

文章编号:1007-9629(2022)03-0285-09

紫外老化对温拌胶粉改性沥青砂浆开裂特性的影响

崔世超^{1,2}, 王 岚^{1,2,*}

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学 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:为研究紫外(UV)老化对温拌胶粉改性沥青砂浆(CR-WAM)开裂特性的影响,以SDYK表面活性剂型温拌胶粉改性沥青砂浆(CRS-WAM)、EM降黏剂型温拌胶粉改性沥青砂浆(CRE-WAM)及热拌胶粉改性沥青砂浆(CR-HAM)为研究对象,结合数字图像处理(DIC)技术、单边切口弯曲梁(SENB)试验与有限元方法,分析了UV老化时长对沥青砂浆开裂特性的影响.结果表明:UV老化后,沥青砂浆起裂点水平位移(U)和水平应变(EXX)、应力强度因子(K)及区域损伤因子(D)均增大,且随着UV老化时长的增加,其增长速率越来越快;CR-WAM的抗开裂、抗老化能力优于CR-HAM,CRS-WAM的抗开裂、抗老化能力最优,CRE-WAM次之;沥青砂浆的裂缝长度越长、越靠近跨中位置、倾斜角度越小, K 值越大,应力集中越明显,越容易开裂.

关键词:温拌胶粉改性沥青砂浆;紫外老化;DIC技术;损伤特性;开裂特性

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.010

Effect of Ultraviolet Aging on Cracking Characteristics of Warm Mix Crumb Rubber Modified Asphalt Mortar

CUI Shichao^{1,2}, WANG Lan^{1,2,*}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to study the effect of ultraviolet(UV) aging on the cracking characteristics of warm mix crumb rubber modified asphalt mortar (CR-WAM), SDYK surfactant type warm mix crumb rubber modified asphalt mortar (CRS-WAM), EM viscosity reducer type warm mix crumb rubber modified asphalt mortar(CRE-WAM) and hot mix crumb rubber modified asphalt mortar (CR-HAM) were studied. The influence of UV aging time on the cracking characteristics of asphalt mortar was analyzed with the help of digital image correlation (DIC) technology, single-edge notch bending (SENB) test and finite element method. The results show that after UV aging, horizontal displacement (U) and horizontal strain(EXX) of cracking point of asphalt mortar, stress intensity factor(K) and regional damage factor(D) all increase, and with the increase of the time of UV aging, the growth rate is getting faster and faster. The anti-cracking and anti-aging ability of CR-WAM is better than that of CR-HAM. CRS-WAM has the best anti-cracking and anti-aging ability and followed by CRE-WAM. Crack length, crack inclination angle and crack

收稿日期:2020-11-13; 修订日期:2021-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11762012);内蒙古自然科学基金资助项目(2019MS05079);内蒙古自治区关键技术攻艰项目(2019GG031)

第一作者:崔世超(1993—),男,内蒙古赤峰人,内蒙古工业大学硕士生.E-mail:cuishichao1000@126.com

通讯作者:王 岚(1966—),女,北京人,内蒙古工业大学教授,博士生导师,博士.E-mail:wanglan661018@163.com

position have great influence on K value. The longer the crack length, the closer to the midspan position, the smaller the tilt angle and the larger the K value is, the more obvious the stress concentration is, and the asphalt mortar is easier to crack.

Key words: warm mix crumb rubber modified asphalt mortar (CR-WAM); UV aging; DIC technology; damage characteristic; cracking characteristic

沥青混合料是以粗集料为分散相,沥青砂浆为分散介质的一种粗分体系.根据现代胶体理论,分散介质对整个分散体系具有重要影响.因此,对沥青砂浆的路用性能展开研究具有重要意义.

已有研究表明,老化会降低沥青路面的路用性能,尤其是开裂性能^[1-2].Montepara等^[3]与 Bocci等^[4]发现,高能紫外线会引发沥青的聚合反应.Hao等^[5]发现,长期老化作用后抗剥落型沥青混合料的水稳定性大幅度降低,而短期老化作用后的水稳定性有所提高.Gallego等^[6]发现,热氧老化作用会促进裂纹的发展.Lee等^[7]发现,再生胶粉改性沥青混合料老化后的高温黏度、高温及中温流变性、低温抗裂性等性能依然满足 Superpave 中对胶结料的要求.Mo等^[8]发现,热氧老化作用后沥青混合料的高温抗剥落性能有所下降,低温抗剥落性能大幅度降低.Cygas等^[9]发现,热氧老化作用后再生沥青混合料的路用性能优良.Glaoui等^[10]发现,老化热循环引起的路面热疲劳是加速路面退化的主要原因.Dony等^[11]发现,热氧老化会使沥青路面的使用寿命大幅度降低.Samer等^[12]发现,添加了抗氧剂的沥青混合料具有更好的抗拉强度比及抗车辙能力.Xie等^[13]研究发现,沥青砂浆的抗紫外老化能力优于沥青,同时确定了紫外老化作用下的最佳油砂比.

内蒙古地区昼夜温差大,沥青路面容易出现开裂破坏,而紫外(UV)老化会加速开裂破坏.因此,本文把数字图像处理(DIC)技术与单边切口弯曲梁(SENB)试验相结合,对不同UV老化时长条件下温拌胶粉改性沥青砂浆(CR-WAM)、热拌胶粉改性沥青砂浆(CR-HAM)的开裂特性展开研究,具有重要意义.

1 试验材料及方案设计

1.1 试验材料

基质沥青采用盘锦90#沥青,橡胶粉颗粒大小为600 μm ,胶粉改性沥青(CR)是在基质沥青中掺入20%(质量分数,本文涉及的掺量、油砂比均为质量

分数或质量比)的橡胶粉颗粒经湿法制备而成.温拌剂为山东交通科学研究院自主研发的表面活性剂SDYK与降黏剂EM,其中SDYK为黏稠状黄色液体,EM为片状白色固体.根据已有研究成果,SDYK、EM掺量分别为0.6%、1.0%时,温拌效果良好.2种温拌胶粉改性沥青(WCR)是在CR中分别掺入0.6%SDYK、1.0%EM制备而成.集料为0~5 mm的玄武岩,矿粉采用石灰岩矿粉.

1.2 试件成型

本文以AC-16型密级配沥青混合料为基础,利用比表面积法和 δ 体积转化法换算而来的沥青砂浆油砂比分别为12.15%、12.30%.2种方法得出的沥青砂浆油砂比相差不大,最终选取油砂比为12.30%.沥青砂浆的配合比如表1所示.通过马歇尔等孔隙率法,确定SDYK表面活性剂型温拌胶粉改性沥青混合料可以降低拌和、压实温度20 $^{\circ}\text{C}$,EM降黏剂型温拌胶粉改性沥青混合料可以降低拌和、压实温度15 $^{\circ}\text{C}$,所以热拌胶粉改性沥青砂浆(CR-HAM)的拌和与压实温度分别设定为180、165 $^{\circ}\text{C}$,SDYK表面活性剂型温拌胶粉改性沥青砂浆(CRS-WAM)和EM降黏剂型温拌胶粉改性沥青砂浆(CRE-WAM)的拌和、压实温度分别为160、145 $^{\circ}\text{C}$ 和165、150 $^{\circ}\text{C}$.沥青砂浆小梁制作参照JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的“T0705”,先采用轮碾法制成300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 50 mm的板状试件,再切割成190 mm $\times$ 20 mm $\times$ 25 mm的沥青砂浆小梁,最后利用小型电锯在跨中位置切割出长4 mm、宽2 mm的预制切口.

1.3 试验设计

UV老化试验采用RGT-UVAH-365F型紫外老化箱,其光源为高压汞灯光源,额定功率为1 kW,灯管长125 mm,工作电流7.8 A,灯管电压135 V.内蒙古年平均太阳辐射总量为6 000 MJ/ m^2 ,紫外光辐射量约占太阳辐射总量的6%,即360 MJ/ m^2 .试件距光源距离为35 cm,利用紫外线光度计测得该处的紫外

表1 沥青砂浆的配合比
Table 1 Mix proportion of asphalt mortar

Sieve size/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	≤ 0.075
Passing ratio(by mass)/%	29.5	17.4	12.4	11.6	6.8	8.0	14.3

辐照强度为 500 W/m^2 , 由此可得室内模拟室外 1 a 自然 UV 老化所需时间为 200 h. 本文模拟室外自然 UV 老化 1(UV1)、3(UV3)、5(UV5) a, 室内所需时间分别为 200、600、1 000 h. 试验时箱内强制通风, 箱内温

度约为 $40 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

SENB 试验采用 500 N 万能试验机, 控制方式为位移控制, 加载速率为 3 mm/min , 试验温度 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 加载过程如图 1 所示. DIC 采集频率为 10 Hz .

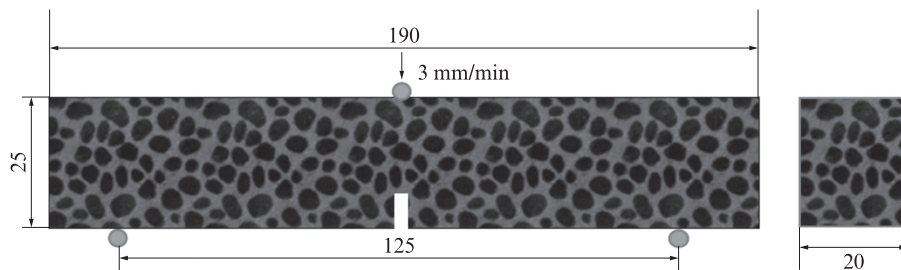


图1 SENB试验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SENB test principle(size:mm)

2 结果与分析

2.1 UV老化对沥青砂浆变形及损伤特性的影响

图2为不同UV老化时长下,各种沥青砂浆的水平位移(U)和水平应变(EXX)值随加载时间的变化曲线.由图2可见:

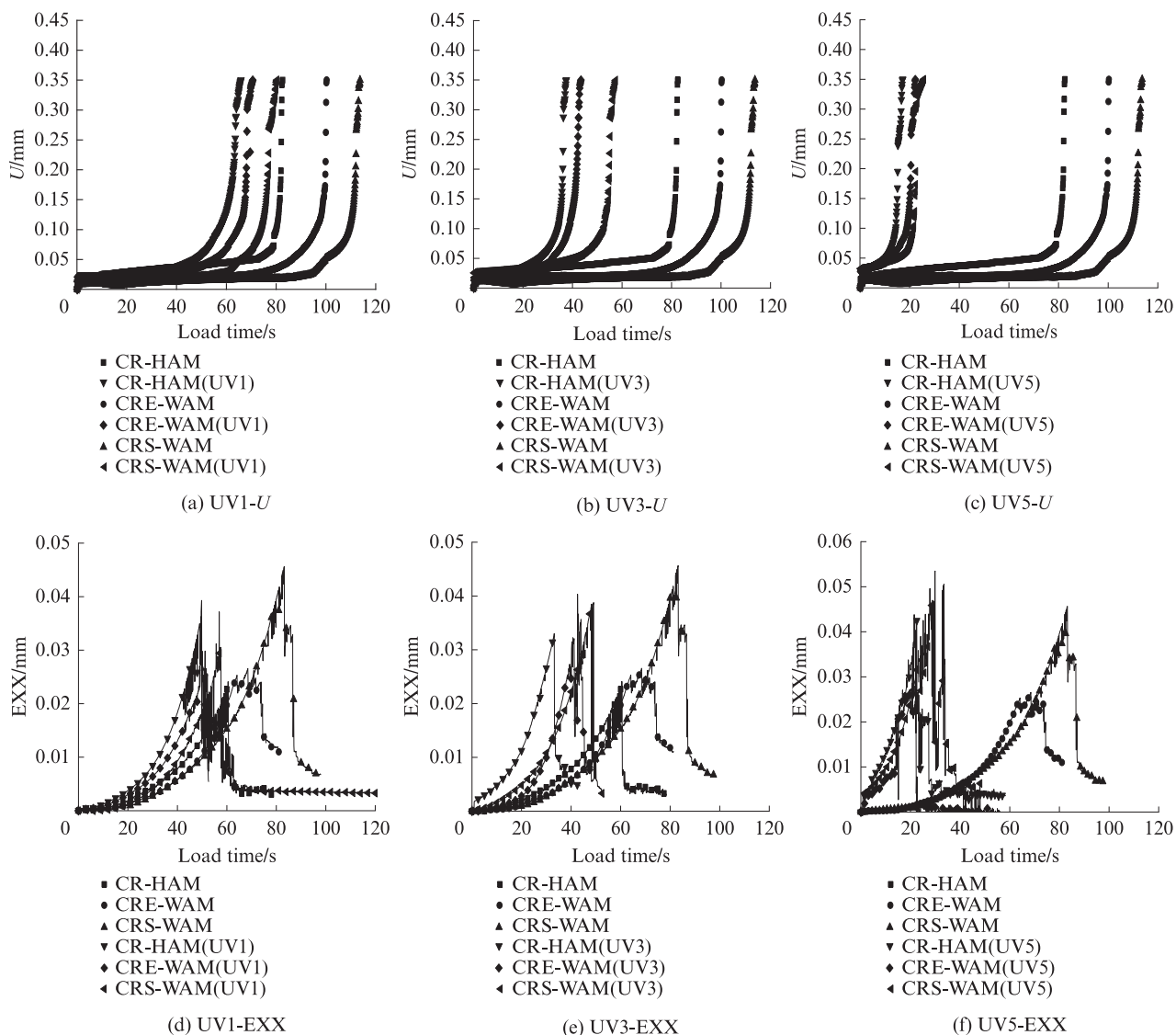
(1)无论是何种UV老化时长,老化前后沥青砂浆 U 值曲线的演化规律大致相同.加载初期的 U 值很小且增长缓慢,待达到某一时间点后, U 值迅速增长,说明此时间点即为开裂时间点,且加载初期宏观裂缝并未生成,只是损伤累计的过程.损伤累计超过一定阈值,沥青砂浆开始出现宏观裂缝,随着加载时间的延长,宏观裂缝迅速发展直至破坏.进一步分析发现,随着UV老化时长的延长,起裂点前移幅度逐渐增大,未老化沥青砂浆的开裂时间点大约在80 s,UV1后变为40 s,UV3后变为25 s,UV5后变为5 s,UV5后沥青砂浆几乎是直接开裂.此时的沥青砂浆丧失了大部分黏性,弹性比例大幅增加.老化前后CR-WAM开裂时间点的出现均迟于CR-HAM,其中CRS-WAM开裂时间点的出现最迟,老化后开裂时间点前移幅度最小,CRE-WAM次之,说明CR-WAM的抗开裂、抗老化能力优于CR-HAM,CRS-WAM具有最佳的抗开裂、老化能力,CRE-WAM次之.

(2)沥青砂浆 EXX 曲线的演化具有3个明显阶段:第1阶段 EXX 值增长幅度较小且稳定发展,第2阶段 EXX 值加速增长至峰值,第3阶段 EXX 峰值过后迅速波动下降并趋于很小值.老化作用对 EXX 值的影响主要体现在前2个阶段,沥青砂浆的 EXX 值在第1阶段增长速率较大,在第2阶段峰值提前出现,且这种规律在UV5上更加明显.这说明老化作用

后沥青砂浆的抗开裂能力下降,UV5影响更为严重.另外还可看出,无论在何种UV老化时长下,虽然CR-HAM与CR-WAM的 EXX 峰值均前移,但CR-WAM前移的幅度较小,CRS-WAM前移的幅度最小,CRE-WAM次之,说明CR-WAM的抗开裂、抗老化能力均强于CR-HAM,CRS-WAM具有最好的抗开裂、老化能力,CRE-WAM次之.

综上所述,CR-WAM较CR-HAM具有更好的抗老化、抗开裂能力,CRS-WAM的抗老化、抗开裂能力最佳,CRE-WAM次之.这是因为UV老化会使沥青质析出,导致沥青变硬、变脆,沥青砂浆变得更加容易开裂.SDYK表面活性剂中的亲水基和亲油基抑制了部分沥青质的析出,从而提高了其抗UV老化的能力.此外,掺加SDYK表面活性剂以后,亲水基和亲油基会对沥青和集料有一定的吸附作用,减小了沥青与集料的接触角,降低了集料的表面能,使沥青与集料形成了更加密实的裹附结构,大大提高了沥青砂浆的抗裂性能.虽然亲水基、亲油基对沥青与集料具有一定的吸附作用,但随着UV老化时长的延长,高能紫外线会破坏部分亲水基、亲油基的分子结构,使裹附能力部分丧失,才会出现上述UV5作用后沥青砂浆近乎直接开裂,且CR-HAM与CR-WAM的开裂时间点非常接近的情况.此外,高能紫外线也会导致集料-沥青胶浆的黏结界面更加脆弱,更易损伤,所以随着UV老化时长的延长,沥青砂浆越来越容易开裂.

研究沥青砂浆小梁试件某一区域的损伤特性对裂缝的扩展规律具有重要意义,但损伤区域的选择并不是随机的.损伤区域的选择应覆盖裂纹扩展路径,这样对于断裂过程中的损伤特性研究才具有实际意义.同时,考虑试验条件最不利原则,即裂缝沿左、右两侧扩展的极限情况,最终选取 $20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的矩

图2 UV老化前后CR-HAM与CR-WAM的 U 、 EXX 值随加载时间变化曲线Fig. 2 Curves of U , EXX values of CR-HAM and CR-WAM varied with loading time before and after UV aging

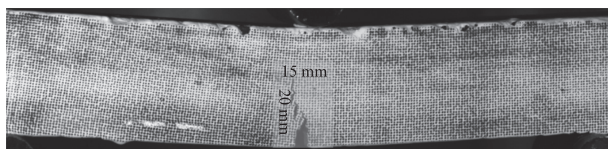
形区域作为损伤研究区域,如图3所示.在此研究区域内每隔0.5 mm设置1个计算点,共有1 200个计算点.

参考牛冬瑜^[14]给出的损伤变量公式,对所选区域的损伤因子(D)进行计算:

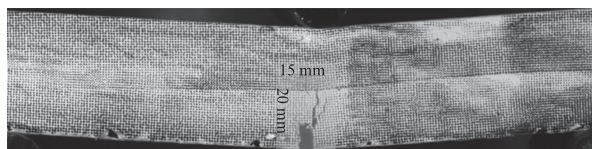
$$D_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (EXX_{ij} - \overline{EXX}_i)^2} \quad (1)$$

$$D_T = \frac{\sum_{i=0.1}^T D_i}{D_{Ti}} \quad (2)$$

式中: D_i 为加载第 i 秒的损伤值; n 为数据点个数; EXX_{ij} 为加载第 i 秒第 j 点的水平应变值; $\overline{EXX}_i$ 为加载第 i 秒的水平应变均值; D_T 为加载到 N 秒由荷载作用造成的损伤值; D_{Ti} 为试件破坏时的累计损伤值.



(a) Crack develops along the left side of the area



(b) Crack develops along the right side of the area

图3 区域损伤研究区域的选取

Fig. 3 Selection of area damage study area

图4为UV老化下CR-HAM与CR-WAM的 D 值随加载时间的变化曲线.由图4可见:

(1)CR-HAM与CR-WAM的 D 值随加载时间变化的规律大体相同,均为加载初期损伤缓慢累积,说明沥青砂浆在宏观裂缝形成前具有一定的抗变形能力.这是因为橡胶粉颗粒是一种高弹材料,在沥青砂浆受荷载变形时,胶粉颗粒会储存一定的

弹性势能,所以具有良好的抗变形能力.

(2)随着加载时间的延长,损伤累积量逐渐增大,待达到某一时间点后损伤量开始突增,此时宏观裂缝已经开始形成,胶粉颗粒储存的弹性势能得以释放,沥青砂浆的强度降低,抗变形能力越来越差.同时沥青砂浆内部的微裂纹与孔洞得以发展,导致损伤累积速度加快,直至试件破坏.

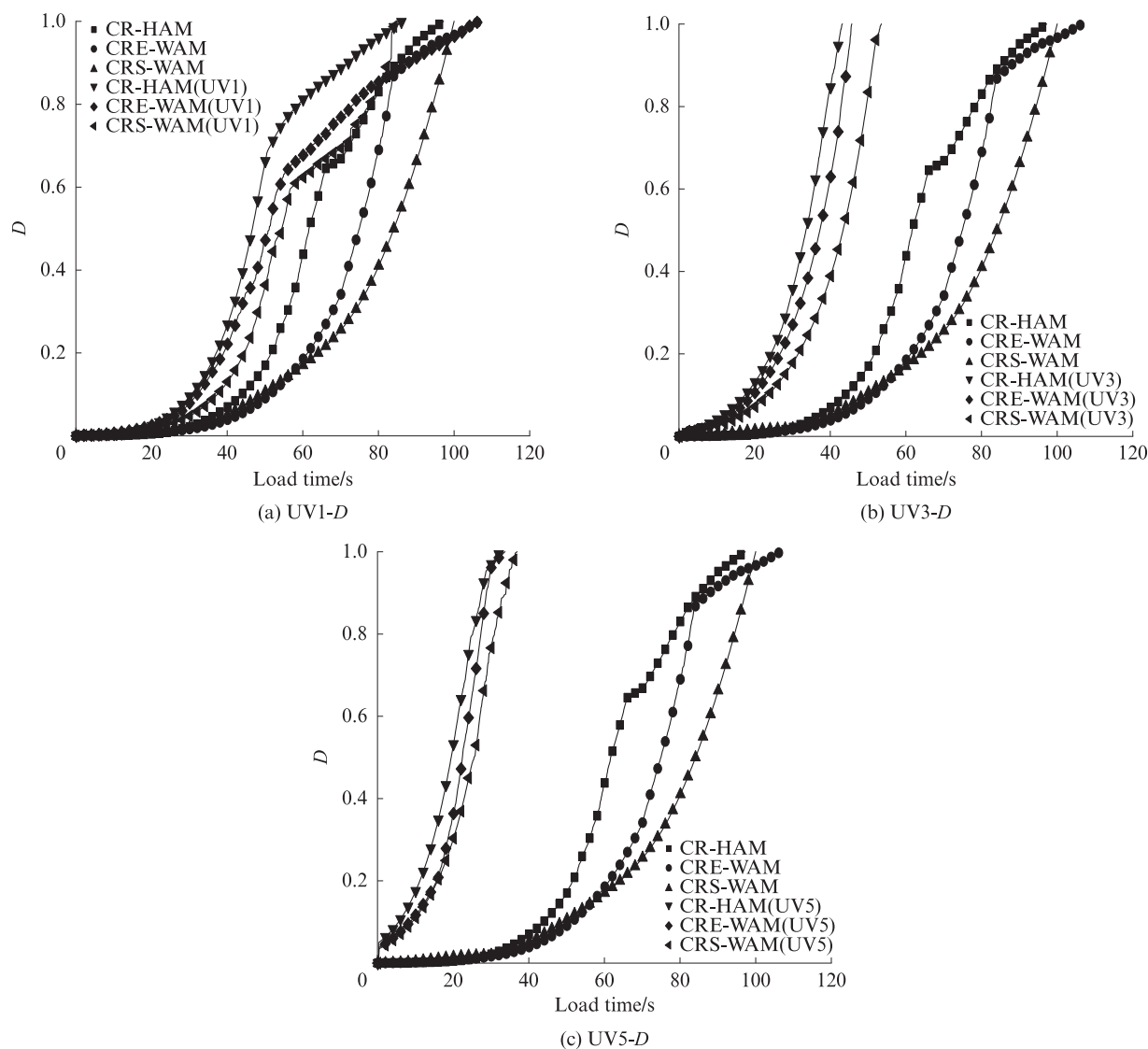


图4 UV老化作用前后 D 值随加载时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of D values with loading time before and after UV aging

由图4还可看出:

(1)在加载初期,UV5后沥青砂浆的损伤累积最快,短时间达到开裂,其次是UV3、UV1、原样,说明UV老化后沥青砂浆的抗开裂能力均下降,随着UV时长的延长,下降的幅度增大,UV5对沥青砂浆的抗开裂性能影响最为严重.

(2)UV1、UV3后损伤累积曲线虽然向前推移,但CR-HAM与CR-WAM的损伤累积速率还有很

大差距,CR-HAM的损伤累积速度快于CR-WAM.而UV5后,CR-HAM与CR-WAM的损伤累积速率差距不大.这是因为高能紫外线破坏了温拌剂的部份分子结构,致使温拌剂丧失部分功能.

(3)高能紫外线会使沥青砂浆黏性丧失严重,弹性增加速度变快,开始变脆、变硬,导致UV5后CR-HAM与CR-WAM的损伤累积速率差距不大.但总体来说,CRS-WAM始终具有最佳的抗开裂性能.

2.2 UV老化对应力强度因子的影响

对于单边切口梁三点弯曲试件,应力强度因

$$\frac{Kb(\sqrt{h})^3}{M} = \left[7.31 + 0.21 \sqrt{\frac{L}{h}} - 2.9 \right] \sec\left(\frac{\pi a}{2h}\right) \sqrt{\tan\left(\frac{\pi a}{2h}\right)} \quad (3)$$

$$M = \frac{P_{\max} L}{4} \quad (4)$$

式中: b 为试件宽度,mm; h 为试件高度,mm; M 为弯曲力矩,N·mm; L 为试件跨度,mm; a 为裂缝长度,mm; $P_{\max}$ 为峰值荷载,N.

根据式(3)、(4)对UV老化前后CR-HAM与CR-WAM的 K 值进行计算,结果如表2所示. K 值越大,表示裂纹尖端的应力越集中,越容易断裂.由表2可见:

(1)UV老化后CR-HAM与CR-WAM的 K 值均增大,沥青砂浆越来越容易开裂.这是因为UV老化使沥青胶结料发生了化学反应,导致沥青组分发生变化,沥青质析出.同时使原有的胶体平衡体系破坏,也改变了原有的高分子链结构,导致其物理特性发生变化,开始变硬、变脆,从而沥青砂浆的抵抗裂纹扩展能力降低,更加容易开裂破坏.

(2)CR-WAM的 K 值始终小于CR-HAM,CRS-WAM具有最小的 K 值,其次是CRE-WAM.说明沥青砂浆老化后的抗断裂能力下降,但CR-WAM的抗断裂能力始终强于CR-HAM.CRS-WAM具有最佳的抗断裂能力,其次是CRE-WAM.

(3)随着UV老化时长的延长, K 值大幅度增加,UV1到UV3的过程中CR-HAM、CRE-WAM、CRS-WAM的 K 值分别增加了58%、47%、46%,UV3到UV5分别增加了41%、49%、44%,UV3后 K 值的增加幅度最大,UV5后增加幅度减小.这是因为UV1时间短,沥青砂浆黏性降低的比例较小,弹性增加量也较小,轻质组分挥发量也较少,破坏的温拌剂分子结构也有限,导致 K 值并没有大幅度提升.而UV3时间较长,破坏了大部分温拌剂分子结构、挥发了大比例轻质组分,黏性部分大幅度减少,弹性部分大幅度增加, K 值得到大幅度提升.UV5时可供破坏的温拌剂分子结构、轻质组分挥发的比例有限,所以 K 值的提升幅度有所下降.总体来说,UV5后沥青砂

浆(K)值求解参考文献[15-17],如式(3)、(4)所示.

浆的 K 值最大,说明裂尖应力集中更加明显,更容易断裂.综上所述,CR-WAM的抗断裂、抗老化能力优于CR-HAM,CRS-WAM最优,CRE-WAM次之.

表2 UV老化作用前后的 K 值
Table 2 K values before and after UV aging

Aging type	CR-HAM	CRE-WAM	CRS-WAM
Original	7.797	7.645	7.197
UV1	9.351	9.012	8.965
UV3	14.782	13.249	13.142
UV5	20.890	19.752	19.051

2.3 基于Abaqus围线积分的 K 值影响因素

前述探讨了由经验公式计算得出的 K 值,目前工程实际应用中采用数值解法求 K 值也比较多见,本节主要通过数值解法来求解 K 值,并对 K 值的影响因素进行探究.此外,前文已经研究了UV老化对 K 值的影响规律,所以本节只以CRS-WAM为例,对 K 值的影响因素进行探讨,其余试件 K 值的影响因素具有类似规律.

围线积分又称云图积分,其求解 K 值步骤如下:首先,创建部件、赋予部件属性,同时在裂纹尖端设置应力集中圆形区域;其次,指定裂纹路径与裂纹尖端;最后,创建围线积分Crack,裂纹奇异性节点采用1/4节点,并设定加载模式与边界条件,而后选择历程输出请求 K 值,划分网格运行作业.图5为裂缝长度为10 mm时未老化CRS-WAM的 K 值围线积分求解应力云图.从图5可以看出,裂纹尖端的应力集中非常明显.表3为围线积分求解的 K 值.其中,输出H-output-1_crack-1有4个值, K_1 为张开型应力强度因子, K_2 为滑开型应力强度因子.同时,根据式(3)、(4)求得CRS-WAM裂缝长度为10 mm时的 K 值为7.832 N/mm^{3/2}.基于以上两点可知,采用围线积分求解 K 值具有较高的可靠性.



图5 10 mm裂缝应力场云图

Fig. 5 10 mm fracture stress field cloud image

表3 Abaqus围线积分求解 K 值
Table 3 Abaqus contour integral for K value

H-output-1_ crack-1	1	2	3	4
K_1	7.671	7.658	7.672	7.690
K_2	0.728 5	0.724 3	0.824 4	0.818 9
MTS direction	-10.66	-10.62	-12.00	-11.89
J from K_s	0.164 9	0.164 4	0.165 4	0.166 1

图6为不同条件下的 K 值应力场云图。由图6(a1)~(a5)可见:随着跨中裂缝长度的增加,应力集中的区域逐渐增大;随着裂缝长度的增加,“V”型裂缝宽度越来越宽,沥青砂浆试件的抗断裂能力越来越差,说明跨中裂缝越长,试件越容易断裂。由图6(b1)~(b6)可见:随着裂缝距离跨中位置越来越远,应力集中的区域越来越小,应力集中越来越不明显;

裂纹尖端“V”型裂缝宽度也逐渐减小,说明距离跨中位置越远,沥青砂浆试件越不容易断裂,这是因为跨中位置所受水平拉应力的影响较大,距离跨中位置越远,水平拉应力的影响越小,所以越不容易断裂。由图6(c1)~(c6)可见:在裂缝倾斜角度 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,随着裂缝倾斜角度的增加,应力集中区域的大小相差较大;在 $\alpha > 30^\circ$ 时,随着裂缝倾斜角度的增加,应力集中区域开始减小,这是因为在裂缝倾斜角度 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,垂直于裂缝的拉应力分量受裂缝倾斜角度变化的影响较大;当 $\alpha > 30^\circ$ 时,这种影响较小,所以导致应力集中区域的这种差异性。在 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,从应力场云图很难分辨倾斜角度对 K 值的影响,但从“V”型裂缝开口宽度可以看出,随着裂缝倾斜角度的增大,“V”型裂缝开口宽度逐渐减小,沥青砂浆试件越来越不容易开裂。

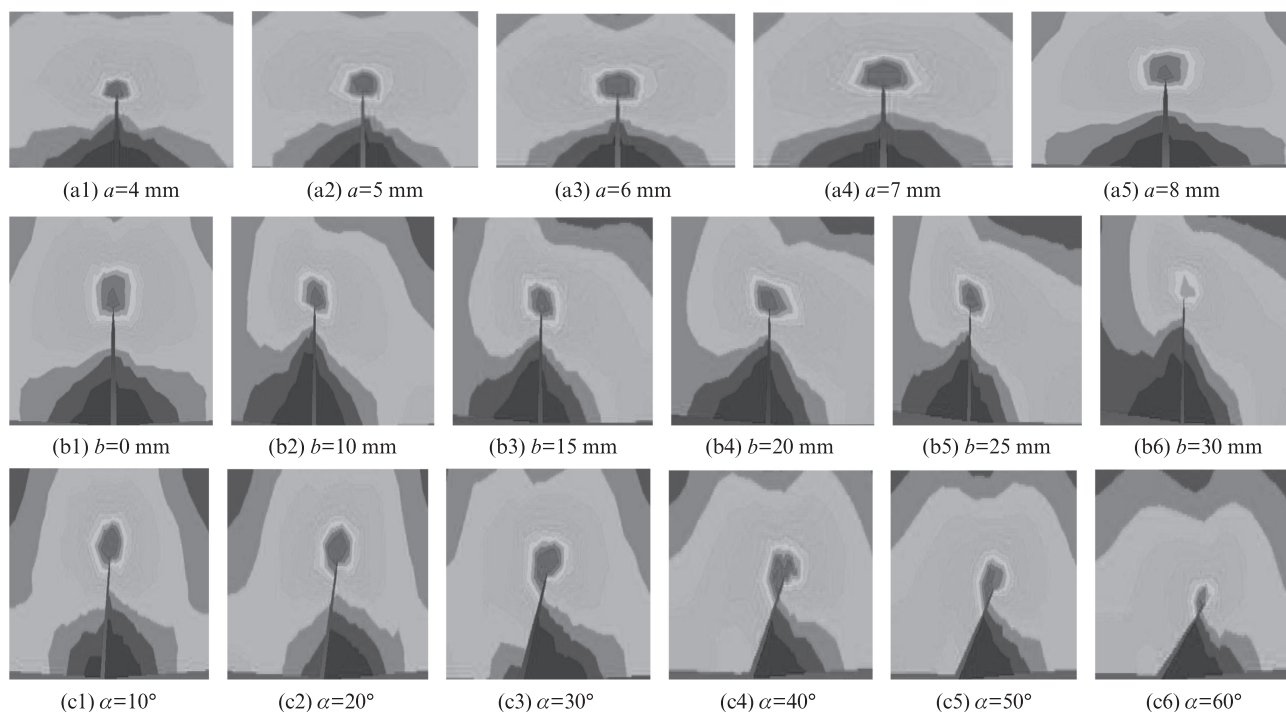


图6 不同条件下的应力强度因子
Fig. 6 K values under different conditions

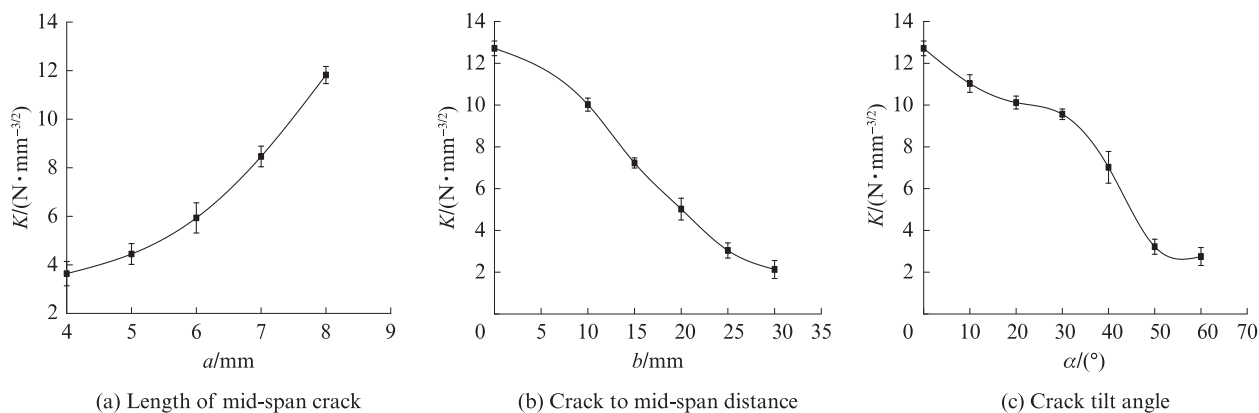
图7为不同条件下的 K 值变化曲线。由图7可见:

(1) K 值随着裂缝长度的增加而增加, K 值越大,表示裂纹尖端应力奇异场强度越大,应力集中越明显,沥青砂浆试件越容易因为应力集中而断裂。结合图6(a1~a5)也可以得出这一结论,通过定量分析弥补了定性分析的不足。

(2)随着距离跨中位置越来越远, K 值单调递减,在距离跨中位置较近的地方递减速率较快,距跨中

越来越远,递减速率也越来越慢。这是因为距跨中位置越来越远水平拉应力的影响越来越小,沥青砂浆试件越不容易断裂。

(3) K 值随着裂缝倾斜角度的增加而减小,在 $\alpha \leq 30^\circ$ 时减小速度非常缓慢,在 $30^\circ < \alpha \leq 50^\circ$ 时减小速度较快,当 $\alpha > 50^\circ$ 时减小速度又趋于缓慢。这说明在 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,裂缝倾斜角度对沥青砂浆断裂性能的影响不大,但在此区域的 K 值还是最大,沥青砂浆试件最容易断裂。在 $30^\circ < \alpha \leq 50^\circ$ 时,裂缝倾斜角度对沥

图7 不同条件下的 K 值变化曲线Fig. 7 K values under different conditions

青砂浆断裂性能影响较大, K 值减小迅速, 沥青砂浆的抗断裂能力下降幅度较大. 当 $\alpha > 50^\circ$ 时, 裂缝倾斜角度对沥青砂浆断裂性能的影响又趋于缓慢, 但此区域拥有最小的 K 值, 所以最不容易开裂. 综上所述, K 值随着裂缝长度的增加、裂缝倾斜角度的减小及裂缝位置距跨中距离的减小而增大, 沥青砂浆试件也变得越来越容易开裂.

3 结论

(1) 起裂位置附近点的水平位移 U 和水平应变 EXX 、应力强度因子 K 及以 EXX 定义的区域损伤因子 D , 均可以反映 CR-WAM 和 CR-HAM 在 UV 老化后的抗开裂性能.

(2) UV 老化后, 沥青砂浆的 U 、 EXX 、 D 、 K 值均增大, 且随着 UV 时长的延长, 增长速率越来越快, 沥青砂浆越来越容易开裂. 利用 Abaqus 围线积分分析 K 值的影响因素具有较高的可靠性, K 值随着裂缝长度的增加、裂缝倾斜角度的减小及裂缝位置距跨中距离的减小而增大, 沥青砂浆也变得越来越容易开裂.

(3) 无论何种 UV 老化时长下 CR-WAM 的抗开裂、抗老化能力均强于 CR-HAM, CRS-WAM 具有最佳的抗开裂、抗老化能力, CRE-WAM 次之.

参考文献:

- [1] 王虎盛, 殷伟. 长寿沥青路面设计方法研究[J]. 华东公路, 2009(5): 11-13.
WANG Husheng, YIN Wei. Research on the design method of longevity asphalt pavement[J]. East China Highway, 2009(5): 11-13. (in Chinese)
- [2] 焦子雄. 重复荷载作用下老化温拌胶粉改性沥青混合料开裂特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019.

JIAO Zixiong. Study on the cracking characteristics of warm mixed rubber powder asphalt mixture after aging under repeated loading[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2019. (in Chinese)

- [3] MONTEPARA A, GIULIANI F. Performance testing and specification tests of road bitumen. Session 1: Performance testing and specifications for binder and mixtures[C]//2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona: [s.n.], 2000: 518-523.
- [4] BOCCI M, CERNI G. The ultraviolet radiation in short-term and long-term aging of bitumen. Session 1: Performance testing and specifications for binder and mixtures[C]//2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona: [s.n.], 2000: 49-58.
- [5] HAO P W, LIU H Y. A laboratory study of the effectiveness of various additives on moisture susceptibility of asphalt mixtures[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2006, 34(4): 261-268.
- [6] GALLEG0 J, CASTRO M, PRIETO J N, et al. Thermal sensitivity and fatigue life of gap-graded asphalt mixes incorporating crumb rubber from tire waste[J]. Transportation Research Record, 2007, 1998(1): 132-139.
- [7] LEE S J, AKISETTY C K, AMIRKHANIAN S N. Recycling of laboratory-prepared long-term aged binders containing crumb rubber modifier[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(9): 1906-1913.
- [8] MO L T, HUURMAN M, WOLDEKIDAN M F, et al. Investigation into material optimization and development for improved ravelling resistant porous asphalt concrete[J]. Materials and Design, 2010, 31(7): 3194-3206.
- [9] CYGAS D, MUCINIS D, SIVILEVICIUS H, et al. Dependence of the asphalt mixture physical and mechanical properties on the grade and of rejuvenating bitumen[J]. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2011, 6(2): 124-134.
- [10] GLAOU1 B, MERBOUH M, VAN DE VEN M, et al. Thermal fatigue of polymer modified bitumen[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2012, 25(4): 469-478.
- [11] DONY A, COLIN J, BRUNEAU D, et al. Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 175-181.

- [12] SAMER D, MOHAMMAD I, DAE-WOOK P, et al. Influence of antioxidant-enhanced polymers in bitumen rheology and bituminous concrete mixtures mechanical performance [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015:214585.
- [13] XIE X B, TONG S J, DING Y B, et al. Effect of the amount of mineral powder on the ultraviolet aging properties of asphalt[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016:5207391.
- [14] 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.
NIU Dongyu. Research on performance of asphalt mortar and asphalt mixture with skeleton structure based on micromechanics [D]. Xi'an:Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [15] 康伟. 沥青路面面层抗裂性能试验研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
KANG Wei. Experimental research on crack resistance of asphalt pavement surface[D]. Xi'an:Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [16] 陈麓. 三点弯曲断裂韧度试样的应力强度因子 K_{Ic} [J]. *力学学报*, 1974(3):17-20.
CHEN Chi. Stress intensity factor K_{Ic} of three-point bending fracture toughness specimen[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1974(3): 17-20. (in Chinese)
- [17] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京:科学出版社, 1981:235.
China Academy of Aeronautics and Astronautics. Handbook of stress intensity factors [M]. Beijing:Science Press, 1981:235. (in Chinese)

(上接第284页)

- [7] WU S Y, YANG J, SUN X Y, et al. Preparation and characterization of anti-freezing asphalt pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236:117579.
- [8] MA T, GENG L, DING X H, et al. Experimental study of deicing asphalt mixture with anti-icing additives[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 127:653-662.
- [9] ZHONG K, SUN M Z, CHANG R H. Performance evaluation of high-elastic/salt-storage asphalt mixture modified with mafilon and rubber particles[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 193:153-161.
- [10] 肖劲松, 邹孟秋. 物理-化学综合融雪除冰沥青混合料研究[J]. *公路*, 2017(8):248-252.
XIAO Jinsong, ZOU Mengqiu. Study of asphalt mixture for melting snow and ice by physical-chemical combining means[J]. *Highway*, 2017(8):248-252. (in Chinese)
- [11] 常荣华. 高弹/蓄盐类沥青混合料关键技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
CHANG Ronghua. Key technology research of high explosive/salt storage asphalt mixture[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [12] 郭峰. 高弹蓄盐沥青混合料材料开发及性能研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2017.
GUO Feng. Study on development and performance of high elasticity salt-containing asphalt mixture [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017. (in Chinese)
- [13] LUO S, YANG X. Performance evaluation of high-elastic asphalt mixture containing deicing agent mafilon[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94:494-501.
- [14] 俞文生, 张晓春, 钟科. 高弹蓄盐融冰雪沥青混合料除冰特性[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(5), 912-916.
YU Wensheng, ZHANG Xiaochun, ZHONG Ke. Deicing performance of asphalt mixture with snowmelt agent and high-elastic modified asphalt binder[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(5):912-916. (in Chinese)