

文章编号 1672-6634(2021)06-0050-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2021.06.006

# 双效温拌剂对沥青混合料的拌合及路用性能影响研究

邹泰<sup>1</sup>,董光彬<sup>1</sup>,郝晓君<sup>1</sup>,穆明浩<sup>2</sup>,王 峥<sup>2</sup>,孙并臻<sup>3</sup>,张 哲<sup>4</sup>,  
郑 君<sup>4</sup>,李明杰<sup>3</sup>,李朝旭<sup>3</sup>

(1. 山东省高速路桥养护有限公司, 济南 250032; 2. 山东高速集团有限公司创新研究院, 济南 250098; 3. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 山东 青岛 266101; 4. 青岛科凯达橡塑有限公司, 山东 青岛 266109)

**摘要** 将自制的两款表面活性类型的温拌改性双效剂 106T、GL-16-7 分别对混合料的拌合降温效果及路用性能进行研究,以 70# 基质沥青及 SBS 改性沥青为对照组,分别比较了在 AC-20 型级配下不同 106T 掺量对沥青黏度、混合料的温拌效果及路用性能影响,再将国外 Sasobit 温拌剂作为对照组,比较了在 SMA-8 型级配下,分别以最佳掺量加入 106T、GL-16-7、Sasobit 三种温拌剂时,对沥青黏度、混合料的温拌效果及路用性能影响。结果表明:随着温拌剂掺量增加,沥青黏度有一定下降,混合料的拌合温度下降 30 ℃,高温动稳定度增大且均远高于对照组和规范要求,低温最大弯拉应变、水稳定性逐渐增大,稳定度及流值变化程度不大且处于规范要求值内;在 AC-20 级配中添加适量 106T,混合料性能能够达到改性沥青的路用性能,而在 SMA-8 型级配中添加适量 GL-16-7,混合料的高低温性能均佳,综合性能好于添加 Sasobit 的混合料,说明自制双效温拌剂在所述条件下能够兼顾降温效果和路用性能。

**关键词** 双效温拌剂;表面活性温拌剂;温拌沥青混合料;沥青拌和温度;路用性能

中图分类号 TQ9

文献标识码 A



开放科学(资源服务)标识码(OSID)

## Research on the Influence of Dual-effect Warm Mixture on Asphalt Mixture Mixing and Road Performance

ZOU Tai<sup>1</sup>, DONG Guangbin<sup>1</sup>, HAO Xiaojun<sup>1</sup>, MU Minghao<sup>2</sup>,  
WANG Zheng<sup>2</sup>, SUN Bingzhen<sup>3</sup>, ZHANG Zhe<sup>4</sup>,  
ZHENG Jun<sup>4</sup>, LI Mingjie<sup>3</sup>, LI Chaoxu<sup>3</sup>

(1. Shandong Hi-speed Road and Bridge Maintenance Co., Ltd., Jinan 250032, China; 2. Shandong Hi-speed Group Innovation Research Institute Co., Ltd., Jinan 250098, China; 3. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China; 4. Qingdao Cascada Polymer Co. Ltd., Qingdao 266109, China)

**Abstract** Two kinds of surface active additives (i.e., 106T and GL-16-7) were designed and developed, and as warm-mixing and modifying dual-effect agents of the asphalt mixture they were further studied

收稿日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(22075307);山东省自然科学基金项目重大基础项目(R2020ZD33)、重点项目(ZR2020KE025)资助

通讯作者:李明杰,男,汉族,博士,副研究员,研究方向:先进功能材料,E-mail: limj@qibebt.ac.cn;李朝旭,男,汉族,博士,研究员,研究方向:先进功能材料,E-mail: licx@qibebt.ac.cn。

in the aspect of mixing temperature cooling effect and road performance improving function. The additive amount of the dual-effect agent was optimized according to asphalt viscosity, warm mixing effect and road performance of the asphalt mixture. Compared with the control groups of 70# base asphalt, SBS-modified asphalt and imported warm mix agent Sasobit, the as-prepared additives with optimal content showed a large reduction in the mixing temperature of the asphalt mixture up to 30 °C, and an increased high temperature dynamic stability(e.g., 30000 /mm) under the SMA-8 gradation, both of which are much higher than those of control groups, and match well with the specification requirements. As for road pavement performance, the as-prepared additives also exhibited observably increased bending tensile strain and water stability at low temperature with considerable Marshall stability and flow value change meeting the standard value. For example, adding a proper amount of 106T to the AC-20 gradation, the asphalt mixture could achieve the road performance of high-quality modified asphalt; adding a proper amount of GL-16-7 to the SMA-8 gradation could give the asphalt mixture much higher low- and high-temperature performance with better overall performance than that of the Sasobit asphalt mixture. Therefore, dual-effect agents can not only dramatically reduce the asphalt mixing temperature but also improve the road pavement performance of the asphalt mixture, shedding light on the development of next-generation multi-functional asphalt additives.

**Key words** dual-effect warm mix agent; surface active warm mix reagent; warm mix asphalt mixture; temperature reduction function; road performance

普通的沥青路面施工方式为高温热拌沥青混合,在高温拌合、高温运输和热施工过程中因较高的拌合温度会释放出大量有害气体,同时会产生大量的能耗,并释放氮氧化物、有害废气、二氧化碳等温室气体<sup>[1,2]</sup>。因此为了减少污染气体排放和降低能源消耗,各国开始研制生产节能环保的新型温拌沥青混合料。温拌沥青混合料(Warm Mix Asphalt)<sup>[3]</sup>是一种通过降低沥青混合料的拌合粘度来改善沥青混合料的施工和易性,能够使普通沥青混合料的拌合温度降低 30-40 °C<sup>[4]</sup>,相比常规 SBS 改性沥青混合料 180 °C 的拌合温度,温拌沥青混合料可以达到 150 °C 左右。降温效果是判断温拌剂的种类选择、掺量优化、温度拌合控制的重要指标<sup>[5]</sup>,早期温拌剂是使沥青混合料可以在相对较低的温度下进行拌合和施工,同时配合改性剂保持沥青混合料路用性能的技术<sup>[6,7]</sup>。温拌混合施工最早是在 90 年代欧洲开始应用,之后温拌技术流行于众多国家,随着温拌技术的推广使用,对温拌技术的路用性能又进行了大量研究和应用,目前在国际沥青混合料路面已得到重点推广和应用<sup>[8,9]</sup>。国内的温拌沥青技术的起步较国外更晚,在 2005 年初,国内铺筑了首条利用温拌技术方案的路面<sup>[10]</sup>。

目前在道路工程应用中,传统的温拌剂用于基质沥青混合料生产时,只可以实现温拌功能,但是无法实现沥青混合料的路用性能提升,且会对路用性能带来一定的负面影响;另外温拌剂在用于改性沥青混合料生产时,则需要预先购置成品改性沥青,既增加了生产成本又存在改性沥青存储时的性能衰变,影响路面质量的隐患。因此沥青混合料的改性温拌技术虽已发展较为成熟,但是针对沥青混合料的集温拌合改性双效功能一体化的成熟技术仍需完善<sup>[11,12]</sup>。

目前温拌剂按机理类型主要分为矿物法、有机降黏剂、表面活性剂以及沥青发泡法四种<sup>[13-15]</sup>。其中表面活性剂类型机理是在集料表面形成一层能够抵消沥青与集料粘结作用的结构性润滑膜,提高拌合易性,降低了拌合压实所需的温度<sup>[16]</sup>,鉴于表面活性剂能够明显改善拌合温度及压实温度,本文采用自制表面活性剂(赖氨酸盐酸盐<sup>[17]</sup>、聚醚二醇单甲醚)改性 MAH-g-POE(马来酸酐接枝聚烯烃弹性体,接枝率 0.8%-1.2%)为主体(106T 型,以甲苯为溶剂,将赖氨酸盐酸盐与聚醚二醇单甲醚加热搅拌发生酯化反应,反应回流至无水生成,再加入碳酸氢钠固体继续搅拌反应至无气体放出后过滤、洗涤、干燥得到聚醚二醇单甲醚赖氨酸酯,再与 MAH-g-POE 高速搅拌后进行双螺杆挤出机共混挤出、粉碎、筛分得到 30-60 目自制双效温拌剂基体。主要制备过程及成分见图 1),并复配其他改性助剂的方法制备出温拌改性双效剂。此类温拌改性双

效剂既能降低沥青拌合压实温度,又能改善沥青路用性能。

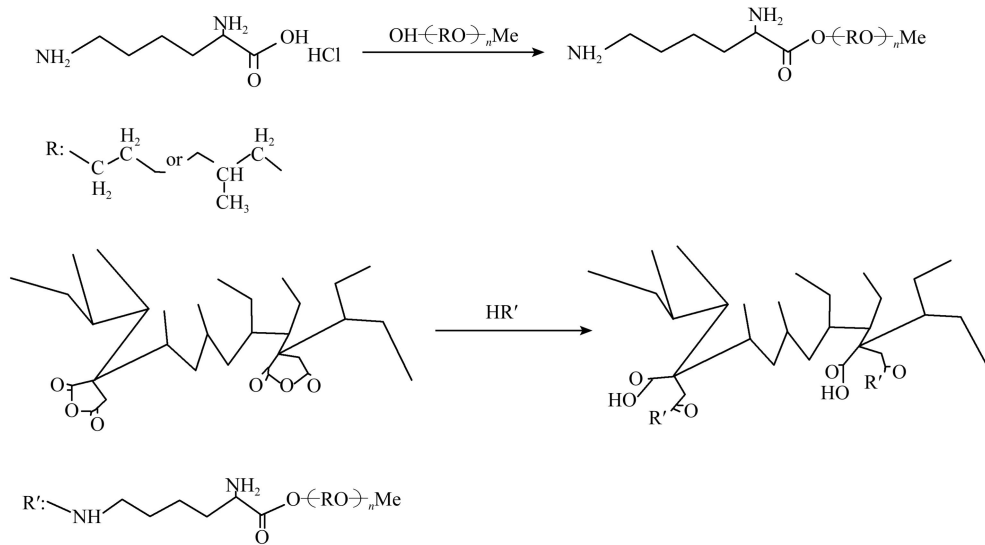


图1 106T主要制备过程

本文自制双效温拌剂可以使基质沥青只需添加一种助剂,无需再额外添加改性剂或加工助剂,在改善温拌效果的同时提升了路用性能。本文主要研究评价自制双效温拌剂对沥青混合料的温拌效果及路用性能;先采用 AC-20 混合料级配方式,以 70# 基质沥青、SBS 改性沥青(I-D)为参照对比,选取 106T 掺加量分别为混合料的(0.35%、0.45%、0.55%、0.65%)四组试验来比较双效温拌剂的降温效果;再从空隙率/%、稳定度/kN、流值/mm、高温动稳定度/(次·mm<sup>-1</sup>)、低温最大弯拉应变(μ $\epsilon$ )、水稳定性 TSR/%来评价其混合料体积指标和路用性能。

## 1 AC-20 级配试验材料及方法

### 1.1 沥青原料

分别选用齐鲁 70# 基质沥青、SBS 改性沥青(I-D)。主要技术指标见表 1。

表1 齐鲁 70# 基质沥青、SBS 改性沥青(I-D)技术指标

测试项目		针入度(25℃, 5s, 100g)(0.1mm)	软化点/℃	动力粘度/(pa·s)	延度 (5cm/min)
齐鲁 70#	实测	69	48	215(60℃)	120(15℃)
基质沥青	质量指标	60-80	≥46	≥180	≥100
SBS 改性 沥青(I-D)	实测	56	73	1.8(135℃)	17(膜后 5℃)
	质量指标	40-60	≥60	≥3	≥15

### 1.2 矿料级配

矿料选用石灰岩,分档筛分,以《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)要求进行常规指标试验,各项技术指标均满足要求。矿质混合料级配选用 AC-20,用筛好的各档料回配,见表 2 和图 2 所示。

1.2.1 温拌沥青黏温曲线。通过布氏黏度计法分别测定 120、135、150、165、180℃ 5 个试验温度下的沥青黏度,绘制成如图 3 所示沥青黏温曲线。从图 3 中可以看出,相同温度条件下,添加温拌剂的沥青黏度比改性沥青、基质沥青的黏度都低;在 120-180℃ 区间内,黏度降低速度随温度的升高逐渐变缓,最后趋于接近的黏度;相同温度条件下,随着双效温拌剂用量的增加,沥青黏度呈现降低的趋势。这是由于在低温区域,表面活性剂起到了一定的降黏作用,而表面活性温拌剂主要通过改善集料与沥青的界面润滑性,因而其对沥青的黏度影响较小,从表中可以看出与基质沥青黏度相差不大;随双效温拌剂用量的增加而降黏效果有所增强,达到一定黏度后,已经接近沥青黏度的最低值,继续下降的幅度有限,差别不明显,对 0.45% 掺量的黏温曲线进行拟合分析,建立多项式拟合方程,得到  $y=0.1164x^2-1.0416x+2.522$ ,  $R^2=0.9998$ ,  $R^2$  趋近于 1,说明

黏温曲线可靠性较高,黏度随温度升高先快速下降,再趋于平缓。

表 2 试验段不同筛孔抽提筛分结果

筛孔/mm	AC-20 试验通过率 /%	规范中值±5%
26.5	100	100
19	96.4	95
16	85.3	85
13.2	73.9	71
9.5	60.7	61
4.75	36.9	41
2.36	24.7	30
1.18	18.6	22.5
0.6	12.3	16
0.3	9.8	11
0.15	7.6	8.5
0.075	5.7	5

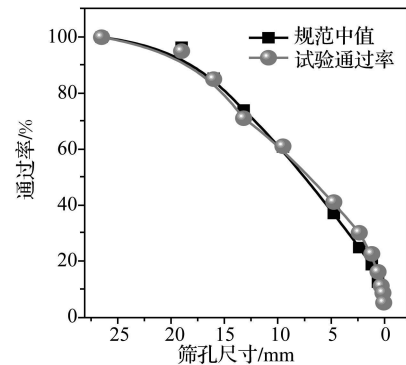


图 2 矿料筛分布曲线

1.2.2 温拌沥青混合料体积指标曲线。空隙率是沥青混合料的固有特征,反映了沥青混合料在压实成型过程中的密实程度,直接影响到路面路用性能和长期使用性能,也从空隙率方面反映了温拌剂降温效果对成型的影响,试验采用马歇尔击实成型方法(75次),分别测定 120、135、150、165、180 °C 5 个试验温度下的混合料空隙率,绘制不同拌合温度下温拌剂用量对混合料空隙率的影响曲线图 4。

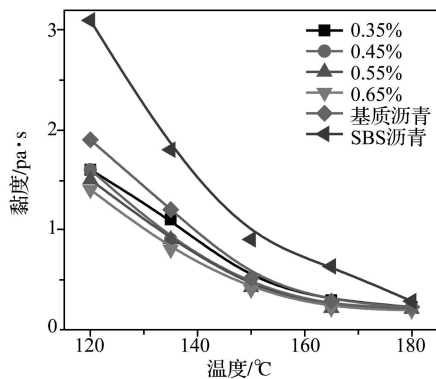


图 3 沥青黏温曲线

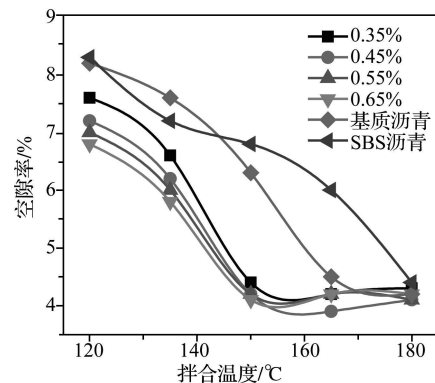


图 4 混合料体积指标曲线

实验以沥青混合料击实空隙率(4%)作为指标来确定沥青混合料的最佳拌合温度,从图 4 中可以看出添加双效温拌剂后,沥青混合料空隙率随温度的升高而快速降低至 4% 左右,较基质沥青和改性沥青相比,拌合温度有明显降低;在低温区域,空隙率随双效温拌剂添加量的增加而变小,达到一定温度后,空隙率相差不大,这是由于表面活性剂将集料表面裹覆润滑后来降低拌合做功,来提高沥青混合料的施工和易性,从曲线中说明少量双效温拌改性剂就能降低拌合温度,达到混合料适合的空隙率。

1.3 温拌沥青混合料路用性能

作为双效温拌改性剂,需要将基质沥青混合料的路用性能提升到使用要求,以 70# 基质沥青、SBS 改性沥青(I-D)为参照对比,从空隙率/%、稳定度/kN、流值/mm、高温动稳定度/(次·mm<sup>-1</sup>)、低温最大弯拉应变(μ $\epsilon$ )、水稳定性 TSR/%来评价其混合料体积指标和路用性能,拌合流程及拌合参数如表 3。

混合料路用性能试验结果如表 4 所示,从表 4 可以看出,在相近的空隙率条件下,相比改性沥青混合料,添加双效温拌剂的混合料拌合温度降温幅度为 30 °C,分析原因可能是赖氨酸盐酸盐改性聚醚链段具有非离子表面活性剂和润滑作用,可以降低沥青与集料石子间的表界面张力,从而提高沥青混合料的流动性,使沥青混合料远低于热拌温度下与矿料混拌均匀,实现温拌效果;不同双效温拌剂掺量的混合料,马氏稳定度、流值

相差程度不大,均在规范要求内;随着温拌剂掺量增加,高温动稳定度逐渐增大、变化趋势明显,且均远远高于对照组和规范要求,随着温拌剂掺量增加,低温最大弯拉应变逐渐增大,分析原因是其中的 POE 链具有强韧性,可以有效改善沥青混合料的高温抗剪切能力和抗冲击阻滞能力,从而提高沥青改性料的高温抗车辙能力和低温耐屈挠能力,但掺量为 0.35% 时低于规范要求。随着温拌剂掺量增加,水稳定性 TSR 值有所增加,沥青混合料的水稳定性越来越好,分析原因是由于双效温拌剂中侧链接枝的马来酰胺基团跟集料的极性相近,结合更紧密,使得沥青与集料的融合更好。

表 3 拌合流程及拌合参数

项目	矿料温度/℃	拌合温度/℃	击实温度/℃	流程
对照组(70# 基质沥青)	160	160	145	矿料、沥青湿拌后加矿粉拌合
对照组(改性沥青)	180	180	165	矿料、沥青湿拌后加矿粉拌合
双效温拌剂 106T+70# 基质沥青	160	150	135	矿料先加双效温拌剂干拌,再加沥青湿拌后加矿粉拌合

表 4 混合料路用性能

类型	空隙率/%	稳定度 /kN	流值 /mm	高温动稳定度 /(次·mm <sup>-1</sup> )	低温最大弯拉应变 ( $\mu\epsilon$ )	水稳定性 TSR/%
对照组(70#)	4.4	12.89	4.6	2100	3120	88
对照组(SBS)	4.6	12.29	3.7	5200	2800	85
掺量 0.35%	4.4	10.21	2.8	8000	2339	88.3
掺量 0.45%	4.3	10.42	2.6	12600	2767	93.6
掺量 0.55%	4.5	10.70	2.4	18000	2856	91.4
掺量 0.65%	4.3	11.83	2.6	30000	3003	94.6
路用规范要求	3-6	$\geq 8$	1.5-4	$\geq 2800$	$\geq 2500$	$\geq 80$

同时,在试验中观察了集料与固态温拌剂干拌效果、拌合后沥青混合料效果及马氏试件冷却后效果,如图 5-图 6 所示。在矿料与双效温拌剂干拌时,利用双效温拌剂的低熔点温度优势,实现其与石料预拌时的充分融化及润滑石料表面的效果,从图 5(a)中可看出,部分 10-20 mm 的粗集料由于比表面积小,干拌后石料表面裹覆温拌剂十分明显。从图 5(b)中可看出,拌合后未出现沥青混合料发干、发暗现象。从图 6 中可以看出双效温拌剂为干粉状态图 6(a),而在加热干拌时热熔的温拌剂将集料粗糙表面图 6(b)包裹,呈现图 6(c)的较平滑状态,说明温拌剂对集料表面包裹效果较好。

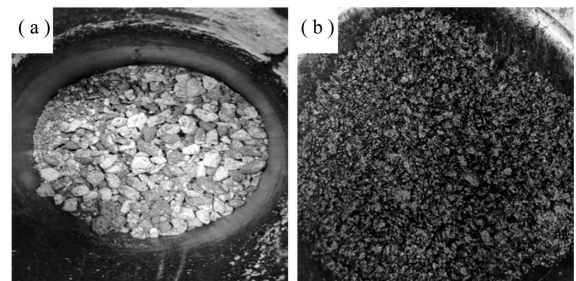


图 5 (a) 矿料与双效温拌剂干拌后效果图;(b) 矿料、70# 沥青与双效温拌剂湿拌后效果图

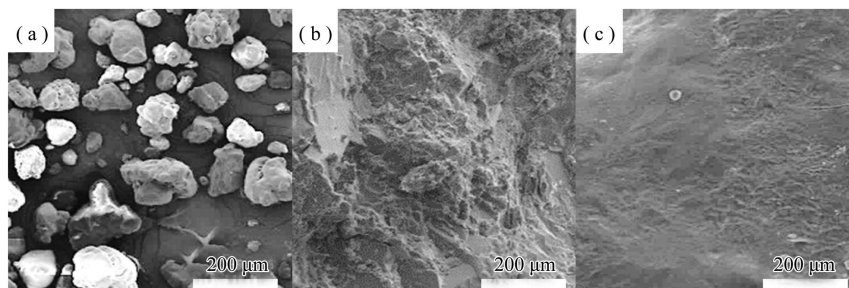


图 6 (a) 干粉双效温拌剂扫描电镜;(b) 干拌前集料表面扫描电镜;(c) 干拌后集料表面扫描电镜

从图 7 中可以看出,对比观察矿料+70# 基质沥青+双效温拌剂(a)与矿料+SBS 改性沥青(b)成型试件,两者外观相差不大,图 7(c)和(d)为图 7(a)的微观组分图,可以看出集料与沥青的结合紧密,相容性好。

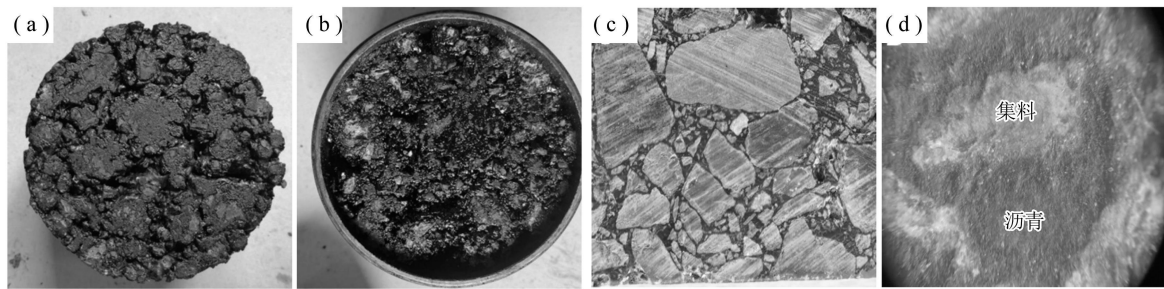


图7 马氏试件冷却后效果图 (a) 矿料+70#基质沥青+双效温拌剂;(b) 矿料+SBS改性沥青;  
(c) 压实混合料切面图;(d) 切面微观组图

#### 1.4 双效温拌剂对沥青玻璃化温度影响研究

沥青玻璃化温度是动力学转变温度,为主要链段开始运动或被冻结的温度,影响沥青的粘弹性、变形温度等,通过差示扫描量热仪(DSC)来分析双效温拌剂对沥青玻璃化温度影响,结果见图8。

沥青玻璃化温度较宽泛,通过软件处理做切线得出,从图8中可以看出添加温拌剂后,沥青玻璃化温度略有下降,分析原因是温拌剂中的POE及油脂降低了沥青的玻璃化温度, $T_g$ 降低有利于低温延度及低温最大弯拉应变,在提高沥青混合料高温动稳定度的同时(表4),保证了沥青混合料的低温性能。

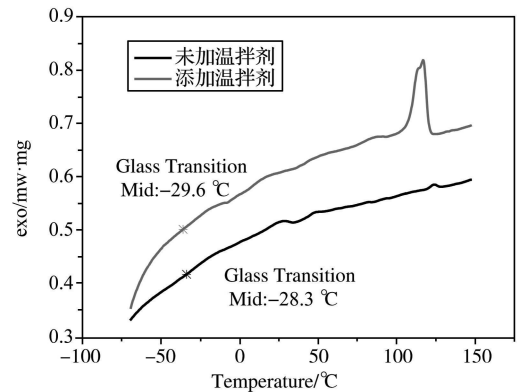


图8 添加温拌剂前后沥青玻璃化温度的变化

## 2 SMA-8型级配试验评价

前期研究中采用的AC-20级配为连续型级配,其特点是矿料为石灰岩,不加入纤维;接下来采用SMA-8型级配进行进一步研究,其为间断级配,特点是矿料为玄武岩,加入纤维,抗疲劳效果较好。以106T为基体,改性得到自制GL-16-7双效温拌剂,其中GL-16-7双效温拌剂含有与沥青能发生化学反应的聚环烯烃,其侧链为梳型咪唑类活性温拌改性剂。选取国外Sasobit温拌剂做对比<sup>[18]</sup>,Sasobit是一款应用普遍的温拌剂,能够显著降低沥青在135℃以上时的粘度,其公司开发出具有温拌性能同时能够提高沥青路用性能的温拌剂,以此为对比组评价自制双效温拌剂106T、GL-16-7,将Sasobit双效温拌剂、106T双效温拌剂、GL-16-7双效温拌剂分别与70#基质沥青掺加进行降温评价,Sasobit双效温拌剂最佳用量为沥青用量的3%,综合成本考虑,106T双效温拌剂、GL-16-7双效温拌剂的用量分别为矿料用量的0.45%、0.5%。

### 2.1 温拌沥青黏温曲线

通过布氏黏度计法分别测定120、135、150、165、180℃5个试验温度下的沥青黏度,绘制成如图9所示沥青黏温曲线。可以看出相同温度下,添加Sasobit温拌剂的沥青黏度较低,可能由于其有机蜡质对沥青的润滑降黏作用,而表面活性剂类的温拌剂以降低集料与沥青界面拌合做功为主,但相比基质沥青及改性沥青仍有降黏效果,对106T、GL-16-7黏温曲线进行拟合分析,建立多项式拟合方程,分别得到 $y=0.0879x^2-0.7161x+1.61, R^2=0.9877$ ;  $y=0.0979x^2-0.8081x+1.798, R^2=0.9912$ ,两者 $R^2$ 趋近于1,说明黏温曲线可靠性较高,曲线符合实际趋势。

### 2.2 温拌沥青混合料体积指标曲线

试验采用马歇尔击实成型方法(75次),分别测定120、135、150、165、180℃5个试验温度下的混合料空隙率,绘制不同温拌剂的拌合温度对空隙率的影响曲线图10。从图10中可以看出,掺加温拌剂后混合料的空隙率较未添加之前均快速下降到4%左右,均在150℃拌合温度下达到适合的空隙率。相比改性沥青180℃拌合温度,添加三种温拌剂的混合料降温幅度明显,效果相差不大。

### 2.3 温拌沥青混合料路用性能

以70#基质沥青、SBS改性沥青(I-D)为参照对比,从空隙率/%、稳定度/kN、流值/mm、高温动稳定

度/(次·mm<sup>-1</sup>)、低温最大弯拉应变( $\mu\epsilon$ )、水稳定性 TSR/%来评价其混合料体积指标和路用性能,拌合流程及拌合参数如表 5,试验结果如表 6。

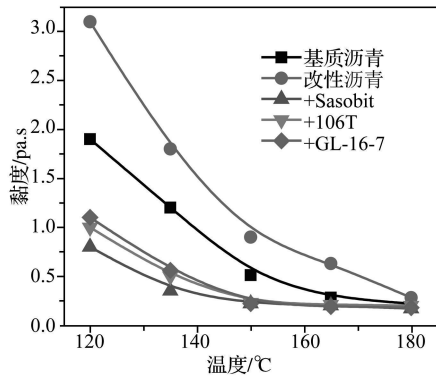


图 9 沥青黏温曲线

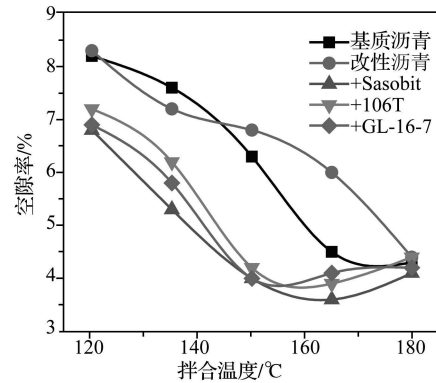


图 10 混合料体积指标曲线

表 5 拌合流程及拌合参数

类型	矿料温度/°C	拌合温度/°C	击实温度/°C	流程
对照组(70# 基质沥青)	160	160	145	矿料、纤维、沥青湿拌后加矿粉拌合
对照组(改性沥青)	180	180	165	矿料、纤维、沥青湿拌后加矿粉拌合
双效温拌剂 106T+70# 基质沥青	160	150	135	矿料、纤维先加双效温拌剂干拌,再加沥青湿拌后加矿粉拌合

表 6 混合料路用性能

类型	空隙率/%	稳定度/kN	流值/mm	高温动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	低温最大弯拉应变( $\mu\epsilon$ )	水稳定性 TSR/%
对照组(70#)	4.2	12.37	5.6	2450	3130	88.0
对照组(SBS)	4.4	13.16	5	3863	2800	90.0
双效温拌剂 106T+70#	3.9	8.98	3	734	3075	96.0
双效温拌剂 GL-16-7+70#	4.0	13.08	2.8	15750	4596	95.4
温拌剂 Sasobit+70#	3.9	13.76	2.5	17290	3182	92.7
规范要求	3.0-4.5	$\geq 6$	2-5	$\geq 3000$	$\geq 2500$	$\geq 80$

从表 6 中可以看出混合料空隙率在 4% 左右时,添加温拌剂之后混合料的稳定度和流值在规范要求范围内,添加 GL-16-7 和 Sasobit 的混合料高温动稳定度大幅提升,而添加 106T 后高温动稳定度反而下降严重,分析原因可能是玄武岩碱性程度弱于石灰岩、或是纤维吸附了部分温拌剂,导致 106T 温拌剂无法有效融化裹覆在石料表面,而温拌剂 GL-16-7 中的咪唑类侧基与集料熔融分散较好,环烯烃与沥青发生化学反应使得混合料的高低温性能表现优异,低温性能优于 Sasobit 的混合料,综合性能在 SMA-8 型级配中最佳。

### 3 结语

(1) 自制的双效温拌剂主要机理并不是降低沥青高温黏度,而是通过表面活性剂裹覆集料表面,降低集料与沥青的拌合做功来达到降低拌合温度,相比改性沥青拌合温度能够降温 30 °C;通过混合料的空隙率指标来确定拌合温度更为准确。

(2) 106T 双效温拌剂在 AC-20 级配中能够满足路用性能,达到改性沥青的路用性能,而 GL-16-7 双效温拌剂在 SMA-8 型级配中的高低温性能均佳,综合性能好于 Sasobit 混合料,说明双效温拌剂在降温幅度 30 °C 时能够兼顾降温效果和路用性能。

(3) 由于温拌剂添加量较小,提升温拌剂与集料干拌时的分散效果可以进一步优化温拌剂使用效果。

(下转第 69 页)

- cals in the solid state [J]. *New Journal of Chemistry*, 2019, 43: 4506-4510.
- [27] ZHANG N N, SA R J, SUN S S, et al. Photoresponsive triazole-based donor-acceptor molecules; color change and heat/air-stable diradicals [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7: 3100-3104.
- [28] DING B, YANG P, LIU Y Y, et al. Hydrothermal syntheses and characterization of a series of luminescent Cd(II) frameworks with pyridine-based and benzene-based bis-triazole ligands [J]. *CrystEngComm*, 2013, 15: 2490-2503.
- [29] HUANG G, YANG L, YIN Q, et al. A comparison of two isoreticular metal-organic frameworks with cationic and neutral skeletons: stability, mechanism, and catalytic activity [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59: 4385-4390.
- [30] FRISCH M J, TRUCKS G W, SCHLEGEL H B, et al. *Gaussian 09, Revision A.02*, Gaussian, Inc, Wallingford C T, 2009.
- [31] LEE C T, YANG W T, PARR R G. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density [J]. *Physical Review B*, 1988, 37: 785-789.
- [32] LU T, CHEN F W. Multiwfn: A multifunctional wavefunction analyzer [J]. *Journal of Computational Chemistry*, 2012, 33: 580-592.
- [33] BONDAR O A, LUKASHUK L V, LYSENKO A B, et al. New microporous copper(II) coordination polymers based upon bifunctional 1,2,4-triazole/tetrazolate bridges [J]. *CrystEngComm*, 2008, 10: 1216-1226.
- [34] Cai H, Hu H-M, Chen W-Z, et al. 1,4-Bis(4H-1,2,4-triazol-4-yl) benzene monohydrate [J]. *Acta Crystallogr. Sect. C, Cryst. Struct. Commun*, 1999, 55: 9900082.
- [35] JOHNSON E R, KEINAN S, MORI-SANCHEZ P, et al. Revealing noncovalent interactions [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132: 6498-6506.
- [36] ZHANG N N, Sun C, JIANG X M, et al. Single-component small-molecule white light organic phosphors [J]. *Chemical Communications*, 2017, 53: 9269-9272.
- [37] GUO G C, YAO Y G, WU K C, et al. Studies on the structure-sensitive functional materials [J]. *Progress in Chemistry*, 2001, 13: 151-155.
- [38] GUO S P, CHI Y, GUO G C. Recent achievements on middle and far-infrared second-order nonlinear optical materials [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2017, 335: 44-57.
- [39] LIU B W, ZHANG M Y, JIANG X M, et al. Large second-harmonic generation responses achieved by the dimeric  $[\text{Ge}_2\text{Se}_4(\mu\text{-Se}_2)]_4$ -functional motif in polar polyselenides  $\text{A}_3\text{Ge}_4\text{Se}_{12}$  (A=Rb, Cs) [J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29: 9200-9207.

(上接第 56 页)

## 参 考 文 献

- [1] 李祝龙,丁小军,赵述曾,等.沥青混合料应用中的环境保护[J].*交通运输工程学报*,2004(4):1-4.
- [2] 刘至飞,吴少鹏,陈美祝,等.温拌沥青混合料现状及存在问题[J].*武汉理工大学学报*,2009,31(4):170-173.
- [3] 纪小平,孙云龙.Sasobit 温拌沥青混合料的试验研究[J].*武汉理工大学学报*,2010,32(14):75-78.
- [4] 王朝辉,陈姣,侯明.道路常用温拌改性剂现状与路用性能评价[J].*材料导报*,2016,30(7):102-108,137.
- [5] 杨航.掺温拌剂的沥青及其混合料性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2010.
- [6] 王文奇,邱延峻,郭玉金,等.有机降黏型温拌沥青添加剂发展现状及展望[J].*化工新型材料*,2017,45(4):210-212.
- [7] CAPITAO S D, PICADO-SANTOS L G, MARTINHO F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 1016-1024.
- [8] 左锋,叶奋.国外温拌沥青混合料技术与性能评价[J].*中外公路*,2007(6):164-168.
- [9] KIM H H, JEONG K D, LEE M S, et al. Effect of FT paraffin wax contents on performance properties of crumb rubber-modified asphalt binders[J]. *American Society of Civil Engineers*, 2015(3): 11-15.
- [10] 张战军.温拌橡胶沥青发展现状及展望[J].*炼油与化工*.2021,32(1):1-5.
- [11] 郭胜龙.新型温拌沥青改性剂的研制和性能研究[D].武汉:武汉科技大学,2015.
- [12] 贺海,王朝辉,孙晓龙,等.新型温拌改性沥青的研发及其路用性能[J].*建筑材料学报*,2014,17(5):927-932.
- [13] PROWELL B, HURLEY G, CREWS E. Field performance of warm mix asphalt at the NCAT test track. [J]. *Journal of the Transportation Research Board*.2007(98): 96-102.
- [14] 秦永春,黄颂昌,徐剑,等.基于表面活性剂的温拌 SMA 混合料性能[J].*建筑材料学报*,2010,13(1):32-35.
- [15] 何永泰,李炜,雷俊安,等.不同温拌剂对沥青及混合料性能的影响研究[J].*公路*,2020(9):59-64.
- [16] 王岚,李冀,桂婉妹.表面活性剂对温拌胶粉改性沥青高低温性能的影响[J].*材料导报*,2019,33(6):986-990.
- [17] 魏西莲,桑青,石成法.一类新型表面活性剂表面活性的研究[J].*聊城师院学报(自然科学版)*,1996(3):47-49+56.
- [18] 时敬涛,范维玉,赵品晖,等.Sasobit 温拌剂对高黏沥青流变性能的影响[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,2020,44(6):141-148.