

自修复微胶囊在沥青路面智能 养护中的应用进展

李 伟¹, 李 萍¹, 王 晖², 张留博¹, 念腾飞¹, 张 强³, 李 宁⁴

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司 高性能材料研究所, 兰州 730030; 3. 甘肃省公路事业发展中心, 兰州 730030; 4. 中铁二十一局集团第四工程有限公司, 西宁 810000)

摘 要 对沥青路面智能养护中的微胶囊技术展开全面分析, 阐述了沥青路面中微胶囊的自修复机理、合成技术、物理和力学性能测试技术以及自愈效果评价方法, 提出了该技术在沥青路面中的发展趋势: 在宏观-细观-微观多尺度下研究微胶囊-老化沥青材料的自修复机理; 合成与沥青混合料本身缝隙尺寸相当的多次缓释微胶囊; 探索微胶囊制备参数与沥青路面养护要求的关系, 改善微胶囊的制备工艺; 依据实际工程条件建立微胶囊应用于沥青路面材料的自修复评价模型, 为微胶囊在沥青路面智能养护中的应用与发展提供参考。

关键词: 沥青路面; 自修复微胶囊; 合成技术; 自愈效果评价; 发展趋势

中图分类号: U418 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)11-3446-17

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240235

Application progress of self-healing microcapsules in the intelligent maintenance of asphalt pavement

LI Wei¹, LI Ping¹, WANG Hui², ZHANG Liu-bo¹, NIAN Teng-fei¹, ZHANG Qiang³, LI Ning⁴

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Center for High-Performance Materials Research and Development, Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China; 3. Gansu Provincial Highway Development Center, Lanzhou 730030, China; 4. China Railway 21st First Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: Microcapsule technology in intelligent maintenance of asphalt pavements is comprehensive analyzed, elucidating the self-healing mechanism of microcapsules in asphalt pavements, synthesis technology, physical and mechanical performance testing techniques, and the evaluation methods of self-healing effects. The development trend of this technology in asphalt pavement maintenance includes research on the self-healing mechanism of microcapsules-aging asphalt materials in macro-micro-microscopic levels, the synthesis of multiple sustained-release microcapsules equivalent to the size of cracks in asphalt mixtures, exploration of the relationship between microcapsule preparation parameters and

收稿日期: 2024-03-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52268070, 52368066); 甘肃省交通运输厅科研项目(2023-02).

作者简介: 李伟(1996-), 男, 博士研究生. 研究方向: 新型路面材料及应用. E-mail: lw18894006385@163.com

通信作者: 李萍(1972-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 沥青及沥青混合料路用性能. E-mail: lzlgliping@126.com

asphalt pavement maintenance requirements, improvement of microcapsule preparation processes, and the establishment of a self-healing evaluation model after the application of microcapsules in asphalt pavement materials based on actual engineering conditions, providing a reference for the application and development of microcapsules in intelligent maintenance of asphalt pavements.

Key words: asphalt pavement; self-healing microcapsules; synthesis technology; evaluation of self-healing effect; development tendency

0 引 言

公路作为交通运输中的重要基础设施,在交通强国的建设中起着积极的作用。在世界各国已建成的公路中,沥青路面占 80% 以上,且中国 90% 以上的高速公路为沥青路面^[1]。然而,在车载、光照、温度及湿度等因素的共同作用下,沥青材料逐渐老化,其自愈能力受到限制,导致路面内部产生微裂纹且难以愈合。若不对微裂纹进行及时有效的处理,其将进一步扩张形成裂缝,易造成沥青路面松散、渗水、坑槽等问题,进而导致沥青路面出现耐久性不足、使用寿命缩短等情况^[2,3]。沥青路面常规养护技术有碎石封层^[4]、雾封层^[5]、稀浆封层^[6]、灌胶封层^[7]、薄罩面封层^[8]及就地热再生法^[9]等。但这些养护技术通常需要较长的维护周期,易阻碍交通,消耗大量的物质资源^[10]。因此,迫切需要开发智能沥青路面养护技术。

近年来,研究者从道路的预防性养护技术着手,提出了可增强沥青路面材料自愈能力的微胶囊技术^[11,12],该技术可很好地规避传统养护方法的不足,且比传统的养护成本节约 6~10 倍^[13],是一种集节能、高效与环保为一体的沥青路面非破坏性早期养护的有效途径。微胶囊是一种用高分子材料作为外壁来封装固体、液滴或分散体等功能材料而形成的微型容器^[14],其包覆膜被称为囊壁,用以包裹胶囊内部的囊芯材料,既能降低外界环境对囊芯的影响,又能避免囊芯材料溢出。微胶囊的基本结构形态有多腔室型、单核型、多核型,以及多壁型、无定型和胶囊簇等^[15],如图 1 所示,广泛应用于食品^[16]、能源^[17]、医药^[18]、军事^[19]、建筑^[20]等领域。Garcia 等^[21]首次在沥青材料中应用封装再生剂的微胶囊自修复技术,此后,研究者们相继开发了不同类型的自修复微胶囊,主要有多腔胶囊和核壳胶囊两类。微胶囊所包裹的修复材料能在特定时间、特定区域释放到沥青路面的裂纹中,同时可适应施工过程中的机械作用和高

温环境,并在感应到沥青路面裂纹后及时释放修复剂,在智能沥青路面的发展中有良好的应用前景^[22]。

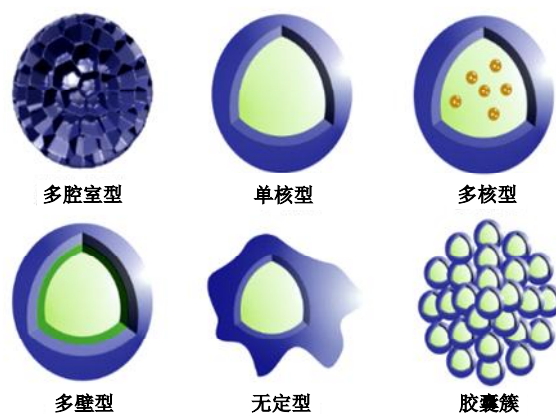


图 1 微胶囊的基本结构形态

Fig. 1 Basic structure of microcapsules

目前,国内外对微胶囊技术在沥青材料自愈合领域的研究和实际工程应用处于初始阶段,尚缺乏系统的总结。鉴于此,本文在分析国内外微胶囊技术对沥青材料自愈合的研究成果的基础上,首先介绍了微胶囊-沥青材料的自修复机理,微胶囊的囊芯、囊壁材料的选择,以及吸附包裹法、锐孔凝固法、界面聚合法和原位聚合法等制备工艺。其次,阐述了不同工艺合成的微胶囊形貌、包覆性、抗渗性、热稳定性及力学性能等特性。再次,概括了微胶囊在沥青及沥青混合料中的应用情况及其自愈性能的评价方法。最后,展望了该技术在沥青路面中的发展趋势。

1 微胶囊-沥青材料自修复机理

将微胶囊埋于沥青路面材料中,在交通荷载和环境因素等的影响下,当沥青路面内部破损形成裂纹且裂缝扩展至微胶囊表面时,微囊壁受到裂缝尖端应力作用发生破裂,所包裹的修复剂在毛细作用下流出并扩散至裂纹周围的沥青中。再生剂的黏度较低,可使裂纹周围的老化沥青软化,

从而降低沥青黏度,加快裂纹自愈合,达到封闭裂纹的效果^[23],如图2所示。Sun等^[24,25]利用荧光显微镜(FM)观察了含微胶囊沥青材料的自修复过程,证实了沥青中裂纹尖端的断裂能使微胶囊囊壁破裂,微胶囊破裂30 min后,裂纹在修复剂的作用下已完全闭合。另外,Su等^[26-28]利用FM观察了微胶囊-沥青材料中微裂纹的自修复过程,包括裂纹产生、毛细现象和扩散行为,发现微裂纹扩展会使微胶囊囊壳破坏,在毛细作用下使修复剂渗入并填充裂缝。Chung等^[29]利用扫描电子显微镜(SEM)观察到微胶囊破裂后囊芯流入沥青的裂纹中进行填充。Zhang等^[30]结合FM和SEM观察到裂纹扩展轨迹上的微胶囊均已破裂,其中的修复剂逐渐扩散至沥青中使裂纹闭合。Tian等^[31]基于分子动力学分析了微胶囊芯材在沥青裂纹中的扩散行为,通过分子动力学模拟及仿真计算,证实了微胶囊修复剂能使沥青裂缝模型的力学性能加速恢复。以上方法均对微胶囊-沥青材料的自修复机理做出了直观的解释,但关于修复剂如何修复裂纹及修复过程尚未完全了解,建议在现有研究基础上结合试验与模拟仿真技术多尺度分析其自修复机理。

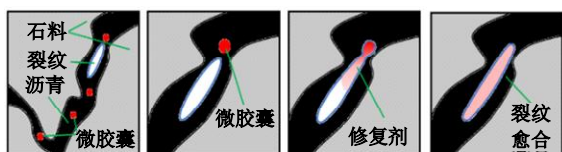


图2 微胶囊-沥青材料自修复机理

Fig. 2 Self-healing mechanism of microencapsulated-asphalt material

2 沥青自修复微胶囊合成技术

2.1 微胶囊类别

目前,用于修复沥青裂缝的微胶囊主要有微米级和毫米级两类。微米级微胶囊粒径在 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下^[32],而沥青混合料的缝隙一般 $\leq 50\text{ }\mu\text{m}$ ^[33],故微胶囊粒径对沥青混合料骨架结构的影响较小;毫米级微胶囊粒径为 $1\sim 6.8\text{ mm}$ ^[34],可替代沥青混合料的部分集料,故当毫米级微胶囊应用于沥青混合料时,对其力学性能有一定的影响。另外,微米级微胶囊一般为核壳结构,在裂缝尖端应力作用下囊芯材料只释放一次,不利于自修复功能的可持续发挥;毫米级微胶囊囊壁为多腔室结构,在裂缝尖端应力作用下可多次释放囊芯材料,具

有缓释效果。综上所述,研发与沥青混合料缝隙尺寸相当的多腔室微胶囊,既对沥青混合料的力学性能有较小影响,又具有缓释效果。另外,可引入可识别沥青组分的生物材料,当沥青轻质组分挥发到一定程度使裂纹出现时,生物材料逐渐分解,将沥青各组分调节至接近原始的属性。

2.2 微胶囊材料选择

2.2.1 囊壁材料

囊壁材料需具有足够的强度和良好的耐高温性能,避免微胶囊在沥青路面拌合施工中先发生破裂。同时,当沥青路面出现裂缝时,囊壁能及时破裂,从而释放所包裹的囊芯材料促进裂缝愈合。目前,学者们研发了多种适用于沥青材料的毫米级和微米级微胶囊囊壁材料。前者往往以海藻酸钙^[35]、多孔砂^[36]、多孔沸石^[37]、多孔膨胀珍珠岩^[38]等微孔结构为主,用水泥和环氧树脂将其包裹,虽能适应沥青材料施工过程中的温度和挤压,但外壳因裂缝尖端应力不易发生破裂,且腔室内的修复剂难以从微孔结构中流出;后者通常采用成膜性能好、开裂有效性高的聚合物材料,如三聚氰胺-甲醛树脂(MFR)^[39]、脲醛树脂(UF)^[40]、三聚氰胺-脲醛树脂(MUF)^[41]、甲醇-三聚氰胺-甲醛树脂(MMF)^[42]、酚醛树脂(PF)^[43]等,虽在裂缝尖端应力作用下易破裂,但耐高温能力较弱。为使微胶囊更好地达到自愈合效果,可通过调节囊壁的属性、厚度和结构,控制壳层的力学强度和热稳定性,使囊壁在尖端应力作用下及时破裂。另外,部分微胶囊囊壁材料易对环境造成污染,后期应研发环保、经济、安全的囊壁材料。

2.2.2 囊芯材料

囊芯材料需具有良好的渗透性和流动性,其渗透行为和毛细作用决定了含微胶囊沥青的自修复效率,分子极性小、分子量小及球形结构的囊芯材料可提升其自修复速率^[44,45]。囊芯材料一般为生物油^[44]、废机油^[46]、葵花油^[48]和植物油^[49]等修复剂,通过扩散作用填充裂纹,与老化沥青混溶并调节其组分^[50],从而恢复沥青混合料的路用性能。当前,修复剂来源广泛,种类繁多,对沥青材料的修复效果也有差别,需根据老化沥青的物理性能和化学指标靶向设计再生剂类型。此外,修复剂液体具有表面张力和黏滞性,在微孔结构内修复剂的渗透会受到一定的阻碍,故对囊芯材料的选择应注重其扩散能力。

2.3 微胶囊制备工艺

2.3.1 吸附包裹法

将多孔砂、多孔沸石或多孔膨胀珍珠岩等多孔材料浸置于再生剂中,用水泥和环氧树脂配制的囊壁将含有修复剂的多孔材料包裹,经环氧树脂固化后形成微胶囊^[51],吸附包裹法工艺流程如图 3 所示。García 等^[52,53]以多孔砂为囊芯的载体制备了粒径 $>1\text{ mm}$ 的微胶囊,可满足沥青路面施工中的高温拌和要求,及服役期间的稳定性和可裂性要求。纪小平等^[54]以多孔沸石为囊芯载体制备了囊芯质量分数为 $5.86\%\sim 10\%$ 的微胶囊,其加入后能明显改善沥青的疲劳性能。Chen 等^[55]将吸收再生剂后的多孔膨胀珍珠岩放入囊芯包裹材料中,经搅拌均匀后固化得到微胶囊,随着微胶囊用量的增加,沥青的自愈效果先增强后减弱。通过吸附包裹法制备的微胶囊,由于多孔材料孔结构、体积的影响,囊芯质量占比受限,对沥青路面材料裂缝的修复能力有限,且多孔材料掺入会使沥青路面材料的力学性能降低。同时,还需控制环氧树脂和水泥的用量,前者用量过大易形成胶囊簇,反之,壳体刚度不足;后者用量过大会吸收腔室内的再生剂,使再生剂从多孔结构中排出,反之,难以形成外壳。因此,采用吸附包裹法制备微胶囊时,应在确保环氧树脂与水泥合理比例的前提下,尽量减小微胶囊粒径,从而降低微胶囊对沥青路面材料高低温性能等路用性能的不利影响。

2.3.2 锐孔凝固法

将海藻酸钠溶液加入由再生剂与乳化剂混合而成的稳定乳液中,搅拌均匀后逐滴滴入氯化钙溶液,在一定温度下海藻酸根离子与钙离子发生交联固化形成囊膜,干燥后形成海藻酸钙微胶

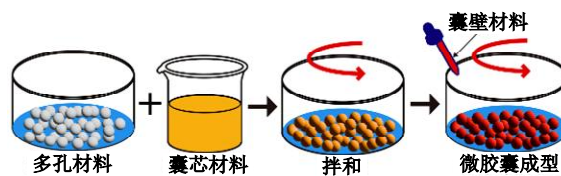


图 3 吸附包裹法工艺流程

Fig. 3 Process flow of adsorption encapsulation

囊^[48],锐孔凝固法工艺流程如图 4 所示。Norambuena 等^[56]采用锐孔凝固法制备了油水比为 0.1 的海藻酸钙微胶囊,当再生剂与海藻酸钙体积比为 $3:1$ 时,该微胶囊提高了沥青路面材料的自愈能力。何亮等^[57]和 Zhang 等^[58]采用锐孔凝固法制备了海藻酸钙微胶囊,发现油水比为 0.1 时其性能最优,能耐受沥青路面施工过程中的高温和受力环境,并能在路面开裂时及时破裂。Bao 等^[59]采用锐孔凝固法制备了海藻酸钙包膜葵花籽油自修复微胶囊,该微胶囊在 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下具有足够的力学强度,经受住了沥青路面材料的搅拌和压实过程。采用锐孔凝固法制备的微胶囊成本 and 环境影响较低,且其腔室结构可使芯材逐渐释放,但腔室存储的芯材含量较低。因此,在缓释胶囊满足沥青路面功能要求和施工条件的前提下,改变腔室结构的内部构造,研制孔洞单元体积较大的腔室结构,可提升芯材的单次释放含量。

2.3.3 界面聚合法

将芯材与油溶性反应单体构成的油相逐渐加入壁材溶解于离子水形成的水相中,混合溶液在机械剪切作用下在水相-油相的界面发生缩聚反应形成水包油乳液,经离心、洗涤后得到微胶囊^[60],界面聚合法工艺流程如图 5 所示。Ji 等^[61]以蒸馏水为水相、异佛尔酮二异氰酸酯为油相、聚乙烯醇为乳化剂,制备了沥青自修复微胶囊,其制备的优良条件为:乳化剂溶液的质量分数为

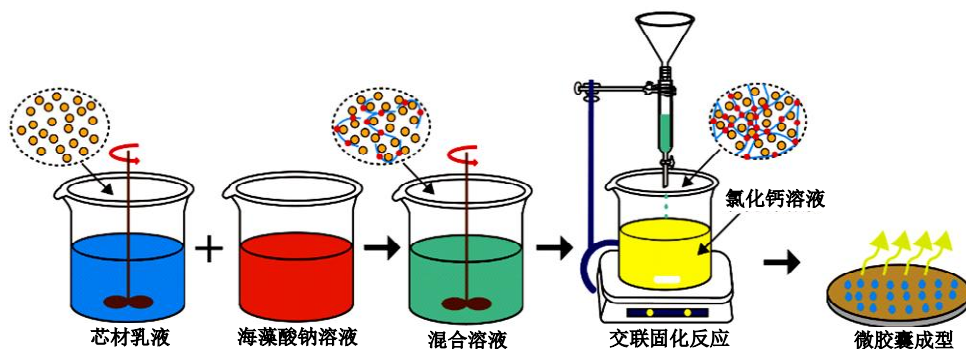


图 4 锐孔凝固法的工艺流程

Fig. 4 Process flow of piercing solidification method

0.4%, 剪切速度为 5 000 r/min, 壳芯材料比为 0.6, 反应温度为 60~70 °C。Shukla 等^[62]将表面活性剂溶解于石蜡油中, 并向该混合溶液中加入乙二胺搅拌, 然后滴加异佛尔酮二异氰酸酯继续搅拌, 成功制备了微胶囊。Liu 等^[63]采用界面聚合法制备了两种分别包埋水性环氧树脂和固化剂的自修复微胶囊, 以乙二醇和甲苯二异氰酸酯为囊壁, 当乳化剂用量为 0.5%、乳化时间为 16 min、芯壁材料比为 1.3:1 时, 水性环氧树脂微胶

囊合成工艺最佳; 当乳化剂用量为 0.7%、乳化时间为 16 min、芯壁材料比为 1:1 时, 固化剂微胶囊的合成工艺最佳。界面聚合法制备微胶囊的工艺简单, 对反应单体配比和纯度要求不高。但该方法形成的囊壁渗透性较强, 包裹芯材的密封性差, 且整个体系需要大量的有机溶剂, 成本较高。因此, 可采用多次界面聚合法, 制备出具有多层壁材的微胶囊, 不仅能加强囊壁对囊芯的密封性, 而且能使有机溶剂重复使用。

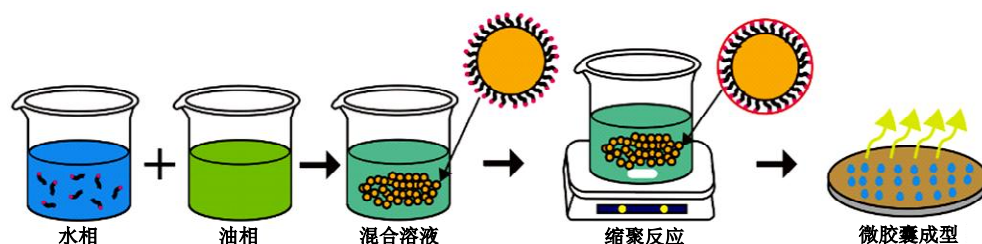


图 5 界面聚合法的工艺流程

Fig. 5 Process flow of interface polymerization

2.3.4 原位聚合法

将再生剂加入乳化剂中, 在高速剪切作用下得到稳定、均匀的芯材乳液; 将壁材逐滴加入芯材乳液中, 芯材液珠通过正负电荷吸引作用将壁材吸引至周围; 在机械搅拌作用下调节溶液温度、pH 值等条件, 使壁材在芯材表面发生交联固化反应, 经抽滤、烘干后形成微胶囊^[25], 原位聚合法工艺流程如图 6 所示。Liu 等^[64]选择再生剂和 MUF 分别作为囊芯和囊壁材料, 采用原位聚合法制备微胶囊, 当乳化剂用量为 0.5%, 预聚物固化时间为 6~9 min 时, 可获得包覆度较好、粒径均匀的微胶囊颗粒。Sun 等^[25]通过原位聚合法制备了以轻质油为芯材、MUF 为壳体的沥青自修复微胶囊, 在核壳比为 2:1、温度为 65 °C、终点乳化速度为 1 500 r/min、终点 pH 为 3 及十二烷基硫酸钠质量分数为 0.7% 的条件下, 合成了形态与热稳定性最佳的微胶囊。Su 等^[65]以 MMF 为囊壁材料, 通

过原位聚合法制备了含再生剂的微胶囊, 发现随着搅拌速率从 1 000 r/min 增加到 6 000 r/min, 其粒径可控制在 23.5~5.0 μm ; 另外, 添加更多的预聚物可增加壳层厚度及密度, 从而确定最佳合成条件。肖艺成^[66]选择 UF 为囊壁、再生剂为囊芯, 采用原位聚合法合成了微胶囊, 当囊壁与囊芯质量比为 1:1.2、pH 值为 3、反应温度为 60 °C、十二烷基苯磺酸钠质量分数为 0.5% 时, 所制备的微胶囊表面形貌致密, 囊芯质量分数为 72.46%, 包覆率为 84.94%, 具有较好的形态, 可改善沥青的自愈性能。

采用原位聚合法制备沥青材料自修复微胶囊, 反应时间长, 生产成本低, 制备工艺要求严格, 若对 pH 值、温度、预聚体滴速等参数控制不当, 会出现微胶囊包覆性差、表面粗糙等问题。另外, 此技术所选用的囊壁材料存在潜在的环境污染风险。因此, 需建立该方法制备微胶囊的工艺控制

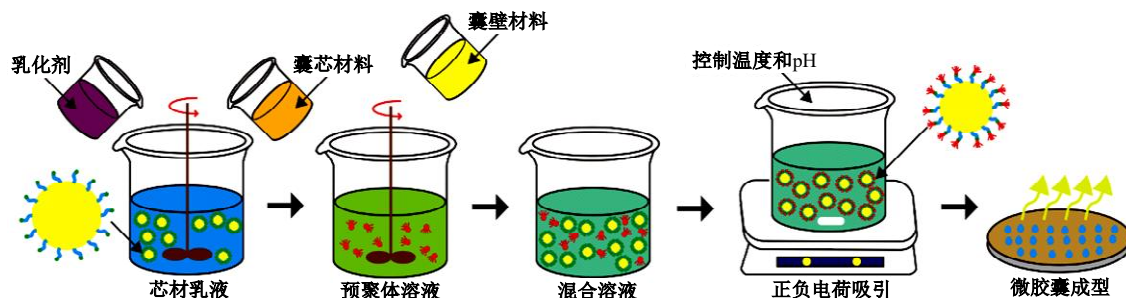


图 6 原位聚合法的工艺流程

Fig. 6 Process flow of in-situ polymerization

体系并研发新型囊壁材料,在提升微胶囊基本性能的同时减少囊壁对环境的危害。

3 沥青自修复微胶囊性能测试

为评估所制备的微胶囊对沥青路面材料裂纹的自愈合效果,可测试微胶囊的形貌、包裹性、抗渗性、热稳定性及力学性能等指标。

3.1 微胶囊形貌

表面形貌对微胶囊与沥青的界面黏附和再生剂的释放行为有重要影响。Su 等^[67]通过 FM 和 SEM 观察了囊芯为再生剂、囊壁为 MMF 的微胶囊形貌,其壁材厚度为 2.78~3.27 μm ,平均粒径为 5~23.5 μm ,呈规则球状,壁材致密,微小颗粒间具有静电吸引力,且平均粒径<10 μm 的微胶囊有聚集趋势。Ji 等^[61]利用光学显微镜(OM)和 SEM 对异佛尔酮二异氰酸酯为外壳、再生剂为囊芯的微胶囊形貌进行观察,其外壳完整,表面光滑,大小分布趋势服从正态分布,直径主要为 10~17 μm ,平均粒径为 14.26 μm ,微胶囊外壳厚度为 2~3 μm 。Wang 等^[68]通过 SEM 对囊芯为废机油、囊壁为 UF 的微胶囊进行形貌观察,其呈球形,结构致密,尺寸均匀;采用统计学方法对 300 多个微胶囊的粒度分布进行了分析,发现粒径范围为 1~18 μm 、直径为 4~6 μm 的颗粒出现频率最高,平均尺寸为 5.26 μm 。Huang 等^[69]利用 FM、SEM 和透射电子显微镜(TEM)分别对二环戊二烯为芯材、UF 为壁材的微胶囊进行形貌表征,发现微胶囊呈球状,表面粗糙,有一定的褶皱和凹陷,且微胶囊之间具有发达的网络空间结构。以上球形微胶囊虽在沥青路面材料中分布均匀,可应对各个方向沥青路面材料的微裂纹,但球形微胶囊被扩展裂纹刺破的概率低。在实际复杂工况下,椭圆和棒状等各向异性的微胶囊较易破裂^[70],该结论通过数值模拟方法得到了证实^[71]。因此,进一步研究不同形状的微胶囊对沥青路面材料裂纹愈合的影响,明确微胶囊的形状与接触面积、稳定性及修复剂释放量的关系,从而为微胶囊的制备工艺提供一定的参数指导。

3.2 微胶囊包裹性

微胶囊包裹性可鉴定芯材是否提前泄露,会影响沥青材料的自愈合效果。通过傅里叶红外光谱(FTIR)对微胶囊与其壁材、芯材的特征吸收峰比较,可判断芯材在壁材中的包裹性。Sun 等^[72]

检测了以 MFR 为外壳材料、再生剂为囊心材料制成的微胶囊的 FTIR,其包含了壳材料和芯材料的特征峰,表明芯材已被成功地封装在微胶囊壳材中。Xue 等^[23]制备了 UF 为壁材、再生剂为芯材的微胶囊,分别对再生剂与微胶囊进行 FT-IR 分析,研究发现微胶囊中同时包含再生剂与囊壁材料的特征峰,且无新特征峰出现,表明再生剂已包覆于囊壁材料中。Ji 等^[73]选用植物油为囊芯材料、纳米二氧化硅改性的 MUF 为外壳材料制备了微胶囊,通过 FTIR 中各吸收曲线特征峰的变化来评价包裹性,测试的红外光谱显示,囊芯材料在 3 008、1 744、1 463 和 723 cm^{-1} 处分别对应植物油的 C=O、—C=C—H—、—CH₃—和—CH₂—特征吸收峰,囊壳材料在 1 241 cm^{-1} 和 1 376 cm^{-1} 处分别对应 MUF 的 —CH₂—O—CH₂—和—CH₂—OH—特征吸收峰,纳米二氧化硅的特征峰只位于 1 098 cm^{-1} 处,表明 MUF、植物油和纳米二氧化硅的特征峰同时存在,此微胶囊中含有上述 3 种物质,其包裹性较好,如图 7 所示。由于囊壁包裹囊芯材料时,可能有部分囊芯材料依附在囊壁的外表面,导致测试出包裹性差的假象,故有必要改进包裹性的测试方法,可通过 FTIR 与 SEM 或 TEM 结合的测试手段来评价微胶囊包裹性。

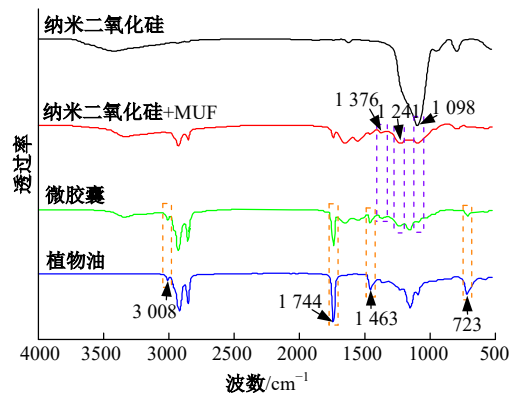


图 7 FTIR 光谱下微胶囊的包裹性

Fig. 7 The coating property of microcapsules under FTIR spectroscopy

3.3 微胶囊抗渗性

微胶囊囊壁对囊芯材料的保护和密封效果反应了其抗渗性能,决定了其对裂纹的修复效率。目前主要是将微胶囊浸泡于溶剂一段时间后,比较其浸泡前后的质量变化率来评价抗渗性。Su 等^[67]将再生剂与 MMF 预聚物制备的微胶囊浸泡在乙醇中,比较不同芯壁比的微胶囊浸泡前后的囊芯质量变化率以评价抗渗性,发现当囊芯与囊

壳比为 3:1 时,浸泡初期囊芯质量变化率约 6%,表明不受外界影响时致密的外壳几乎不释放芯材。Li 等^[74]将沥青浸泡于三氯乙烯溶剂中充分溶解,将定量的再生剂与 MUF 制备的微胶囊加入该溶剂中,一段时间后用滤纸过滤溶剂中的微胶囊,待溶剂蒸发后,利用 FTIR 对剩余的沥青进行分析,发现测试样品出现芯材的特征吸收峰且面积较小,如图 8 所示,故微胶囊具有轻微的渗透性。以上表征微胶囊抗渗性的方法只能表现短期内的效果,而微胶囊在沥青路面材料中的作用是长期的过程,还要考虑光照、温度、湿度和外界荷载等客观因素对抗渗性的影响,故需考虑多因素耦合作用对微胶囊抗渗性能的影响,评价其在真实环境下的长期抗渗性能。另外,在沥青路面铺筑过程中微胶囊处于高温受挤压状态,也需结合实际施工环境评价微胶囊的抗渗性能。

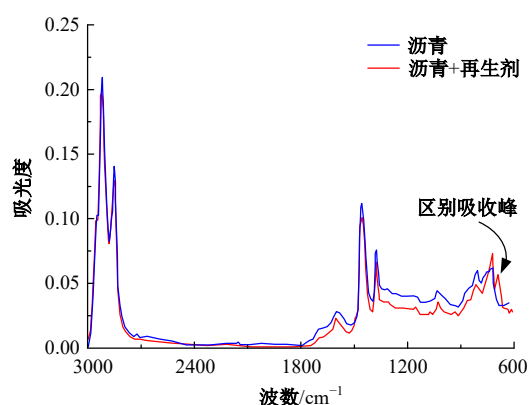


图 8 FTIR 光谱下微胶囊的抗渗性

Fig. 8 Impermeability of microcapsules under FTIR spectroscopy

3.4 微胶囊热稳定性

微胶囊在沥青路面材料中成功应用的关键,在于其能抵抗施工温度,避免在高温条件下发生破坏。García 等^[36]对制备的多孔砂微胶囊进行热重分析(TGA),当温度为 160~180 °C 时,该微胶囊的质量变化率为 0.8%~1.3%,其损失与多孔材料中的孔隙水蒸发及其材料脱水有关;在 350~450 °C 温度下质量变化率较大,因为大部分环氧树脂发生了降解。Al-Mansoori 等^[75]对所制备的海藻酸钙微胶囊进行了 TGA 分析,当温度为 200 °C 时,微胶囊的质量变化较小,约为 5%,原因是囊壁降解和水蒸发,在 >500 °C 的温度下,胶囊损失了大约 90% 的质量,这是因为壁材、芯材受热分解。Aguirre 等^[76]通过 TGA 分析了 UF 为壁材的微胶囊的热稳定性,在 163 °C 的温度下样

品质量减少不到 8%,260 °C 时微胶囊的质量变化最大,308 °C 时样品质量降低了 50%,故此温度下微胶囊崩解。Liu 等^[64]对以 MUF 为壁材的微胶囊进行同步热分析仪(TG-DSC)测试,发现 202.8 °C 时其质量变化仅为 0.9%,这是由于微胶囊中的水分蒸发所致;在 252~377.6 °C 之间质量变化率较大,原因是壁材和芯材成分分解、燃烧;583.2 °C 时吸热峰再次出现,表明微胶囊成分进一步分解或再次燃烧。Su 等^[65]通过 TGA 对 MMF 为壁材的微胶囊耐热性能进行了分析,发现 170 °C 之前只有少量的质量损失,由水分和未包裹的囊芯分解或挥发导致;当温度达到 389 °C 时,微胶囊的质量迅速降低并出现热分解。以上研究表明不同微胶囊均有较强的耐高温能力,其 TGA 曲线的热稳定性对比如图 9 所示。由于高温环境可能改变微胶囊的形貌,根据沥青混合料的实际拌合温度,需观察微胶囊的形貌特征变化,综合分析微胶囊在高温环境下的裂纹愈合效果。另外,可在微胶囊中加入纳米材料,如纳米 CaCO_3 、 Al_2O_3 、 ZnO 等,使微胶囊热稳定性达到最佳。

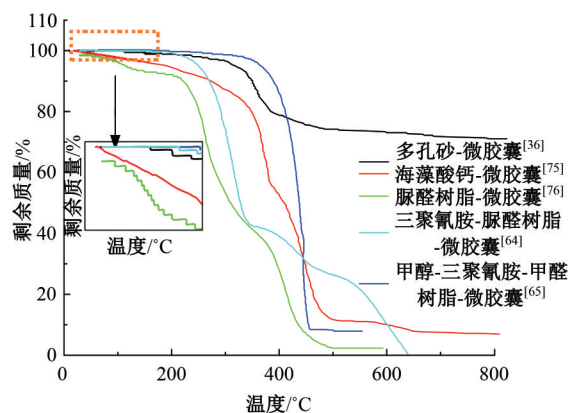


图 9 不同微胶囊的 TGA 曲线

Fig. 9 TGA curves of different microcapsules

3.5 微胶囊力学性能

力学性能是保证微胶囊在沥青路面施工过程中保持完整的关键,能在沥青路面出现裂缝时使囊壁及时破裂释放出芯材,决定了其能否修复沥青路面材料的裂缝。赵钊等^[77]通过纳米压痕测试仪(NHT³)对微胶囊中剥离出的囊壁材料 UF 进行测试,得到了微胶囊壁材的力学性能参数,其弹性模量约为 2.12 GPa,屈服应力约为 15.35 MPa,且与文献[78]中 UF 为微胶囊囊壁材料的弹性模量介于 1.03~3.90 GPa 的研究结果相符。

Wan 等^[79]采用万能材料试验机(UTM)测试了硅藻土与海藻酸钙复合胶囊的抗压强度,质量分数为 0.3% 及 6% 的硅藻土与海藻酸钙复合胶囊的抗压强度分别为 10.3、13.5 和 15.9 N,表明硅藻土与海藻酸钙复合胶囊具有较高的抗压性能,且强度随硅藻土用量的增加而增强。Ji 等^[61]以沥青再生剂为囊芯材料、异佛尔酮二异氰酸酯为外壳材料制备沥青路面微胶囊,选取 5 个微胶囊进行 NHT³测试,通过 Oliver-Pharr 理论计算了微胶囊的弹性模量和硬度,其弹性模量介于 276.94~719.94 MPa,平均值为 446.86 MPa;硬度介于 43.38~71.084 MPa,平均值为 56.27 MPa,其力-位移曲线如图 10 所示。微胶囊的粒径、材料性质及制备工艺等因素会影响其力学性能,需建立微胶囊制备参数与力学性能的靶向调控关系。同时,着重考虑微胶囊力学性能与沥青路面内部力学响应的联系,在确保施工环境下微胶囊壁材不会破裂的前提下,提出沥青路面材料中微胶囊力学性能的推荐值,保证微胶囊达到预期的使用效果。

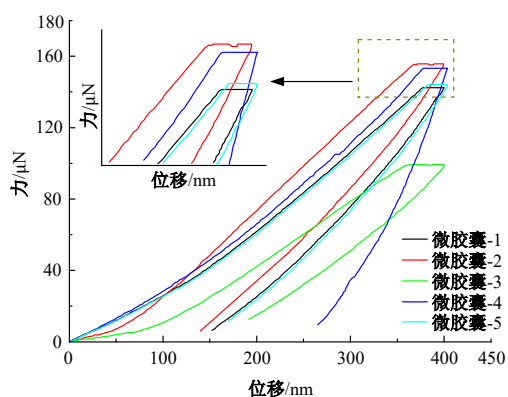


图 10 微胶囊的力-位移曲线

Fig. 10 Force-displacement curve of microcapsules

4 微胶囊-沥青及沥青混合料自愈效果评价

目前对微胶囊-沥青及沥青混合料的自愈效果的评价方法尚无统一标准,国内外学者采用不同的测试方法评价了微胶囊对沥青及沥青混合料的修复效果。

4.1 微胶囊-沥青的自愈效果评价

微胶囊-沥青材料的自愈效果评价方法如表 1 所示。

在常规延性试验的基础上提出预切延性

(PD)试验,通过对比预制裂缝试件修复后的延性与无裂缝试件的延性得出含微胶囊沥青的自修复效率。何亮等^[40]、Yang 等^[80]、Li 等^[81]、Wang 等^[82]采用 PD 试验分析了微胶囊掺量对沥青自愈性能的影响,其评价指标如表 1 中式(1)所示,发现随着微胶囊掺量的增加,沥青的自愈率呈现先增大后减小的趋势。

拉应力恢复(TSR)试验通过分析含微胶囊沥青愈合前后的拉应力的差异来评价其自修复水平。Sun 等^[83]、Shu 等^[84]通过 TSR 试验分析了微胶囊对沥青自愈性能的影响,其评价指标如表 1 中式(2)所示,发现当微胶囊掺量为 5% 时,沥青的拉应力恢复率达到最高,分别为 32.08%、83.8%,表明微胶囊可有效地提高沥青的自愈性能。

动态剪切流变(DSR)试验可分析含微胶囊沥青在剪切荷载作用下的裂纹愈合情况。Sun 等^[83]通过 DSR 试验分析了含微胶囊沥青的愈合性能,其评价指标如表 1 中式(3)、式(4)所示,发现当基质沥青和老化沥青中微胶囊掺量分别为 0.5%、1.0% 时,其愈合效率达到最佳。Wang 等^[85]通过 DSR 试验模拟了含微胶囊沥青微裂纹开裂后的自愈过程,其评价指标如表 1 中式(5)所示,发现微胶囊可提高沥青的自愈能力。Sun 等^[24]采用 DSR 试验分析了微胶囊含量对沥青自修复效率的影响,其愈合效率的量化如表 1 中式(6)~(8)所示,随着微胶囊含量增加,沥青自修复效率提高。Zhang 等^[86]基于损伤-修复-损伤模式的 DSR 试验,分析了含微胶囊沥青的自愈合指数,如表 1 中式(9)、式(10)所示,研究表明,当微胶囊掺量分别为 2% 和 3% 时,沥青复合剪切模量分别提高 0.33 MPa 和 0.80 MPa,疲劳寿命分别提高 156 倍和 257 倍。

线性振幅扫描(LAS)试验可分析加载速率和损伤程度对微胶囊-沥青材料自愈性能的影响。Liu 等^[64]基于 LAS 试验在应变水平为 15% 和 30% 的条件下,分析了含微胶囊的沥青在不同屈服应力下的自愈效率,其评价指标如表 1 中式(11)所示,研究表明,两种应变下沥青愈合效率差异较小,随着微胶囊用量的增加,沥青试样的屈服强度呈先增大后减小的趋势。

动态力学分析(DMA)是测量含微胶囊沥青

表 1 微胶囊-沥青自愈效果评价方法

Table 1 Evaluation method of self-healing effect of microencapsulated-asphalt

试验方法	测试参数	愈合条件	评价指标	参考文献
PD	5℃、裂缝深度 3 mm	24 h、20℃	$H_{PD}=\frac{L_1}{L_0}$	何亮等 ^[40]
	25℃、裂缝深度 5.3 mm	4 h、25℃		Yang 等 ^[80]
	25℃、裂缝深度 3.6 mm	4 h、25℃		Li 等 ^[81]
	10℃、裂缝深度 5.3 mm	1.5 h、35℃		Wang 等 ^[82]
TSR	-18℃、24 h、加载速率 5 cm·min ⁻¹	48 h、10℃	$H_{TSR}=\frac{TS_1}{TS_0}$	Sun 等 ^[83]
	-10℃、1 h	24 h、10℃		Shu 等 ^[84]
DSR	20℃、应力 0.3 MPa、加载频率 10 Hz	1 h、20℃	$H_{DSR1}=\frac{G_1^*}{G_0^*}$	Sun 等 ^[83]
			$H_{DSR2}=\frac{N_1}{N_0}$	
	25℃、应力 0.3 MPa、加载频率 10 Hz	1 h、25℃	$H_{DSR}=\frac{G_1^*-G_{s1}^*}{G_0^*-G_{s1}^*}$	Wang 等 ^[85]
	20℃、应变 3%、加载频率 10 Hz	1 h、20℃	$H_{DSR}=\frac{W_1}{W_0}$	Sun 等 ^[24]
			$W=\sum_{i=1}^n DE_i$	
			$DE_i=\pi \epsilon_i^2 G_i^* \sin \delta_i$	
	20℃、加载频率 10 Hz、应力 0.3 MPa	1 h、25℃	$H_{DSR1}=\frac{(G_{s1}^* - G_1^*)}{ G_1^* }$	Zhang 等 ^[86]
			$H_{DSR2}=\frac{(N_{s1}-N_{s2})}{N_{s2}} \times \frac{ G_{s2}^* }{ G_0^* }$	
LAS	扫描时间 300 s、应变 15% 和 30%	1 h、25℃	$H_{LAS}=\frac{\sigma_2}{t\sigma_1}$	Liu 等 ^[64]
DMA	25℃、应力 200 KPa、频率 10 Hz	25℃、50 min	$H_{DMA}=\frac{(G_1-G_e) \times t_1}{(G_0-G_e) \times t_0}$	Li 等 ^[87]
FM	0℃、每秒传输帧数为 5	12 h	裂缝闭合情况	纪小平等 ^[88]
MD	25℃、真空层宽度 3nm、压强为 1 个标准大气压	25℃	裂缝闭合情况	张恩浩等 ^[89]

注： H_{PD} 、 H_{TSR} 、 H_{DSR} 、 H_{DSR1} 、 H_{DSR2} 、 H_{LAS} 、 H_{DMA} 为不同试验方法下含微胶囊的沥青自愈系数； L_0 为沥青初始的延性，cm； L_1 为沥青自愈后的延性，cm； TS_0 为试样的初始拉应力，MPa； TS_1 为试样愈合后的拉应力，MPa； G_0^* 为第一加载阶段沥青初始复合剪切模量，Pa； G_1^* 为沥青愈合后第二加载阶段初始复合剪切模量，Pa； N_0 为复合剪切模量在第一次加载阶段降低初始值 50% 时的加载次数； N_1 为修复后第二次加载阶段复合剪切模量比初始值降低 50% 所需的加载次数； DE_i 为第 i 次加载周期的耗散能； ϵ_i 、 δ_i 和 G_i^* 分别为第 i 次加载周期下的应变、相角和复合剪切模量； W_0 和 W_1 分别为沥青自愈前、后的累计耗散能量； G_{s1}^* 为第一次加载结束时沥青损伤的复合剪切模量，Pa； G_{s2}^* 为沥青第二次损伤后的复数剪切模量，Pa； N_{s1} 为沥青第一次损伤后对应的疲劳次数； N_{s2} 为沥青第二次损伤后对应的疲劳次数； σ_1 为第一加载阶段沥青的屈服应力，Pa； σ_2 为第二加载阶段沥青的屈服应力，Pa， t 为愈合时间，h； G_0 为沥青初始动态模量，kPa； G_1 为沥青愈合后的动态模量，kPa； G_e 为沥青最终动态模量，kPa； t_0 为初始动模量加载时间； t_1 为修复后初始动模量加载时间。

在一定温度和加载频率范围内的黏弹性动态变化的重要技术。Li 等^[87] 基于 DMA 研究了微胶囊掺量和损伤程度对沥青自愈性能的影响，通过沥青愈合前后动态模量衰减率的比值来评价其自愈性能，其评价指标如如表 1 中式(12)所示，结果表明沥青的自愈效率随微胶囊掺量的增加呈非线性增加，随损伤程度的增加呈非线性降低。

FM 法可观察到微胶囊破裂释放的修复剂对沥青材料裂缝的修复过程。纪小平等^[88] 采用 FM

可视化了微胶囊芯材在沥青裂纹中的扩散过程，并借助显微图像软件实时动态监测含微胶囊沥青的裂纹愈合过程，研究表明裂纹中微胶囊囊芯材料的扩散行为可使裂缝逐渐闭合。

分子动力学(MD)法可分析微胶囊芯材与沥青裂缝融合后界面微观结构的变化情况，从而评价沥青自愈性能。张恩浩等^[89] 通过 MD 模拟了含微胶囊的沥青分子和再生剂分子的自修复过程，在沥青分子模型与沥青分子-再生剂分子模型中

分别插入宽度为 3 nm 的真空层来表征沥青内部的裂纹,经 500 ps 的正则系综模拟使各个分子充分接触,研究表明微胶囊破裂使再生剂流入裂纹中并使裂缝加速愈合。

4.2 微胶囊-沥青混合料的自愈效果评价

微胶囊-沥青混合料的自愈效果评价方法如表 2 所示。

三点弯曲(3PB)试验可分析含微胶囊沥青混合料在断裂-愈合-断裂作用下的强度恢复情况。Yamaç 等^[49]、Mansoori 等^[75]、Wan 等^[79]、姚秉辰等^[90]、Norambuena 等^[91]、Mansoori 等^[92]基于 3PB 分析了微胶囊掺量对预制裂缝沥青混合料梁强度恢复的影响,其评价指标如表 2 中式(13)所示,发

现微胶囊可有效增强沥青混合料的自愈性能。另外,Aguirre 等^[76]基于 3PB 分析了沥青混合料愈合前后裂缝宽度的变化情况,其评价指标如表 2 中式(14)所示,研究表明,随着愈合时间的延长,沥青裂纹的宽度逐渐减小。

通过四点弯曲(4PB)试验可分析含微胶囊沥青混合料试样修复前后的刚度模量或疲劳寿命变化情况。Sun 等^[39]、何亮等^[57]通过 4PB 试验分析了微胶囊对沥青混合料自愈性能的影响,以弯曲劲度模量恢复率和疲劳寿命恢复率量化了含微胶囊沥青混合料的自愈效果,如表 2 中式(15)、式(16)所示,结果表明含微胶囊沥青混合料试件的弯曲劲度模量恢复比和疲劳寿命恢复比均高于未

表 2 微胶囊-沥青混凝土自愈效果评价方法

Table 2 Evaluation method of self-healing effect of microencapsulated asphalt concrete

试验方法	测试参数	愈合条件	评价指标	参考文献
3PB	-20 ℃、4 h、加载速率 3 mm·min ⁻¹	25 ℃/40 ℃、120 h	$H_{3PB} = \frac{F_1}{F_0}$ (13)	Yamaç 等 ^[49]
	-20 ℃、4 h、加载速率 2 mm·min ⁻¹	20 ℃		Mansoori 等 ^[75]
	-20 ℃、加载速率 0.5 mm·min ⁻¹	20 ℃、48 h		Wan 等 ^[79]
	-10 ℃、加载速率 2 mm·min ⁻¹	30 ℃、1 h/1.5 h		姚秉辰等 ^[90]
	-20 ℃、裂缝深度 5 mm	20 ℃、5~216 h		Norambuena 等 ^[91]
	-20 ℃、裂缝深度 5 mm、加载速率 2 mm·min ⁻¹	20 ℃、72 h		Mansoori 等 ^[92]
	25 ℃、加载速率 0.25 mm·min ⁻¹	144 h、26 ℃/50 ℃	$H_{3PB} = \left(1 - \frac{C_1}{C_0}\right)$ (14)	Aguirre 等 ^[76]
4PB	15 ℃、4 h、加载频率 10 Hz、应变 500 με	30 ℃、24 h/72 h	$H_{4PB1} = \frac{S_1}{S_0}$ (15)	Sun 等 ^[39]
	15 ℃、加载频率 10 Hz、应变 5×10 ⁻⁴	20 ℃、20 h	$H_{4PB2} = \frac{N_1}{N_0}$ (16)	何亮等 ^[57]
BOEF	0 ℃、缺口深度 4.3 mm	0 ℃、24 h	裂缝张开位移	Su 等 ^[93]
	0 ℃、24 h	0 ℃、24 h	$H_{BOEF} = \frac{LS_n}{LS_0}$ (17)	Zhang 等 ^[30]
SCB	5 ℃、缺口深度 10 mm、加载速率 5 mm·min ⁻¹	20 ℃、48 h	$H_{SCB} = \frac{F_{S2}}{F_{S1}}$ (18)	Sun 等 ^[83]
	0 ℃、缺口深度 10 mm、加载速率 5 mm·min ⁻¹	23 ℃、20 h		Xu 等 ^[94]
HPI	5 ℃	45 ℃、12 h	$\nu = \frac{(Q_1 - Q_2)}{t}$ (19)	纪小平等 ^[95]
	5 ℃、2 h、水压 700 kPa、加载速率 5 mm·min ⁻¹ 、	45 ℃、6 h	$\nu_e = \frac{\nu_0}{\nu_1}$ (20)	周泽洪等 ^[38]
CT	20 ℃	20 ℃、96 h	裂缝闭合情况	Micaelo 等 ^[96]
	20 ℃、扫描分辨率 0.7 μm	25 ℃、48 h	微胶囊释放油量	Bao 等 ^[59]

注: H_{3PB} 、 H_{4PB1} 、 H_{4PB2} 、 H_{BOEF} 、 H_{SCB} 、 H_{HPI} 、 H_{CT} 为不同试验方法下含微胶囊的沥青混合料自愈系数; F_0 为试件的初始抗弯强度, N; F_1 为试件愈合后的抗弯强度, N; C_0 为试件初始裂缝宽度, mm; C_1 为试件愈合后裂缝宽度, mm; S_0 为试件愈合前弯曲劲度模量, MPa; S_1 为试件愈合后弯曲劲度模量, MPa; N_0 为试件愈合前的疲劳寿命; N_1 为试件修复后的疲劳寿命; LS_0 为试样的初始载荷应力; LS_n 为修复过程后的载荷应力; n 为修复循环次数 ($n=1, 2, 3, 4, 5$); F_{S1} 为试件第一阶段破坏的最大载荷, N; F_{S2} 为试件第二阶段破坏的最大载荷, N; Q_1 、 Q_2 分别为试验前、后的水量; ν 为渗水速率; ν_0 、 ν_1 分别为同一试件愈合前、后的渗水速率; t 为渗水时间。

加含微胶囊沥青混合料试件。

通过弹性基础梁(BOEF)试验分析含微胶囊沥青混合料中的黏弹性愈合和黏性愈合行为来评价其自愈性能。Su等^[93]基于BOEF试验分析了含微胶囊沥青混合料愈合前后裂缝张开位移的变化情况,结果表明再生沥青的多重自愈能力只能部分修复沥青混合料在使用寿命期间的损伤,且愈合温度和愈合时间对愈合过程影响很大。Zhang等^[30]采用BOEF试验比较了含微胶囊沥青混合料梁各循环加载下的应力值,其自愈效率如表2中式(17)所示,发现自愈效率随循环次数的增加呈下降趋势。

半圆弯曲(SCB)试验可分析含微胶囊沥青混合料在弯曲载荷下的变化情况。Sun等^[83]、Xu等^[94]通过SCB试验分析了含微胶囊沥青混合料愈合前后抗弯强度的变化,其评价指标如表2中式(18)所示,发现随着微胶囊掺量的增加,愈合效率先升高后降低,且微胶囊提高了沥青混合料断裂后的愈合能力。

水分可渗透于沥青混合料的裂缝,含微胶囊沥青混合料的自愈性能会使裂缝尺寸变小,高压渗水(HPI)试验中的渗水速率可反映裂缝的大小。周泽洪等^[38]、纪小平等^[95]利用HPI试验分析了含微胶囊沥青混合料愈合前后的渗水速率变化,其评价指标如表2中式(19)、式(20)所示,结果表明微胶囊使沥青混合料裂缝的自愈效果得到显著提升。

计算机断层扫描(CT)技术可观察到含微胶囊沥青混合料内部裂缝的生长和闭合情况。Micaelo等^[96]通过CT试验观察了含微胶囊沥青混合料裂缝愈合前后裂缝的闭合情况,发现静息期前微胶囊之间的裂缝是连续的,受损沥青混合料裂缝的体积在修复期后大幅减少且裂缝最宽处的宽度减小了约60 μm ,证明该微胶囊能诱导沥青混合料裂缝愈合。另外,Bao等^[59]采用CT技术分析含微胶囊沥青混合料在荷载作用下的释油量,发现随着压缩加载次数的增加,沥青混合料中的微胶囊释放出的油量增加,沥青混合料裂缝的自愈水平明显提高。

综上所述,微胶囊-沥青及沥青混合料的自愈效果评价指标众多,包括延度、拉应力、复合剪切模量、屈服应力、动态模量、抗弯强度、劲度模量、

疲劳寿命、渗水速率等,虽能通过各指标在修复前后的恢复率来量化微胶囊-沥青及沥青混合料的自愈效果,但无法解释其自愈过程。采用FM法、CT试验等技术可观察微裂纹的愈合过程,但不能说明修复剂的扩散情况。因此,需采用分子动力学的方法来解释微胶囊-沥青及沥青混合料自愈过程中的修复剂运动行为和扩散情况;需建立宏观-细观-微观多尺度的评价体系,全面分析微胶囊-沥青及沥青混合料的自愈效果。另外,大多数微胶囊-沥青及沥青混合料自愈性能评价指标的测试仅在实验室完成,但室内测试的试件仅能评价短期修复效果,缺乏对实际沥青路面长期自愈效果评价的研究,故需结合实验室和现场试验的测试数据,构建沥青路面实况下的自愈效果评价模型,推广微胶囊技术在沥青路面智能养护中应用。

5 结 论

(1)不同地域差异、环境因素和交通荷载等因素影响下的沥青路面老化程度有差别,沥青路面材料中裂纹扩展模式不同,可基于沥青老化程度建立沥青路面裂纹扩展的预测模型,制备出与裂纹适配的自修复微胶囊。另外,目前微胶囊的制备仅在实验室完成,后期应加强微胶囊生产技术的革新,创建合成微胶囊的生产线。

(2)在微胶囊物理和力学性能测试中,要将各试验程序规范化,数据分析统一化。另外,在微胶囊力学性能测试中,需完善应力-应变本构关系,分析多因素(拌和、施工碾压、行车荷载、自然环境)共同作用下的微胶囊在沥青路面中的实际受力状况。

(3)划分微胶囊在抵抗沥青路面前期施工荷载的强度与后期服役阶段裂纹尖端应力作用下的可裂强度范围,并与微胶囊在沥青路面材料中的破裂理论相结合,量化微胶囊可裂强度的界限值。

(4)在宏观-细观-微观尺度下研究微胶囊-老化沥青材料的自修复机理,并深入分析微胶囊对沥青路面的修复过程及修复能力。

(5)微胶囊-沥青及沥青混合料具有多种自愈效果评价方法,但因试验方法、加载程序、愈合条件和评价指标不同,其自愈效果的量化值差异较大。未来可在完善精确、标准、系统的自愈效果评

价方法的同时,进一步量化沥青路面在交通荷载和环境影响荷载下的微胶囊自愈效率。

参考文献:

- [1] 肖月, 常祁文, 董前坤, 等. 道路沥青材料 VOCs 的指纹组分及其定量分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 276-287.
Xiao Yue, Chang Xi-wen, Dong Qian-kun, et al. Fingerprint components and quantitative analysis of volatile organic compounds of asphalt materials[J]. China Journal of Highway Transportation, 2020, 33(10): 276-287.
- [2] 朱春风, 程永春, 梁春雨, 等. 硅藻土-玄武岩纤维复合改性沥青混合料路用性能试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(1): 165-173.
Zhu Chun-feng, Cheng Yong-chun, Liang Chun-yu, et al. Road performance experiment of diatomite-basalt fiber composite modified asphalt mixture[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1): 165-173.
- [3] 殷鹏, 潘宝峰, 康泽华, 等. 稻壳灰改性沥青混合料性能研究及路面结构动力响应分析[J]. 材料导报, 2023, 37(14): 36-43.
Yin Peng, Pan Bao-feng, Kang Ze-hua, et al. Study on performance of rice husk ash modified asphalt mixture and dynamic response analysis of pavement structure[J]. Materials Reports, 2023, 37(14): 36-43.
- [4] 钱旭栋, 钱高科, 蒋常龙, 等. 玻璃纤维凝灰岩碎石沥青下封层路用性能研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 113-118.
Qian Xu-dong, Qian Gao-ke, Jiang Chang-long, et al. Research on road performance of glass fiber tuff gravel asphalt underseal layer[J]. Highway, 2022, 67(12): 113-118.
- [5] 张韶华, 聂晨亮, 段建先, 等. 抗滑雾封层开发及性能验证[J]. 公路, 2022, 67(8): 386-393.
Zhang Shao-hua, Nie Chen-liang, Duan Jian-xian, et al. Development and performance verification of anti-skid mist seal[J]. Highway, 2022, 67(8): 386-393.
- [6] 蒋毅. 乳化沥青稀浆封层技术在农村公路养护中的应用[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(2): 83-85.
Jiang Yi. Application of emulsified asphalt slurry sealing technology in rural road maintenance[J]. Transportation Technology and Management, 2023, 4(2): 83-85.
- [7] 冯新军, 梁辉, 彭程. 湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的研制与性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2023, 43(5): 11-20.
Feng Xin-jun, Liang Hui, Peng Cheng. Preparation and performance of high performance grouting sealant for asphalt pavement in humid and hot areas[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2023, 43(5): 11-20.
- [8] Chen A Q, Zhao Y L, Li P B, et al. Crack propagation prediction of asphalt pavement after maintenance as a function of initial cracks distribution[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117157.
- [9] 姚玉权, 仰建岗, 高杰, 等. 就地热再生沥青混合料的材料组成波动及控制策略[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 59-68.
Yao Yu-quan, Yang Jian-gang, Gao Jie, et al. Asphalt mixture material composition volatility and control strategy for hot in-place recycling[J]. Materials Reports, 2022, 36(16): 59-68.
- [10] Huang Y L, Qiao Z H, Zhang H T. Evaluation of an economy-technology-green development system for asphalt pavement construction in China based on synergistics[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 125132.
- [11] Irence G T, José N C. Recent advances on self-healing of bituminous materials by the action of encapsulated rejuvenators[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119568.
- [12] Li Y, Hao P W, Zhang M Y. Fabrication, characterization and assessment of the capsules containing rejuvenator for Improving the self-healing performance of asphalt materials: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125079.
- [13] 纪小平, 方向征, 李加, 等. 微胶囊沥青混合料自愈性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2023, 43(1): 39-48.
Ji Xiao-ping, Fang Xiang-zheng, Li Jia, et al. Self-healing behavior of MUF microencapsulated asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2023, 43(1): 39-48.
- [14] Yang P, Han S H, Su J F, et al. Design of self-healing microcapsules containing bituminous rejuvenator with nano-CaCO₃/organic composite shell: mechanical properties, thermal stability, and compactability[J]. Polymer Composites, 2018, 39(3): 1441-1451.
- [15] Massella D, Giraud S, Guan J, et al. Textiles for health: A review of textile fabrics treated with chito-

- san microcapsules[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17(4): 1787-1800.
- [16] 高向新, 陈永福, 乌斯嘎勒. 益生菌微胶囊的制备及其在食品中应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 19-28.
- Gao Xiang-xin, Chen Yong-fu, Wu Si-ga-le. Research progress of preparation and application of probiotic microen-capsulation in food[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 19-28.
- [17] 王子青, 栾敬德. 杂化壳相变微胶囊的制备与热性能研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(9): 527-531.
- Wang Zi-qing, Luan Jing-de. Preparation and thermal properties of hybrid shell phase change microcapsules[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 527-531.
- [18] 杨宝嘉, 孙晗, 蒋士龙, 等. 脂肪酶微胶囊制备工艺及性质研究[J]. *中国乳品工业*, 2023, 51(9): 10-14.
- Yang Bao-jia, Sun Han, Jiang Shi-long, et al. Preparation and properties of lipase microcapsules[J]. *China Dairy Industry*, 2023, 51(9): 10-14.
- [19] Jiang F Y, Wang X D, Wu D Z. Magnetic microen-capsulated phase change materials with an organo-silica shell: design, synthesis and application for electromagnetic shielding and thermal regulating polyimide films[J]. *Energy*, 2016, 98: 225-239.
- [20] Khadiran T, Hussein M Z, Zainal Z, et al. Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 916-928.
- [21] Garcia A, Schlangen E, Ven M V D. Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: Microcapsules and induction heating[J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 417/418: 573-576.
- [22] Bao S, Liu Q, Rao W, et al. Synthesis and characterization of calcium alginate-attapulgit composite capsules for long term asphalt self-healing[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120779.
- [23] Xue B, Wang H F, Pei J Z, et al. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 641-649.
- [24] Sun D Q, Pang Q, Zhu X Y, et al. Enhanced self-healing process of sustainable asphalt materials containing microcapsules[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(11): 9881-9893.
- [25] Sun D Q, Lu T, Zhu X Y, et al. Optimization of synthesis technology to improve the design of asphalt self-healing microcapsules[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175: 88-103.
- [26] Su J F, Qiu J, Schlangen E, et al. Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: in situ rejuvenation for aged bitumen[J]. *Construction and Building materials*, 2015, 74: 83-92.
- [27] Su J F, Schlangen E, Wang Y Y. Investigation the self-healing mechanism of aged bitumen using microcapsules containing rejuvenator[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 85(15): 49-56.
- [28] Su J F, Qiu J, Schlangen E. Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, 98(6): 1205-1215.
- [29] Chung K, Lee S, Park M, et al. Preparation and characterization of microcapsule-containing self-healing asphalt[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 29: 330-337.
- [30] Zhang X L, Guo Y D, Su J F, et al. Investigating the electrothermal self-healing bituminous composite material using microcapsules containing rejuvenator with graphene/organic hybrid structure shells[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 1158-1176.
- [31] Tian Y J, Zheng M L, Liu Y M, et al. Analysis of behavior and mechanism of repairing agent of microcapsule in asphalt micro crack based on molecular dynamics simulation[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 305: 124791.
- [32] Kim D, Kim Y, Kim H, et al. A study of properties of self-healing asphalt mixtures containing microcapsule[J]. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 2014, 14(6): 59-64.
- [33] Su J F, Qiu J, Schlangen E, et al. Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(12): 4067-4076.
- [34] 何亮, 黄胡端, Van den bergh W, 等. 沥青自修复微胶囊研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(15): 15092-15101.
- He Liang, Huang Hu-duan, Wim V D B, et al. A state-of-the-art on microcapsules for asphalt self-

- healing[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(15): 15092–15101.
- [35] 陈琨, 袁妙, 刘全涛, 等. 缓释型沥青自愈合胶囊的优化制备与修复效果研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2022, 41(7): 89–95.
- Chen Kun, Yuan Miao, Liu Quan-tao, et al. Optimization and preparation of slow-release asphalt self-healing capsules[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2022, 41(7): 89–95.
- [36] García A, Schlangen E, Ven D V M, et al. Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184(1–3): 603–611.
- [37] 柴子奇, 郑毅, 赵鸿铎. 内嵌于沥青混合料的自修复胶囊性能评价[J]. *交通科技*, 2016, 4(2): 163–165.
- Chai Zi-qi, Zheng Yi, Zhao Hong-duo. Performance evaluation of self-healing capsules embedded in asphalt mixture [J]. *Transportation Science & Technology*, 2016, 4(2): 163–165.
- [38] 周泽洪, 杨自广, 纪小平, 等. 微胶囊沥青混合料的裂缝自愈与路用性能研究[J]. *公路*, 2021, 66(2): 45–51.
- Zhou Ze-hong, Yang Zi-guang, Ji Xiao-ping, et al. Research on crack self-healing and road performances of microcapsule contained asphalt mixture[J]. *Highway*, 2021, 66(2): 45–51.
- [39] Sun D Q, Li B, Ye F Y, et al. Fatigue behavior of microcapsule-induced self-healing asphalt concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 466–476.
- [40] 何亮, 孟森, 黄义洲, 等. 复配愈合剂微胶囊制备及其对沥青自愈合性能的影响[J]. *公路*, 2023, 68(2): 1–10.
- He Liang, Meng Sen, Huang Yi-zhou, et al. Preparation of encapsulated compound rejuvenator and its impact on healing effect of asphalt pavement[J]. *Highway*, 2023, 68(2): 1–10.
- [41] Li F, Zhou S Q, Chen S, et al. Preparation of low-temperature phase change materials microcapsules and its application to asphalt pavement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(11): 04018303.
- [42] Wang X Y, Xie X M, Wang L Q, et al. Rheological behaviour of bitumen blending with self-healing microcapsule: effects of physical and chemical interface structures[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 586: 124212.
- [43] Aguirre M A, Hassan M M, Shirzad S, et al. Microencapsulation of asphalt rejuvenators using melamine-formaldehyde[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114(1): 29–39.
- [44] Karlsson R, Isacsson U. Laboratory studies of diffusion in bitumen using markers[J]. *Journal of Materials Science*, 2003, 38(13): 2835–2844.
- [45] 沈凡, 赵明宇, 卢吉, 等. 改性再生剂在老化沥青中的扩散规律研究[J]. *功能材料*, 2014, 45(21): 21064–21067.
- Shen Fan, Zhao Ming-yu, Lu Ji, et al. Diffusion of modifying rejuvenator on aged asphalt binder[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(21): 21064–21067.
- [46] Ji J, Yao H, Suo Z, et al. Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(3): D4016003.
- [47] Qurashi I A, Swamy A K. Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 992–1000.
- [48] Al-Mansoori T, Norambuena C J, Micaelo R, et al. Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 330–339.
- [49] Yamaç O E, Yilmaz M, Yalçın E, et al. Self-healing of asphalt mastic using capsules containing waste oils[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121417.
- [50] 毛昱, 李萍, 念腾飞, 等. 再生剂在老化沥青中扩散行为的量化分析[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(2): 79–87.
- Mao Yu, Li Ping, Nian Teng-fei, et al. Quantitative analysis of the diffusion behavior of rejuvenator in aged asphalt[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2021, 49(2): 79–87.
- [51] García A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic[J]. *Fuel*, 2012, 93: 264–272.
- [52] García A, Schlangen E, Ven D V M. Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete[J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 583–591.
- [53] Garcia A, Jelfs J, Austin C J. Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules[J]. *Construction and*

- Building Materials, 2015, 101: 309-316.
- [54] 纪小平, 张宜洛, 杨自广, 等. 一种沥青混凝土裂缝自愈微胶囊及其制备方法[P]. 中国:CN106810102 B, 2019-03-19.
- [55] Chen B, Liu D B, Chen A F, et al. Influence of microcapsules on self-healing performance and road performance of dense-graded asphalt mixture[J]. Earth and Environmental Science, 2021, 768(1): 012020.
- [56] Norambuena C J, Yalcin E, Garcia A, et al. Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules[J]. Construction and Building Materials, 2018, 175: 254-266.
- [57] 何亮, 蔡卓, 张军辉, 等. 封装愈合剂及橡胶沥青混合料的自愈性能[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2018, 48(5): 911-919.
- He Liang, Cai Zhuo, Zhang Jun-hui, et al. Properties of encapsulated healing agent and self-healing in asphalt-rubber mixture[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2018, 48(5): 911-919.
- [58] Zhang L, Liu Q T, Li H C, et al. Synthesis and characterization of multi-cavity Ca-alginate capsules used for self-healing in asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 298-307.
- [59] Bao S W, Liu Q T, Li H C, et al. Investigation of the release and self-healing properties of calcium alginate capsules in asphalt concrete under cyclic compression loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(1): 04020401.
- [60] 姜添镗, 赵宏天, 刘攀, 等. 原位聚合法制备微胶囊在功能材料的应用进展[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 199-204.
- Jiang Tian-qiang, Zhao Hong-tian, Liu Pan, et al. Application progress of microcapsules prepared by in-situ polymerization in functional materials[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(1): 199-204.
- [61] Ji X P, Li J, Hua W L, et al. Preparation and performance of microcapsules for asphalt pavements using interfacial polymerization[J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 123179.
- [62] Shukla P G, Jagtap S B, Biradar S C, et al. Preparation and characterization of microcapsules containing industrially important reactive water-soluble polyamine[J]. Colloid and Polymer Science, 2016, 294: 2039-2050.
- [63] Liu Q, Zhang J P, Liu W L, et al. Preparation and characterization of self-healing microcapsules embedding waterborne epoxy resin and curing agent for asphalt materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 384-394.
- [64] Liu W L, Zhang J P, Liu Q, et al. Effects of emulsifier dosage and curing time on self-healing microcapsules containing rejuvenator and optimal dosage in asphalt binders[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2019, 19(1): 57-65.
- [65] Su J F, Schlangen E, Qiu J. Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt[J]. Powder Technology, 2013, 235: 563-571.
- [66] 肖艺成. 路用自修复材料的制备及性能研究[D]. 西安:长安大学建筑工程学院, 2015.
- Xiao Yi-cheng. The preparation and properties of self-healing materials of road[D]. Xi'an: School of Civil Engineering, Chang'an University, 2015.
- [67] Su J F, Schlangen E. Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 198: 289-300.
- [68] Wang Y D, Hao P W. Rheological and fatigue-healing durability of asphalt containing synthesized microcapsules with refined waste oil core[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 121964.
- [69] Huang J X, Muhammad Y, Li J Q, et al. Study on the self-healing performance of urea-formaldehyde - dicyclopentadiene (UF - DCPD) microcapsules-incorporated SBS polymer-modified asphalt[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(4): 1-13.
- [70] Mookhoek S D, Colver P J, Fischer H, et al. The creation of high aspect ratio capsules to improve the efficiency of self-healing polymer systems[C]//First International Conference on Self Healing, Noordwijk, the Netherlands, 2007:1-5.
- [71] Tabaković A, Post W, Cantero D, et al. The reinforcement and healing of asphalt mastic mixtures by rejuvenator encapsulation in alginate compartmented fibres[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(8): 084003.
- [72] Sun D Q, Hu J L, Zhu X Y. Size optimization and self-healing evaluation of microcapsules in asphalt binder[J]. Colloid and Polymer Science, 2015, 293:

- 3505-3516.
- [73] Ji X P, Wang S Q, Yao B C, et al. Preparation and properties of nano-SiO₂ modified microcapsules for asphalt pavement[J]. *Materials & Design*, 2023, 229: 111871.
- [74] Li B, Sun G Q, Sun D Q, et al. Survival and activation behavior of microcapsules in self-healing asphalt mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119719.
- [75] Al-Mansoori T, Norambuena C J, Garcia A. Effect of capsule addition and healing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures[J]. *Materials and Structures*, 2018, 51(2): 1-12.
- [76] Aguirre M A, Hassan M M, Shirzad S, et al. Laboratory testing of self-healing microcapsules in asphalt mixtures prepared with recycled asphalt shingles[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9): 04017099.
- [77] 赵钊, 计宏伟, 陈金龙, 等. 自修复体系中微胶囊壁材力学性能的测试与表征[J]. *实验力学*, 2013, 28(5): 580-585.
- Zhao Zhao, Ji Hong-wei, Chen Jin-long, et al. Mechanical properties testing and characterization of microcapsule wall material in self-healing system[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(5): 580-585.
- [78] Keller M W, Sottos N R. Mechanical properties of microcapsules used in a self-healing polymer[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46: 725-733.
- [79] Wan P, Wu S P, Liu Q T, et al. Sustained-release calcium alginate/diatomite capsules for sustainable self-healing asphalt concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 372: 133639.
- [80] Yang S, Ji J Q, Tao H, et al. Fabrication of urea formaldehyde - epoxy resin microcapsules for the preparation of high self-healing ability containing SBS modified asphalt[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(8): 4128-4137.
- [81] Li J, Yang S, Muhammad Y, et al. Fabrication and application of polyurea formaldehyde-bioasphalt microcapsules as a secondary modifier for the preparation of high self-healing rate SBS modified asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 246: 118452.
- [82] Wang X G, Guo G J, Zou F B, et al. Enhancing self-healing properties of microcrack on aged asphalt incorporating with microcapsules encapsulating rejuvenator[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 344(15): 128123.
- [83] Sun G Q, Zhang J P, Liu Q, et al. Effects of microcapsules on self-healing performance of asphalt materials under different loading modes[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2021, 147(2): 04021010.
- [84] Shu B N, Wu S P, Dong L J, et al. Microfluidic synthesis of ca-alginate microcapsules for self-healing of bituminous binder[J]. *Materials*, 2018, 11(4): 630.
- [85] Wang Y Y, Tan Y Q, Lyv H J, et al. Evaluation of rheological and self-healing properties of asphalt containing microcapsules modified with graphene[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 357: 129287.
- [86] Zhang H L, Bai Y Z, Cheng F L. Rheological and self-healing properties of asphalt binder containing microcapsules[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 138-148.
- [87] Li J, Ji X P, Fang X Z, et al. Self-healing performance and prediction model of microcapsule asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 330: 127085.
- [88] 纪小平, 姚秉辰, 司伟, 等. 微胶囊沥青自愈合行为与微观机理[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(2): 67-77.
- Ji Xiao-ping, Yao Bing-chen, Si Wei, et al. Self-healing behavior and microscopic mechanism of micro-encapsulated asphalt[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(2): 67-77.
- [89] 张恩浩, 刘爽, 单丽岩, 等. 石墨烯微胶囊沥青双机制愈合机理研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(7): 91-99.
- Zhang En-hao, Liu Shuang, Shan Li-yan, et al. Study on double healing mechanism of graphene microcapsule asphalt binder[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(7): 91-99.
- [90] 姚秉辰, 纪小平, 汤振农, 等. 沥青路面界面聚合微胶囊的制备和性能[J]. *材料导报*, 2022, 36(13): 233-238.
- Yao Bing-chen, Ji Xiao-ping, Tang Zhen-nong, et al. Preparation and performance of interfacial polymerization microcapsules for asphalt pavement[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(13): 233-238.
- [91] Norambuena C J, Yalcin E, Hudson G R, et al. Me-

- chanical and self-healing properties of stone mastic asphalt containing encapsulated rejuvenators[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(5): No. 04019052.
- [92] Mansoori T, Micaelo R, Artamendi I, et al. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1091-1100.
- [93] Su J F, Wang Y Y, Han N X, et al. Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106: 317-329.
- [94] Xu S, Liu X Y, Tabaković A, et al. Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete[J]. *Materials*, 2019, 12(1): 168.
- [95] 纪小平, 杨自广, 周泽洪, 等. 密级配沥青混合料自愈性能的评价方法[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 51-57.
- Ji Xiao-ping, Yang Zi-guang, Zhou Ze-hong, et al. Evaluation method for self-healing property of dense-graded asphalt mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(11): 51-57.
- [96] Micaelo R, Almansoori T, Garcia A. Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 734-744.