**温-热拌再生剂对再生沥青及其混合料性能影响研究**

**李韦剑1 何兆益2\***

（重庆交通大学 土木工程学院1 重庆 400074；重庆交通大学 交通运输学院2 重庆 400074）

**摘 要** 为对比研究温拌与热拌再生剂对再生沥青及其混合料的性能的影响，本文通过三大指标、布氏粘度、沥青剪切流变实验以及马歇尔稳定度、残留水稳定度等室内实验对两种受不同再生剂影响的沥青材料性能进行了探究，结果表明，沥青胶结料常规性能方面：温拌再生剂可以与热拌再生剂同等程度恢复老化沥青的针入度和软化点，温拌再生剂可以更有效恢复延度，同时使再生沥青粘度低于新沥青，有效降低拌合温度。力学性能方面：温拌再生剂比热拌再生剂更大程度恢复了老化沥青的复数模量，但会导致沥青粘-弹性比例失调。混合料方面：温拌再生沥青混合料水稳定性评价高于热拌再生沥青混合料，低温及高温性能评价低于热拌再生沥青混合料。

**关键词** 道路工程 沥青混合料 温拌再生剂 热拌再生剂 路用性能

**中图法分类号** U416； **文献标志码** A

**Study on the influence of warm and hot regenerant on the performance of asphalt and mixture**

Li Weijian1 He Zhaoyi**2\***

（Civil Engineering College，Chongqing Jiaotong University1，Chongqing 400074，China；

Transportation College，Chongqing Jiaotong University2，Chongqing 400074，China)

**[Abstract]** In order to study the influence of warm mixing and hot mixing regenerants on the performance of recycled asphalt and its mixtures, the performance of two kinds of asphalt materials affected by different regenerants was studied through three major indexes, Brinell viscosity, shear rheological test of asphalt, Marshall stability and residual water stability. In terms of conventional performance of asphalt binder, warm mix regenerant can restore penetration and softening point of aging asphalt to the same degree as hot mix regenerant, and warm mix regenerant can restore ductility more effectively, at the same time, make the viscosity of regenerated asphalt lower than new asphalt, and effectively reduce mixing temperature. Mechanical properties: Warm mix regenerant restores the complex modulus of aging asphalt to a greater extent than hot mix regenerant, but it will lead to the imbalance of asphalt viscous-elastic ratio. Mixture: The water stability evaluation of Warm-Mix recycled asphalt mixture is higher than that of Hot-Mix recycled asphalt mixture, and the low and high temperature performance evaluation is lower than that of Hot-Mix recycled asphalt mixture.

**[Key words]** road engineering asphalt mixture warm mix regenerant hot mix regenerant road performance

随着沥青再生技术的发展，温拌再生沥青技术应运而生，该技术的应用可以降低混合料的拌合温度、提高RAP的掺量，既降低了能源的消耗，减少了污染物的排放，也可控制沥青的二次老化，提高再生沥青混合料性能。

已有众多学者对沥青温拌再生技术进行了研究：郭乃胜等对影响温拌再生沥青混合料性能的因素进行了分析，认为温拌剂和RAP掺量是主要影响因素；刘唐志等将Evotherm温拌技术应用于温拌再生，研究了RAP掺量与沥青混合料性能的关系，认为随着RAP掺量的提高，沥青混合料水稳定性先增大后减小[1]；李立寒等研究了软-硬复配温拌再生沥青混合料的性能，认为此技术可以使再生沥青混合料满足路用性能，且疲劳性能明显占优[2，3];陈静云等研究了利用SHRP方法对再生沥青性能进行评价，认为再生沥青高温稳定性、耐疲劳性和抗裂性较好[4]；张遥等评价了生物型再生剂的作用效果，认为该再生剂提高了再生沥青混合料的低温、水稳定性，降低了高温稳定性[5]。综上所述，对再生技术已有较详尽的研究，但对热拌和温拌再生剂性能对比的研究仍较少。本文基于表面活性温拌再生剂，对比评价热拌再生剂与温拌再生剂对沥青胶结料及混合料性能的影响。

1再生剂技术指标

温拌再生剂为自主开发的A型温拌再生剂，试验确定最佳掺量为7%，热拌再生剂选择最佳掺量相同的B型热拌再生剂，温拌再生剂基础性能如表1：

表1 再生剂技术指标

Table 1 Technical index of regenerant

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 再生剂 | 135℃粘度/Pa·s | RTFOT前后质量损失/% | RTFOT前后粘度比 | 闪点/℃ | 相对密度 |
| 温拌再生剂 | 0.01 | 1.37 | 1.26 | 245 | 1.060 |
| 热拌再生剂 | 0.084 | 1.7 | 1.65 | 263 | 1.042 |
| 技术要求 | 0.01~0.2 | ＜4 | ≤3 | ≥220 | 实测 |

2再生沥青胶结料性能

2.1再生沥青常规性能指标

目前对于温拌再生沥青性能的研究多是探讨温拌剂或温拌再生剂对于老化沥青性能的改善，但是由于温拌再生剂的设计作用范围不仅限于RAP中的老化沥青，其中表面活性组分对新沥青同样起到改性作用，且新-旧沥青共同存在且相互渗透的情况更为符合沥青路面再生工程中的实际情况，因此选用混合沥青（将新沥青与老化沥青以6:4的比例混合，与配合比设计结果一致，为模拟实际条件下RAP与新沥青的接触与混合条件，混合沥青选用搅拌工艺制成），以此为基础研究温拌再生剂对再生沥青混合料中全部沥青性能的影响，各沥青三大指标测定结果表2：

表2 沥青样品三大指标实验结果

Table 2 Experimental results of three major indicators of asphalt samples

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 沥青  性能  指标 | 70号基  质沥青 | 老化70  号沥青 | 混合沥青 | 混合沥青 | 混合沥青 |
| 不加再生剂 | 不加再生剂 | 不加再生剂 | 温拌再生剂 | 热拌再生剂 |
| 25℃针入度/0.01mm | 67.9 | 23.7 | 43.89 | 71.86 | 67.33 |
| 软化点/℃ | 54.6 | 77.4 | 68.66 | 51.74 | 53.00 |
| 10℃延度/cm | 28.5 | 4 | 10.51 | 21.10 | 16.40 |

由实验结果可知，70号基质沥青经过老化后，针入度及延度下降，软化点升高，新沥青的掺入可以使三大指标一定程度恢复，添加再生剂后，针入度和软化点的恢复程度较高，指标基本恢复至老化前水平，添加热拌再生剂后，延度的恢复程度仅有58.9%，改用温拌再生剂，可以使该比例提高至71.0%，分析认为，基质沥青经过老化，与新沥青存在较大组分差别，难以相互渗透，混合工艺为搅拌而非剪切时，两者难以混溶，旧沥青表面的吸收沥青及表层有效沥青较少、多为表层无效沥青[6]，导致混合沥青性能较基质沥青大幅降低，热拌再生剂与温拌再生剂可通过对旧沥青调节还原，使针入度与软化点恢复；温拌再生剂中的表面活性组分作用于新旧沥青表面，促进新、旧沥青相互渗透，性能上表现为沥青延度恢复比例提高，温拌再生剂对混合沥青延度恢复的作用优于热拌再生剂。

2.2再生沥青SHRP性能指标

2.2.1粘度

使用Brookfield DV-II旋转粘度仪，以50 dr/min的速度测试在95 ℃及135 ℃沥青的粘度，结果见表3：

表3 沥青粘度实验结果

Table 3 Experimental results of asphalt viscosity

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 沥青  温度 |  | 沥青样品的粘度/Pa·S | | | |
| 70号基质沥青 | 老化70号沥青 | 混合沥青 | 混合沥青 | 混合沥青 |
|  | 不加再生剂 | 不加再生剂 | 不加再生剂 | 温拌再生剂 | 热拌再生剂 |
| 95℃ | 3.682 | 16.844 | 10.788 | 3.272 | 3.864 |
| 135℃ | 0.356 | 2.94 | 1.710 | 0.336 | 0.464 |

实验结果显示，70号基质沥青老化后，95℃及135℃粘度上升了457.5%和82%，将新旧沥青混合后粘度产生一定程度的恢复，但仍大幅高于老化前；温拌再生剂与热拌再生剂均使混合沥青粘度大幅降低，温拌再生剂降粘幅度较高，掺入后混合沥青粘度低于新沥青。分析认为，热拌再生剂掺入后，轻质油分稀释了混合料沥青，导致沥青粘度大幅下降，热拌再生剂降粘效果主要由于沥青的稀释，温拌再生剂掺入后，表面活性组分充分作用于新沥青，老化沥青，降低了粘度，温拌再生剂降粘效果高于热拌再生剂于粘度主要源于表面活性组分的降粘效果。

2.2.2流变特性

本文对沥青流变特性的测定采用动态剪切流变仪，模式为温度扫描，温度为40~64℃，温度梯度为6℃，应力控制大小为0.12 Pa，实验频率为10 Hz，试样厚度为1 mm，直径为25 mm，测定沥青样品复数剪切模量、相位角δ，各沥青样品实验结果如表4所示：

表4 沥青DSR实验结果

Table 4 DSR experimental results of asphalt

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 70号基质沥青 | δ/° | /Pa | /Pa | /Pa | 抗车辙因子/Pa |
| 76.61 | 34767.1 | 8053.0 | 33821.6 | 35739.0 |
| 78.46 | 15067.7 | 3015.5 | 14762.9 | 15378.8 |
| 80.24 | 6566.2 | 1113.1 | 6471.1 | 6662.6 |
| 80.36 | 2950.3 | 494.1 | 2908.6 | 2992.5 |
| 80.44 | 1458.3 | 242.2 | 1438.1 | 1478.9 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 老化沥青 | δ/° | /Pa | /Pa | /Pa | 抗车辙因子/Pa |
| 72.75 | 211735.3 | 62790.9 | 202210.6 | 221708.6 |
| 76.46 | 84700.6 | 19831.6 | 82346.2 | 87122.3 |
| 78.17 | 33882.9 | 6948.9 | 33162.7 | 34618.8 |
| 79.42 | 13560.7 | 2489.5 | 13330.2 | 13795.2 |
| 80.07 | 5430.2 | 936.4 | 5348.8 | 5512.8 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 混合沥青 | δ/° | /Pa | /Pa | /Pa | 抗车辙因子/Pa |
| 75.14 | 123251.20 | 31607.84 | 119129.35 | 127515.66 |
| 79.42 | 49302.90 | 9056.47 | 48463.97 | 50156.35 |
| 80.33 | 19729.28 | 3312.72 | 19449.17 | 20013.42 |
| 82.99 | 7900.43 | 964.04 | 7841.39 | 7959.91 |
| 82.23 | 3164.49 | 427.95 | 3135.42 | 3193.83 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 混合沥青温拌再生剂 | δ/° | /Pa | /Pa | /Pa | 抗车辙因子/Pa |
| 78.62 | 30543.60 | 6026.71 | 29943.12 | 31156.13 |
| 80.99 | 12227.10 | 1914.90 | 12076.23 | 12379.87 |
| 83.56 | 4898.11 | 549.16 | 4867.23 | 4929.19 |
| 85.12 | 1962.14 | 167.06 | 1955.01 | 1969.29 |
| 87.28 | 784.95 | 37.25 | 784.07 | 785.84 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 混合沥青热拌再生剂 | δ/° | /Pa | /Pa | /Pa | 抗车辙因子/Pa |
| 74.31 | 53197.50 | 14386.33 | 51215.31 | 55256.41 |
| 77.00 | 21282.86 | 4713.02 | 20754.46 | 21824.72 |
| 79.76 | 8516.14 | 1549.91 | 8373.91 | 8660.78 |
| 80.34 | 3413.04 | 546.64 | 3368.98 | 3457.67 |
| 81.80 | 1371.02 | 175.35 | 1359.76 | 1382.38 |

由上表可见，各沥青样品相位角δ均随温度升高而增大，复数模量随温度升高而降低，沥青粘性提升、弹性减小，抗变形能力减弱；基质沥青、老化沥青及混合沥青在40℃下的弹-粘性比分别为0.238、0.311、0.265、64℃下分别为0.168、0.175、0.136；各温度下老化沥青复数模量及抗车辙因子/sinδ均为最高，抗变形能力最强，其后依次为混合沥青、掺入热拌再生剂的混合沥青、基质沥青、掺入温拌再生剂的混合沥青；混合沥青掺入热拌再生剂后，40℃时弹-粘性比例为0.281，64℃时弹-粘性比例0.129，掺入温拌再生剂后，40℃时弹-粘性比例为0.201，64℃时弹-粘性比例0.047；随温度升高，老化沥青弹性模量下降慢于基质沥青，粘性模量下降速率快于基质沥青。分析认为，沥青老化后，弹性增加，粘性降低，剪切变形中，因变形产生机械能所占比例上升，沥青内部摩擦产生热能占比降低，抗变形能力增加，由粘-弹性体向弹性体转变，温拌再生剂的掺入使老化沥青力学性能向老化前还原，复数模量减小，较高温度下再生沥青的弹性占比降低，是因为温拌再生剂加速了混合沥青在升温条件下弹性向粘性的转化，使沥青弹性性能损失较大；混合沥青中添加热拌再生剂，沥青弹性模量、粘性模量降低幅度虽少于温拌再生剂，但未出现高温下的弹-粘性比例失调，测试所有温度下，弹-粘性比例更加接近新沥青，由此可见热拌再生剂对沥青的粘-弹性起到了较好的恢复作用，认为在再生过程中，热拌再生剂对沥青力学性能的影响优于温拌再生剂。

3再生沥青混合料性能

RAP取自G60高速贵州麻江至凯里段，为防止RAP结团、确保RAP均匀性，对其进行破碎筛分，分档抽提确定级配[7]，再生沥青混合料设计级配为AC-16，RAP掺量40%，新料为0~10 mm，10~20 mm石灰岩及石灰岩矿粉，使用马歇尔设计方法，确定最佳油石比为4.9%。

3.1再生沥青混合料高温稳定性

为评价再生沥青混合料的高温条件下抵抗永久变形的能力，进行室内车辙实验，分别对掺入情况不同的再生沥青混合料进行测定，轮压为0.7 MPa，实验温度60℃，碾压速度42 次/min，碾压时间60 min，结果见表5：

表5 再生沥青混合料动稳定度实验结果

Table 5 Experimental results of dynamic stability of recycled asphalt mixture

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 再生方式 | 再生沥青混合料 | | | 规范值 |
|  | 热拌再生剂 | 温拌再生剂 |
| 动稳定度/  次/mm | 2441 | 2172 | 1826 | >800 |

由上表可知，加入RAP后的沥青混合料动稳定度较高，即沥青老化后，抗变形能力提高，与动态剪切流变实验结论相符，热拌与温拌再生剂作用于沥青混合料，使动稳定度分别降低11%及25.2%，仍高于规范的要求，相比热拌再生剂，温拌再生剂使沥青弹性降低，且在沥青与集料的结合中，降低了沥青膜厚度，温拌再生剂的掺入使沥青动稳定度损失较大，这与动态剪切流变实验所得结果一致。

3.2再生沥青混合料水稳定性

本文通过测定再生沥青混合料在60℃下浸水30 min及48 h的马歇尔稳定度，评价沥青混合料的水稳定，实验结果如表6所示：

表6 再生沥青混合料水稳定性实验结果

Table 6 Experimental results of water stability of recycled asphalt mixture

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 再生方式 | 浸水马歇尔残留稳定度实验 | | |
| MS |  | /% |
| 不加再生剂 | 9.14 | 7.32 | 80.08 |
| 热拌再生剂 | 9.28 | 7.85 | 84.59 |
| 温拌再生剂 | 9.53 | 8.22 | 86.25 |

由上表可知，采用各再生方式混合料浸水30 min及48 h后，稳定性大小均为添加温拌再生剂最高，之后分别为添加热拌再生剂、不添加再生剂，三组稳定性在浸水30 min时差异较小，但在浸水48h后则出现一定区别，添加再生剂的沥青混合料残留稳定度较高，其中，添加温拌再生剂略高于添加热拌再生剂。结合前文的分析结果认为，新旧沥青中存在的性质差异，影响了两者的互相渗透与溶解，未添加再生剂的沥青混合料，新旧沥青混溶程度较低，结合薄弱，老化沥青弹性模量高，粘性模量低，与集料的粘附强度低，在长时间的高温与水浸泡耦合作用下，再生沥青混合料中存在的液-液，固-液薄弱结合面失稳，导致了沥青混合料水稳定性下降[8]，添加热拌再生剂后，部分恢复了老化沥青性能，因而残留稳定度上升，添加温拌再生剂后，作用于老化沥青，起到了恢复老化沥青性能的作用，也作用于旧沥青与新集料的结合面，降低了集料表面吸附能，促进了结合面的稳定[9\_11]，宏观表现为添加温拌再生剂的再生混合料水稳定性更好。

3.3再生沥青混合料低温性能

本文通过低温小梁弯曲试验方法，研究再生沥青混合料低温抗裂性能，试件为250mm×30 mm×35 mm棱柱型小梁试件，跨径200 mm，试验温度为-10℃，实验结果如表7所示：

表7 再生沥青混合料低温稳定性实验结果

Table 7 Experimental results of low temperature stability of recycled asphalt mixture

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 再生混合料类型 | 破坏弯拉强度/MPa | 最大破坏弯拉应变/µε | 破坏弯曲劲度模量  /MPa | 规范要求弯拉应变  /µε |
| 不加再生剂 | 9.33 | 2834 | 3292.17 | ≥2000 |
| 热拌再生剂 | 9.13 | 3328 | 2743.39 |
| 温拌再生剂 | 9.04 | 3071 | 2943.67 |

由实验结果可知，三种再生沥青混合料均可以满足规范要求，最大破坏弯拉应变由大到小为热拌再生剂、温拌再生剂、不添加再生剂；破坏弯曲进度模量由大到小为不添加再生剂、温拌再生剂、热拌再生剂。分析认为，温拌和热拌再生剂作用于再生沥青混合料，可以改善低温性能，温拌再生剂虽对沥青低温延度改善明显，但导致沥青抗变形能力降低，热拌再生剂对低温性能的改善优于温拌再生剂；两种再生剂的掺入均降低了再生沥青混合料的弯曲劲度模量，这是由于再生剂使老化沥青软化，提高了沥青在低温状态下的应力松弛能力。

结论：

(1)在温拌再生剂的性能研究中，采用新-旧混合沥青实验模型与再生沥青在混合料中的工作情况较接近。

（2）相同掺量下的温拌再生剂与热拌再生剂对针入度及软化点的恢复能力相似，但温拌再生剂恢复延度的能力较好。

（3）热拌再生剂可以恢复老化沥青复数模量及沥青弹性模量与粘性模量比例，温拌再生剂在恢复老化沥青复数模量的同时，随着温度升高，会使沥青弹性严重损失、弹-粘性比例失调。

4.热拌、温拌再生沥青混合料的高温、低温及水稳定性能均满足规范要求，温拌再生剂作用于再生沥青混合料较大程度降低了动稳定度，认为热拌再生沥青混合料的高温、低温性能较好，温拌再生沥青水稳定性能略优。

参考文献：

1刘志唐,朱洪州,李佳坤.温拌热再生沥青混合料水稳定性能研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(3): 54-58

Liu Tangzhi, Zhu hongzhou, Li Jiakun. Study on water stability of warm mixed hot recycled asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2013,35(3):54-58

2李立寒,王飞,欧阳君.软－硬复配沥青混合料强度特征的试验研究[J].建筑材料学报,2011,14(5):708-711

Li lihan, Wang Fei ,Ouyang Jun.Experimental Research on strength characteristics of soft-hard asphalt mixtures[J]. Journal of Building Materials,2011,14(5):798-711

3李立寒,邹小龙,孟庆楠.软硬复合沥青温拌混合料性能研究[J].建筑材料学报,2012,15(6):867-870

Li lihan, Zou Xiaolong, Meng Qingnan. Study on performance of soft-hard composite asphalt warm mixture[J]. Journal of Building Materials, ,2012,15(6):867-870

4陈静云,赵惠敏.用SHRP方法评价再生沥青性能[J].大连理工大学学报,2011,51(1):68-72

Chen Jingyun, Zhao Huiming. Evaluation of recycled asphalt performance by SHRP method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011,51(1):68-72

5张遥,吴少鹏,刘刚.生物型再生剂对再生沥青混合料性能的影响[J].武汉理工大学学报,2018,42(2):340-343

Zhang Yao, Wu Shaopeng,Liu Gang. Effect of Biological Recycling Agent on Performance of Recycled Asphalt Mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2018,42(2):340-343

6成志强,陈先勇,陈辉强等. RAP中有效沥青膜厚度测定[J].重庆交通大学学报,自然科学版,2012,31(6):1149

Cheng Zhiqiang, Chen Xianyong, Chen Huiqiang,et al. Measurement of effective asphalt film thickness in RAP[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition,2012,31(6):1149

7王刚,张唯煜,江照伟等.RAP级配变异性对温拌再生沥青混合料水稳性能影响[J].公路工程,2014.39(6):305-309

Wang Gang, Zhang Weiyu, Jiang Zhaowei,et al. Effect of RAP gradation variability on water stability of warm mixed tecycled asphalt mixture[J]. Highway Engineering,2014.39(6):305-309

8 李波,张智豪,刘祥等.基于表面理论的温拌 SBS 改性沥青-集料体系的粘附性[J].材料导报,2018,31(4):115-120

Li Bo, Zhang Zhihao,Liu Xiang,et al. Adhesion of warm-mix SBS modified asphalt-aggregate system based on surface theory[J]. Material Report,2018,31(4):115-120

9郝培文,张肖宁.沥青与沥青混合料[M].北京:人民交通出版社,2009

Hao Peiwen, Zhang Xiaoning. Asphalt and Asphalt Mixture[M]. Beijing: People's Communications Publishing House,2009

10 陈燕娟,高建明,陈华鑫..基于表面能理论的沥青-集料体系的粘附特性研究[J]..东南大学学报 (自然科学版),2014,44(1):183-187

Chen Yanjuan, Gao Jianming, Chen Huaxing. Study on adhesion characteristics of asphalt-aggregate system based on surface energy theory[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition) ,2014,44(1):183-187

11 魏建明.沥青,集料的表面自由能及水分在沥青中的扩散研究[D]..山东:中国石油大学,2008

Wei Jianming. Study on surface free energy and water diffusion of asphalt and aggregate in asphalt[D].Shandong: China University of Petroleum,2008