重复加载次数为沥青混凝土裂缝长度扩展速率失稳开裂的起点。计算该点占整个重复加载次数的比重,结果见表6(4种沥青混凝土在10 Hz加载循环情况下)。

由表6可知:① 4种沥青混凝土在不同老化环境下的裂纹长度扩展速率失稳点均占整个重复加载循环次数的60%~71%。且长、短期老化和紫外老化促使沥青混凝土在重复加载下进入失稳破坏阶段,3种老化环境分别将裂缝长度扩展速率失稳点提前了4%~5%、0.5%~2.6%、2.5%~4.5%;② 掺加玄武岩纤维可以延缓裂缝长度扩展速率失稳点的出现,玄武岩纤维将基质沥青混凝土和SBS改性沥青混凝土裂缝长度扩展速率失稳点推迟了0.2%~1.1%;③ 在道路工程中,应摒弃传统养护观念,提倡预防性养护,在沥青混凝土达到失稳破坏前应进行多次路面

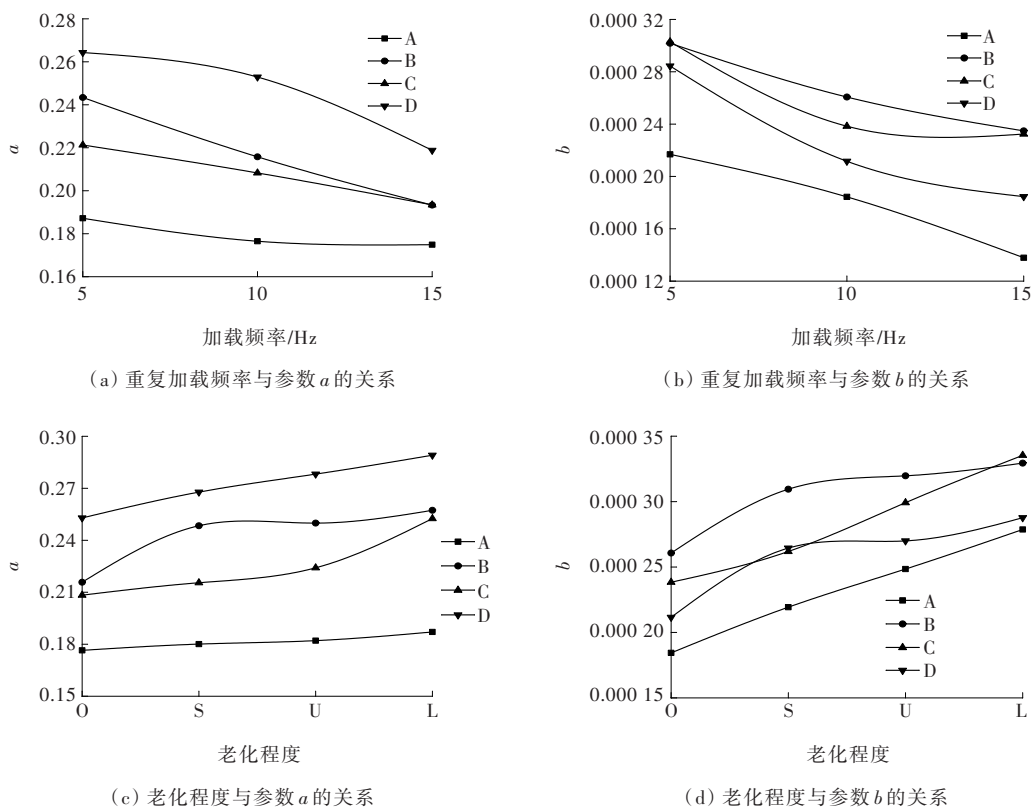
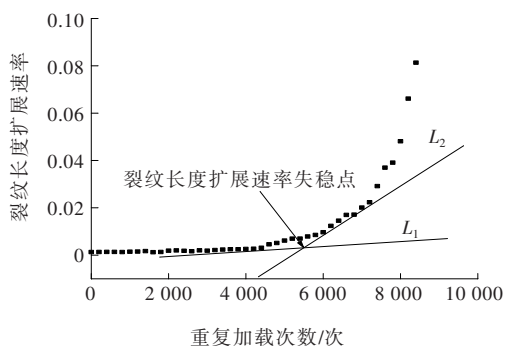
图 6 裂纹扩展参数 a 、 b 与重复加载频率、老化程度的关系

图 7 裂纹扩展速率与加载次数关系

检测、探伤、修复工作,以提高沥青混凝土在道路工程中的使用寿命。

2.2 基于损伤因子下的沥青混凝土开裂性能

沥青混凝土由于表面及内部存在缺陷(空洞、孔隙),在荷载及路用环境作用下引起更严重的劣化称为损伤。根据损伤机制,采用 DIC 得到的水平应变场数值来表述沥青混凝土在重复加载及老化作用下的损伤程度。定义沥青混凝土小梁试件的损伤因子 D_T ,由试件水平应变的变化得到^[25],如式(3)、(4)所示:

$$D_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon_{it} - \bar{\epsilon}_t)^2} \quad (3)$$

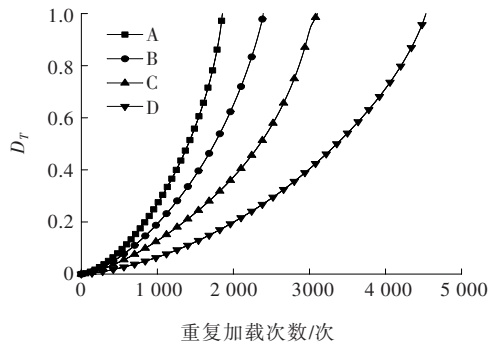
表 6 4 种沥青混凝土裂纹长度扩展速率失稳点

混凝土类型	老化类型	裂纹长度扩展速率失稳点(加载次数)/次	加载总次数/次	占比/%
A	L	5 593	8 721	64.1
	U	8 733	13 514	64.6
	S	10 598	15 982	66.3
	O	11 976	17 381	68.9
B	L	8 813	13 699	64.3
	U	11 092	16 905	65.6
	S	12 497	18 708	66.8
	O	13 728	19 861	69.1
C	L	13 187	20 089	65.6
	U	14 294	21 293	67.1
	S	14 778	21 445	68.9
	O	15 599	22 376	69.7
D	L	12 639	19 054	66.3
	U	14 073	20 873	67.4
	S	15 983	23 126	69.1
	O	17 034	24 055	70.8

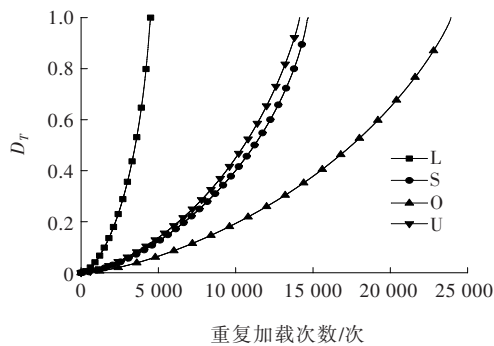
$$D_T = \frac{\sum_{t=0}^T D_t}{D_{Tf}} \quad (4)$$

式中: ε_n 为重复荷载 t 时刻第 i 点的水平应变; ε_t 为重复荷载 t 时刻水平应变的平均值; n 为计算点的个数; D_t 为重复荷载 t 时刻的损伤值; D_T 为时间 T 内造成的损伤值; D_{Tf} 为试件破坏时的累积损伤值。

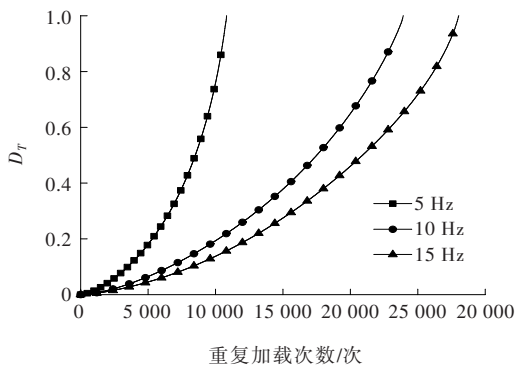
根据式(3)、(4)计算4种沥青混凝土在不同老化条件、重复加载频率下的损伤因子,结果如图8所示。



(a) 不同沥青混凝土(未老化、10 Hz)



(b) 不同老化条件(玄武岩纤维基质沥青混凝土、10 Hz)



(c) 不同重复加载频率(玄武岩纤维基质沥青混凝土、长期老化)

图8 损伤因子与重复加载次数的关系

由图8可知:① 不同沥青混凝土小梁试件在重复加载下的损伤因子随加载次数的增加而变大,具

体表现为:在试件加载初期,荷载对其造成的损伤在试件抗变形能力范围内,损伤累积较为缓慢。随着加载次数的增加,微裂纹产生并逐渐发展,损伤在试件内部加速累积,裂纹沿损伤缺陷处加速扩展成为宏观裂缝直至沥青混凝土小梁试件破坏。对比在相同重复加载次数下不同沥青混凝土小梁试件的损伤因子 D_T 发现,掺加玄武岩纤维的沥青混凝土在重复加载情况下的损伤较为缓慢。这是因为玄武岩纤维的桥接、阻裂、吸油性使得沥青混凝土内部集料间黏附更多的沥青,使得试件内部的沥青质、胶质含量也随着增加,在裂纹扩展初期,沥青与集料形成的黏聚力阻碍裂纹扩展。当裂纹逐渐变宽加长,玄武岩纤维丝在沥青混凝土内部形成的空间网状结构可以有效地桥接试件内缺陷部位及裂纹处的沥青集料分散体,阻止了裂纹进一步发展为宏观裂缝,进而提高了沥青混凝土的抗开裂性能;② 沥青混凝土在老化环境下,其内部的沥青质、胶质等成分在长时间氧化后沥青将会脆硬化,降低了沥青的黏聚力,使得沥青混凝土内部的各集料间在受到加载后松散化,从而降低了沥青混凝土的抗损伤能力。同一加载次数下,不同老化条件对损伤因子影响程度依次为:长期老化>紫外老化>短期老化>未老化。由此可知:老化程度越高损伤因子越大,沥青混凝土抵抗损伤的能力越小,其抗开裂的能力越低;③ 不同的加载频率,对于同一重复加载次数的沥青混凝土小梁试件,5 Hz重复加载循环的损伤因子最大,其次是10 Hz、15 Hz。由此可知:由于沥青混凝土的黏弹特性,重复加载频率越低,小梁试件因荷载形成的损伤在内部消散得越慢,随着加载次数的增加,其内部积累的损伤越大,最终以加快裂纹扩展的方式消散。故重复加载频率越低,沥青混凝土在道路工程使用中寿命越短。

3 结论

(1) 沥青混凝土小梁试件在重复加载作用下造成的损伤主要以裂纹扩展方式消散,当裂纹扩展为宏观裂缝时试件达到失稳破坏阶段。在沥青混凝土中掺入适量的玄武岩纤维可以延迟裂纹扩展进入失稳时刻,进而提高沥青混凝土的使用寿命。

(2) 沥青混凝土小梁试件在达到全加载过程的

60%~70%时,裂缝长度扩展速率进入加速状态。老化作用促使沥青混凝土硬化导致小梁试件的裂缝长度扩展速率提前加速,如长期老化将裂缝长度扩展速率失稳点提前了4%~5%。在实际道路工程中,应在沥青混凝土达到裂缝长度扩展速率失稳点前,进行多次道路检测与养护。

(3) 不同的加载频率对同一沥青混凝土小梁试件的重复加载损伤程度不同。重复加载频率越低时,由于沥青混凝土的黏弹特性,荷载在小梁试件内部形成的损伤越慢,随着加载次数的增加,损伤在试件内部累积越多,最终以加速试件开裂的方式消散。故在道路工程中的限速路段应提高沥青混凝土的强度,从而延长整条道路的使用寿命。

参考文献:

- [1] 房辰泽,郭乃胜,孙雅珍,等.基于劲度模量分析的橡胶沥青混合料疲劳寿命研究[J].工程力学,2020,37(4):196-204.
- [2] 白卫峰,刘霖艾,管俊峰,等.基于统计损伤理论的硫酸盐侵蚀混凝土本构模型研究[J].工程力学,2019,36(2):66-77.
- [3] 余志武,单智.混凝土随机损伤本构模型研究新进展[J].工程力学,2018,35(8):1-8,13.
- [4] 施成华,王祖贤,刘建文,等.基于混凝土损伤模型的盾构隧道极限承载力研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4310-4325.
- [5] 苗艳春,张玉,SELYUTINA Nina,等.基于X-CT的高温后再生保温混凝土损伤分析[J].复合材料学报,2022,39(6):2829-2843.
- [6] 孙雅珍,郭学南,程圆圆,等.细观尺度下基于非均匀性研究沥青混合料的开裂行为[J].中外公路,2018,38(5):187-192.
- [7] 袁海,朱洪洲,魏巧,等.沥青疲劳试验方法评价[J].中外公路,2020,40(3):241-246.
- [8] 弥海晨,张娟,郭平,等.老化后橡胶沥青混合料高温性能研究[J].中外公路,2019,39(4):251-254.
- [9] 孙艳娜,张中平,李立寒.基于广义剪切试验的沥青高温性能评价指标[J].建筑材料学报,2019,22(4):645-650.
- [10] 熊宏玲.机制砂与沥青黏附性评价方法研究[J].中外公路,2020,40(5):306-310.
- [11] 左锋,叶奋,王泽,等.耦合老化作用下混合料中SBS改性沥青的老化行为研究[J].建筑材料学报,2020,23(2):401-406.
- [12] 屈鑫,丁鹤洋,汪海年.道路沥青老化评价方法研究进展[J].中国公路学报,2022,35(6):205-220.
- [13] 祁文洋,李立寒,张明杰,等.SBS改性沥青的阶段性老化特征与机理[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(1):95-99.
- [14] 许婷婷,顾兴宇,倪富健.玄武岩纤维增强沥青混凝土试验与性能研究[J].交通运输工程与信息学报,2011,9(2):115-121.
- [15] 杨立云,林长宇,张飞,等.玄武岩纤维对活性粉末混凝土受压破坏的影响[J].建筑材料学报,2022,25(5):483-489.
- [16] 闫景晨,郑建龙,李宁宁.玄武岩纤维沥青砂浆的抗裂性能研究[J].建筑材料学报,2019,22(5):800-804.
- [17] 樊兴华,薛振华.大温差地区掺玄武岩纤维低标号沥青混合料路用性能研究[J].中外公路,2020,40(5):286-291.
- [18] 边旭辉,申爱琴,连城,等.基于灰关联理论的玄武岩纤维混凝土孔与抗冻性能相关性研究[J].中外公路,2022,42(4):192-198.
- [19] GÓRSZCZYK J, MALICKI K, ZYCH T. Application of Digital Image Correlation (DIC) method for road material testing[J].Materials,2019,12(15):2349.
- [20] LI C, WANG L, WANG X X. Crack and crack growth behavior analysis of asphalt mixtures based on the digital speckle correlation method[J]. Construction and Building Materials,2017,147:227-238.
- [21] 张倩,孙红红.基于Matlab的沥青混合料内部空隙率测定与分析[J].公路交通科技,2012,29(6):1-5.
- [22] 苑苗苗.基于数字散斑相关方法的沥青混合料疲劳破坏机理研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [23] 李佳.基于数字散斑相关方法的沥青混合料疲劳变形分析[D].广州:华南理工大学,2013.
- [24] 穆岩.玄武岩增强纤维在重载交通沥青路面中的应用研究[D].西安:长安大学,2016.
- [25] 牛冬瑜.基于细观力学的沥青砂浆及骨架结构沥青混合料性能研究[D].西安:长安大学,2015.