DOI:10.11918/202008083

沥青自愈合性能影响因素探究及CT扫描细观分析

周 璐[1,2],黄卫东[1,2],孙立军[1,2,3],吕 泉[1,2,3],张 翕[4]

(1.道路与交通工程教育部重点实验室(同济大学),上海 201804;2. 同济大学 交通运输工程学院,上海 201804;
3.上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室(同济大学),上海 201804;4.太原理工大学 土木工程学院,太原 030024)

摘 要:为了直观研究沥青的自愈合性能,采用BBS(binder bond strength)拉拔实验探究温度、水分、老化及改性剂对沥青自愈合性能的影响,并利用CT(computed tomography)扫描实验,从细观角度观测沥青在不同条件下的自愈合进程。BBS实验结果表明:较高温度与干燥条件有利于沥青的自愈合,水分不利于沥青的短期与长期愈合,但能够提高中期阶段的愈合率;4.5%(质量分数)SBS改性沥青的愈合性能与多次破坏-愈合循环后的稳定强度均低于基质沥青,且其愈合性能对老化作用的敏感度较低。CT实验结果表明沥青的愈合进程主要包括"聚合、圆润化及外移"三特征。CT扫描图像验证了高温干燥条件对沥青自愈合的有利影响及对SBS改性剂的不利影响。

关键词:沥青自愈合;拉拔实验;CT扫描;界面愈合;细观分析

中图分类号:U414 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2021)09-0001-09

Influence factors of asphalt self-healing performance and micro-analysis by CT scanning

ZHOU Lu[1,2], HUANG Weidong[1,2], SUN Lijun[1,2,3], LÜ Quan[1,2,3], ZHANG Xiao[4]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education (Tongji University), Shanghai 201804, China;
2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety (Tongji University), Shanghai 201804, China;
4. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To intuitively investigate the self-healing performance of asphalt, binder bond strength (BBS) test was conducted to study the influence of temperature, moisture, aging, and SBS modifier on the self-healing performance of asphalt. The healing process of asphalt under different healing conditions was observed by computed tomography (CT) test. BBS test results showed that higher temperature and dry condition were conducive to the asphalt self-healing performance. Moisture was disadvantageous to the short-term and long-term healing of asphalt, but could improve the healing ratio during the mid-term of the healing process. The healing behavior and the stabilized healing strength of 4.5% (mass fraction) SBS-modified asphalt after multiple failure-healing cycles were lower than those of base asphalt, and the healing performance of SBS-modified asphalt was less sensitive to aging. CT scanning results showed that the healing process of asphalt mainly included three steps: gathering, rounding, and moving. CT images confirmed the favorable effect of higher temperature and dry condition on asphalt self-healing and the adverse effect on SBS modifier.

Keywords: asphalt self-healing; binder bond strength test; CT scanning; interface healing; micro-analysis

沥青性能在沥青混合料的疲劳与耐久性中起到了很重要的作用。前期研究[1-4]大多通过对沥青材料施加连续的重复荷载,测试其疲劳性能以对沥青及混合料耐久性进行预测。在这类实验研究中,荷载通常是连续的,试件在经过一阶段的荷载后便停止实验。然而在实际路面情况中,沥青混合料所经受的往往是间歇车辆荷载。实验室中连续荷载与实际路面间歇荷载之间的差异会导致预测出的沥青路面疲劳寿命与实际可服役年限有较大出入。这主要是由于沥青材料的自愈合特性所导致。在无车辆荷载的间歇期,若路面温度较高,沥青材料会发生明显的愈合行为,路面的微小裂纹逐渐弥合,甚至一些已与集料发生剥离的沥青,在压力与温度的双重作用下,也会与集料重新产生黏附,沥青路面的性能由此得到一定的恢复。因此,在对沥青路面耐久性能进行评价时,沥青材料的自愈合性能也是需要考虑的重要指标。

沥青及其混合料的自愈合现象早在文献[5-6]

收稿日期:2020-08-19
基金项目:国家自然科学基金(51778481,51908426)
作者简介:周 璐(1993—),女,博士研究生;
黄卫东(1970—),男,研究员,博士生导师;
孙立军(1963—),男,教授,博士生导师;
张 翕(1980—),男,教授,博士生导师
通信作者:吕 泉,1991lvquan@tongji.edu.cn

中就有提出。文献[7]于 1971 年建立了分子蠕动模型,对聚合物分子在界面扩散动力学作出了解释。基于分子蠕动模型, 文献[8]提出了聚合物材料裂纹愈合动力学方程。文献[9]利用上述理论构建了高分子聚合物愈合过程的 5 个阶段:1)表面重组;2)表面接触;3)润湿;4)扩散;5)随机化。文献[10]进一步将沥青的自愈合过程分为 3 步。文献[11]则将沥青材料的自愈合分为裂缝表面的浸润和内源性自愈合,两者都被认为是沥青的自身特性并由其内在的分子扩散作用决定。文献[12]研究了沥青与沥青胶浆的自愈合现象,认为沥青自愈合先是有裂缝的闭合,然后才有强度的恢复。

沥青的自愈合水平受多种因素的影响,主要包括温度、水分、老化作用、改性剂等[13]。温度对沥青本身的性能及沥青-集料的黏附性和自愈合特性都有很大影响:一方面,沥青的劲度模量等流变学指标对温度较为敏感;另一方面,温度会对沥青的黏度、沥青分子的热运动产生作用,影响着沥青-集料黏结强度的形成和愈合过程。关于水分及不同改性剂对沥青愈合的作用影响,目前不同研究之间还存在着矛盾争议。一些研究[14-15]认为,SBS 改性剂不利于基质沥青自愈合性能,但也有其他研究[16-17]表明线型 SBS 改性剂利于沥青的自愈合性能。可能因为不同研究中所采用的实验方法与条件不同,所以造成了相左的实验结论。

目前关于沥青材料的自愈合性能的研究大多通过流变学手段[18-20],通过加载间歇期前后沥青模量、相位角等变化来反映沥青的自愈合性能,但缺乏常规的路用指标以进行直观表现。此外,也缺少利用无损检测的方式对沥青-石料界面自愈合进程进行长期直观观测。以上导致了目前大多研究对沥青自愈合现象的理解还不够具体直观,与实际应用脱节。

针对以上在沥青-石料界面自愈合方面研究存在的不足与问题,本文基于 BBS(binder bond strength)拉拔实验,对基质沥青与 4.5%(质量分数)SBS 改性沥青在不同条件下的自愈合性能进行评价,探究温度、水分与老化对两种沥青自愈合性能的影响。并利用 CT(computed tomography)计算机断层扫描实验,对沥青-石料界面黏附性自愈合机理进行探究,直观观测沥青在不同愈合条件下随时间的愈合进程变化,并以此对 BBS 实验所得结论进行验证。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本文分别选用基质沥青与道路工程中常用的 4.5%(质量分数)SBS 改性沥青进行研究对比。其中,基质沥青选用埃克森美孚公司生产的埃索(ESSO)70#沥青;SBS 改性剂为线型 SBS,产自岳阳巴陵石化有限公司的 SBS1301-1(YH791H),嵌段比 *S*/*B* 为 30/70。两种沥青的主要实验技术指标见表 1。

另外需要指出的是,由于 SBS 改性剂与沥青之间的不相容性,需向其中加入硫磺稳定剂以促进 SBS 与沥青产生交联,从而提高其存储稳定性,防止离析。在本文中,4.5%(质量分数)SBS 改性沥青中硫磺掺量为 0.15%。

表 1 沥青种类及主要技术指标

Tab.1 Asphalt types and main indexes

实验材料	针入度(25 ℃)/0.1 mm	软化点/℃	延度/cm	135 ℃布氏黏度/(Pa·s)	PG 分级
ESSO 70#基质沥青	64.0	50.9	42.7 (10 ℃)	0.429	64-22
4.5% SBS 改性沥青	47.9	75.3	47.4 (5 ℃)	2.389	70-22

1.2 实验参数与方法

1.2.1 BBS 实验

BBS 拉拔实验是 AASHTO 中评价沥青黏结性能的标准实验[21]。由于其能够快速、准确并直观地反映沥青-石料黏结强度,近些年在国内外的研究中逐渐得到了较多应用。通常情况下,BBS 实验的破坏形式有两种。在干燥条件下养护后的试件一般呈现内聚破坏(破坏出现在沥青内部);在浸水条件下养护后的试件则会出现黏附破坏(破坏出现在沥青-石料界面)。在本文中,为了探究沥青在集料界面的愈合行为,采取浸水养护,以期得到破坏形式为黏附性破坏的沥青-石料试件。

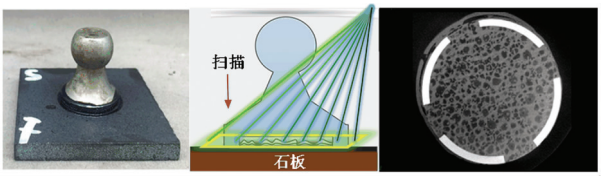
BBS 实验的试件成型步骤在前期研究[22]中已有较为详细的描述,在此不再赘述。试件成型后,首先将其在 25 ℃恒温恒湿箱中干燥放置 1 h,以确保其强度的形成;接着将其放入 40 ℃水浴箱中养护 24 h(促进黏附破坏);再将试件放入 25 ℃水浴箱中降温 10 min,随后取出并测定初始拉拔强度(initial pull-off tensile strength, $POTS_{initial}$)。根据 AASHTO TP91-11 规范,加载速率为 0.7 MPa/s。初始强度测定完成后,将拔头按原位放回,并根据研究目标将试件置于不同条件下进行愈合养护,然后再次测定愈合拉拔强度($POTS_{healing}$)。以愈合率(healing ratio, HR)作为评价沥青愈合性能的指标,其计算方式为

$$HR = \frac{POTS_{initial}}{POTS_{healing}} \times 100\%$$

1.2.2　CT 扫描实验

CT 即计算机断层扫描技术，利用 X 射线、γ 射线或超声波，围绕被观测物体按照断面进行分层扫描，并通过计算机重建从而获得被扫描物体的三维模型和断层图像。CT 技术具有扫描时间快、图像清晰等特点，能够准确了解被观测物体内部的空间构造[23]。为了从细观上进一步了解沥青-集料界面的黏附性自愈合进程，使用 YXLON 公司生产的 Y.CT Precision 2 高精度工业 CT 机对 BBS 实验中经过初始拉拔破坏后的自愈合试件进行 CT 扫描。

CT 实验中，扫描对象为拔头与石板之间的沥青膜。用于自愈合 CT 扫描的试件的制备过程如下：在不损坏石板表面的前提下，将 BBS 拉拔实验中所用的石板切割成 50 mm×50 mm×5 mm 的小石板，每块小石板上成型 1 个拔头试件，如图 1(a)所示。试件在经过初次拉拔破坏后，在不同条件下进行愈合。通过对不同愈合时间状态下的试件进行扫描，如图 1(b)所示，从而直观地观测沥青在石板表面的自愈合进程。扫描得到的图像处理采用 VG MAX2.1 软件，获得的沥青膜 CT 扫描图像如图 1(c)所示。其中颜色较暗的部分是试件中的空隙及裂缝，颜色较亮的部分为沥青。图中能够清楚展示沥青膜横截面上的空隙大小、形态及分布情况，借此可对沥青-石板界面上的细观空隙演化规律及自愈合进程进行分析。



(a)扫描试件　　(b)CT 扫描示意　　(c)沥青膜 CT 扫描图像

图 1　CT 实验示意

Fig.1　General view of CT test

2　实验结果与分析

2.1　基于 BBS 实验的沥青自愈合量化分析

2.1.1　愈合温度及沥青标号对沥青自愈合的影响

愈合温度是影响沥青愈合性能的重要因素之一，然而即使在同一温度下，不同标号基质沥青的愈合性能表现也有明显不同。本文中，分别选取了 5、15、25、40 ℃作为愈合温度，愈合时间为 24 h，以探究愈合温度对沥青-石料界面自愈合特性的影响；并选用 ESSO 70#基质沥青、橡胶油调和 90#基质沥青、橡胶油调和 110#基质沥青这 3 种不同标号的沥青，以对比不同标号沥青在不同愈合温度影响下表现出的自愈合能力差异，实验对比结果如图 2 所示。

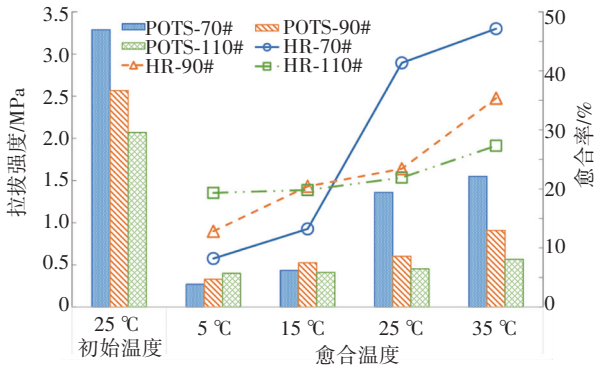


图 2　不同标号基质沥青在不同温度下的愈合性能对比

Fig.2　Comparison of healing performance of base asphalt with different penetration grades at different temperatures

由图 2 可知，温度越高，沥青的愈合拉拔强度则较高，愈合率也更高。这是由于在较高温度下(25 ℃、40 ℃)在宏观层面上，沥青黏度较低、流动性较好，在沥青-石板界面自愈合过程中能更有效地重新填充破坏面的空隙；微观层面上，沥青分子热运动更剧烈，基于渗透作用和扩散作用，通过分子的交换和分子间键力的形成，促使愈合发生。而在较低温度下，上述作用受到抑制，尤其是低标号为 70#基质沥青在低温(5 ℃)下的流动性最差，填充破坏面空隙的过程最慢、程度最低，因此表现出最低的愈合率。

一般认为，针入度较高的“软沥青”相较于针入度较低的“硬沥青”自愈合能力要高，然而在温度≥25 ℃的时候，70#沥青要比 90#和 110#沥青的愈合能力要高。只有在温度进一步降低到 15 ℃和 5 ℃的时候，90#和 110#沥青的愈合能力才能比 70#沥青高。因此“软沥青”具有高愈合能力的特性只有在低温状态下才能显示出来，而高温地区还是宜选择针入度等级较低的沥青[24]。

2.1.2　浸水条件及愈合时间对沥青自愈合的影响

沥青-集料界面自愈合的过程即是沥青与集料重新建立黏结强度的过程，在这一过程中，愈合时间与干湿环境会直接影响愈合程度。其中，浸水环境与沥青的自愈合程度呈现出较为复杂的关系：一方面，浸水环境对沥青体现出养护作用，促进了界面自愈合；另一方面，随着愈合时间的增长，水对于愈合过程表现出不利作用，阻碍了界面的愈合。水分对沥青-集料愈合过程具体呈现正面促进的作用还是反面阻碍的作用，取决于浸水愈合养护时间的长短。

为了研究浸水与愈合时间对沥青黏附性自愈合的影响，将 BBS 拉拔自愈合试件分为几组，分别测得自愈合试件在 25 ℃水浴条件及 25 ℃干燥条件下

愈合养护 1、2、4、8、12、24、48、96、192、384 h 后的愈合率,并对比沥青-石板试件在干燥、浸水养护条件下不同愈合时间的自愈合情况。图 3 显示了水及愈合时间对于沥青黏附性自愈合的影响。由于时间跨度较长,为了更清晰地展示不同愈合时间下的沥青愈合强度,图中愈合时间以半自然对数坐标的形式给出。

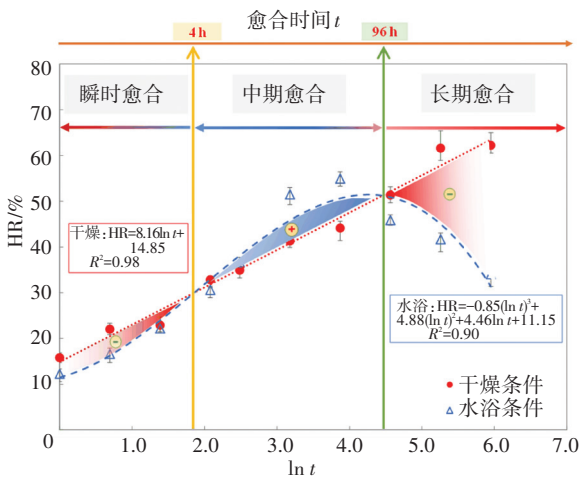


图 3　浸水及愈合时间对于沥青黏附性自愈合的影响

Fig.3　Effect of moisture and healing time on adhesion healing performance of asphalt

由图 3 可以看出,在干燥条件下,沥青的愈合率与愈合时间呈现出半对数函数的正相关关系。相比之下,浸水条件下沥青的愈合率则随着愈合时间的延长先增后减,这体现了水对于沥青的黏附性自愈合具有双面效应。根据前期实验研究发现,干燥愈合条件下沥青-石料间黏附强度愈合率在愈合开始的 4 h 内增长较慢;从第 4 小时至 96 小时,沥青-石料间的黏结强度有较为明显的恢复,愈合率增长较快;从第 96 小时之后,愈合率曲线虽然还有一定增长,但逐渐变缓并趋于稳定,说明沥青-石料间的黏结强度已逐渐接近平稳值。基于此,在本文中,将沥青-石料间的愈合过程分为短、中、后期,大致为:愈合开始的 4 h 内为短期愈合阶段;第 4 小时至 96 小时(4 d)为中期愈合阶段;第 96 小时之后为长期愈合阶段。

将干燥与浸水条件下的沥青愈合率随时间的发展情况进行对比,可以发现,在浸水的最初几个小时内,浸水条件下的愈合率低于干燥条件下的愈合率,这说明水分不利于沥青的瞬时(短期)自愈合。而在自愈合中期阶段,浸水愈合率则较高,表明水分对沥青愈合的正面促进效果体现出来。这可能是由于水中的氢离子与沥青的表面能中酸碱分量具有很好的亲和性(good affinity)[25],从而在破坏面重新形成了更强的氢键与愈合强度。由于氢键的形成需要一定的时间,因此水分的正面效应在愈合中期阶段才显现出来。随着愈合时间的进一步延长,浸水条件下的沥青-石板愈合率有了明显的下降,且低于干燥养护条件下的愈合率。这说明从长期角度来看,水分对沥青-石板的愈合效果有阻碍作用。根据湿度迁移理论[26],水的损坏作用随着愈合时间的增长逐步凸显,水逐渐从沥青膜破裂处或者集料内部的毛细路径侵入沥青-石板的黏附界面,甚至可能替换部分沥青膜使其产生剥落,从而进一步降低沥青与集料的愈合黏附强度。

2.1.3　干湿愈合条件下不同沥青的多次破坏-愈合

实际路用状态下,发生黏附性破坏或产生微裂缝的路面在自愈合过程中仍可能继续受到水、车辆荷载等作用的影响,从而影响自愈合进程或再次发生破坏;当再次破坏发生后,在车辆荷载作用下,则随即又开始新一轮的自愈合过程。如此循环往复,在多次破坏-愈合后,沥青-集料间的黏结强度会逐渐趋于稳定,即达到多次愈合后的稳定强度。较大的稳定强度使得沥青-集料能在不断自愈合过程的基础上持续保持较好的黏结强度(如图 4 中曲线 *B* 所示),路面不会发生剥落;较小的稳定强度最终则会导致路面在外界反复作用下发生黏附性破坏或开裂(如图 4 中曲线 *A* 所示)。需要注意的是,初始强度较高的沥青并不一定也具有较高的愈合稳定强度。因此从路面的长期性能来看,也需要对沥青-石料在外界因素长期作用下的愈合稳定强度给予充分关注。

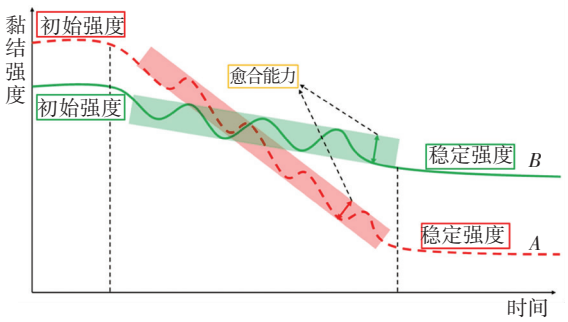


图 4　多次破坏-愈合循环后沥青-集料黏结强度的变化示意

Fig.4　Variation of bond strength between asphalt and aggregate after multiple failure-healing cycles

因此,探究沥青-石料界面在多次破坏-愈合过程中的自愈合特性,研究沥青路面在长时间服役过程中的性能变化,对路面日常养护管理具有重要意义。本小节基于 BBS 拉拔实验,针对沥青路面在不断的干湿循环及外荷载的反复作用下沥青-石料界面的多次破坏场景,通过破坏-愈合循环来模拟多次黏附性自愈合过程。每个试件经过初始破坏后,进行 6 次愈

合-再破坏循环，得到最终的愈合稳定强度。干燥与浸水条件的愈合温度均为 25 ℃，愈合时间为 24 h。愈合实验结果如图 5 所示。

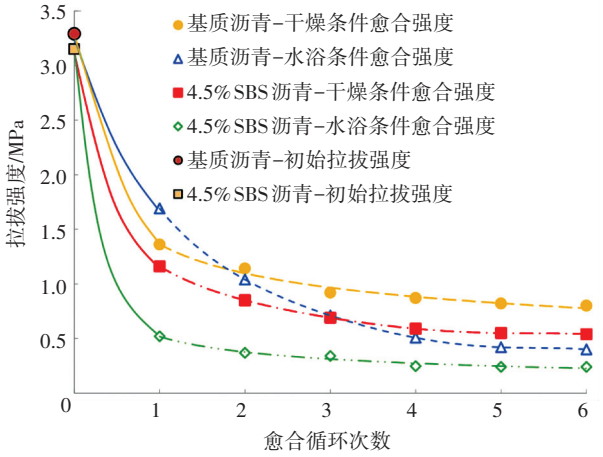


图 5　基质沥青与 SBS 改性沥青在干湿条件下多次破坏-愈合循环下的自愈合行为

Fig. 5　Self-healing performance of base asphalt and SBS-modified asphalt during multiple failure-healing cycles under dry and wet conditions

由图 5 可知，无论是 ESSO 基质沥青还是 SBS 改性沥青，其所能恢复的愈合强度随着破坏-愈合次数的增多而逐渐降低并趋于一个稳定强度，且沥青的黏附性自愈合能力与其破坏-愈合次数（即损伤程度）成幂函数关系。随着损伤的积累，沥青与集料之间的黏结强度会越来越难以恢复[27]。

由干燥与浸水条件下的愈合情况对比可以看出，不同破坏-愈合循环次数下，干燥条件下的沥青恢复强度均高于潮湿条件下的恢复强度。例如，基质沥青与 4.5%（质量分数）SBS 改性沥青在浸水愈合条件下的愈合稳定强度仅为干燥愈合条件下的一半左右。这说明水会降低沥青与集料界面在多次破坏-愈合循环下的愈合能力。此外，无论在干燥还是浸水条件下，4.5%（质量分数）SBS 改性沥青的愈合稳定强度均低于基质沥青，这表明线型 SBS 对沥青的愈合有不利作用。产生这种现象的原因是 SBS 改性剂的加入提高了沥青的黏度与模量，降低了其流动性能，SBS 大分子的存在阻碍了沥青在愈合过程中在石板表面上的流动浸润，导致其在多次破坏-愈合-再破坏后无法恢复到较高的强度。

2.1.4　老化程度对与沥青自愈合的影响

实际路用状态下，路面沥青会遭受不同程度的老化，造成沥青各项性能指标下降。宏观层面上，老化使得沥青变硬变脆、流动性减弱；微观层面上，老化造成了沥青质含量增加、胶体结构向凝胶型转化、渗透作用和扩散作用的效果变化，进而影响沥青-集料界面的黏附性和自愈合特性。然而对于改性沥青来说，改性剂与沥青的老化效果相互叠加，难以区分，这会对老化沥青整体性能评价造成影响，难以准确评价老化对改性沥青性能的影响。因此，为了准确探究老化对沥青多次自愈合特性的影响，本小节选取了 ESSO 70#沥青与 4.5%（质量分数）线型 SBS 改性沥青，对两种沥青的原样试件、RTFO 短期老化试件及 PAV 长期老化试件进行多次破坏-愈合-再破坏的 BBS 拉拔实验。每一次愈合循环中，愈合条件为干燥 25 ℃，愈合时间为 24 h，基质沥青在不同老化程度下的多次自愈合结果如图 6 所示。由图中结果可知，尽管从初始拉拔强度来看，呈现出 POTS 值随老化程度的加深而上升的现象，PAV 老化沥青的初始强度达到 4.33 MPa，比原样沥青高出 32%，但多次破坏-愈合后，原样沥青相对于老化沥青表现出较高的愈合稳定强度。

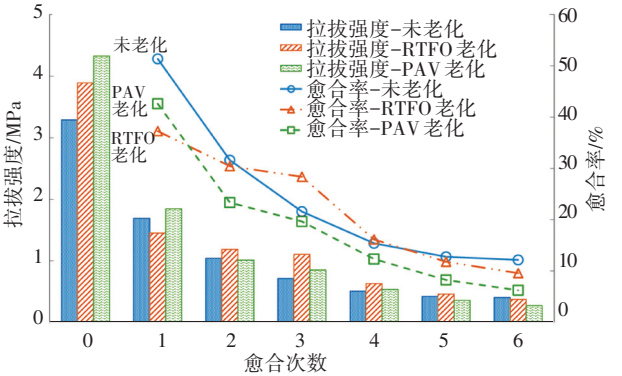


图 6　不同老化程度的基质沥青在多次破坏-愈合循环中的愈合结果

Fig.6　Healing performance of base asphalt with different aging degrees during multiple failure-healing cycles

具体来看，在前 5 次破坏-愈合循环下，相对于基质沥青，老化沥青呈现出较高的愈合拉拔强度；而第 6、7 次破坏-愈合循环中，基质沥青的愈合拉拔强度较高。这表明，老化对于沥青的愈合强度有着正反向两方面的影响：一方面，老化使得沥青的流动性能减弱，降低了其在石料表面的扩散与渗透作用，阻碍了沥青愈合进程；但另一方面，如前文所说，老化提高了沥青质含量与极性，增强了沥青模量，因此，若给予足够的愈合时间与合适的愈合温度，一旦沥青能够重新与石料产生足够面积的黏附，沥青-石料间愈合黏附强度仍能够达到较高值。沥青老化程度不同，对愈合的正反面效果叠加，则体现出“促进”或是“阻碍”愈合两种不同结果。在本文的“干燥 25 ℃，24 h”这一愈合养护条件下，前期破坏-愈合循环中，老化对沥青愈合性能的正面促进影响占了主导地位，因此老化沥青的愈合强度更高；而随着破坏次数的增加，老化对愈合的反面阻碍效应凸显

出来,体现出较低的愈合稳定强度。其中,PAV 长期老化对沥青愈合的双面效应比 RTFO 的短期老化更为明显。但总体上,从愈合率的角度来看,老化不利于基质沥青的自愈合进程。

4.5%(质量分数)线型 SBS 改性沥青在不同老化程度下的多次自愈合结果如图 7 所示。由图中结果可知,相对于基质沥青,老化对 SBS 改性沥青愈合性能的负面影响减弱。PAV 老化沥青的愈合强度在前 5 次破坏-愈合循环中均保持最高,且不同老化条件下的愈合率由大到小排序为 PAV 老化、原样、RTFOT 老化,而后两次破坏-愈合循环下 3 种老化程度的 SBS 改性沥青则无明显区别。这表明,长期老化提高了 SBS 改性沥青的自愈合性能。这一现象的原因可能在于老化对于 SBS 改性沥青自愈合性能也存在正反两方面的作用效果:一方面,老化造成 SBS 改性沥青中沥青相的硬化而降低其愈合能力;但另一方面,老化作用使得 SBS 高分子链发生降解,沥青中的聚合物分子链缩短,平均分子质量降低,进而提高了沥青的流动性能,使愈合能力有所提升[16]。因此老化对于 SBS 改性沥青的愈合性能存在双面影响,且这两种影响之间存在一定平衡关系。这种平衡关系解释了为何短期老化会降低线型 SBS 改性沥青的自愈合能力,而长期老化反而提高了自愈合能力。以上现象也说明了 SBS 改性沥青的自愈合性能对老化作用的敏感性较低。

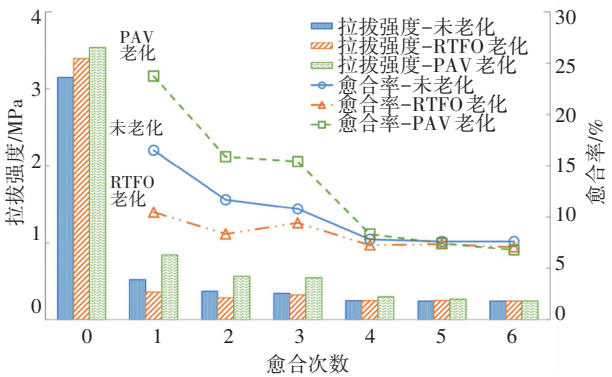


图 7　不同老化程度的 SBS 改性沥青在多次破坏-愈合循环中的愈合结果

Fig. 7　Healing performance of SBS-modified asphalt with different aging degrees during multiple failure-healing cycles

2.2　基于 CT 实验的沥青-石料界面黏附性自愈合细观分析

为了进一步直观地探究温度、水分及 SBS 改性剂对沥青-石料黏附性自愈合性能的影响,利用 CT 实验对 ESSO 70#基质沥青和 4.5%(质量分数)SBS 改性沥青的 BBS 实验愈合试件进行扫描,得到沥青在不同温度、干湿条件下随时间的愈合进程变化的细观图像。

2.2.1　干燥条件下沥青的自愈合进程

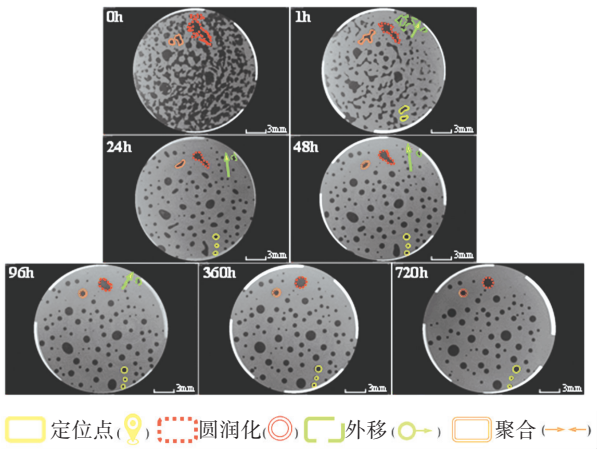
为了研究温度对沥青与集料界面黏附性自愈合行为的影响,采用 CT 实验扫描了 25 ℃及 40 ℃干燥条件下基质沥青在不同愈合时间节点的图像,如图 8 所示,其中一些明显的变化区域以高亮颜色圈出。由图 8 可见,随着愈合时间的增加,石板表面沥青膜中的空隙、裂缝在逐渐减少,且这种变化在愈合的早期更为明显,尤其是从 0 h 到 1 h 的愈合过程中。通过观察 1 h 的愈合图像与 720 h 的愈合图像,可以从中归纳并总结出 3 个机理来解释沥青-集料界面的黏附性自愈合行为(图中黄色实线的定位点表明了所有图像都是从同一个视角进行对比分析的)。

1)聚合。沥青中相邻的空隙与裂缝相互靠近、聚集,最终合并成一个空隙,使得破坏面的总空隙数量减少,图中橘黄色双线标记的空隙变化体现了这一现象。这可以由沥青材料的浸润特性解释:浸润是指当两个破坏面接触的时候,两个界面在表面张力的作用下相互接近的过程。由于沥青具有浸润集料表面的能力,使得残留在沥青膜内的临近气泡在沥青的浸润作用下不断相互靠近。

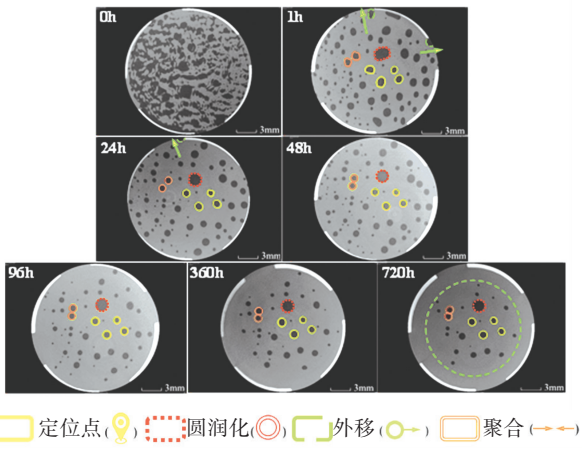
2)圆润化。无论空隙或裂缝的初始形状如何,在愈合足够的时间后均会变为圆形。这可能是由于空隙中空气或水分的表面张力所导致。此外,沥青中出现的裂缝或空隙会降低附近的沥青密度从而形成垂直于空隙界面的密度梯度,布朗运动会导致沥青分子沿着梯度从密度较高处向较低处发生自扩散,并最终形成圆形的稳定状态[27]。

3)外移。接近试件边缘的空隙逐渐向边缘靠近,形成排水或排空气的通道,使得沥青-石板界面空隙数量减少、界面空隙率降低。1 h 的愈合图像至 96 h 的愈合图像中绿色长虚线标记的空隙演化规律体现了这一现象。试件愈合 360 h,标记的空隙已完全外移消失。此外,图中定位点的空隙从 96 h 至 720 h 也以放射线状逐渐向外移动,这也证明了沥青-石板界面破坏处空隙的外移行为。

对比图 8(a)与 8(b),当干燥愈合温度从 25 ℃提高到 40 ℃,沥青自愈合的速率会进一步提高,沥青-石板界面的气泡空隙或者裂缝会更快聚合、圆润化并外移。在 40 ℃干燥条件下愈合 720 h 后,沥青膜外围基本上已经没有空隙或裂缝,表明高温对于沥青的愈合具有重要作用。此外,通过对比可以发现,40 ℃干燥条件下愈合 1 h 的图像与 25 ℃干燥条件下愈合 96 h 的图像愈合程度非常接近,说明相较于愈合时间,愈合温度对于沥青的愈合进程有更显著的影响。



（a）25 ℃干燥



（b）40 ℃干燥

图 8　基质沥青随时间的愈合 CT 图像

Fig.8　CT images of healing process of base asphalt with healing time

2.2.2　浸水条件下沥青的自愈合进程

图 9 展示了基质沥青在 25 ℃浸水条件下随时间的愈合进程 CT 扫描图。

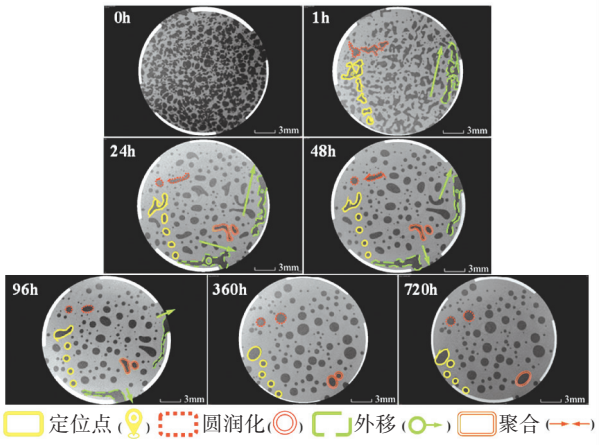


图 9　基质沥青在 25 ℃水浴愈合条件下随时间的愈合 CT 图像

Fig.9　CT images of healing process of base asphalt with healing time under wet condition at 25 ℃

对比图 8 与图 9 可以观察到，浸水愈合条件下的沥青愈合过程同样包含聚合、圆润化与外移 3 个愈合特征现象。且在浸水条件下沥青空隙的聚合与外移现象明显慢于同温度的干燥愈合条件下的进程。在愈合的第 96 小时，干燥条件下沥青-石板界面的气泡空隙已基本从拔头的溢流孔排出，且界面残留气泡空隙均已基本圆润化，而浸水条件下的沥青-石板界面仍残留有许多气泡还未排除。甚至到了第 720 小时，仍有部分空隙还处于未圆润化的状态。这说明沥青在浸水条件下的愈合能力明显弱于同温度干燥条件下的愈合能力。以上 CT 扫描实验结果证实了水对于沥青自愈合尤其是短期自愈合的不利影响[28]。

2.2.3　SBS 改性沥青的自愈合进程

为了对比不同种类沥青的自愈合性能，对上文中所用到的 4.5%（质量分数）SBS 改性沥青的 BBS 试件也进行 25 ℃浸水愈合条件下不同时间节点的 CT 扫描，其随时间的界面愈合图像如图 10 所示。

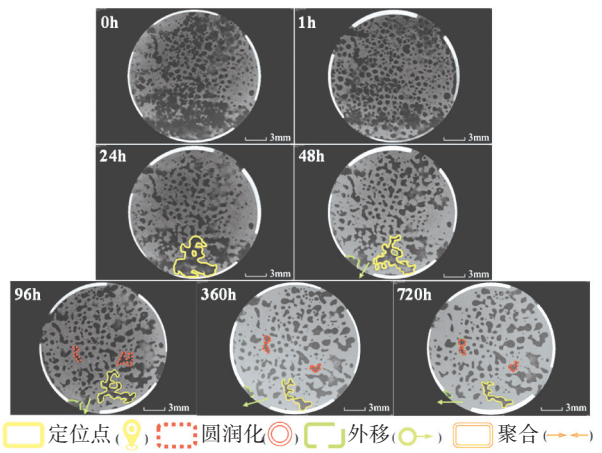


图 10　SBS 改性沥青在 25 ℃水浴愈合条件下随时间愈合的 CT 图像

Fig.10　CT images of healing process of SBS-modified asphalt with healing time under wet condition at 25 ℃

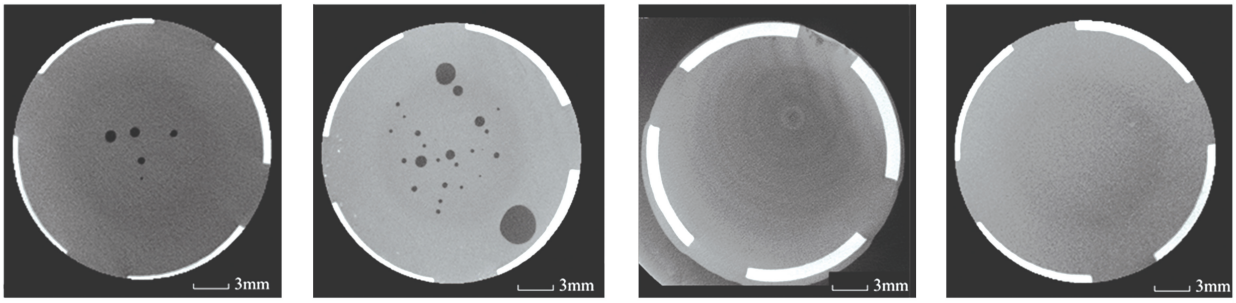
由图 10 可见，与基质沥青相比，4.5%（质量分数）SBS 改性沥青在自愈合进程中的聚合、圆润化与外移这 3 个现象较为不明显，其中甚至基本没有观察到明显的空隙聚合现象。基质沥青在经历 360 h 的愈合后空隙的变化趋于稳定，而 SBS 改性沥青中的裂缝或空隙在经历 360 h 愈合后还有继续闭合的趋势，且细观空隙结构的演进也并未达到稳定。此外，基质沥青的空隙形状比 SBS 改性沥青更加规则，分布更加均匀。根据上述断面空隙的 3 个现象变化情况，可以总结出 4.5%（质量分数）SBS 改性沥青的愈合进程明显慢于基质沥青，这与 BBS 实验中“SBS 改性沥青相比于基质沥青有较低的愈合强度及愈合率”这一结论相一致。

综上,基于CT技术,本研究证明了线型SBS改性剂不利于沥青的黏附性自愈合。这可能是由于SBS改性剂在沥青中会发生溶胀作用,导致沥青中的饱和分与芳香分被部分吸收到聚合物网络中,使得沥青质的含量增加,沥青的黏度变大。而高沥青质含量与高黏度会降低沥青的自愈合能力[27]。另一方面可能是SBS改性剂的弹性聚合物网络会阻碍破坏面或微裂缝上的沥青与集料重新接触并愈合。SBS分子在0 ℃至40 ℃的实验温度下相当稳定,在该温度范围内SBS不会发生相变或物理化学反应,这就意味着破坏的SBS结构很难发生自我修复。此时的SBS类似于"填充物"的作用,影响了沥青愈合进程中的浸润与扩散作用[24]。这些作用叠加在一起最终导致了"线型SBS改性剂会降低沥青的黏附性自愈合性能"这一结果。

2.2.4　不同沥青的长期自愈合表现

图11展示了基质沥青与4.5%(质量分数)SBS改性沥青在不同条件下的长期(1 a)愈合效果。

从图中可见,若给予足够长的愈合时间,各条件下沥青-石板界面之间的空隙与裂缝基本完全消失,这表明只要有充足的愈合时间,沥青从集料上剥离下来后能够发生完全的再次黏附。而相比之下,水浴条件的试件在愈合1 a后仍然有若干难以愈合的大空隙,这也证明了水对于沥青长期自愈合的不利作用。SBS改性沥青试件的残留空隙更为明显,这表明在沥青路面的长期服役过程中,SBS改性沥青路面虽不易发生剥落,但其一旦产生裂缝甚至是沥青剥落,即使能够给予其较长的荷载间歇与愈合时间,也难以完全愈合并恢复原先的路用性能。



(a)基质沥青25 ℃水浴　(b) SBS改性沥青25 ℃水浴　(c) 基质沥青25 ℃干燥　(d) 基质沥青40 ℃干燥

图11　沥青在各条件下的长期愈合情况

Fig.11　Healing status of asphalts under different healing conditions in long-term

3　结　论

基于BBS拉拔实验与CT扫描实验,测量评价了基质沥青与SBS改性沥青在不同愈合条件下的自愈合性能,并从细观角度观测了沥青-石板界面的黏附性自愈合进程,直观展示了温度、水分、改性剂对沥青自愈合表现所造成的影响。实验结果具体如下:

1)温度越高,沥青的愈合率也越高。标号较高的沥青虽然具有较高的愈合流动性,但强度较低,相较于低标号的沥青,其由流动性带来的高愈合特性只有在低温状态下才体现出来。在常规温度下(25 ℃~40 ℃)不同针入度等级的基质沥青自愈合性能由优到劣排序为70#、90#、110#。

2)沥青在干燥条件下的愈合率与愈合时间呈现出半对数函数的正相关关系。而浸水条件下则随着愈合时间的延长先增后减,水对于沥青的黏附性自愈合具有双面效应。通过干湿对比可以发现,水分不利于沥青的瞬时(短期)自愈合与长期愈合性能,但能够促进提升沥青的中期阶段的愈合。

3)4.5%(质量分数)SBS改性沥青的愈合稳定强度低于基质沥青,表明SBS改性剂对沥青自愈合性能有不利影响。老化也对沥青的愈合性能有双面影响:既可提高沥青的愈合强度,但又使沥青流动性减弱,愈合能力下降。随着老化程度的加深,老化对沥青愈合性能的负面影响逐渐体现出来。而对于SBS改性沥青,由于SBS大分子链的降解掩盖了老化对沥青流动性的不利影响,因此SBS改性沥青愈合性能对外界老化作用的敏感性较低。

4)基于CT扫描实验,归纳出沥青-集料界面的黏附性自愈合行为的3个主要特征现象:聚合、圆润化及外移。干燥条件与较高温度对沥青自愈合是有利的影响。相较于愈合时间,愈合温度对于沥青的愈合进程有更显著的影响。此外,也验证了浸水条件会阻碍沥青的短期自愈合进程,线型SBS改性剂不利于沥青的黏附性自愈合。

参考文献

[1] ANDERSON A, HIR L, MARASTEANU O, et al. Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders[J]. Transportation Research Record, 2001,1766(1): 48

[2] BONNETTI S, NAM K, BAHIA U. Measuring and defining fatigue behavior of asphalt binders[J]. Transportation Research Record, 2002, 1810(1):33

[3] PASETTO M, BALDO N. Unified approach to fatigue study of high performance recycled asphalt concretes[J]. Materials & Structures, 2017, 50(2):113

[4] CAO W, MOHAMMAD N, BARGHABANY P. Use of viscoelastic continuum damage theory to correlate fatigue resistance of asphalt binders and mixtures [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(11):2

[5] BAZIN P, SAUNIER J. Deformability, fatigue, and healing properties of asphalt mixes [C]// International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Michigan: International Society for Asphalt Pavements, 1967

[6] RAITHBY D, STERLING B. The effect of rest periods on the fatigue performance of a hot-rolled asphalt under repeated loading[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1970, 39: 134

[7] GENNES D. Reptation of a polymer chain in presence of fixed obstacles[J]. Journal of Chemical Physics, 1971, 55(2):572

[8] WOOL P, OCONNOR M. A theory crack healing in polymers[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(10):5953

[9] KIM H, WOOL P. A theory of healing at a polymer-polymer interface[J]. Macromolecules, 1983, 16(7):1115

[10] PHILLIPS C. Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing[C]// Eurobitume Workshop on Performance Related Properties for Bituminous Binders. Luxembourg: Eurobitume, 1998

[11] BOMMAVARAM R, BHASIN A, LITTLE D. Determining intrinsic healing properties of asphalt binders: role of dynamic shear rheometer[J]. Transportation Research Record, 2009, 2126(1):47

[12] QIU J, Van De VEN M, MOLENAAR A. Crack-healing investigation in bituminous materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25(7): 864

[13] 徐辰，何兆益，吴文军，等. 沥青自愈合性能在不同影响因素下的评价[J]. 中外公路，2014，34(2):274
XU Chen, HE Zhaoyi, WU Wenjun, et al. Evaluation of different influencing factors on asphalt self-healing performance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(2):274

[14] LITTLE N. An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the application of micromechanics first principles of fracture and healing[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1999, 68: 501

[15] KIM B, ROQUE R. Evaluation of healing property of asphalt mixtures[J]. Transportation Research Record, 2006, 1970(1):84

[16] CANESTRARI F, VIRGILI A, GRAZIANI A, et al. Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70(1):351

[17] LEE J, DANIEL S, KIM R. Continuum damage mechanics-based fatigue model of asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 105

[18] 孙大权，林添坂.改性剂对沥青自愈合能力的影响[J]. 公路，2015(4):224
SUN Daquan, LIN Tianban. The effect of modifiers on the asphalt self-healing property[J]. Highway, 2015(4):224

[19] 张世兴.基于流变学的沥青胶浆自愈合行为研究[D]. 郑州：郑州大学，2019
ZHANG Shixing. Study on self-healing behavior of asphalt mortar based on rheology[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019

[20] 徐辰.沥青自愈合特性及影响因素研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2013
XU Chen. Study on the features and influencing factors of self-healing characteristic of asphalt[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013

[21] Standard method of test for determining asphalt binder strength by means of the binder bond strength (BBS) test: AASHTO TP91-11 [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011

[22] ZHOU L, HUANG W, ZHANG Y, et al. Evaluation of the adhesion and healing properties of modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2020, 251:3

[23] 纪伦，李俊，张磊，等. 沥青混凝土中粗集料形貌特征分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2019，51(3):67
JI Lun, LI Jun, ZHANG Lei, et al. Analysis of the morphology characteristics of coarse aggregate in asphalt concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3):67

[24] QIU J, Van De VEN M, WU S, et al. Evaluating self healing capability of bituminous mastics[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(8):1163

[25] GOOD J, OSS V. The modern theory of contact angles and the hydrogen bond components of surface energies[M]. Boston: Springer, 1992:1

[26] MASAD E, OMARI A, CHEN H. Computations of permeability tensor coefficients and anisotropy of asphalt concrete based on microstructure simulation of fluid flow[J]. Computational Materials Science, 2007, 40(4):449

[27] AYAR P, MORENO-NAVARRO F, RUBIO-GÁMEZ C. The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113:28

[28] NORAMBUENA J, GARCIA A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating[J]. Materials & Design, 2016, 106:404

（编辑　魏希柱）