

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.05.046

# 再生剂在回收热拌沥青混合料生产中的应用研究综述

李雪连,叶峻宏,唐成,吕新潮 编译

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**目前,回收沥青路面材料(RAP)已广泛应用于生产热再生沥青混合料,但高含量RAP容易造成路面结构中过早产生疲劳破坏和低温缩裂,故通常在RAP中加入再生剂或复原剂,使老化的沥青恢复到类似于新沥青的状态。该文概述了10多种再生剂在高含量RAP沥青路面热再生中的应用情况;介绍了常用的3种再生剂使用方法:传统的高温拌和法、再生密封胶(RSM)法和胶囊封装法;归纳了再生剂的类型及其对老化沥青及混合料性能的影响,展望了RAP热再生沥青混合料的发展趋势。

**关键词:**再生沥青路面;回收;再生;评论

## 1 概述

随着科技的进步以及人们对环保和社会效益的关注,RAP广泛应用于沥青路面热再生。Chen等统计发现RAP是目前世界上回收率最高的材料之一。通过沥青厂进行热循环利用、现场热再生、现场冷再生和全厚度回收的RAP可用于新路面施工。

该文主要通过研究再生方法与不同再生剂(类型和剂量)对老化沥青和混合料特性的影响,并评价再生剂在再生路面结构中的使用效果。

沥青路面的再生一般通过在老化路面混合料中添加再生剂来实现。特别是当再生混合料的RAP含量较高时,通常必须采用再生剂。虽然沥青再生剂和沥青软化剂之间存在差异,但是再生剂有时也被称为软化剂或回收剂。软化剂用于降低沥青胶结料的黏度,再生剂则用于恢复沥青质/饱和分的比率。

Martins Zaumanis等发现必须仔细选择再生剂类型以满足其短期和长期性能标准。在短期标准中,再生剂必须迅速溶解到RAP胶结料并活化老化沥青。通过形成均匀混合料涂层来降低再生混合料的永久变形(车辙)敏感性以及避免减小摩擦系数。此外,再生剂很难完全扩散到RAP胶结料中,从而导致再生混合料不均匀。根据Carpenter的研究,再生剂的扩散过程包括4个步骤:①再生剂形成黏度很低的膜聚集

在集料颗粒的周围,这些集料颗粒被老化的沥青胶结料包围;②再生剂开始渗入老化胶结料中并使其软化;③再生剂渗透到老化的胶结料中,并使其内层和外层的黏度逐渐降低;④随着时间的推移,再生剂在大部分再生沥青膜薄层上达到平衡。

分析影响再生剂扩散率的因素主要有:①分子或团块的大小和形状;②分子间作用力;③温度;④扩散分子的结构刚度(对于弯曲和扭曲的抵抗);⑤可能存在的相对固定相的微观结构。

2003年,Karlsson和Isacsson利用红外光谱分析了温度、胶结料膜厚度、沥青的类型和胶结料的化学性质等不同参数对扩散率的影响,发现温度对扩散速率的影响最大。

在长期标准中,除了考虑胶结料的流变性质之外,还应尽量改变再生剂化学性质,以最大限度地降低疲劳和低温开裂风险。当采用较软胶结料时,要求对抗车辙性没有影响。同时,再生的沥青应该在集料之间能提供足够的黏结力和内聚力,以防止出现水损坏和松散。鉴于再生胶结料的老化速度比原胶结料快,故应评价再生沥青混合料的性能。

## 2 再生剂使用方法

研究统计发现有3种再生方法。目前,第一种方法也是沥青路面再生时最常见的方法,即将再生剂与

收稿日期:2020-03-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51308075);海南省交通运输厅科技计划项目(编号:JT20160898009);湖南省教育厅重点项目(编号:18A130);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(编号:201409,201516)

老化沥青混合料在高温下进行拌和;第二种方法被称为再生密封剂(RSM)法,即把再生剂直接喷洒在沥青路面的表面,通常在完成路面施工后3~4年使用。RSM法使用过程中的两个重要影响因素:①再生剂的有效渗透深度;②沥青胶结料的扩散效果。RSM法可以改善混合料性能;防止由水、汽油、柴油和风化作用而引起的破坏;甚至可以改善道路混合料的表面抗裂性能。当再生剂渗入到沥青混合料的孔隙中,可以防止胶结料氧化。然而,RSM法也存在一些不足。首先,再生剂必须渗透到路面所需要的深度,否则可能造成表面抗滑性能降低,从而导致交通开启延迟。RSM法的另一个不足则是可能污染环境;再生剂的第三个方法是胶囊封装法。在这种方法中,再生剂被封装在胶囊中(胶囊的工作机理,如图1所示)。使用该方法的前提是需要分析作用在胶囊表面上力的分布情况。从图1中可以看出:由于交通荷载(点1)的作用,混合料中的胶囊逐年弱化。沥青硬度和分布在胶囊表面的力同时改变,最终会导致胶囊破裂(点2)。因此,在点3处,胶囊受到恒定的交通荷载作用产生变形,此时再生剂从胶囊中溢出并扩散到胶结料中。

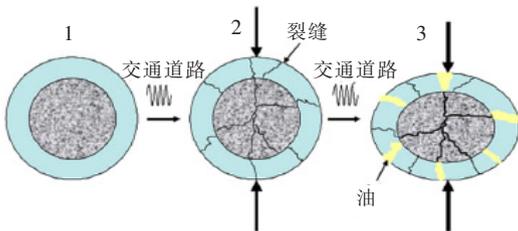


图1 胶囊方案

近来,随着微胶囊化工艺的发展,在微胶囊理论中,微胶囊破裂后释放的再生剂会渗入路面微裂纹中,以帮助路面愈合,见图2。同时,由于微胶囊的外壳通常由聚合物材料制成,所以其不仅能提供适当的强度

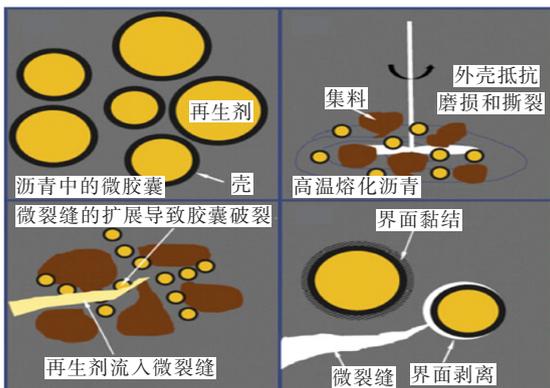


图2 在沥青路面中的微胶囊

和韧性,而且在高温下也表现出良好的热稳定性。

### 3 再生剂的种类

再生剂可以多种渠道获得,但其类型和剂量的选择非常重要。过量的再生剂会导致沥青膜从骨料中剥落等问题。再生剂的类型包括:植物油、废料衍生油、工程产品以及传统和非传统精炼厂基础油。良好的再生剂应适当地与老化沥青反应,从而生产高质量的再生胶结料。然而,Ping-Sien Lin等认为目前尚缺少关于再生剂是如何改善老化胶结料性质进而提高再生混合料质量的相关资料。

### 4 再生剂对老化沥青及混合料性质的影响

Simonen等研究发现,如果沥青质含量足够则采用植物再生剂效果最好。Martin Hugener等发现,植物油(VO)再生剂对于现场或厂拌都具有很好的效果。此外,还发现植物油再生剂可以激活老化沥青;Martins Zaumanis等比较了6种不同再生剂对老化沥青性能的影响。研究发现废植物油(WV油)与其他再生剂相比,降低老化沥青的性能等级和疲劳参数的效果更好,但必须使用促黏剂抵抗由WV油引起的高湿度敏感性。

Kuang等分析了高芳烃含量的轻质油(普通再生剂)和复合油(轻质油与含极性基团化合物的混合料)对老化沥青性能和微观结构的影响。研究发现:复合油再生剂可以通过与沥青质之间进行成分调节和化学反应来更有效地恢复老化沥青的胶体结构,从而改善重度老化沥青。使用该再生剂再生的沥青流变特性比其他普通再生剂的效果更好。

Shen等分析了再生剂和软沥青对含有不同含量RAP沥青混合料的影响。采用间接拉伸试验评价水敏感性,而采用沥青路面分析仪分析其抗车辙性能。研究发现:与使用软沥青的混合料相比,采用再生剂拌制的混合料具有更高的强度值和更小的车辙深度,并且拉伸强度比也略有不同。

Junan Shen等分析了以低沥青质含量(按重量2%计)的软沥青和不同含量沥青质组成的再生剂对老化沥青及其混合料性质的影响。通过研究得到了老化沥青的高温车辙性能参数( $G^* / \sin\delta$ )随着再生剂百分比的增加而线性下降。且疲劳参数( $G^* \cdot \sin\delta$ )也呈

线性变化,其值随着再生剂含量的增加而降低,具有更好的抗疲劳特性。混合料的动稳定度(DS)值结果显示:与原样混合料(未添加再生剂的混合料)相比,再生混合料的 DS 值显著降低。并且发现较低的 DS 值将会降低混合料的高温性能。然而,约束试件温度应力试验(TSRST)结果发现:当断裂温度从 $-22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,再生混合料的低温性能更好。当再生剂含量从 $0\%$ 增加到 $7.4\%$ 时,断裂强度增加 $0.5\text{ MPa}$ 。

Mogawer 等通过对高含量 RAP 的沥青及混合料性质的研究,分析了 BituTech RAP、SonneWar-mix RJT 和 SonneWarmix RJ 3 种不同再生剂的使用效果。研究发现使用再生剂可以增加沥青的不可恢复蠕变柔度。线性振幅扫描(LAS)试验结果表明:与原沥青相比,再生胶结料的疲劳性能得到了改善。由于再生剂在硬沥青中的扩散,将使混合料中的空气孔隙减少。此外,虽然再生剂可以减少混合料的开裂,但将对混合料的抗车辙性和水敏感性产生不利影响。

2014 年,Zaumanis 等进行了一项综合研究,评价不同再生剂对再生胶结料及混合料性质的影响。通过控制再生剂的剂量( $12\%$ ),研究了废植物油(WV 油)、废植物油脂(WV 油脂)、有机油、蒸馏塔尔油、芳烃油

(AO)和废机油(WEO)6 种不同再生剂的效果。各再生剂的性质见表 1。该研究发现:在中等温度( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,所有再生剂都可以将沥青黏度降低至原沥青的水平,但温度较高时沥青黏度会高于原沥青黏度。与石油再生剂相比,有机油只需要相对较低的剂量就能达到类似的软化效果。在添加 $12\%$ 的再生剂后,RAP 胶结料的和易性得到改善,但仍未达到原沥青的水平。通过 LAS 试验分析发现:使用有机油可以改善老化沥青的疲劳性能。其中,废植物油再生剂再生效果最好,并且产生的疲劳性能几乎与原沥青相同。当然,石油再生剂也不会降低老化沥青的疲劳性能。在所有再生剂中使用 $12\%$ 的有机油表现出最佳的综合性能,其次是 WV 油脂和蒸馏塔尔油。而 WEO 是最差的再生剂。因此,必须确定再生剂的最佳剂量,并使用相似再生剂对再生混合料进行补充研究。汉堡车辙试验结果表明:再生混合料具有较高的抗车辙性能。与 RAP 混合料相比,再生混合料的抗裂性能得到了改善,并且 WV 油和 AO 再生的混合料具有与原混合料相似的抗裂性。除 WEO 再生混合料外,其他再生混合料的抗疲劳性都比原混合料好。尽管在某些情况下必须使用抗剥落剂,但混合料的性能得到了改善。须注意的是,极性芳烃环结构具有致癌性,故其使用受到限制。

表 1 回收剂的性质和描述

回收剂	Kin. 黏度( $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ )/ ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	相对密度	工程 <sup>a</sup> 或 通用 <sup>b</sup>	石油或 有机	精制或 废弃物	分子结构	极性
WV 油	5.17	0.924	通用	有机	废弃物	环和链	无 <sup>c</sup>
WV 油脂	4.28	0.924	通用	有机	废弃物	环和链	轻度
有机油	5.43	0.947	工程	有机	精制	环和链	强 <sup>d</sup>
蒸馏塔尔油	5.60	0.950	通用	有机	精制	环和链	轻度
废机油	3.86	0.872	通用	石油	废弃物	脂肪	轻微
芳烃油	9.20	0.995	通用	石油	精制	芳烃环	强
纯沥青	474.00	1.020	通用	石油	精制	环和链	混合 <sup>e</sup>

注:a 指专有配方,可通过受控销售网络优化性能;b 指各种供应商和制造商的全球性非专利石油;c 指极性化合物极少的产品;d 指极性化合物比例含量高的产品;e 指参考含不同极性程度的油馏分混合料构成沥青胶浆。

Chen 等使用不同含量(再生胶结料重量的 $0\%$ 、 $5\%$ 和 $10\%$ )的再生剂、废食用油和棉花籽油进行了对比研究。研究发现:使用再生剂的再生胶结料的抗车辙性能( $G^*/\sin\delta$ )略有降低。总体而言,使用再生剂的再生胶结料比使用废食用油和棉花籽油的再生胶结料具有更好的弹性恢复能力和抗流动变形能力。且废食用油和棉花籽油生产 PG-64 沥青的最佳剂量为

$5\%$ 。

Zaumanis 等使用 9 种不同的再生剂对含 RAP 的沥青及混合料的性质进行了试验分析。使用的再生剂是由蒸馏塔尔油、WEO、WEO 底渣、WEO+FT 蜡、环烷基熔剂油、芳烃油(AO)、石蜡原油、精炼牛脂和有机油。研究证明:在这些组成成分中,精炼牛脂在降低老化沥青黏度方面最有效。另外,使用 WEO 底渣

会使黏度值升高,这将造成拌和及压实过程中的温度升高。混合料的低温性能用间接拉伸蠕变柔量和间接拉伸强度来评价。结果表明:在大多数情况下,混合料的低温性能通过添加再生剂能够得到改善。

Im 等研究了3种商业再生剂(R1,R2和R3)对含19%RAP的HMA混合料性能和工程性质的影响。在这项研究中,再生剂R1和R2被直接添加到原沥青中,而R3则先与再生材料混合。研究发现:使用再生剂可以提高混合料的抗裂性、抗变形能力和水稳定性。HWTT的结果表明:添加了R2再生剂的混合料车辙深度最低,为6.05 mm。但是,根据罩面试验(OT),添加了R3的混合料具有最好的抗裂性,其次是添加了R2和R1的再生混合料,破坏循环次数分别为80、60和40次。

Asli 等分析了不同百分比(沥青重量的1%~5%)的废食用油对老化沥青性能的影响。采用针入度、软化点和黏度试验来评价老化和再生胶结料的物理性质。结果显示:在含量为40/50的再生胶结料中,由3%~4%的废食用油再生的沥青可以接近80/100原沥青的物理性能。另外,化学分析发现:与老化沥青相比,使用废食用油再生剂后,沥青质与饱和分比例会降低。

Dony 等将占总沥青重量40%的芳烃油(AO)、植物油(VO)和软沥青(SB)(160/220渗透等级)作为再生剂进行了研究。所有沥青均通过旋转薄膜烘箱(RTFOT)法和加速压力老化(PAV)法进行老化。老化沥青的沥青质含量通常取决于沥青的类型。根据结果,假设RAP胶结料可以使用选定的再生剂进行高效再生。对于所有沥青来说,复数模量( $G^*$ )随温度升高而减小,而相位角( $\delta$ )随温度升高而增加。此外,再生胶结料比原沥青具有更好的疲劳性能。

Huang 等分析了乳液、饱和分和植物油再生剂对3种沥青(AAA-1、AAD-1和AAM-1)的物理性质和流变性质的影响。研究发现:植物油和饱和分的再生剂对高度老化沥青的流动性改善能力相似。与其他类型的再生剂相比,植物油再生剂能够改善AAD-1沥青的抗疲劳性。对于AAM-1沥青,使用乳液再生剂比其他两种类型的再生剂能更有效地改善高度氧化沥青的疲劳性能。此外,植物油再生剂对老化沥青的高温稳定性改善效果最好。

Nayak 等分析了复合蓖麻油(30%焦炉煤气冷凝物 and 70%蓖麻油)和水黄皮油再生剂的使用效果。使用复合油可以增加再生胶结料中的饱和烃,并可将沥

青质溶解在再生沥青中。试验时,再生剂采用了3种剂量(5%、10%和15%)。研究表明:掺10%再生剂的再生沥青具有与原沥青类似的抗车辙性能。且无论再生剂剂量多少,所有再生沥青的抗疲劳寿命都比原沥青长。此外,由水黄皮油再生的沥青具有更好的疲劳性能。总之,这两种类型油在剂量为5%时,疲劳和车辙性能最好。

最近,Mogawer 等研究了石蜡油、芳烃油和有机油再生剂(掺量为沥青重量的9%)在含50%RAP的混合料中的效果。弯曲梁疲劳试验结果表明:所有再生剂都可以改善沥青混合料抗疲劳性能,甚至比用PG 58-28和PG 64-28的沥青效果更好。石蜡油再生混合料的疲劳寿命最高。除了疲劳性能得到改善外,再生混合料通常强度较低、刚度较小而蠕变速率较大。

## 5 讨论

综上所述,再生剂的最佳剂量应根据沥青及混合料性能试验确定。再生剂用量不足可能对恢复废沥青性能毫无效果,而过量也可能对沥青胶结料不利。例如,研究表明再生剂与沥青重量比超过10%,再生剂将对沥青性能产生不利影响。

然而,目前再生剂的再生机制还需进一步探索。沥青和混合料性能试验在一定程度上可以评价再生混合料的性质特征,但是,再生沥青的化学性能特征需采用更先进的试验(如:化学试验等)评价。研究再生沥青的理化性质数量也有限,仍需展开进一步研究。

## 6 结论

(1) 再生剂通常用于高含量RAP再生沥青路面中,其种类和剂量应根据路面材料特点及其老化程度进行选择。

(2) 添加再生剂时,应评价其对再生沥青混合料的短期和长期性能的影响。

(3) 再生剂密封材料(RSM)法通常在完成路面施工后3~4年使用,其可以有效改善混合料性能。

(4) 微胶囊封装法是通过交通荷载来控制再生剂缓慢释放速率以软化沥青,达到修复路面微裂纹的效果。

(5) 不同种类再生剂对沥青及沥青混合料性能的影响不完全相同,但通常再生剂能够有效改善沥青流变性,提高再生混合料的抗裂性、水稳定性、抗车辙性

能和疲劳性能。

### 参考文献:

- [1] Taher Baghaee Moghaddam, Hassan Baaj. The Use of Rejuvenating Agents in Production of Recycled Hot Mix Asphalt: A Systematic Review[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2016, 114: 805—816.
- [2] Chen Jian—Shiuh, Wang Ching—Hsiung, Huang Chien—Chung. Engineering Properties of Bituminous Mixtures Blended with Second Reclaimed Asphalt Pavements (R<sup>2</sup>AP)[J]. *Road Mater. Pavement*, 2009, 10(Sup 1): 129—149.
- [3] Martins Zaumanis, Rajib B. Mallick, Robert Frank. 100% Recycled Hot Mix Asphalt: A Review and Analysis[J]. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2014, 92: 230—245.
- [4] S. H. Carpenter, J. R. Wolosick. Modifier Influence in the Characterization of Hot Mix Recycled Material[J]. *Transportation Research Record*, 1980(777).
- [5] Robert Karlsson, Ulf Isacson. Application of FTIR—ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion[J]. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2003, 15 (2): 157—165.
- [6] Lin Ping—Sien, Wu Tung—Lin, Chang Chi—Wen, et al. Chang Effects of Recycling Agents on Aged Asphalt Binders and Reclaimed Asphalt Concrete[J]. *Mater. Struct.*, 2011, 44 (5): 911—921.
- [7] Markus Simonen, Timo Blomberg, Terhi Pellinen, et al. Physicochemical Properties of Bitumens Modified with Bioflux[J]. *Road Mater. Pavement Des.*, 2013, 14 (1): 36—48.
- [8] Martin, Hugener, Manfred, et al. Cold Asphalt Recycling with 100% Reclaimed Asphalt Pavement and Vegetable Oil—Based Rejuvenators[J]. *Road Mater. Pavement Des.*, 2014, 15(2): 239—258.
- [9] Martins Zaumanis, Rajib B. Mallick, Robert Frank. Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures[J]. *Transp. Res. Rec.*, 2013, 2370(1): 17—25.
- [10] Kuang Dongliang, Yu Jianying, Chen Huaxin, et al. Effect of Rejuvenators on Performance and Microstructure of Aged Asphalt[J]. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, 2014, 29 (2): 341—345.
- [11] Shen Junan, Amirkhanian Serji, Jennifer Aune Miller. Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement[J]. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2007, 19 (5): 376—384.
- [12] Shen Junan, Amirkhanian Serji, Tang Boming. Effects of Rejuvenator on Performance—Based Properties of Rejuvenated Asphalt Binder and Mixtures[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2007, 21(5): 958—964.
- [13] Walaa S. Mogawer, Abbas Booshehrian, Siavash Vahidi, et al. Evaluating the Effect of Rejuvenators on the Degree of Blending and Performance of High RAP, RAS, and RAP/RAS Mixtures [J]. *Road Mater. Pavement Des.*, 2013, 14(Sup 2): 193—213.
- [14] Martins Zaumanis, Rajib B. Mallick, Robert Frank. Evaluation of Different Recycling Agents for Restoring Aged Asphalt Binder and Performance of 100% Recycled Asphalt[J]. *Mater. Struct.*, 2015, 48 (8): 2475—2488.
- [15] Chen Meizhu, Xiao Feipeng, Putman Bradley, et al. High Temperature Properties of Rejuvenating Recovered Binder with Rejuvenator, Waste Cooking and Cotton Seed Oils[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2014, 59: 10—16.
- [16] Im Soohyok, Zhou Fujie, Lee Robert, et al. Impacts of Rejuvenators on Performance and Engineering Properties of Asphalt Mixtures Containing Recycled Materials [J]. *Constr. Build. Mater.*, 2014, 53(28): 596—603.
- [17] TxDOT Designation: TEX—242—F, Hamburg Wheel—Tracking Test [S]. *Constr. Div, Texas Department Trans*, 2009.
- [18] Hallizza Asli, Esmaeil Ahmadiania, Majid Zargar, et al. Investigation on Physical Properties of Waste Cooking Oil—Rejuvenated Bitumen Binder[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2012, 37: 398—405.
- [19] A. Dony, J. Colin, D. Bruneau, et al. Reclaimed Asphalt Concretes with High Recycling Rates: Changes in Reclaimed Binder Properties According to Rejuvenating Agent[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2013, 41: 175—181.
- [20] Huang Shin—Che, Qin Qian, R. Will Grimes, et al. Influence of Rejuvenators on the Physical Properties of RAP Binders[J]. *J. Test. Eval.*, 2015, 43 (3): 594—603.
- [21] P. Nayak, U. C. Sahoo. A Rheological Study on Aged Binder Rejuvenated with Pongamia Oil and Composite Castor Oil[J]. *Int. J. Pavement Eng.*, 2017, 18(7): 595—607.
- [22] Walaa S. Mogawer, Alexander Austerman, Reynaldo Roque, et al. Ageing and Rejuvenators: Evaluating Their Impact on High RAP Mixtures Fatigue Cracking Characteristics Using Advanced Mechanistic Models and Testing Methods[J]. *Road Mater. Pavement Des.*, 2015, 16 (Sup 2): 1—28.