

基于三点弯曲试验的高黏沥青砂应力吸收层的 裂缝扩展过程研究

孙雅珍¹, 孙晓芳², 房辰泽¹, 王金昌³

(1.沈阳建筑大学, 辽宁 沈阳 110168; 2.中建科技长春有限公司; 3.浙江大学 交通工程研究所)

摘要: 为了研究带3种贯通裂缝的水泥混凝土加铺高黏沥青砂应力吸收层和没有应力吸收层两种结构的反射裂缝的扩展路径与断裂机理,对带3种裂缝的两种结构试件分别进行三点弯曲室内试验。并以扩展有限元方法(XFEM)为基本方法,建立有限元模型对应有应力吸收层的加铺层的裂缝扩展过程进行模拟。把扩展有限元模拟结果与室内试验结果进行比较并分析了反射裂缝的力学响应、扩展机理和断裂过程。结果表明:数值计算与试验的结果在断裂形态上相近,两者数据的相关性较高。高黏沥青砂应力吸收层能降低加铺层底部的应力集中,减缓加铺层下部裂缝扩展的速率,达到防治反射裂缝的目的。

关键词: 扩展有限元; 裂缝扩展; 复合结构; 高黏沥青砂; 应力吸收层; 三点弯曲试验

在已开裂的水泥路上加铺沥青层是如今国内外普遍采用的修筑措施。因为旧水泥混凝土层上已带有缺陷,结构底层的大部分承载能力下降,在温度和荷载的影响下,加铺层极易出现反射裂缝。为了尽量推迟反射裂缝的发展,国内外学者采用设置应力吸收层的方法来抵抗反射裂缝并进行了大量试验来验证应力吸收层的抗裂效果。应力吸收层自身变形大,弹性恢复能力强,能消减裂缝对加铺层底部的应力集中现象。目前,对于分析不连续问题的最普遍的方法是有限元法,但是传统的有限元法在处理类似裂缝等不连续问题时,裂尖周围均需加密网格,并且裂缝扩展过程中要反复地重新划分网格,不仅操作繁琐,而且求解复杂,运算率低下,甚至计算机无法计算求解。为了解决这一问题,Belytschko和Black等提出扩展有限元法,他们对位移场近似采用附加函数在求解裂纹扩展时,能够减少网格重新划分的繁琐问题。扩展有限元法能根据材料属性和破坏准则自由判断裂纹扩展的方向。扩展有限元法中的裂纹能够从单元内部开裂而不局限于网格划分,裂纹的扩展毫不需要考虑它的形状和发展趋势,就能实现裂纹从始至终自动地扩展模拟。姚莉莉等利用XFEM分析了劈裂试验裂纹的扩展过程,并对沥青混合料在载荷下的破坏机理进行了研究;周德云等利用XFEM建立三维立体模型,模拟旧水泥上加铺

层的开裂,并说明了其对应力应变减弱和软夹层的阻裂效果。以上学者对裂缝扩展的模拟都有各自的研究重点,要了解带裂缝复合结构加铺层的裂缝扩展过程,需结合前人研究成果,在其基础上做进一步研究。

该文对带3种贯通裂缝的水泥混凝土加铺沥青结构的复合试件做三点弯曲试验,并以扩展有限单元法为基本方法,对3种裂缝有应力吸收层复合试件在荷载作用下发生一次性断裂破坏的过程进行模拟。以分析复合试件的力学响应、破坏形态和扩展机理。

1 三点弯曲试验

1.1 试验方案

该文加铺层采用AC-13沥青混合料,应力吸收层采用高黏弹胶合料,它由70#沥青、SBS(7%)、SEBS(1%)、芳香烃(5%)、其他助剂(1%)组成。高黏弹沥青砂的配合比采用最佳配合比为:(5~10 mm碎石):(3~5 mm碎石):(0~3 mm石屑):高黏弹沥青=20:20:60:8.8=451:451:1352:198(kg/m³)。试件尺寸为300 mm(长)×90 mm(宽)×100 mm(高)。试件共分为3层:水泥层厚5 cm,高黏沥青砂层厚2 cm,加铺层AC-13厚3 cm。水泥层分为带裂缝和不带裂缝两种,根据行车荷载和裂缝的位

收稿日期:2018-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51478276);辽宁省自然科学基金资助项目(编号:20170540770)

作者简介:孙雅珍,女,博士,教授,博士生导师.E-mail:syz16888@126.com

置关系,设计3种贯穿裂缝:中缝、偏缝、斜裂缝(图1),中缝模拟I型(张开型)裂纹的开裂,偏缝和斜裂缝模拟I-II(剪切型)复合型开裂。裂缝宽度均为5 mm。

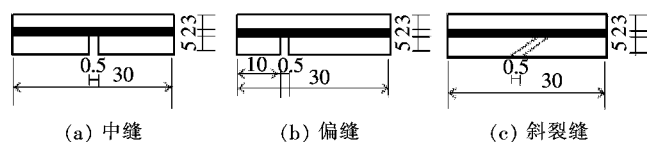


图1 3种裂缝类型图(单位:cm)

试验速率:2 mm/min,试验温度:15℃,两端支点距离为250 mm,通过对不带裂缝的复合结构试验得到试件顶部所受荷载与挠度的关系曲线,该曲线的面积即为数值模拟所需断裂能。对带裂缝的复合试件进行三点弯曲试验直至断裂,观察裂缝扩展过程并得到试验过程中的各种参数。为了尽可能减少试验的相对误差,每种裂缝做5组平行试验并取平均值。

1.2 试验结果

1.2.1 中缝

中缝有应力吸收层的裂缝扩展过程见图2。

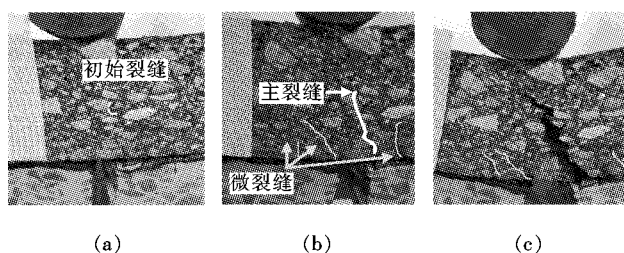


图2 中缝有应力吸收层的扩展过程

从图2可以观察到:试件的起裂在应力吸收层与加铺层界面处,随后有裂缝沿水泥层预制缝处向上缓慢扩展,也有一些微裂纹从两侧斜向上发展,主裂缝向上扩展至应力吸收层断开,继续向上扩展至全部断裂,试验结束。

中缝无应力吸收层的裂缝扩展过程见图3。

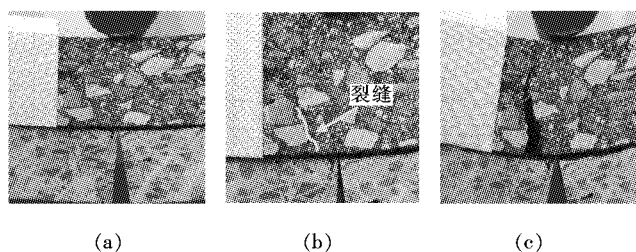


图3 中缝无应力吸收层的扩展过程

从图3可以观察到:初始裂缝从加铺层底部预制缝处产生,最后穿过加铺层至断裂。结合中缝两种加

铺层的裂缝扩展情况,不难发现在I型模式下,无论是有应力吸收层还是没有应力吸收层的试件,裂缝都不会理想地笔直向上扩展,通常会发生一定的侧偏后再慢慢变回理想向上的轨迹,裂缝的整体发展走向不会发生特别大的改变。

1.2.2 偏缝

偏缝有应力吸收层结构的裂缝扩展过程见图4。

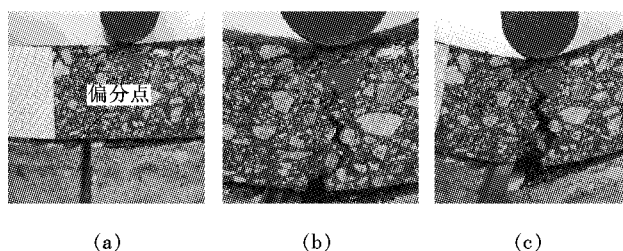


图4 偏缝有应力吸收层的扩展过程

从图4可以观察到:裂缝在夹层与加铺层界面处先起裂,垂直向上发展,呈现I型裂纹的扩展模式,随后裂缝从水泥混凝土层的接缝偏分处产生,其扩展方向成45°角斜向上偏向跨中,出现I、II复合型模式发展,两者同时发展,直至两条裂缝贯通至试件压坏。

偏缝无应力吸收层试件断裂最快,其过程如图5所示。

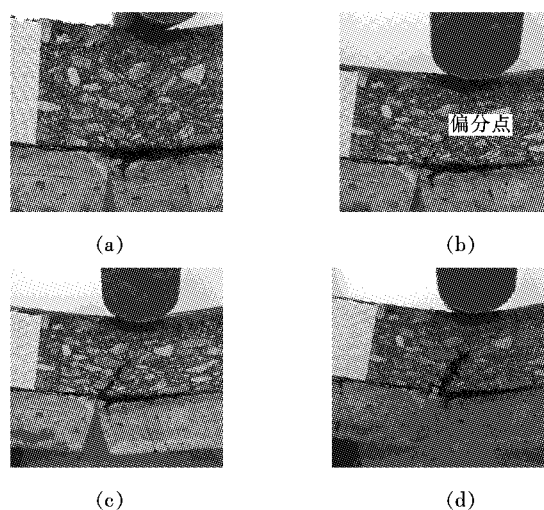


图5 偏缝无应力吸收层的扩展过程

从图5可以看到:裂缝从水泥混凝土层裂缝偏分处产生,其方向趋于跨中扩展,出现I、II复合型模式断裂,当裂缝扩展至压头正下方,复合试件完全破坏。

1.2.3 斜裂缝

斜裂缝有应力吸收层的试件与偏缝有应力吸收层的相同,裂纹扩展过程如图6所示。

由图6可知:裂缝都是从应力吸收层与加铺层界

面处先出现并向压头正下方扩展,随后应力吸收层底部出现裂缝,应力吸收层上裂缝也呈 I、II 复合型模式扩展,上下两层裂缝同时扩展,试件压坏试验停止。

斜裂缝无应力吸收层结构的裂缝扩展相对较快,其过程如图 7 所示。

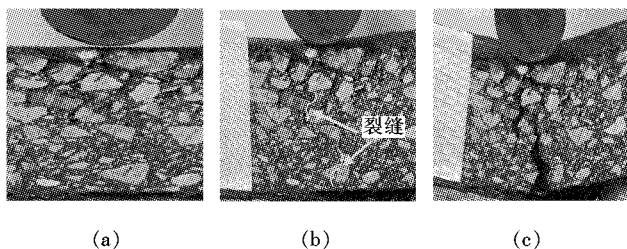


图 6 斜裂缝有应力吸收层的扩展过程

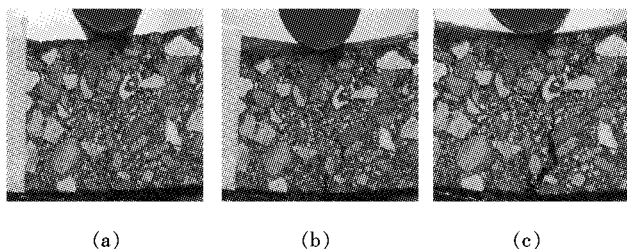


图 7 斜裂缝无应力吸收层的扩展过程

从图 7 可以看到:压头正下方先出现裂缝,伴随着加载在这条裂缝的右上方,试件中间出现一条裂缝,斜向上扩展至压头正下方,试件破坏试验停止。

通过人工观察 3 种裂缝的扩展过程,并对比高黏沥青砂应力吸收层对裂缝扩展速率的影响。含应力吸收层的裂缝扩展速率较慢,没有高黏沥青砂层的裂缝扩展区域相对集中,充分说明了沥青砂层能将水泥混凝土层上的预制缝引发的集中应力扩散到更大的范围上,降低加铺层的应力集中,推迟裂缝的扩展,有较好的抗裂性能。试验观察到裂纹总是从应力吸收层与加铺层界面处开始起裂,这点与数值模拟有所区别,产生这一现象的原因可能是由于两层的弹性模量相差较多,两层间的结合程度较差,由此联想到改善两层间的结合,在实际路面工程铺筑时具有重要意义。道路工程中加强两层间的结合,降低裂纹扩展速率,使路面寿命达到理想值。

2 反射裂缝扩展断裂机理分析

水泥层加铺沥青层与普通的弹性层体系的应力应变特征有较大区别。在荷载与温度应力的作用下,试验中带裂缝的旧水泥混凝土作为基层结构承载力低,

导致加铺层的受力状态较为复杂。断裂力学认为水泥层结构上的裂缝缺陷,是引发应力集中的主要原因。还因为旧水泥混凝土的裂缝处弯拉应力和剪切应力的承受能力相对较弱,进而加铺层承受了接缝处大半的弯拉应力和剪切应力,使加铺层产生反射裂缝。

断裂力学中裂缝的开裂有 3 种模式: I 型(张开型)、II 型(剪切型)和 III 型(撕开型)。交通荷载下反射裂缝主要受张开型和剪切型影响,温度应力主要受张开型影响。当荷载驶于裂缝的正上方时,裂缝以 I 型模式扩展,当荷载驶于裂缝的前方和后方路面时,反射裂缝主要以 II 型模式扩展。实际工程中路面的裂纹开裂并非单一模式,普遍是 I + II 复合型模式开裂,撕开型模式不常出现。无论是有初始裂缝还是没有,在应力作用下加铺层都会产生裂纹并扩展至断裂。通过观察 3 种裂缝的试验现象,能明显地看到当裂缝扩展遇到粗集料时裂缝的走向会绕开粗集料,沿着集料与砂浆的界面继续向上扩展。这表明骨料的位置会影响裂纹部分扩展的路径,同时验证了沥青混合料多相复合的材料性能。

因为沥青混合料的组成导致它自身具有离散性,材料内部有非均质的微缺陷,在荷载作用下损伤会逐渐加剧,微缺陷会逐渐成为宏观裂缝。在小范畴损伤领域下,如中缝 I 型开裂模式下,应力相对集中在跨中处先开裂,两侧的损伤几乎不再发展。在大范畴损伤领域下,即没有突出应力相对集中的时候,微缺陷会自由发展,在主要初始裂纹出现以前会有许多次裂纹萌生,即多裂纹同时出现扩展现象。根据试验过程中试验现象和裂纹扩展速率的变化情况同时结合大多数学者的理论成果将裂纹从产生至断裂的过程可看成 4 个阶段:① 微裂纹成核,在受到应力时,应力处会因相对滑移而出现微裂纹核;② 微裂纹扩展,微裂纹成核后沿最大应力点方向扩展至试件面层;③ 裂缝扩展,微裂纹开裂形成裂缝,呈单一模式扩展;④ 断裂,裂纹扩展至临界尺寸后产生失稳至断裂。

3 扩展有限元模型的建立

为了模拟试验并计算旧水泥混凝土层有 5 mm 裂缝时,其上的复合沥青加铺层(3 cm 厚 AC-13+2 cm 厚高黏沥青砂应力吸收层)的裂缝发展情况,该文数值计算采用 Abaqus 有限元软件中的 XFEM 模块建立二维模型,中间预留 5 mm 宽的裂缝,在加铺层上设置裂缝可能穿过的区域,并将此处设为 XFEM 裂缝扩

展区域,并采用创建一个一维无材料特性部件来模拟初始预制裂缝。沥青加铺层与水泥混凝土层的接触面为连续接触类型,应力吸收层与面层通过设置层间摩擦系数定义层间接触。为了让裂缝能够自由扩展,模型的损伤准则采用最大主应力准则,通过该文三点弯曲试验确定参数,最大主应力方向的正交方向是裂缝的扩展方向。模型的断裂准则采用试验的荷载与挠度的关系曲线计算得到的断裂能作为判断依据。模型各层的尺寸、厚度大小、材料属性取值如表1所示。为减少计算量,只加密有限元模型中间XFEM区域范围内的网格。通过设置竖向压缩位移来模拟3种裂缝试验的整个过程。

表1 模型参数取值

结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
加铺层 AC-13	3	1 400	0.35
应力吸收层	2	400	0.3
旧水泥混凝土路面	5	3 000	0.15

4 结果对比及分析

4.1 中缝断裂过程分析

使用扩展有限元法时在加铺层跨中底部预设一条裂缝,施加位移荷载使试件变形和跨中处损伤逐渐累加,至裂缝沿跨中正上方向上扩展到断裂。

由扩展有限元模拟结果可知:模型的位移和变形均呈对称发展,跨中位置的挠度最大,裂缝沿水泥混凝土层上的裂缝继续逐渐向上扩展,模拟与试验的扩展过程相似,均与Ⅰ型裂缝的扩展相同。图8为模拟和试验得到的最大应力位置的荷载—变形之间的关系曲线,数据显示模拟结果与试验结果的相似度较好。通过模拟计算获得的荷载峰值、变形大小及曲线的发展走向与试验得到的结果大体上一致。

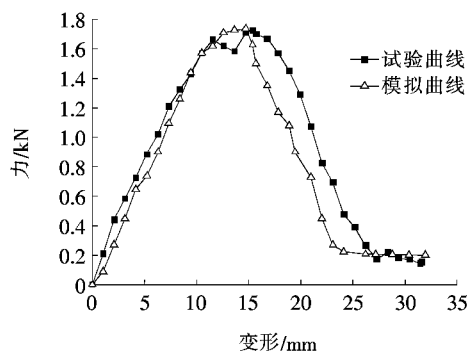


图8 中缝模式下最大应力位置的力—变形曲线

4.2 偏缝和斜裂缝断裂过程分析

在道路工程中,常出现车轮荷载不在裂缝的正上方,路面会受拉应力和剪应力的共同作用,因此路面的开裂为Ⅰ—Ⅱ复合型开裂,所以该文采用扩展有限元法对偏缝和斜裂缝试验的断裂进行模拟,模型的参数取值与前文中缝的开裂模型相同。

由扩展有限元模拟结果可知:Ⅰ+Ⅱ型开裂的起裂点由加铺层底部裂缝处向跨中处斜向上扩展,模拟与试验的扩展过程基本相同。裂缝偏于跨中时,加铺层的主拉应力在裂缝尖端和跨中底部这两处集中,加铺层最后的断裂形态是这两处应力竞争开裂的结果。

图9、10为两种复合型裂缝的数值计算和试验得到的最大应力位置的荷载—变形之间的关系曲线。

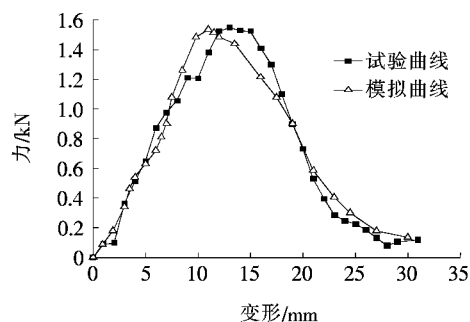


图9 偏缝模式下最大应力位置的力—变形曲线

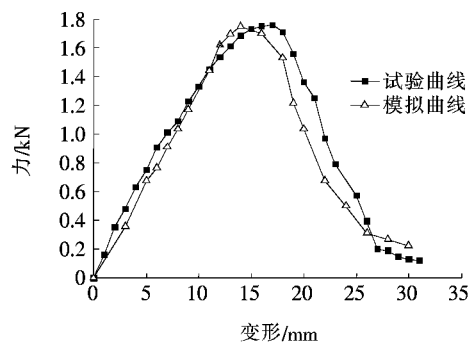


图10 斜裂缝模式下最大应力位置的力—变形曲线

由图9、10可见:计算结果与试验曲线吻合良好,模拟和试验获得的荷载峰值、变形大小及曲线的走向基本相似,验证了扩展有限元是模拟裂缝自由扩展的有效手段。

采用扩展有限元法来模拟加铺层从损伤到断裂的整个过程,与试验过程吻合较好,故可将整个过程分为4个阶段:①初始加载弹性阶段:刚开始施荷,裂缝处还没发展到材料的抗拉强度,属于弹性变形,这个过程占整个断裂过程的比例较短;②损伤积累阶段:当裂缝处的应力达到抗拉强度以后,引发裂纹尖端损伤,随

着损伤逐渐累积,裂纹尖端的损伤程度加剧,试件所能承受的荷载最大值就发生在这个阶段;③ 裂缝产生并扩展阶段:当裂尖损伤达到 1 时,在裂缝尖端会萌生新的裂缝并发展,伴随位移荷载的逐渐增大,裂缝以慢速向上扩展,待裂缝的长度扩展至 40 mm 左右时,承载能力几乎下降至零,此阶段是整个断裂过程的核心阶段;④ 破坏失效阶段:当裂缝发展至加铺层表面时,模型彻底断裂至完全丧失载荷能力。

5 结 论

该文研究了带 3 种裂缝的水泥混凝土层加铺两种结构的三点弯曲试验。采用扩展有限元方法分别模拟了 3 种裂缝模式下的断裂过程并分析了试件的力学响应、破坏形态和扩展机理,得到以下主要结论:

(1) 试验观察到裂纹总是从应力吸收层与加铺层界面处开始起裂,这点与数值模拟有所区别,产生这一现象的原因可能是两层的弹性模量相差较多,两层间的结合程度较差,因此在实际路面施工中应加强两层间的结合处理,降低裂纹扩展速率,使路面寿命达到理想值。

(2) 试验中缝模式下,位移和变形均呈对称发展,跨中位置的挠度最大,与 I 型(张开型)裂纹的扩展路径相同;偏缝和斜裂缝模式下,裂纹由加铺层底部偏分点处斜向上并向跨中偏移,呈 I—II 复合型开裂。

(3) 试验观察有高黏沥青砂层与没有高黏沥青砂层裂缝的扩展过程发现,没有高黏沥青砂层的裂缝扩展区域相对集中,充分说明了沥青砂层能将水泥混凝土层上的预制缝引发的集中应力扩散到更大的范围,降低加铺层的应力集中,推迟裂缝的扩展,有较好的抗裂性能。

(4) 对 3 种裂缝复合结构进行数值模拟,模拟与试验获得的力学响应和裂缝扩展路径基本一致,验证了扩展有限元方法用来模拟裂缝扩展的优势。加铺层的断裂过程分为初始加载弹性、损伤积累、裂缝产生并扩展、破坏失效 4 个阶段。

(5) 当施加荷载达到最大值时,试件已经发生损伤,荷载减小后,裂缝才开始出现。这个过程看成是损伤带内拉应力减小、未损伤带内拉应力增大或者损伤带内拉应力增大后再减小的过程。虽然损伤带的内拉应力是起伏波动的,但损伤带的长度是始终增加的。

参考文献:

- [1] 谭忆秋.沥青与沥青混合料[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [2] Belytschko T, Black T. Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1999, 45: 601—620.
- [3] Daux C, Moes N, Dolbow J, et al. Arbitrary Branched and Intersecting Cracks with the Extended Finite Element Method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 48: 1741—1760.
- [4] 彭璞,余满汉.基于 XFEM 的沥青加铺层材料的裂缝扩展[J].公路工程,2012(4).
- [5] 乔华,陈伟球.基于 ARLEQUIN 方法和 XFEM 的结构多尺度模拟[J].工程力学,2010(27).
- [6] 金光来.基于扩展有限元的沥青路面疲劳开裂行为的数值研究[D].东南大学博士学位论文,2015.
- [7] 姚莉莉,王选仓.沥青混合料劈裂试验的扩展有限元法数值模拟[J].武汉大学学报:工学版,2011(6).
- [8] 周德云,姚祖康.旧水泥混凝土路面上沥青加铺层结构的三维有限元分析[J].中国公路学报,1990(3).
- [9] 程毅.设置应力吸收层的水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究[D].长安大学硕士学位论文,2006.
- [10] Wang H, Wu Y F, Ye S. Analysis of the Mode of Crushing and Stability in Old Cement Pavement during Asphalt Overlay Project [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 204—208(12): 1941—1944.
- [11] 毛成.沥青路面裂纹形成机理及扩展行为研究[M].成都:西南交通大学出版社,2004.
- [12] Wang H. A Comparative Study of Fatigue Performance to Resist Reflective Cracking among three Different Stress—Absorbing Materials[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 303—306: 2625—2635.
- [13] O. M. Ogundipe, N. H. Thom, A. C. Collop. Evaluation of Performance of Stress—Absorbing Membrane Interlayer (SAMI) Using Accelerated Pavement Testing[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(6): 569—578.
- [14] 赵云涛.半刚性路面反射裂缝防治中应力吸收层的理论分析与实验研究[D].河北工业大学硕士学位论文,2014.
- [15] Moreno—Navarro F, Sol—Sánchez M, Rubio—Gómez M C. Reuse of Deconstructed Tires as Anti—Reflective Cracking Mat Systems in Asphalt Pavements[J]. Construction & Building Materials, 2014, 53(53): 182—189.