

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.014

引用格式:郑扬,韩超,安丰伟.自制毫米胶囊对沥青自愈合性能的影响研究[J].公路与汽运,2025,41(2):66-68.

Citation:ZHENG Yang,HAN Chao,AN Fengwei.Study on effect of self-made millimeter capsule on self-healing properties of asphalt[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(2):66-68.

自制毫米胶囊对沥青自愈合性能的影响研究*

郑扬^{1,2},韩超^{1,2},安丰伟^{1,2}

(1.苏交科集团股份有限公司,江苏南京 210019;2.新型道路材料国家工程研究中心,江苏南京 210019)

摘要:通过沥青胶结料的多次愈合能解决沥青老化问题,降低沥青路面维护成本,延长沥青路面使用寿命。文中制备2种不同配方的自愈合毫米胶囊,对比分析其热稳定性和抗搅拌性能、对沥青三大基本性能(针入度、软化点、延度)及自愈合性能的影响。结果表明,2种配方的自愈合胶囊均能抵抗135 r/min的搅拌强度,但高温稳定性还须进一步提高;毫米胶囊掺量小于3%时,胶囊的加入对沥青针入度、软化点和延度的影响较小;毫米胶囊对沥青的修复效果与直接添加再生剂相当,沥青自愈合率超过50%。

关键词:公路;自愈合胶囊;改性沥青;自愈合性能;沥青老化

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0066-03

受车辆荷载和气候变化等因素的影响,沥青路面易产生裂缝、松散和坑槽等病害^[1-2],导致路面使用寿命缩短。随着公路存量养护时代的到来,一方面,每年因沥青路面大中修和改扩建产生高达数十万吨的废旧沥青混合料^[3-4],另一方面,对原材料的需求庞大。而各地方养护资金需求随道路服役性能的衰减愈发紧张,其中路面养护投入占比最大。为适应新形势要求,亟须研发经济适用性强、低碳环保、耐久性好的养护材料。沥青混凝土自愈合材料是一种基于缓释型理念、可长期作用于服役中后期路面的养护技术,可将路面结构层微裂纹消灭在萌芽状态,解决路面裂缝、松散、坑槽等问题^[5]。本文采用锐孔法制备2种不同配方的自愈合毫米胶囊,对比分析其对沥青基本性能和自愈合性能的影响。

1 自愈合毫米胶囊的制备

1.1 原材料

用于制备自愈合毫米胶囊的原材料包括工业级海藻酸钠、凹凸棒土、R3乳化剂、食用级葵花籽油、脱水氯化钙和自来水。其中:海藻酸钠溶液是一种可缓慢释放芯材的外壳材料^[6];凹凸棒土(以下简称为凹土)具有多孔通道,有利于在溶液中获得良好的分散性^[7],同时它是一种很好的增强材料,可提升胶

囊的力学强度;R3乳化剂由甘油和蔗糖硬脂酸酯混合而成,可防止水-油分离,提高溶液的稳定性;葵花籽油可使沥青胶结料恢复活力,作为修复剂使用,葵花籽油的性能指标见表1。

表1 葵花籽油的性能指标

项目	检测结果
60℃黏度/(Pa·s)	0.285
闪点/℃	230
饱和烃/%	61.2
芳烃/%	38.3
15℃密度/(g·cm ⁻³)	0.936

沥青采用70#基质沥青,其性能指标见表2。

表2 70#基质沥青的性能指标

项目	检测结果	技术要求
15℃密度/(g·cm ⁻³)	1.041	实测
针入度/(0.1mm)	70	60~80
软化点/℃	47.5	≥46
15℃延度/cm	>100	≥100

1.2 制备工艺

采用锐孔法制备2种自愈合毫米胶囊,制备流程为制备海藻酸钠溶液并去除气泡→在溶液中依次

* 基金项目:江苏省交通运输科技与成果转化项目(2022Z02-1)

加入凹土粉末、葵花籽油、R3 乳化剂,通过高速剪切形成水包油型乳液→将乳液滴入氯化钙溶液中交联形成胶囊^[8]。2 种自愈合胶囊的相关参数见表 3,其外观见图 1。

表 3 自愈合毫米胶囊的制备参数

自愈合胶囊编号	凹土/g	海藻酸钠溶液的质量分数/%	修复剂/mL	R3 乳化剂/mL	CaCl ₂ 溶液的质量分数/%	剪切速率/(r·min ⁻¹)
C1	0	2	40	2	2.5	4 000
C2	3	2	40	2	2.5	4 000



图 1 自愈合毫米胶囊的外观

2 自愈合毫米胶囊性能测试

通过测试自愈合毫米胶囊的热稳定性及抗搅拌性能评价其力学性能。以硅油为热介质,将胶囊加热至 180 ℃,测试自愈合胶囊的热稳定性,以加热前后质量差为评价指标。结果显示:加热至 180 ℃时 2 种自愈合胶囊的质量损失达 50%,这是由于高温下海藻酸钠壁材的蒸发使带水软粒子的水分流失严重。因此,自愈合胶囊应在低温干燥后使用,掺入沥青中使用时避免加热时间过长。

JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》规定实验室用沥青混合料拌和机的搅拌叶自转速率为 70~80 r/min,公转速率为 40~50 r/min^[9]。考虑到拌和楼的搅拌转速比室内试验设备大,将搅拌速率设为 135 r/min。将自愈合胶囊加入啫喱中,用磁力搅拌器进行搅拌,通过目测判断自愈合胶囊的抗搅拌强度。结果显示:搅拌速率为 135 r/min 时,自愈合胶囊外观均无破损,它能抵抗混合料拌和中的搅拌强度。

3 自愈合毫米胶囊对沥青自愈合性能的影响

3.1 沥青样品制备

将一定质量的 70# 基质沥青加热至 135 ℃,分别添加 3% 的含凹土自愈合胶囊(C2)、不含凹土自愈合胶囊(C1)及相应质量的葵花籽油修复剂,采用玻璃棒进行搅拌,然后放入烘箱中加热至融合,完成沥青样品制备。

3.2 试验方法

(1) 沥青的基本性能测试。按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测试沥青的软化点、针入度、延度。

(2) 自愈合效果评价试验。按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》制备沥青试样,试验温度为 5 ℃,拉伸速率为 1 cm/min。用刀片在试样中部刻一条 4 mm 深裂纹,在 20 ℃烘箱中修复 4 h,修复完成后测试延度 L_a 。 L_a 与未经破坏的试样延度 L_b 的比值 H_E 即为沥青的自愈合率,公式如下:

$$H_E = \frac{L_a}{L_b} \times 100 \tag{1}$$

3.3 胶囊掺量对沥青基本性能的影响

为评价自愈合胶囊掺量对沥青基本性能的影响,分别测试添加自愈合胶囊前后沥青软化点、针入度及延度,结果见表 4。

表 4 自愈合胶囊掺量对沥青基本性能的影响

自愈合胶囊掺量/%	自愈合胶囊编号	软化点/℃	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	延度(15 ℃)/cm
0	—	47.5	70	>100
1	C1	47.0	67	>100
	C2	47.5	68	>100
3	C1	47.0	72	>100
	C2	47.0	71	>100
规范要求		≥46	60~80	≥100

从表 4 可以看出:添加自愈合胶囊后,沥青针入度小幅度上升,软化点和延度变化不明显,均满足规范要求。自愈合胶囊中的修复剂破裂后,沥青中轻质组分占比上升,从而调节沥青的黏度,使其针入度升高。但由于自愈合胶囊掺量很小,指标变化并不

明显。为避免对混合料高温性能产生影响,胶囊掺量不宜过大。

3.4 修复剂类型对沥青自愈合性能的影响

在 20℃ 温度下保持 4 h,考察添加 3% 自愈合胶囊及直接添加同掺量葵花籽油修复剂对沥青自愈合性能的影响^[10],结果见表 5。

表 5 修复剂类型对沥青自愈合性能的影响

修复剂类型	L_a/cm	L_b/cm	$L_a/L_b/\%$
胶囊 C1	8.65	12.95	66.80
胶囊 C2	7.80	15.75	49.52
葵花籽油	>100.00	>100.00	50.00

由表 5 可知:添加胶囊 C2 沥青的低温延度高于添加胶囊 C1 的沥青,说明凹土粉末能提高沥青的低温抗裂性能;添加自愈合胶囊及直接添加同掺量修复剂对沥青均有明显的修复效果,沥青自愈合率分别为 66.80%、49.52%、50.00%,这是由于温度升高,沥青中分子运动加剧,润湿了微裂纹,从而完成部分自愈合;直接添加葵花籽油修复剂的沥青延度高于添加自愈合胶囊的沥青延度,可能是由于胶囊中的修复剂(葵花籽油)并未完全释放。

4 经济性分析

自愈合胶囊的原材料为常见化学药剂,价格低廉,供应方式市场采购,来源广,易获取。自愈合胶囊的价格分析见表 6。因室内生产设备较小,生产效能不足,自愈合胶囊的生产成本较高,其加工单价为 420 元/kg,综合生产成本为 456.8 元/kg。70# 基质沥青的单价为 3.6 元/kg,加入自愈合胶囊后其单价上升至 460.4 元/kg,相较于 SBS 改性沥青的单价 4.1 元/kg,自愈合胶囊沥青的成本很高。但通过技术创新和生产流程优化,有望实现成本降低,进而提高自愈合沥青在市场上的竞争力。

表 6 自愈合胶囊的价格分析

原材料	掺量	单价	总价/元
海藻酸钠	55 g	10 元/(100 g)	5.5
凹土	48 g	28 元/(500 g)	2.7
葵花籽油	200 mL	80 元/(5 L)	3.2
乳化剂	12 mL	200 元/(100 mL)	24.0
氯化钙	36 g	20 元/(500 g)	1.4
综合单价		36.8 元/kg	

5 结论

本文采用锐孔法制备 2 种用于沥青自修复的毫米胶囊,采用自愈合胶囊对 70# 基质沥青进行改性,研究胶囊掺量对沥青基本性能的影响及沥青的自修复效果,主要结论如下:

(1) 采用锐孔法制备的 2 种不同配合比的自愈合胶囊均能抵抗 135 r/min 的搅拌强度,但高温稳定性不良,掺入沥青中时应避免加热时间过长。

(2) 自愈合胶囊掺量小于 3% 时,胶囊的加入不会对沥青的针入度、软化点和延度产生明显影响,但为避免对混合料高温性能产生影响,胶囊掺量不宜过大。

(3) 添加自愈合胶囊 C1、C2 及直接添加同掺量修复剂对沥青均有明显修复效果,沥青自愈合率分别为 66.80%、49.52%、50.00%,这是由于温度升高,沥青中分子运动加剧,润湿了微裂纹,从而完成部分自修复。

参考文献:

- [1] 李佳.沥青路面的病害原因与处治技术分析[J].工程技术研究,2023,8(9):50-52.
- [2] 吴传海,杨艺,王旺,等.基于病害特征的湿热地区公路沥青路面破损状况评价研究[J].交通科学与工程,2023,39(4):9-16.
- [3] 岳喜兵.废旧沥青砼再利用方案经济性与环保性比选研究[J].公路与汽运,2020(5):163-166.
- [4] 褚晨枫,邓军,周琛,等.乳化沥青冷再生混合料断裂性能试验研究[J].中外公路,2024,44(2):82-90.
- [5] 唐杰,赵华,陈佳宾,等.沥青混合料自愈合微胶囊制备与评价的研究进展[J].市政技术,2022,40(7):10-16.
- [6] 魏靖明,张志斌,冯华,等.海藻酸钠作为药物载体材料的研究进展[J].化工新型材料,2007,35(8):20-22.
- [7] 张婧.凹凸棒土处理含铅废水与高氟水的吸附热力学及机理研究[D].北京:北京大学,2008.
- [8] 王显伦.锐孔法制备微胶囊技术研究[J].郑州粮食学院学报,1995,16(4):21-26.
- [9] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [10] 李彬,孙大权,凌森林,等.微胶囊对沥青混合料疲劳与自愈性能影响研究[J].石油沥青,2021,35(1):28-34.

收稿日期:2023-12-20