DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.057

自修复微胶囊在沥青混合料中的应用

王燕春
（山西交通职业技术学院 公路工程系，山西 晋中 030031）

摘要：为探讨含再生剂的微胶囊在沥青混合料中应用的可行性，该文对不同沥青种类、不同温度水平、不同老化程度、不同微胶囊掺量条件下的沥青结合料的延度恢复及模量恢复效果进行量化表征。然后结合光纤测裂缝技术，对比微胶囊在沥青混合料中的修复效果。为模拟自然环境及荷载作用下自修复微胶囊对混合料裂缝的修复作用，分别对不同加速加载次数、不同冻融作用次数、不同温差作用次数、不同紫外线照射时长下混合料的平均裂缝宽度进行测量。结果表明：微胶囊对沥青延度的恢复初期幅度较大，后期保持稳定；不同老化程度的沥青结合料，微胶囊对其修复效果有所差异；随着微胶囊掺量的增加，裂缝的愈合速率有所提高。而DSR试验结果与延度试验结果有较好的一致性。不同环境及荷载作用下微胶囊对沥青混合料的修复效果有所不同，微胶囊的掺加可以有效地对路面早期微小裂缝进行修复，从而防止微小裂纹迅速演化扩展。

关键词：沥青混合料；微胶囊；再生剂；裂缝修补；光纤测裂缝

1 前言

沥青路面在长期服役过程中受车辆荷载与环境因素的作用，极易产生裂缝，而针对裂缝最常用的处治方式为灌缝，但目前灌缝多依赖于人工修补，处治时间较为滞后，往往是裂缝扩展至路表才能发现并修补，无法对裂缝实现及时实时自动修复。

自修复微胶囊的研发为沥青路面裂缝的实时自发修复提供了新的思路，从而引起了业界的广泛关注。将再生剂采用微胶囊的形式添加到沥青混合料中，可以解决直接将再生剂添加到沥青中造成的路面抗滑性能减小及有害环境等问题。其修复机理如图1所示。

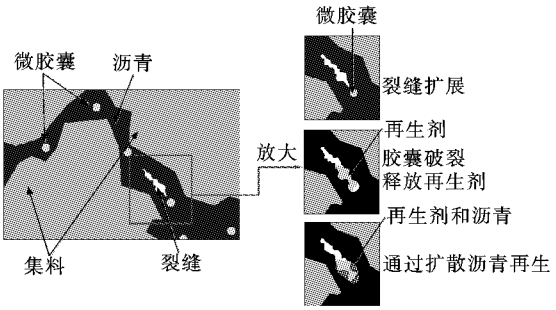


图1 含微胶囊的沥青混合料自修复机理示意图

当沥青混合料内部出现微裂纹时，在传播途中遇到微胶囊，这时裂缝尖端刺破微胶囊，从而使微胶囊破裂释放出再生剂对微裂纹进行修复。SU等研究指出，沥青路面中的集料颗粒间的砂浆膜厚约为50 μm，为了避免沥青混合料在拌和及碾压过程中微胶囊发生破裂，微胶囊的尺寸应该小于50 μm，但同时为了保证微胶囊中可以包裹足够量的再生剂，其尺寸不应小于10 μm。而微胶囊的大小可以通过控制核心与壳材料的质量比（核/壳比）及搅拌速度来调节。此外，微胶囊的掺量应小于沥青体积的30%，以保证混合料的路用性能。而核/壳比与搅拌速度对微胶囊的壳厚度影响并不大，再生剂对裂缝的填充速度则取决于微胶囊在沥青中所占的体积比。因此需要对混合料的路用性能及微胶囊的修复速率进行平衡。Garcia等对5种微胶囊的强度与组成进行了表征，并将其添加到沥青混合料中，通过量化微胶囊在沥青混合料中的间接拉伸强度、模量及疲劳寿命，对其抗拌和及压实的能力进行研究，研究表明：尺寸大的微胶囊含修复剂的量较大，但强度小于小尺寸的微胶囊。另外，大多数的微胶囊可以抵抗混合料的拌和及压实的作用，但由于微胶囊的强度小于所需强度，因而其间接拉伸强度及模量有所降低，而微胶囊对沥青混合料的疲劳寿命无显著影响。

综上所述，目前针对自修复微胶囊的研究主要集

收稿日期：2018－08－10
作者简介：王燕春，女，讲师.E－mail:646488194@qq.com

中在其机理、制备与表征方面，但针对其在沥青路面中的应用研究较少。这主要是由于微胶囊技术还不成熟，在与沥青混合料的拌和过程中易破裂，存活率低，且目前并没有标准的评价体系对于微胶囊对沥青混合料的修复作用进行量化表征。该文针对以上问题，在研究讨论沥青种类、环境温度、沥青老化程度等因素对掺有自修复微胶囊的沥青结合料的延度及模量恢复的影响的基础上，结合光纤测裂缝技术，对不同环境荷载条件、不同级配类型以及不同集料最大粒径条件下微胶囊沥青混合料的修复水平进行试验研究。

2 原材料与试验方案

2.1 原材料

沥青采用 SK70# 基质沥青、5%SBS 改性沥青及 20%胶粉改性沥青，技术性质如表 1 所示。制备得到的微胶囊技术性质如表 2 所示。所采用的 3 种矿料级配取 JTG F20－2004《公路沥青路面施工技术规范》中 AC－10(骨架密实)、SMA－10(悬浮密实)及 OGFC－10(骨架空隙)的中值，石料采用石灰岩，油石比均为 15%，矿粉用量为 25%，以使混合料可以免压密实。

表 1 沥青结合料技术性质

技术性质	单位	基质沥青	SBS 改性沥青	胶粉改性沥青	试验方法
针入度(25 ℃)	0.1 mm	66	59	35	T0604－2011
软化点	℃	53	76	71	T0606－2011
10 ℃延度	cm	29	82	63	T0605－2011

表 2 微胶囊技术性质

20～40 μm 粒径占比/%	核/壳比	囊芯含量/%	包覆率/%	热稳定温度/℃
81.3	2∶1	74.37	86.62	190

2.2 试验方案

首先进行结合料部分的试验。采用控制变量法，选择 3 种沥青种类(基质沥青、SBS 改性沥青、胶粉改性沥青)、3 个温度水平(0、20、40 ℃)、3 种 PAV 老化温度(52、64、76 ℃)、4 种微胶囊掺量(2%、4%、6%、8%)，测量微胶囊对沥青结合料的延度恢复及模量恢复的作用效果。采用 DSR 往复剪切试验测得沥青的初始模量，然后在破坏后给予一定时间修复愈合，试验温度选择 20 ℃，应力选择 0.4 MPa，加载频率 10 Hz，愈合后再次测得初始模量，每个试验设置 3 组平行试件，剔除明显异常点后取均值。

然后在确定的因素水平条件下进行混合料试验。试验结合光纤测裂缝技术，对比微胶囊在沥青混合料中的修复效果，为保证光纤不在碾压成型过程中发生损耗及破坏，混合料采用浇筑式沥青混合料级配免压实成型。矿料级配采用 3 种类型(AC－10、SMA－10、OGFC－10)及 3 种单一最大粒径(13.2、9.5、4.75 mm)。为模拟自然环境及荷载作用下自修复微胶囊对混合料裂缝的修复作用，分别对不同加速加载次数(荷载 0.7 MPa，速率 60 次/min)、不同冻融作用次数(－40 ℃与 40 ℃冻融各 6 h 为作用 1 次)、不同温差作用次数(－40 ℃与 40 ℃冷热交替各 6 h 为作用 1 次)、不同紫外线照射时长下混合料的平均裂缝宽度进行测量，每个试验设置 3 组平行试件，剔除明显异常点后取均值。

2.3 光纤测裂缝简介

将光纤与行车方向从一定角度埋入沥青混合料中，从光纤一端注入稳定的光功率，在另一端采用 OTDR 光电探测器探测光功率信号，得到两端光功率的差值即为光功率损耗，这种损耗是由于裂缝的产生而引起了光纤的弯曲损耗，因此裂缝宽度与光功率损耗存在一定相关关系，根据已知宽度的裂缝与光功率损耗的数值进行曲线拟合，可以得到裂缝宽度与光功率损耗间的对应函数，从而可以根据测得的光功率损耗反算出其他点的裂缝宽度。

对裂缝进行测定，首先应采用室内模拟试验得到裂缝宽度与光功率损耗关系曲线，将已制备好的沥青车辙板沿与行车方向垂直的方向一分为二切开，得到一条预制裂缝，将车辙板置于裂缝调制器上，然后将 PMMA 聚合物光纤埋入沥青混合料中，并使光纤与行车方向的夹角 θ 为 45°，用环氧树脂进行封装。打开光源笔和光功率计，连接好设备，调节预制裂缝的宽度，读取对应的光功率值。

该文采用的光纤埋设方法如图 2 所示，得到的裂缝宽度与光功率损耗关系曲线及拟合公式如图 3 所示。

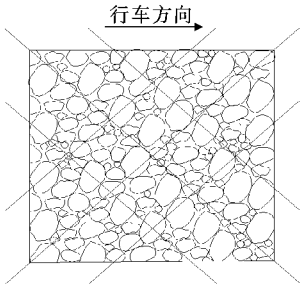


图 2 光纤布设示意图

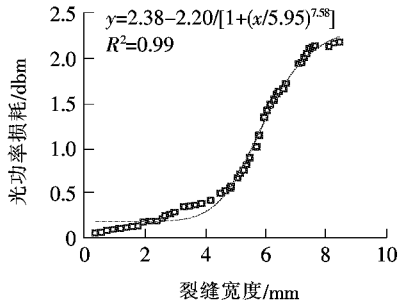


图 3　裂缝宽度与光功率损耗关系曲线

2.4　评价指标

微胶囊对沥青延度及模量恢复效果的贡献率计算方法如式(1)所示，微胶囊对沥青混合料裂缝宽度的修复水平如式(2)所示。

$$HI=\frac{S_1}{S_0}-\frac{W_1}{W_0} \tag{1}$$

式中：HI 为延度或初始模量恢复率；S_1、S_0 分别为掺加微胶囊的沥青断裂愈合后、无断裂的延度或初始模量；W_1、W_0 分别为未掺加微胶囊的沥青断裂愈合后、无断裂的延度或初始模量。

$$\Delta L=L_0-L_1 \tag{2}$$

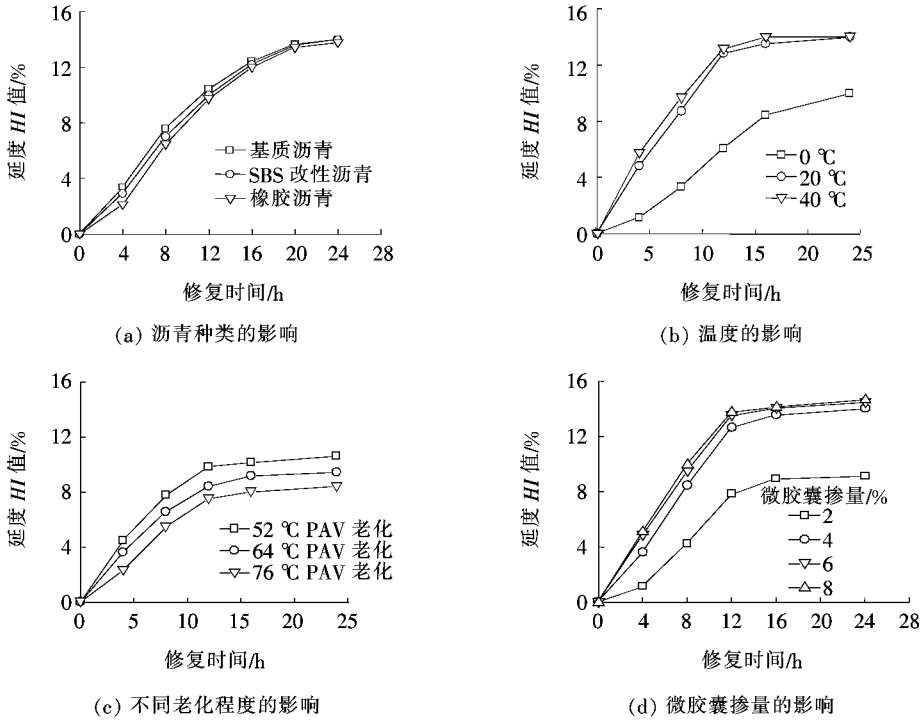
式中：ΔL 为微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平；L_0、L_1 为未掺加、掺加微胶囊沥青混合料试样的裂缝平均宽度。

3　结果与讨论

3.1　微胶囊对沥青结合料修复效果影响因素研究

3.1.1　延度恢复

不同因素水平下微胶囊对沥青延度恢复的贡献率如图 4 所示，其中，修复时间为自裂缝产生起无外力作用条件下试样的静置时间。



(a) 沥青种类的影响　(b) 温度的影响　(c) 不同老化程度的影响　(d) 微胶囊掺量的影响

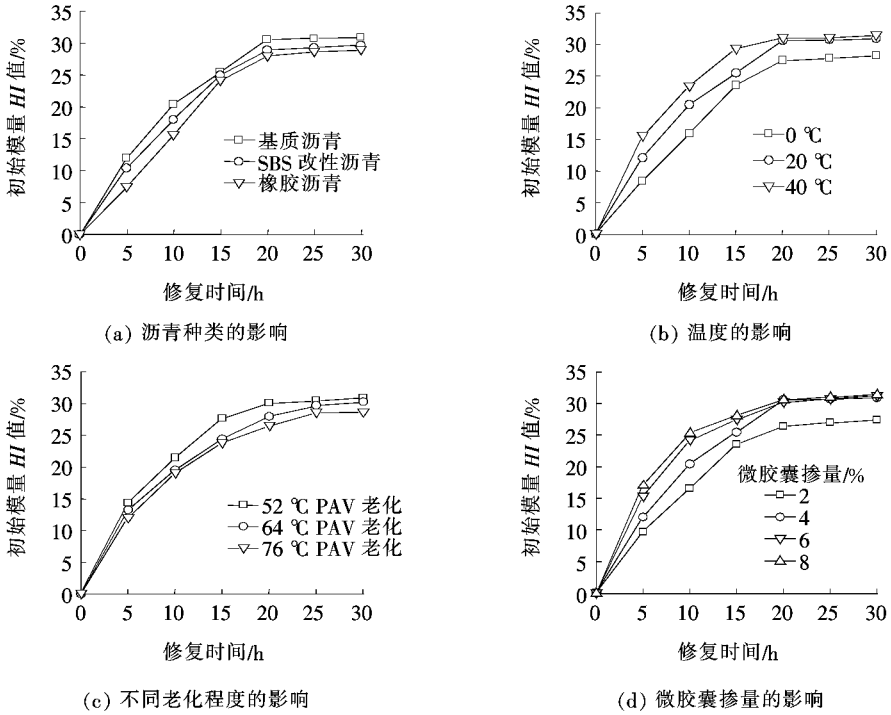
图 4　不同因素对微胶囊沥青延度恢复贡献率的影响

由图 4 可以看出：随着修复时间的延长，HI 值先急剧增大，后逐渐趋于平稳，也就是微胶囊对沥青延度的恢复初期幅度较大，这个阶段微胶囊在裂缝的作用下发生破裂，微胶囊中的再生剂迅速释放对裂纹进行修复，后期当修复稳定后，HI 值便保持平稳，将这一近似值记为 HI_{max}。由图 4(a)可知：沥青种类对初期的 HI 值有一定影响，这是由于改性剂的掺入改变了原本沥青中组分的分布情况，从而造成接触反应的速率不一致，而随着修复时间的延长，这种差异逐渐缩小，最终的恢复效果差距不大，可见裂缝的修复需要足够的修复时间。由图 4(b)可知：温度对初期 HI 值影响显著，随着温度升高，HI 值增大，4 h 时 0 ℃的 HI 值仅为 1.14%，而 20 ℃的 HI 值为 5.73%；随着时间的延长，这种差异有所减小，也就是说随着温度的升高，微胶囊沥青达到愈合最大值的时间有所缩短，但极低的温度对裂缝的修复效果是有影响的，0 ℃条件下

24 h 后掺加微胶囊沥青的 *HI* 值仅为9.97%。由图 4(c)可知:针对不同老化程度的沥青结合料,微胶囊对其修复效果有所差异,这是由于再生剂的注入破坏了已老化部分材料的大分子链,使其部分恢复原有水平,但由于老化程度不同,当破坏的界面大于修复能力时,再生剂无法使其复原。由图 4(d)可知:随着微胶囊掺量的增加,裂缝的愈合速率有所提高,但在相同温度下,当微胶囊掺量达到 4%及以上时,*HI* 的极值很接近,此时多余的微胶囊主要对裂缝的二次修复起作用。

3.1.2 模量恢复

不同因素水平下微胶囊对沥青初始模量恢复的贡献率如图 5 所示。



(a) 沥青种类的影响 (b) 温度的影响

(c) 不同老化程度的影响 (d) 微胶囊掺量的影响

图 5 不同因素对微胶囊沥青初始模量恢复贡献率的影响

由图 5 可知:随着时间的延长,*HI* 值有不同程度的增大,随后趋于稳定,这与延度恢复的规律具有一致性。由图 5(a)可知:不同沥青种类的 *HI* 值有所差异,但随着时间的延长,差异逐渐减小。由图 5(b)可知:温度对 *HI* 值影响显著,随着温度升高,*HI* 值增大,对比 15 min 时 0 ℃的 *HI* 值为 23.52%,而 20 ℃的 *HI* 值为 25.47%;而随着愈合时间的延长,这种差异有所减小。由图 5(c)可知:微胶囊对不同老化程度的沥青结合料修复效果有所差异。由图 5(d)可知:随着微胶囊掺量的增加,裂缝的愈合速率有所提高,但在相同温度下,当微胶囊掺量达到 4%及以上时,*HI* 的极值很接近。因此,DSR 试验结果与延度试验结果具有一致性,但延度所需修复时间较长,且在混合料的应用中,沥青砂浆的膜厚约为 50 μm,与 DSR 的沥青厚度为 1 mm 更为接近,因此建议在条件允许的情况下,可采用 DSR 试验进行微胶囊修复水平的表征。

3.2 微胶囊对沥青混合料修复效果影响因素研究

3.2.1 环境及荷载作用影响

不同环境及荷载作用下微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平如表 3 所示,试验温度为 20 ℃。

由表 3 可知:不同环境及荷载作用下微胶囊对沥青混合料的修复效果有所不同。在单因素作用下混合料的裂缝宽度较小,未掺加微胶囊的试样裂缝宽度最大可达 3.46 mm,此时掺加微胶囊的试样裂缝宽度最大为 2.24 mm,说明微胶囊对于沥青混合料早期的微小裂缝具有较好的修复效果,而随着环境及加载条件的耦合,未掺加微胶囊试样的裂缝宽度迅速增大,最大达到 8.02 mm,而掺加微胶囊的试样裂缝宽度最大为 4.89 mm,说明早期对于微小裂缝的修补起到了防止裂纹扩展的作用,也就是说微胶囊的掺加可以有效对路面早期微小裂缝进行修复,从而防止微小裂纹迅速演化扩展,大大提高路面的服务水平及服役寿命。

表 3　不同环境及荷载作用下微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平

环境及荷载条件				试验值		
加速加载次数/(×10⁶ 次)	冻融循环次数/次	温差作用次数/次	紫外线照射时长/d	无微胶囊试样裂缝宽度 L_0/mm	有微胶囊试样裂缝宽度 L_1/mm	修复水平 L/mm
6	0	0	0	1.03	0.44	0.59
9	0	0	0	2.98	1.01	1.97
0	40	0	0	2.01	1.32	0.69
0	80	0	0	3.24	2.24	1.00
0	0	60	0	2.21	1.07	1.14
0	0	120	0	3.46	1.87	1.59
0	0	0	28	0.46	0.24	0.22
0	0	0	56	1.03	0.54	0.49
6	40	60	28	4.57	2.44	2.13
6	80	60	28	6.43	4.02	2.41
9	40	120	56	5.74	3.66	2.08
9	80	120	56	8.02	4.89	3.13

由此可知，沥青路面产生裂缝是多种作用耦合的结果，由前述 DSR 试验可知，在沥青膜极薄的情况下，微胶囊沥青在 20 ℃环境条件下自修复达到极值的时间最大为 30 min，因此该文选择加速加载 6×10^6 次，温差循环 60 次，冻融循环 40 次，紫外线照射 28 d 作为一个作用周期，相邻程序及周期间隔 30 min 作为修复时间。

3.2.2　级配影响

不同级配类型条件下微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平如图 6 所示。

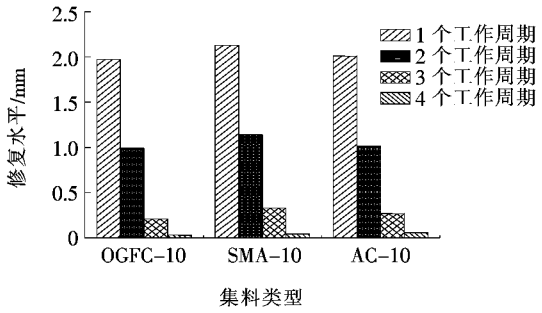


图 6　级配类型对微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平的影响

由图 6 可以看出：在外部环境及荷载的作用下，随着作用周期的增大，微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平逐渐减小，从第 4 个作用周期开始接近于 0，说明微胶囊的修复作用在第 4 个作用周期时已达到极限值；而对于不同级配类型的混合料，微胶囊对其修复效果有所差异，这可能一方面与不同级配类型的混合料在外部环境及荷载条件下作用力传递与应力集中不同有关；另一方面是由于在相同沥青用量下，不同级配类型的混合料中砂浆膜厚有所差异，产生裂缝的难易性也有所差异。针对该文所选的 3 种级配，微胶囊对 SMA－10 的修复效果最好。

3.2.3　单一粒径大小影响

不同单一粒径条件下微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平如图 7 所示。

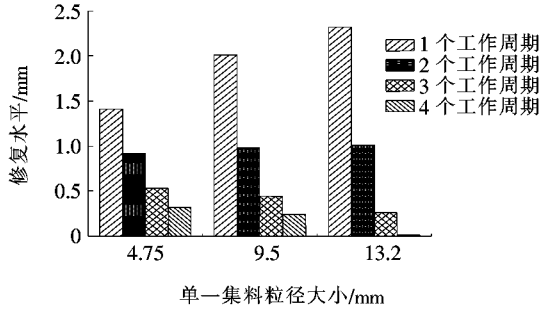


图 7　微胶囊对单一集料粒径沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平的影响

由图 7 可知：随着粒径的增大，微胶囊修复效果达到极值的作用周期数减小，且同一作用周期下，大粒径混合料的 ΔL 值较小粒径混合料大，说明大粒径的混合料在环境及荷载作用下更易发生开裂，且开裂尺寸较大，因此微胶囊中的再生剂迅速大量释放进行裂缝的修复，也因此修复次数有所减小。

4 结论

该文结合光纤测裂缝技术，通过对影响微胶囊在沥青结合料及沥青混合料中修复效果的试验分析，得出以下结论：

(1) 微胶囊对沥青延度的恢复初期幅度较大，后期趋于平稳。针对不同老化程度的沥青结合料，微胶囊对其修复效果有所差异。随着微胶囊掺量的增加，裂缝的愈合速率有所提高，但在相同温度下，当微胶囊掺量达到 4%及以上时，微胶囊对沥青延度恢复的贡献率达到极值。

(2) DSR 试验结果与延度试验结果具有一致性，但耗时较短，且 DSR 的沥青厚度与混合料中沥青砂浆的膜厚(约 50 μm)更为接近，因此建议采用 DSR 试验进行微胶囊对沥青结合料修复水平的表征方法。

(3) 不同环境及荷载作用下微胶囊对沥青混合料的修复效果有所不同。在单因素作用下混合料的裂缝宽度较小，而随着环境及加载条件的耦合，未掺加微胶囊试样的裂缝宽度迅速增大，而微胶囊早期对于微小裂缝的修补起到了防止裂纹扩展的作用。

(4) 在外部环境及荷载的作用下，随着作用周期的增大，微胶囊对沥青混合料试样裂缝宽度的修复水平逐渐减小，其修复作用在第 4 个作用周期时达到极限值；而对于该文所选的 3 种级配类型的混合料，微胶囊对 SMA－10 的修复效果最好；随着粒径的增大，微胶囊修复效果达到极值的作用周期数减小。

参考文献：

[1] 高艳丽，付丽琴，王玉顺，等.高速公路沥青路面裂缝修补技术探讨[J].公路，2002(9).

[2] 王玉顺.京秦高速公路沥青路面裂缝修补方法[J].公路交通科技，2003(3).

[3] Shen J，Amirkhanian S，Miller JA Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixturescontaining Reclaimed Asphalt Pavement[J]. ASCE J Mater Civil Eng，2007，19(5)：376－384.

[4] Su JF，Schlangen E.Synthesis and Physicochemical Properties of High Compact Microcapsules Containing Rejuvenator Applied in Asphalt[J].Chem Eng J，2012，198－199：289－300.

[5] Garc′a A′，Schlangen E，van de Ven M.Two Ways of Closing Cracks on Asphalt Concrete Pavements：Microcapsules and Induction Heating[J].Key Eng Mater，2010，417－418：573－576.

[6] Su JF，Qiu J，Schlangen E，Wang Y－Y.Experimental Investigation of Self Healing Behaviour of Bitumen/Microcapsule Composites by Modified Beam on Elastic Foundation Method[J]. Materials and Structures，2015，48：4 067－4 076.

[7] Su J F，Schlangen E，Wang Y Y. Investigation the Self－Healing Mechanism of Aged Bitumen Using Microcapsules Containing Rejuvenator[J].Construction & Building Materials，2015，85(6)：49－56.

[8] Garcia A，Austin C J，Jelfs J. Mechanical Properties of Asphalt Mixture Containing Sunflower Oil Capsules[J]. Journal of Cleaner Production，2016，118：124－132.

[9] JTG F40－2017 公路沥青路面施工技术规范[S].

[10] 肖艺成.路用自修复材料的制备及性能研究[D].长安大学硕士学位论文，2014.

[11] 关永胜.分布式光纤传感在铺装裂缝监测中的应用研究[D].东南大学硕士学位论文，2006.

[12] 孙宝臣，徐华，李剑芝，等.基于光纤网络的全分布裂缝检测技术研究[J].传感技术学报，2007(7).

[13] 陈旭，方凯，陈临潇，等.道路裂缝检测中的光纤传感技术研究进展及展望[J].建筑工程技术与设计，2017(5).

[14] 裴建新.基于光纤光栅传感技术的道路裂缝扩展监测[J].筑路机械与施工机械化，2016(3).

[15] 李兴海，于静，丛铖东，等.沥青混合料 I 型断裂试验方法研究综述[J].中外公路，2017(4).

[16] 翟殿钢，赵健，郭昕，等.一种新型沥青冷补料应用研究[J].中外公路，2017(6).