

基于 Overlay Test 评价应力吸收层 抗反射裂缝性能

颜可珍[†], 王绍全, 田珊, 陈景豪, 孙皓
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了更好地评价应力吸收层的抗反射裂缝性能,提出采用 Overlay Test(OT)试验测定 SBS、WTR 和 WTR/APAO 改性沥青应力吸收层在常规条件、浸水和长期老化后的抗反射裂缝性能。研究发现,试验周期数、荷载损失率和总断裂能能够很好地表征应力吸收层的抗反射裂缝性能;第一周期最大荷载和临界断裂能是评价初期开裂的指标。试验发现 3 种应力吸收层在常规条件下均有良好的抗反射裂缝性能,但是水损坏对 WTR/APAO 的抗裂性能影响较大,长期老化后 WTR 和 WTR/APAO 的抗反射裂缝性能大大降低。3 种应力吸收层的 OT 试验最大荷载-周期数曲线符合幂函数变化规律。

关键词:应力吸收层;反射裂缝;Overlay Test;水损坏;长期老化;沥青混合料
中图分类号:U416.03 **文献标志码:**A

Research on Anti-reflective Cracking Performance of Stress-absorption Interlayer Based on Overlay Test

YAN Kezhen[†], WANG Shaoquan, TIAN Shan, CHEN Jinghao, SUN Hao
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the anti-reflective crack performance of stress-absorption interlayer (SAI), the Overlay Test(OT) was used to determine the anti-reflective cracking performance of SBS, WTR and WTR/APAO modified asphalt SAI under standard conditions, after moisture damage and long-term aging. The research shows that the cycle number, reduction in load and total fracture energy can characterize the anti-reflective cracking performance of SAI. The maximum load in the first cycle and critical fracture energy are indicators for evaluating initial cracking. It is found that three stress-absorption interlayers have good anti-reflective cracking performance under standard conditions. However, the moisture damage has a great influence on the crack resistance of WTR/APAO. The anti-reflective cracking performances of WTR and WTR/APAO are greatly reduced after long-term aging. The OT maximum load-cycle number curve of three SAIs is in accordance with power function.

Key words: stress-absorption interlayer; reflective cracking; overlay test; moisture damage; long-term aging; asphalt mixtures

* 收稿日期:2019-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778224), National Natural Science Foundation of China(51778224);湖南省交通科技计划项目(201705), Hunan Transportation Science and Technology Plan Project(201705)

作者简介:颜可珍(1975—),男,湖南桃江人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: yankz@hnu.edu.cn

在我国无论是广泛应用的半刚性基层沥青路面还是“白改黑”工程中的沥青路面加铺层结构,反射裂缝病害始终是我国沥青路面中广泛存在的一种破坏形式。^[1-3]为解决沥青路面反射裂缝病害问题,国内外进行了大量研究,其中设置应力吸收层被认为是一种能够有效防止反射裂缝的技术,因而在实际工程中得到了较多的应用^[4]。但是,对于应力吸收层的抗反射裂缝性能试验研究,大多采用复合试件抗压的疲劳试验来评价其抗裂性能^[5],国内学者对应力吸收层的研究还不够深入和系统。国外学者采用 Overlay Test(OT)试验来模拟沥青路面受下部拉力情况下的抗裂性能,OT 试验能较为合理地模拟实际沥青路面受反射裂缝的影响^[6]。同时国内外学者研究发现,OT 试验能够较好地评价沥青混合料的抗反射裂缝性能^[7-8]。因此,本文提出采用 OT 试验对应力吸收层的抗反射裂缝性能进行深入研究,以期更充分地评价应力吸收层的性能。

1 试验用材料

1.1 改性沥青

研究对象为 3 种改性沥青应力吸收层混合料,3 种改性沥青分别为 SBS 改性沥青、废胶粉(WTR)改性沥青和新型 WTR/APAO 复合改性沥青^[9]。后两种改性沥青由实验室制备得到。

改性沥青所用改性剂有两种,一是国产 177 μm (80 目)废旧橡胶粉改性剂;二是美国亨斯迈公司生产的 2385 型 APAO 改性剂,APAO 是一种非晶态 α -烯烃,属于热塑性树脂类改性剂^[10]。其中 WTR 改性沥青由 70# 基质沥青和 15%废胶粉制备而成;WTR/APAO 复合改性沥青由 70# 基质沥青、4%APAO 和 15%废胶粉制备而成。

采取 SBS 改性沥青作为对照组,试验用 SBS 改性沥青为国产成品 I-D 型。基质沥青和 SBS 改性沥青的基本技术指标见表 1。WTR 改性沥青和 WTR/APAO 改性沥青的性能见表 2。

表 1 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青基础技术指标

Tab.1 Properties of 70# matrix asphalt and SBS modified asphalt

沥青	针入度 /0.1mm	软化点 /°C	延度/cm (15 °C, 5 cm/min)	黏度/(Pa·s) (175 °C)
70# 基质沥青	69.7	50.2	>150	0.54
SBS 改性沥青	55.3	77.3	90.8	0.41

表 2 改性沥青基础技术指标

Tab.2 Properties of modified asphalt

沥青	针入度 /0.1mm	软化点 /°C	弹性恢复 /%	黏度/(Pa·s) (180 °C)
规范要求	25~70	>54	>60	1.5~4.0
WTR	37.6	79.4	68	0.765
WTR/APAO	30.8	65.2	91	2.44

1.2 集料及级配

试验采用的集料为湖南省产石灰岩,集料性能符合规范要求,见表 3。根据唐曦^[11]关于改性沥青混合料应力吸收层的研究,选择应力吸收层级配如表 4 所示,研究采用连续级配以确保级配的稳定性。同时在此级配下的最佳油石比选取 8.8%。应力吸收层混合料的拌合温度为 175 °C,压实温度为 170 °C。

表 3 集料基础技术指标

Tab.3 Properties of aggregate and mineral powder

	性质	单位	实测值	规范要求
集料	毛体积密度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.733	≥ 2.50
	表观相对密度	—	2.785	≥ 2.50
	洛杉矶磨耗损失	%	16.7	≤ 30
	压碎值	%	20.7	≤ 30
	吸水率	%	0.68	≤ 3
矿粉	塑性指数	%	2.9	<4
	亲水系数	—	0.79	<1

表 4 应力吸收层级配

Tab.4 Gradation of stress-absorption interlayer

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
13.2	100	0.6	46.61
9.5	99.21	0.3	34.20
4.75	77.34	0.15	23.96
2.36	51.36	0.075	15.87
1.18	48.70		

2 Overlay Test

2.1 试验方法

根据美国德克萨斯州 TEX-248-F 规范要求^[12],对 3 种改性沥青应力吸收层混合料通过旋转压实试

制备出一个直径为 150 mm, 高为(115±5) mm 的圆柱形试件, 按照图 1 的要求将试件进行切割, 最终得到如图 2 所示的标准试件.

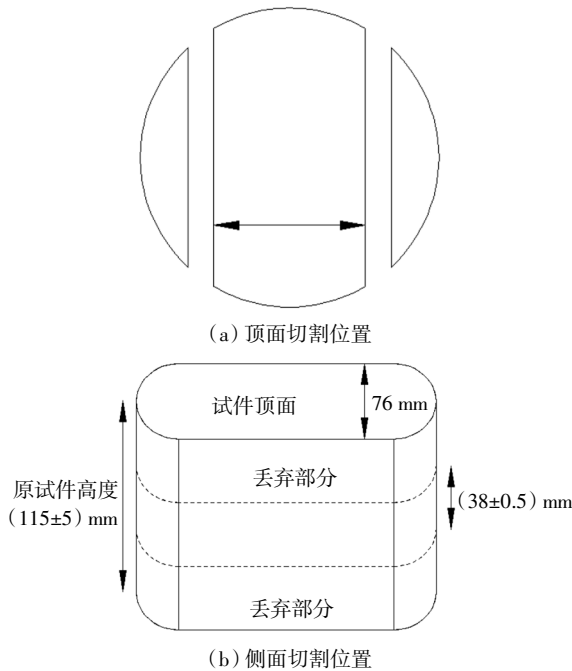


图 1 Overlay Test 试件切割示意图
Fig.1 Overlay Test specimen cutting diagram

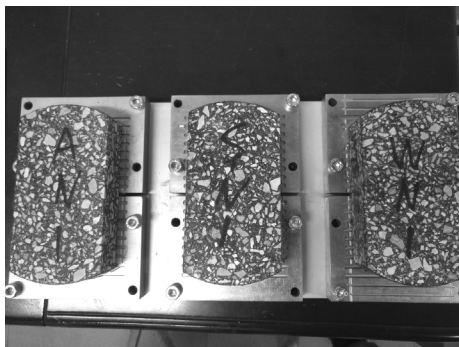


图 2 Overlay Test 标准试件
Fig.2 Overlay Test standard test piece

试件长为 150 mm, 宽为 76 mm, 厚为 38 mm, 按规范要求制备平行试件 3 个. 将切割好的试件用环氧树脂黏结在两块拉伸盘上, 如图 2 所示. 每个试件上施加 4.5 N 的压力, 待 8 h 后认为强度足够, 将整个试件安装在 UTM-30 设备上, 如图 3 所示.

由图 3 可知模具中间是一条 2~3 mm 的间隙, 模具的下部固定而上部向上拉伸, 模拟一个下部反射裂缝对应力吸收层的作用. 规范要求以裂缝位移的长度作为控制指标, 裂缝的目标位移值为 0.635 mm, 试验温度规定为 25 ℃. 试验荷载的加载波形为三角

波, 荷载循环周期为 10 s. 通过上述荷载变化来模拟实际反射裂缝的闭合运动^[9]. 规范通过最终试件在达到破坏前所经历的荷载循环次数来评价试件对抗反射裂缝性能的敏感性. 规范中对于试件破坏的认定条件是: 当试件在某次循环的最大荷载与初始循环最大荷载相比衰减达到了 93% 以上时, 认为试件发生破坏. 同时规范设定试验最大运行周期为 1 200 次.

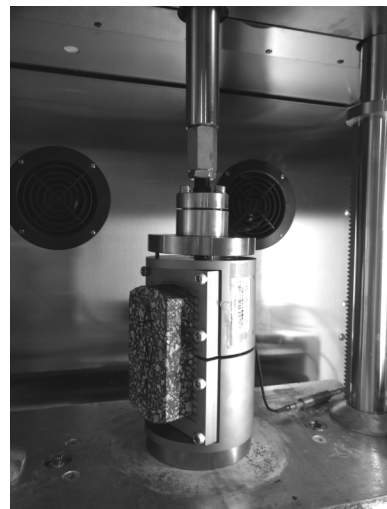


图 3 Overlay Test 试件安装示意图
Fig.3 Overlay Test specimen installation diagram

2.2 试验方案

除了按照规范要求对 SBS、WTR 和 WTR/APAO 三种改性沥青制备的应力吸收层进行常规条件的 OT 试验外, 还对应力吸收层进行浸水以及长期老化处理后的 OT 试验, 试验温度按照规范要求均为 25 ℃. 浸水和混合料的长期老化试验按我国规范 JTG E20—2011 中方法进行.

3 试验结果与分析

UTM-30 设备在进行 OT 试验过程中, 会自动记录试验周期数 N 、荷载损失率 R 、拉伸荷载、拉伸应力、位移和温度等参数. 本文选取自动记录的试验参数有: 试验周期数 N 、荷载损失率 R 、临界断裂能 E_c 和第一周期最大荷载 F_1 .

同时根据前人研究引入总断裂能 G 来进一步评价应力吸收层的抗反射裂缝性能. 总断裂能由试件的最大荷载-周期曲线下所包围的面积(即整个周期内所有荷载的总和)表示混合料开裂的总断裂能^[9], 如图 4 所示.

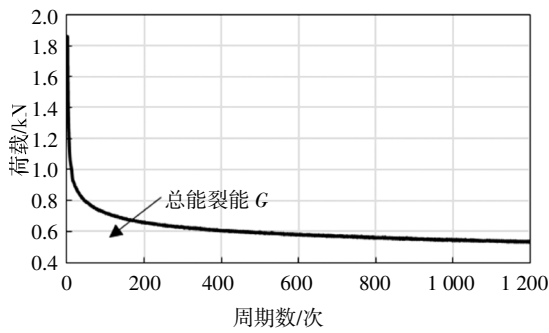


图 4 试件破坏的总断裂能 G 示意图

Fig.4 Total fracture energy of the specimen failure

3.1 常规条件下 OT 结果

常规条件下 3 种应力吸收层的 OT 试验结果见表 5,最大荷载-周期变化曲线如图 5 所示.

表 5 常规条件 OT 试验结果

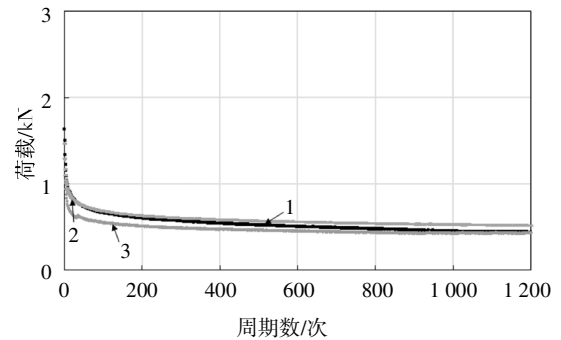
Tab.5 OT results under standard conditions

应力吸收层类型	试验	荷载	第一周期	临界断	总断	
		周期数	损失率	最大荷载	裂能 E_c	裂能 G
		N /次	R /%	F /kN	I /($J \cdot m^{-2}$)	I /($N \cdot m^{-1}$)
SBS	均值	1 200	68.20	1.46	1.04	635.57
	VAR	0	13.74	0.02	0.01	0.31
WTR	均值	1 200	87.10	2.79	1.85	712.01
	VAR	0	3.05	0.16	0.06	4.05
WTR/APAO	均值	1 200	86.83	3.48	2.08	940.55
	VAR	0	25.62	0.01	0.22	7.49

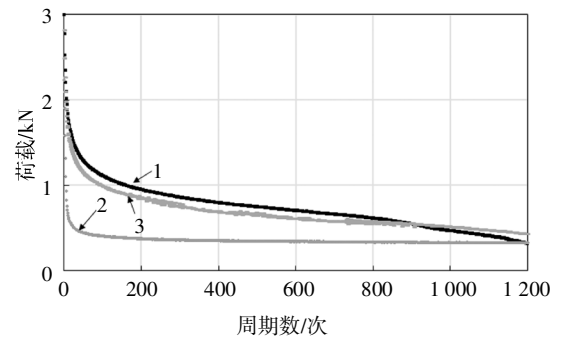
从表 5 可发现在常规条件下,3 种应力吸收层的试验周期数 N 均在达到 1 200 次时荷载损失率 R 值小于 93%. 当周期数达到 1 200 次时,SBS 的荷载损失是最少的, R 值仅为 68.2%; 而 WTR 和 WTR/APAO 的荷载损失率较大且较为相近, R 值分别为 87.1% 和 86.83%. 3 组材料的总断裂能 G 变化规律为 $WTR/APAO > WTR > SBS$. 说明在整个反射裂缝作用周期中,WTR/APAO 破坏所需能量最多. 第一周期最大荷载和临界断裂能变化规律一致, 均是 $WTR/APAO > WTR > SBS$, 说明 WTR/APAO 应力吸收层需要更多的力和能量才能在初期形成反射裂缝.

从图 5 中可看出,3 种材料的曲线变化规律相似: 试验初期荷载迅速下降, 后期趋于缓慢减小. 但是 3 种材料的不同之处也较为明显. SBS 应力吸收层的 3 个平行试件的变化曲线较为接近且初始荷载较小. WTR 和 WTR/APAO 两种材料应力吸收层的初始荷载是 SBS 的 2 倍左右. 与 SBS 相比同周期数时的荷载数值也更大, 荷载降低速率也更快. 可以说

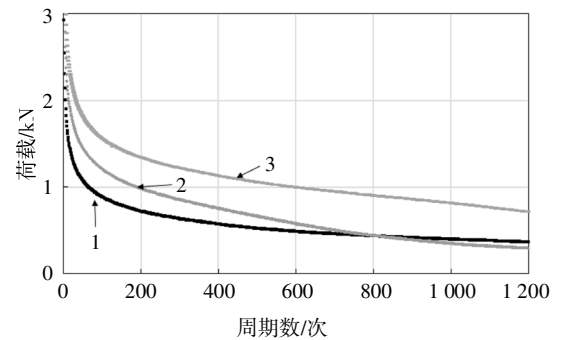
明最大荷载-周期变化曲线能很好地反映材料在整个承受反射裂缝作用过程中的变化规律和特点.



(a)SBS 应力吸收层



(b)WTR 应力吸收层



(c)WTR/APAO 应力吸收层

图 5 常规条件下最大荷载-试验周期变化曲线

Fig.5 Maximum load-cycle curve under standard conditions

3.2 浸水后应力吸收层 OT 结果

3 种应力吸收层试件在经过水损坏作用后的 OT 试验结果见表 6,相应的最大荷载-试验周期变化曲线如图 6 所示.

由表 6 可知,在经历过水损坏之后 SBS 和 WTR 应力吸收层试件的试验周期数 N 仍达到 1 200 次而 WTR/APAO 试件的试验周期的均值为 815 次且只有一个试件达到 1 200 次,同时试验的 VAR 值的离散性较小. 这说明水损坏作用对 WTR/APAO 应力吸收层的影响较为明显. 3 种材料的荷载损失率 R 值较常规条件下均有所增加. 3 组材料的总断裂能 G 的

表 6 浸水后 OT 试验结果

Tab.6 OT results after moisture damage

应力吸收层 类型	试验 周期数 N/次	荷载 损失率 R/%	第一周期	临界断	总断	
			最大荷载 F/kN	裂能 E_c /($J \cdot m^{-2}$)	裂能 G /($N \cdot m^{-1}$)	
SBS	均值	1 200	74.20	1.57	1.14	578.07
	VAR	0	9.68	0.04	0.03	0.97
WTR	均值	1 200	90.77	2.74	1.83	594.24
	VAR	0	0.90	0.06	0.11	0.27
WTR/ APAO	均值	815	89.27	3.45	2.08	606.03
VAR	75.49	29.40	0.03	0.04	14.34	

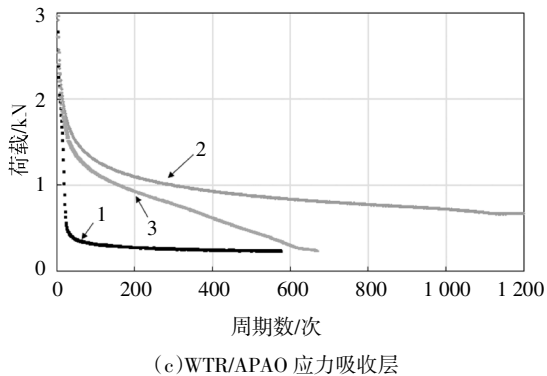
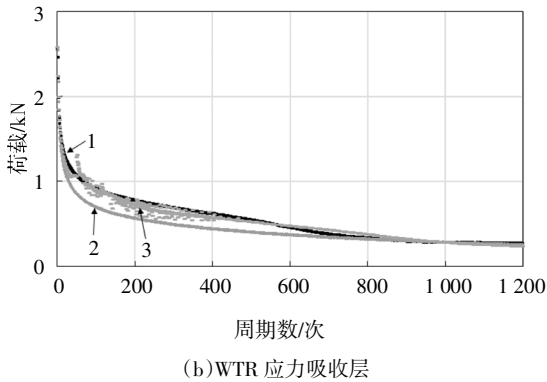
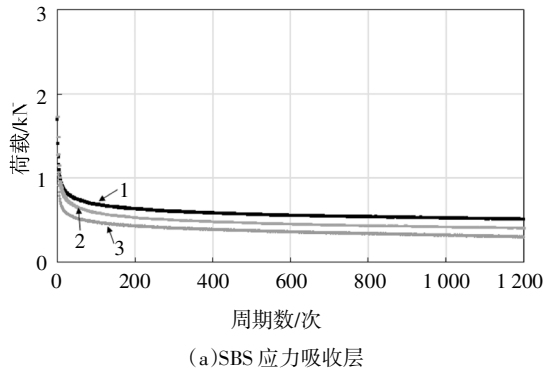


图 6 浸水后 OT 最大荷载-试验周期变化曲线

Fig.6 Maximum load- cycle curve after moisture damage

规律与常规条件一致,虽然 WTR/APAO 的试验周期数较少,但在整个过程中却需要最多的断裂能来完成裂缝的扩展和发展.第一周期最大荷载和临界断裂能的变化规律与常规条件下一致.总体而言,浸水对 SBS 和 WTR 两种应力吸收层的破坏并不十分显著,而对 WTR/APAO 应力吸收层有不利的影响.这与应力吸收层较高的压实度有关,致密的结构会降低水对混合料结构的影响.

从图 6 中可看出,SBS 在浸水后的曲线变化与常规条件下无明显区别.WTR 的曲线变化特点是在 100 次左右完成了荷载的迅速下降,100~800 次周期间是一个速率较缓的荷载下降过程,而 800 次之后出现了接近平行缓慢下降的现象.WTR/APAO 3 个试件的变化差别较大,试件在 50 次循环周期内就完成了荷载的迅速下降,然后进入平行缓慢下降过程;试件 3 则是在初期荷载迅速下降后,整体以接近 45° 的下降速率而达到破坏;试件 2 则是呈现了常规的变化规律,展现了良好的抗反射裂缝性能.

3.3 长期老化后应力吸收层 OT 结果

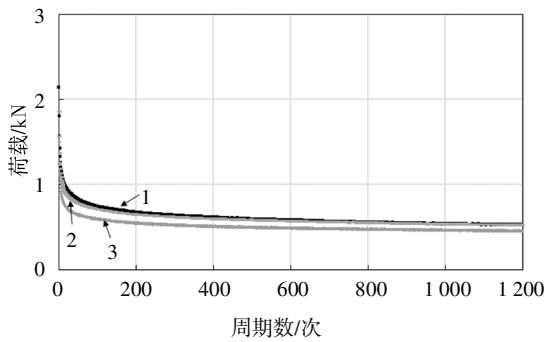
在道路结构中应力吸收层属于中间层,虽然不与大气环境直接接触,但是由于沥青混合料的孔隙联通,中间层仍会在一定程度上受到环境等因素的影响产生老化,从而影响使用性能.因此对应力吸收层的老化性能研究便具有一定的必要性.研究进行了应力吸收层在经过长期老化后的 OT 试验,结果见表 7,最大荷载-试验周期变化曲线如图 7 所示.

表 7 长期老化后 OT 试验结果

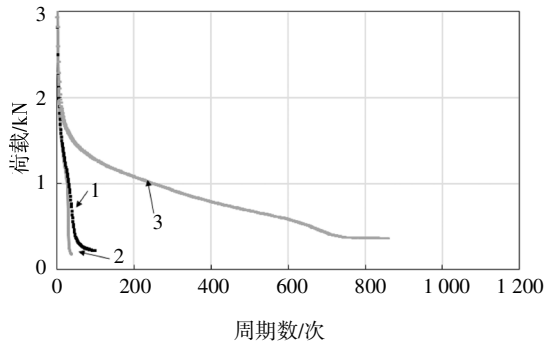
Tab.7 OT results after long-term aging

应力吸收层 类型	试验 周期数 N/次	荷载 损失率 R/%	第一周期	临界断	总断	
			最大荷载 F/kN	裂能 E_c /($J \cdot m^{-2}$)	裂能 G /($N \cdot m^{-1}$)	
SBS	均值	1 200	72.30	1.83	1.37	693.10
	VAR	0	5.79	0.07	0.03	0.30
WTR	均值	332	93.45	3.03	2.06	277.16
	VAR	99.25	0.20	0.01	0.02	9.41
WTR/ APAO	均值	311	93.20	2.48	1.42	53.44
VAR	64.40	0.01	0.71	0.52	0.07	

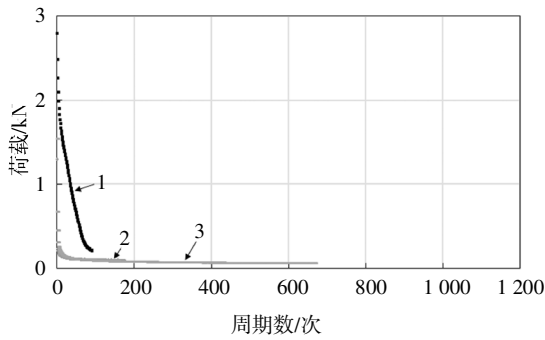
由表 7 可发现,长期老化使 WTR 和 WTR/APAO 的试验周期数明显下降,N 值均下降到了 300 次左右.而 SBS 在经过长期老化后仍达到了 1 200 次,同时荷载损失率只有 72.3%.由第一周期最大荷载和临界断裂能的数据可发现,WTR 应力吸收层的开裂需要更大的力和能量,WTR/APAO 和 SBS 所需能量



(a)SBS 应力吸收层



(b)WTR 应力吸收层



(c)WTR/APAO 应力吸收层

图 7 长期老化后 OT 最大荷载-试验周期变化曲线

Fig.7 Maximum load- cycle curve after long-term aging

较少,这与常规和浸水后的规律有所不同.这说明 WTR/APAO 应力吸收层在经过长期老化后丧失了之前的强度,更易开裂.同时由于 WTR 和 WTR/APAO 的过早破坏,导致两者的总断裂能结果与 SBS 的差距较大.从 OT 参数可发现,长期老化作用降低了 WTR 和 WTR/APAO 两种应力吸收层的变形性和延展性,两者的抗裂性能有着明显的降低.与 SBS 应力吸收层的差异,一方面归结为两种沥青材料在制备过程中的高温对沥青老化的加剧;再者是两种自制材料制备工艺的不成熟导致的改性沥青性质不均.

从图 7 中可看出,SBS 在长期老化后的荷载-周期曲线变化与前两种条件下并无明显区别,性质优良且稳定. WTR 的 2 个试件在初期破坏后迅速失效.

另一个试件却展现了不错的变化趋势,在经历了 800 次循环后逐渐达到破坏. WTR/APAO 应力吸收层的 3 个试件在初期经过荷载的迅速下降后,在 200 次周期内便发生了迅速破坏或在一种临近破坏的状态下平行缓慢下降,这说明在长期老化后 WTR/APAO 应力吸收层的抗裂性丧失殆尽.

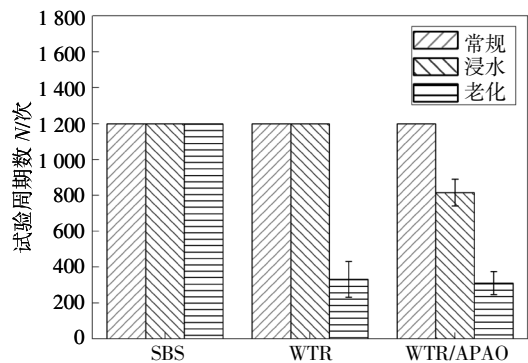
3.4 不同条件对抗反射裂缝性能的影响

由图 8(a)可知,浸水和老化对 SBS 的影响最小,3 种情况下 N 值均达到 1 200 次.浸水对 WTR/APAO 的影响最大,老化对 WTR 和 WTR/APAO 的试验周期次数影响明显.

由图 8(b)可知,3 种应力吸收层在经过浸水和老化后荷载损失率均有所增加.对 SBS 而言水损坏对 R 值的影响大于老化作用.对于 WTR 和 WTR/APAO 来说,老化作用的影响大于水损坏.在 3 种条件下 SBS 的荷载损失率都是最小的,而 WTR 和 WTR/APAO 的荷载损失率均较高且相差不大.

从图 8(c)可知,在常规条件下三者抵抗反射裂缝中所需的总断裂能依次是 WTR/APAO>WTR>SBS,浸水后三者的总断裂能相差不大,老化后由于 WTR 和 WTR/APAO 的周期数迅速减少而导致总断裂能下降迅速.在经历过浸水和老化之后 3 种应力吸收层的总断裂能均有所下降且老化的影响更加显著(SBS 老化后略有升高).

图 8(d)(e)的变化规律相似,SBS 和 WTR 的第一周期最大荷载和临界断裂能均是老化>浸水>常规.这说明老化和水损坏导致需要更多的力和能量来产生裂缝. WTR/APAO 在常规和浸水条件下第一周期最大荷载和临界断裂能相似,但是老化后下降明显,这与其他参数的变化规律一致,说明老化造成了试件的硬化和强度降低,基本破坏了试件的抗裂性能.



(a)试验周期数

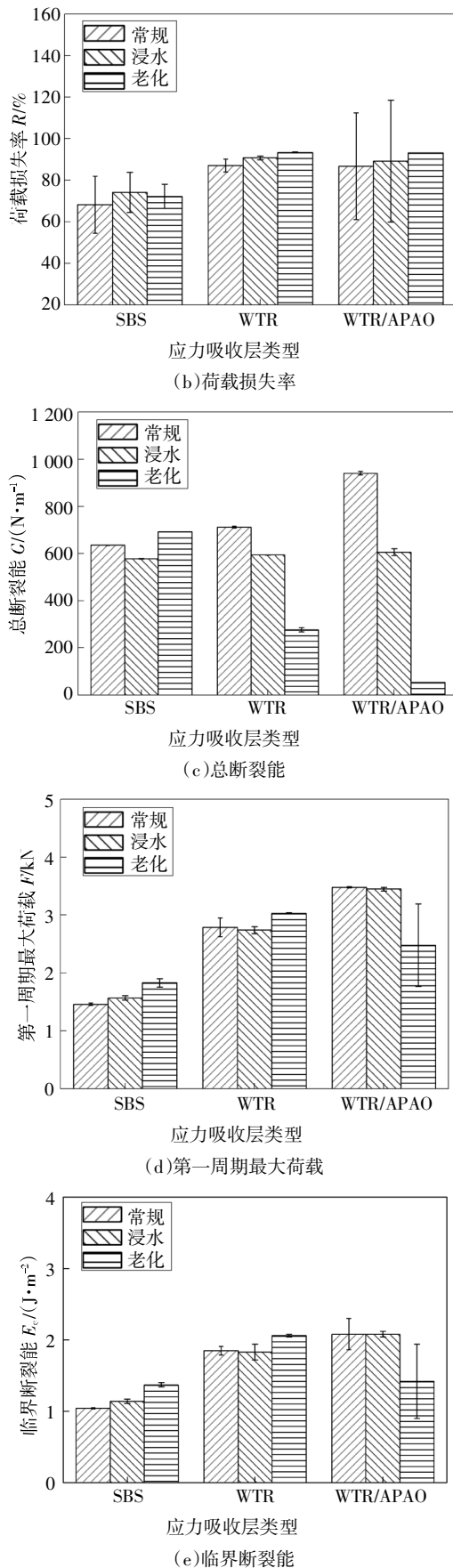


图8 在不同条件下 OT 指标变化规律

Fig.8 Change rule of OT index under different conditions

综上可发现试验周期数、荷载损失率和总断裂能指标可以很好地反映和评价试件整体的抗裂性能,而第一周期最大荷载和临界断裂能是评价试件初期裂缝产生时的指标。

3.5 OT 曲线拟合

可以发现图 5、图 6 和图 7 中的 3 种应力吸收层在不同条件下的最大荷载-周期曲线符合幂函数变化规律.采用公式(1)对典型的变化曲线进行拟合得到表 8 所示拟合结果。

$$y = a \cdot x^{-b} + \varepsilon, \varepsilon: N(0, \delta^2). \quad (1)$$

通过表 8 可发现在常规和浸水后曲线的变化规律十分符合幂函数的变化规律,变异系数 R^2 达到了 0.95 以上.而长期老化后 WTR 和 WTR/APAO 由于试件的迅速破坏而导致了曲线的拟合度不高,但是在周期数 600 次以上的曲线拟合的变异系数也达到了 0.8 以上.这说明应力吸收层的 OT 最大荷载-周期曲线变化符合幂函数变化规律。

表 8 OT 最大荷载-试验周期曲线拟合结果

Tab.8 Fitting result of OT maximum load-cycle curve

条件	沥青类型	拟合公式	R^2	a	b
常规	SBS	$y=1.189 3x^{-0.117}$	0.990 9	1.189 3	0.117
	WTR	$y=3.622 8x^{-0.28}$	0.975 4	3.622 8	0.28
	WTR/APAO	$y=4.109 6x^{-0.251}$	0.993 7	4.109 6	0.251
浸水后	SBS	$y=1.243 6x^{-0.126}$	0.987 1	1.243 6	0.126
	WTR	$y=3.868 1x^{-0.373}$	0.979 0	3.868 1	0.373
	WTR/APAO	$y=4.114 4x^{-0.335}$	0.991 4	4.114 4	0.335
长期老化	SBS	$y=1.324 7x^{-0.13}$	0.982 6	1.324 7	0.13
	WTR	$y=8.089 1x^{-0.413}$	0.808 8	8.089 1	0.413
	WTR/APAO	$y=0.401 7x^{-0.297}$	0.857 4	0.401 7	0.297

幂函数的参数 a, b 代表曲线变化的速率, a 值和 b 值越大说明荷载衰减得越快.从 3 种材料在不同条件下的拟合曲线可发现:荷载衰减的速率为 $WTR/APAO > WTR > SBS$.老化和水损坏作用能加大应力吸收层荷载衰减速率,且老化的影响要大于水损坏.与 WTR 和 WTR/APAO 相比, SBS 受水损坏和老化的影响荷载衰减速率增加得并不明显。

4 结论

通过对 SBS、WTR 和 WTR/APAO 3 种改性沥青

应力吸收层进行常规、浸水和长期老化后的 OT 试验,系统研究了不同条件下 3 种应力吸收层的抗反射裂缝性能,新的材料和研究方法为实际工程中的反射裂缝病害防治问题提供了参考.研究得到主要结论如下:

1) OT 试验可以很好地评价应力吸收层的抗反射裂缝性能,试验周期数、荷载损失率和总断裂能能够有效地评价试件整体的抗裂性能,第一周期最大荷载和临界断裂能是评价初期开裂的指标.

2) 3 种应力吸收层在常规条件下均有良好的抗反射裂缝性能,但水损坏对 WTR/APAO 的抗裂性能影响较大,长期老化后 WTR 和 WTR/APAO 抗裂性大幅衰减.

3) 3 种应力吸收层的最大荷载-周期数曲线符合幂函数变化规律.曲线参数 a 、 b 表征荷载衰减的速率, a 值和 b 值越大说明荷载衰减得越快.

4) 基于 OT 试验指标的评价标准,将不同类型的应力吸收层更恰当地应用到不同条件下的实际道路防反射裂缝工程中,可针对性地防治反射裂缝病害.

参考文献

- [1] DAVE E V, BUTTLAR W G. Thermal reflective cracking of asphalt concrete overlays [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2010, 11(6): 477—488.
- [2] 曾梦澜, 陈伟, 朱艳贵, 等. 布敦岩沥青湿法工艺掺量对改性沥青混合料性能的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(11): 94—101.
ZENG M L, CHEN W, ZHU Y G, *et al.* Effects of proportion of Buton rock asphalt on performance of modified asphalt mixture with wet method [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(11): 94—101. (In Chinese)
- [3] 钱振东, 薛永超, 孙健. 橡胶环氧沥青碎石防水黏结层抗剪性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(7): 82—87.
QIAN Z D, XUE Y C, SUN J. Shear performance of waterproof cohesive layer of rubber epoxy asphalt stone [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(7): 82—87. (In Chinese)
- [4] CHEN Y, LOPP G, ROQUE R. Effects of an asphalt rubber membrane interlayer on pavement reflective cracking performance [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(12): 1936—1940.
- [5] LI Z Z, CHEN S F, LIAO W D, *et al.* Lab simulation study on anti-cracking performance of asphalt concrete overlays for fatigue [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 510: 478—483.
- [6] GU F, LUO X, ZHANG Y, *et al.* Using overlay test to evaluate fracture properties of field-aged asphalt concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 101: 1059—1068.
- [7] 翟瑞鑫, 陈永满, 余清华, 等. 基于 overlay tester 评价大粒径透水沥青混合料抗反射开裂性能[J]. *功能材料*, 2017, 48(9): 9129—9135.
ZHAI R X, CHEN Y M, YU Q H, *et al.* Evaluation of cracking-resistance potential of large stone permeable asphalt mixture based on overlay tester [J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(9): 9129—9135. (In Chinese)
- [8] 李兴海, 周绪利, 张涛, 等. 基于 Overlay tester 试验评价沥青混合料抗反射裂缝的能力[J]. *中外公路*, 2015, 35(3): 303—305.
LI X H, ZHOU X L, ZHANG T, *et al.* Evaluation of anti-reflective cracks in asphalt mixture based on overlay tester [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2015, 35(3): 303—305. (In Chinese)
- [9] YAN K Z, HE W L, MING C, *et al.* Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 129: 256—265.
- [10] ZHAO X W, YAN K Z, YANG S, *et al.* Laboratory research on the properties of warm amorphous poly alpha olefin-modified asphalt mixture using sasobit and deurex [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(5): 1—9.
- [11] 唐曦. 应力吸收层沥青混合料组成设计及路用性能试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学交通运输工程学院, 2015: 18—33.
TANG X. Research on material of stress absorbing layer asphalt mixture and experiments of pavement performance [D]. Changsha: College of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, 2015: 18—33. (In Chinese)
- [12] TEX-248-F Overlay test [S]. Texas: Construction Division, Texas Department of Transportation, 2009: 1—6.