DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.013
引用格式:徐波,徐佳骏.基于多指标的泡沫温拌再生沥青热存储特性研究[J].公路与汽运,2025,41(2):61-65.
Citation:XU Bo,XU Jiajun.Research on thermal storage characteristics of recycled asphalt with foam warm mixing technique based on multiple indicators[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(2):61-65.

基于多指标的泡沫温拌再生沥青热存储特性研究

徐波[1,2],徐佳骏[3]
(1.南京航空航天大学 民航学院,江苏 南京 210016;2.江苏京沪高速公路有限公司,江苏 淮安 223005;
3.江苏交通控股有限公司,江苏 南京 210041)

摘要:为研究泡沫温拌再生沥青的热存储特性,对 0、20%、40%、60%、80%回收沥青掺量的泡沫温拌再生沥青进行离析试验、三大指标试验和动态剪切流变试验,采用软化点差值、延度比值、针入度差值、车辙因子差值评价泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性。结果表明,掺加回收沥青后,一些老化的回收沥青向泡沫温拌再生沥青的底部渗透,泡沫温拌再生沥青的软化点差值、延度比值、针入度差值、车辙因子差值增大,热存储稳定性变差;回收沥青掺量大于 40%时,泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性显著变差,须采取改进措施提高泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性。

关键词:公路;泡沫温拌再生沥青;热存储特性;回收沥青;软化点差值;延度比值;针入度差值;车辙因子差值
中图分类号:U418.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2668(2025)02-0061-05

据统计,交通运输及其相关的碳排放约占全社会碳排放总量的 25%,而交通系统碳排放中超过 85%是道路系统碳排放[1],道路领域的节能减排迫在眉睫。中国道路大中修工程产生的沥青路面旧料每年约 1.8 亿 t,旧料的回收利用不仅能解决原材料过度开采的问题,还可以减少碳排放,具有良好的经济效益和环境效益[2]。热再生技术存在碳排放多、能源消耗量大等问题,而泡沫温拌技术在成本方面具有明显优势,且没有添加剂生产过程的能耗与排放,可有效减少碳排放。泡沫温拌再生技术将厂拌热再生与泡沫温拌技术相结合,可实现路面废料的循环利用与节能减排[3-4]。

泡沫温拌再生沥青的存储稳定性对混合料性能及路面质量有重要影响。Bowers B. F.等利用 GPC(凝胶渗透色谱)和 FTIR(傅里叶变换红外光谱仪)研究旧沥青与新沥青混合后的形态,发现二者混合后呈现不均匀混合的状态[5]。Lopes M.等认为将温拌技术和回收料结合可能导致老化问题,老化过程模拟结果表明,相对于温拌沥青,温拌再生沥青具有良好的流变性能、更高的弹性模量和强度[6]。郭鹏等对新旧沥青融合程度进行量化分析,发现无扩散阶段温拌再生混合料中新旧沥青的混合效率为 29.8%,扩散阶段并保温 2 h 后混合效率约为 56.3%[7]。郝培文等的研究表明,与常规拌和方式相比,新旧沥青 100%融合条件下拌制的混合料,其低温性能、水稳定性及抗反射裂缝性能更优,高温性能较差,旧料掺量高于 30%时,热再生混合料设计中须考虑新旧沥青的融合程度[8]。张雪飞等对木焦油基再生沥青的热存储稳定性进行研究,发现经过热存储后,沥青的软化点、复数模量提高,稳定性和相位角降低,热存储时间的延长会削弱再生沥青的使用性能[9]。万宁等的研究表明,加热温度为 125 ℃、拌和温度为 190 ℃的条件下,旧沥青混合料的分散度最大,在该条件下配制的 AC-20C 热再生沥青混合料具有优良的路用性能[10]。近些年对温拌再生技术进行了较深入的研究,但对泡沫温拌再生沥青热存储特性的研究不多见。本文制备 5 种不同回收沥青掺量的泡沫温拌再生沥青试样进行离析试验、三大指标试验和动态剪切流变试验,选取软化点差值、延度比值、针入度差值、车辙因子差值对泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性进行评价。

1 试验概况

(1)试验原材料。路面废料为一级公路上面层铣刨料,路面使用年限约 5 年,铣刨速度为 6 m/s 左右。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混

合料试验规程》中旋转蒸发器法进行沥青回收，回收沥青的基本技术指标见表 1。

表 1 回收沥青的基本技术指标

项目	技术要求	测试结果
针入度(25 ℃、100 g、5 s)/(0.1 mm)	60～80	11.1
延度(15 ℃、5 cm/min)/cm	≥100	0.6
软化点/℃	≥46	74.2
密度(15 ℃)/(g·cm^{-3})	实测记录	1.028
溶解度(三氯乙烯)/%	≥99.5	99.5

(2) 泡沫沥青的室内制备。基质沥青采用 AH-70# 重交通沥青，其基本技术指标见表 2。采用德国维特根 WLB10 发泡试验机制备泡沫沥青，制备条件为发泡温度 145 ℃、发泡用水量 1.5%、发泡水温 30 ℃。

表 2 AH-70# 重交通沥青的基本技术指标

项目	技术要求	测试结果
针入度(25 ℃、100 g、5 s)/(0.1 mm)	60～80	70.9
延度(15 ℃、5 cm/min)/cm	≥100	167
软化点/℃	≥46	48.1
闪点(开口)/℃	≥230	251
含蜡量/%	≤3	1.86
密度(15 ℃)/(g·cm^{-3})	实测记录	1.032
溶解度(三氯乙烯)/%	≥99.5	99.8

(3) 泡沫温拌再生沥青的制备。将回收沥青分别按 0、20%、40%、60%、80%(基于回收沥青和泡沫温拌沥青的总质量)的掺量与泡沫沥青混合，在 140 ℃条件下高速(3 000 r/min)搅拌 45 min 制备泡沫温拌再生沥青(FWRA)，每类试样各制备 3 份。

(4) 热存储稳定性试样的制备。通过离析试验测试泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性。将加热至流动的试样倒入直径约 25 mm、长约 140 mm 的铝管中。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》，评估各种聚合物改性沥青在加工、生产、运输及存储过程中的稳定性，通常将沥青样品在 163 ℃烘箱中存储 48 h。本文主要评价泡沫温拌再生沥青在生产、运输和摊铺过程中的热存储稳定性，考虑到泡沫温拌再生混合料的施工温度约为 135 ℃，整个施工过程在 4 h 左右完成，将泡沫温拌再生沥青样品在 135 ℃烘箱中存储 4 h。待沥青固化后，将铝管剪成顶部、中部、底部三段，分别取顶部、底部试样进行软化点、延度、针入度试验和动态剪切流变试验。试样制备过程见图 1。

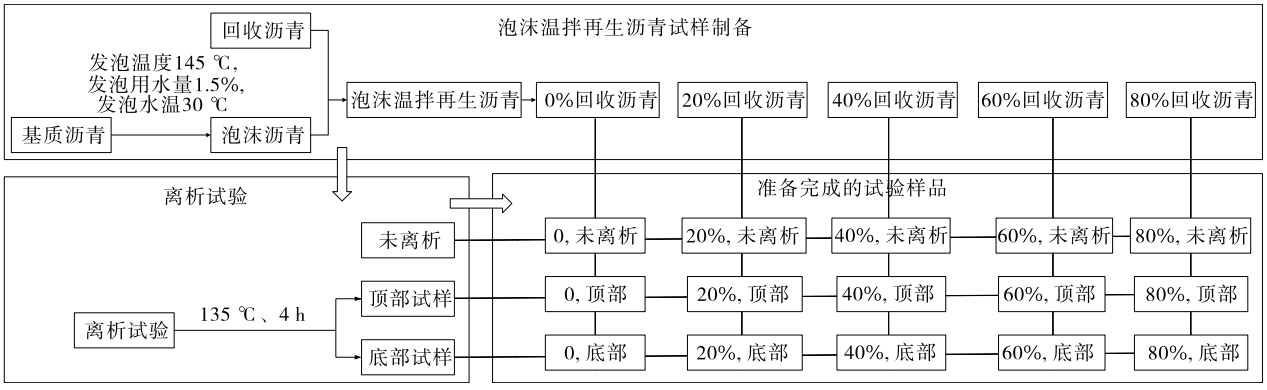


图 1 泡沫温拌再生沥青热存储稳定性试样的制备过程

(5) 试验内容。1) 沥青三大指标试验。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测试泡沫温拌再生沥青试样的软化点、延度、针入度。参考文献[11]，采用软化点差值、延度比值、针入度差值评价泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性。软化点差值为顶部软化点值减底部软化点值，取绝对值，差值越大，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性越差。延度比值为顶部延度值/底部延度值×100，比值越大，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性越差。针入度差值为顶部针入度值减底部针入度值，差值越大，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性越差。2) 动态剪切流变试验。采用 TA-AR1500EX 动态剪切流变仪对泡沫温拌再生沥青进行温度扫描试验(加载频率、控制应变分别为 10 rad/s、10%)，获得 30～80 ℃时车辙因子。采用车辙因子差值(底部车辙因子减顶部车辙因子)表征泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性[12]，差值越大，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性越差。

2　沥青三大指标试验结果分析

分别对进行离析试验的顶部、底部试样和未离析的试样进行软化点、延度、针入度试验，结果见图 2～7。

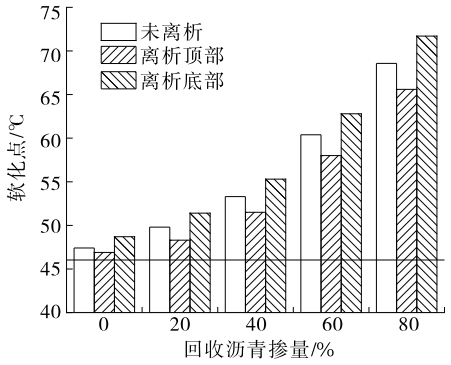


图 2　泡沫温拌再生沥青的软化点

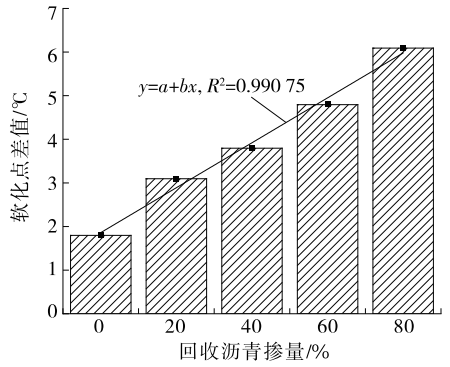


图 3　泡沫温拌再生沥青的软化点差值

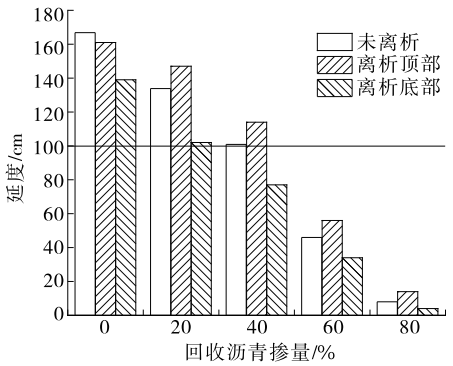


图 4　泡沫温拌再生沥青的延度

由图 2、图 4、图 6 可知：与未离析、回收沥青掺量为零的泡沫温拌再生沥青相比，未离析、回收沥青掺量为 60% 的泡沫温拌再生沥青的软化点增大 27%、延度和针入度分别降低 72%、48%，回收沥青的加入会较大程度改变泡沫温拌再生沥青的三大指标。无论是顶部试样还是底部试样，随着回收沥青掺量的增大，泡沫温拌再生沥青的软化点增大、延度

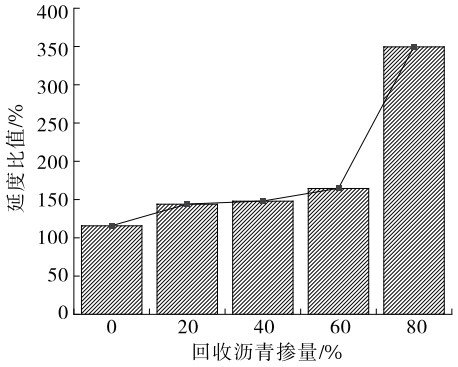


图 5　泡沫温拌再生沥青的延度比值

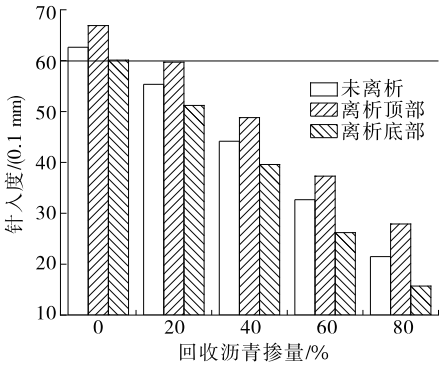


图 6　泡沫温拌再生沥青的针入度

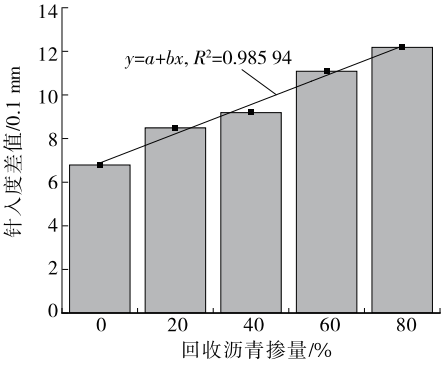


图 7　泡沫温拌再生沥青的针入度差值

和针入度降低，掺加回收沥青会使泡沫温拌再生沥青的硬度和黏度增大、延展性变差。回收沥青掺量对泡沫温拌再生沥青三大指标的影响显著。受离析试验存储条件的影响，顶部泡沫温拌再生沥青的针入度和延度大于底部，软化点小于底部。未进行离析试验的泡沫温拌再生沥青的三大指标介于进行离析试验泡沫温拌再生沥青顶部试样和底部试样之间。离析试验后，一些老化的回收沥青向泡沫温拌再生沥青的底部渗透，老化的回收沥青中沥青质含量增大，较硬较脆[13]，导致底部软化点更高，而针入度和延度降低。未离析、离析顶部、离析底部的泡沫温拌再生沥青的软化点均满足规范要求。回收沥青

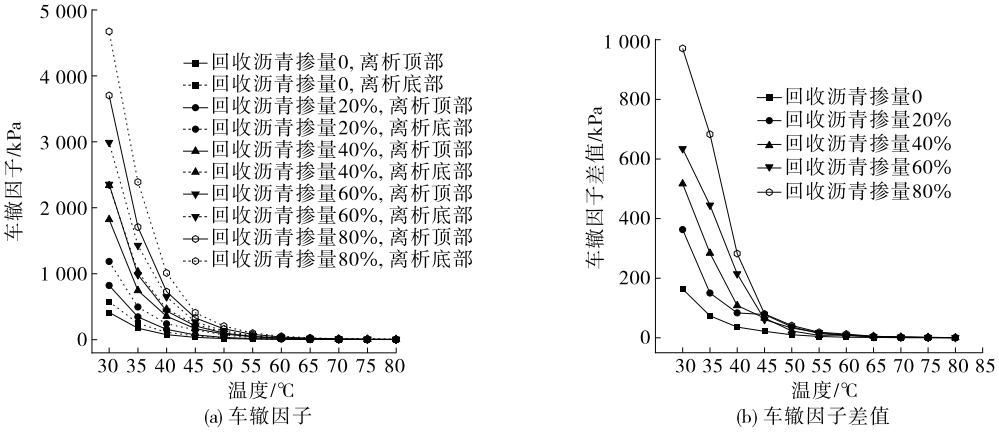
掺量为 40%时，未离析和离析顶部的泡沫温拌再生沥青的延度满足规范要求，而离析底部的延度小于规范要求值；回收沥青掺量为 60%、80%时，未离析、离析顶部、离析底部的泡沫温拌再生沥青的延度均不满足规范要求。掺入回收沥青后，未离析、离析顶部、离析底部的泡沫温拌再生沥青的针入度均不满足规范要求。

由图 3、图 5、图 7 可知：随着回收沥青掺量的增大，未离析、离析顶部、离析底部的泡沫温拌再生沥青的软化点差值、延度比值、针入度差值增大，回收沥青的掺入导致泡沫温拌再生沥青的热存储性能变差。软化点差值、针入度差值随着回收沥青掺量的增加几乎呈线性增大，相关性系数均在 0.9 以上。回收沥青掺量为 0～60%时，泡沫温拌再生沥青的延度比值变化不大，趋于稳定；回收沥青掺量达到 80%时，延度比值显著增大，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性变差。

3 动态剪切流变试验结果分析

不同回收沥青掺量下进行离析试验的顶部、底部试样的动态剪切流变试验结果见图 8。

由图 8 可知：1）随着温度的升高，泡沫温拌再生沥青的车辙因子降低，抗车辙能力减弱；任何温度下，随着回收沥青掺量的增加，泡沫温拌再生沥青的



(a) 车辙因子　　(b) 车辙因子差值

图 8 泡沫温拌再生沥青的车辙因子和车辙因子差值

车辙因子增大，其高温性能增强，如 40 ℃时回收沥青掺量从零增加至 80%时，顶部泡沫温拌再生沥青的车辙因子分别增加 110%、382%、492%、896%，底部的车辙因子分别增加 117%、322%、493%、826%。此外，底部的车辙因子大于顶部，如 40 ℃时回收沥青掺量从零增加至 80%时，底部车辙因子比顶部分别高 6.36%、15.70%、0.20%、7.80%，表明底部的泡沫温拌再生沥青具有更高的抗车辙性能，也表明存在一些老化的回收沥青向泡沫温拌再生沥青底部渗透。2）车辙因子差值随着回收沥青掺量的增加而增大，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性变差。温度为 30～50 ℃时，随着温度的变化，泡沫温拌再生沥青的车辙因子差值显著变化，顶部和底部的泡沫温拌再生沥青由于离析存储而产生的差异明显；温度高于 50 ℃时，泡沫温拌再生沥青的车辙因子差值随温度的变化基本保持稳定。

4 结论

（1）回收沥青掺量增加使泡沫温拌再生沥青的软化点增大、延度和针入度降低。回收沥青掺量大于 40%时，未离析、离析顶部、离析底部的泡沫温拌再生沥青的延度、针入度均不满足规范要求。

（2）离析试验后，一些老化的回收沥青向泡沫温拌再生沥青的底部渗透，导致底部泡沫温拌再生沥青的针入度、延度小于顶部，软化点和车辙因子大于顶部。未进行离析试验的泡沫温拌再生沥青的性能指标介于离析顶部和底部之间。

（3）掺加回收沥青后，泡沫温拌再生沥青的软化点差值、延度比值、针入度差值、车辙因子差值增大，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性变差。结合泡沫温拌再生沥青的三大指标及流变特性，回收沥青掺量大于 40%时，泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性明显变差。须采取适当的改进措施提高泡沫温拌再生沥青的热存储稳定性。

参考文献：

[1] 黄萍，廖祖文，张林鹏，等.高速公路服务区碳足迹分析：以江西省某高速公路服务区为例[J].能源研究与

管理，2021(2)：1-4＋9.
[2] GUO M，LIU H Q，JIAO Y B，et al.Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture：a state-of-the-art review[J].Journal of Cleaner Production，2020，266：121704.
[3] YU X，DONG F Q，DING G Y，et al.Rheological and microstructural properties of foamed epoxy asphalt[J].Construction and Building Materials，2016，114：215-222.
[4] XIAO F P，PUNITH V S，PUTMAN B J.Effect of compaction temperature on rutting and moisture resistance of foamed warm-mix-asphalt mixtures[J].Journal of Materials in Civil Engineering，2013，25(9)：1344-1352.
[5] BOWERS B F，HUANG B S，SHU X，et al.Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency through GPC and FTIR[J].Construction and Building Materials，2014，50：517-523.
[6] LOPES M，GABET T，BERNUCCI L，et al.Durability of hot and warm asphalt mixtures containing high rates of reclaimed asphalt at laboratory scale[J].Materials and Structures，2015，48(12)：3937-3948.
[7] 郭鹏，鲁承慧，谢凤章，等.微观尺度下温拌再生混合料新-旧沥青界面融合特性[J].中国公路学报，2021，34(10)：89-97.
[8] 郝培文，李洪祥，崔鹰翔，等.新旧沥青融合程度对热再生沥青混合料性能影响[J].硅酸盐通报，2021，40(11)：3837-3846.
[9] 张雪飞，蒋康，吴超凡，等.木焦油基再生沥青的热储存稳定性[J].中南林业科技大学学报，2021，41(10)：174-182.
[10] 万宁，张烁，胡林杰.厂拌热再生 RAP 的分散特性研究[J].公路与汽运，2022(6)：82-87.
[11] HU S M，WANG C H，DU Q L，et al.Research on aging properties of tourmaline modified asphalt[J].Advanced Materials Research，2012，535-537：1715-1718.
[12] DONG F Q，YU X，CHEN J，et al.Investigation on compatibility and microstructure of PCBs-modified asphalt[J].Journal of Applied Polymer Science，2017，134(25-26)：44798.
[13] 别长军.纳米材料对生物沥青流变性能和抗紫外老化性能影响研究：以重庆市为例[J].公路与汽运，2023(3)：51-56.

收稿日期：2024-01-22

****

(上接第 60 页)

(1) 在同等水灰比且添加适量减水剂的情况下，减小水泥掺量能增强混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度与弹性模量，使采用低水泥掺量配制高强度混凝土成为可能。运用同种填缝料并保证相同黏结强度时，填缝料黏结混凝土组合体的抗弯拉性能和疲劳性能增强。

(2) 高应力比下填缝料黏结混凝土组合体普遍破坏较快，低应力比下疲劳寿命较长，但试件疲劳性能差异较大，存在一定的不稳定性。运用同种填缝料并保证相同黏结强度时，混凝土的强度是决定黏结组合体疲劳性能的关键因素。

参考文献：

[1] 马健生，孙大伟，余地，等.装配式道路基层结构填缝材料配比设计及性能分析[J].公路，2017，62(10)：17-21.
[2] 颜祥程，翁兴中，杨立耀.机场水泥混凝土道面加铺层结构接缝传荷能力分析[J].公路，2015，60(8)：46-50.
[3] 周富杰.防治反射裂缝的措施及其分析[D].上海：同济大学，1998.
[4] 尚云龙.寒区混凝土路面接缝和裂缝变形量测定[J].低温建筑技术，2007，29(4)：142-143.
[5] 马健生，孙大伟，余地，等.装配式道路基层结构填缝材料配比设计及性能分析[J].公路，2017，62(10)：7-21.
[6] 田志伟，贾立夫，于兵杰，等.装配式道路基层结构接缝传荷性能及影响参数分析[J].森林工程，2023，39(2)：165-175.
[7] 郭高，郭梓烁，战宏宇，等.沥青路面装配式基层接缝的荷载传递性能研究[C]//中国科学技术协会，交通运输部，中国工程院，等.2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(上册).北京：人民交通出版社股份有限公司，2023：120-126.
[8] 曾春华，邹十践.疲劳分析方法及应用[M].北京：国防工业出版社，1991.
[9] 石小平，姚祖康，李华，等.水泥混凝土的弯曲疲劳特性[J].土木工程学报，1990，23(3)：11-22.
[10] 易华森.水泥冷再生混合料基层疲劳特性分析与预测[J].公路与汽运，2023(5)：93-96＋102.
[11] 刘加海，常介瑾.高强混凝土配制的研究[J].哈尔滨建筑工程学院学报，1994，27(3)：70-75.

收稿日期：2024-02-23