

# 微表处用改性咪唑啉型沥青乳化剂的合成及性能评价

孔祥军<sup>1</sup>, 李福起<sup>2</sup>, 杨维才<sup>3</sup>, 范维玉<sup>1</sup>, 姚艳<sup>1</sup>, 刘娜娜<sup>1</sup>, 罗辉<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学重质油国家重点实验室, 山东青岛 266580; 2. 中海油(青岛)重质油加工工程技术研究中心有限公司, 山东青岛 266500; 3. 黄岛区实验中学, 山东青岛 266400)

**摘要:**以分子结构设计为基础,通过合成多头亲水活性基团、接枝改性增加咪唑啉型乳化剂的空间位阻,采用月桂酸、四乙烯五胺和丙烯酸甲酯为原料,利用在线红外监测咪唑啉中间体的官能团变化,合成改性咪唑啉型微表处用慢裂快凝型乳化沥青乳化剂,并对其进行性能评价。结果表明:合成的乳化剂性能优异,临界胶束浓度为 23.99  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,在临界胶束浓度下表面张力为 24.36  $\text{mN}/\text{m}$ ;用该乳化剂制备的乳化沥青颗粒均匀,体积平均粒径为 3.09  $\mu\text{m}$ ,乳化剂用量为 1.5% 时乳化沥青各项指标均满足微表处用乳化沥青的技术要求,与石料的可拌和时间达 206 s。

**关键词:**乳化剂; 乳化沥青; 慢裂快凝; 微表处

**中图分类号:**TE 626.86 **文献标志码:**A

**引用格式:**孔祥军,李福起,杨维才,等.微表处用改性咪唑啉型沥青乳化剂的合成及性能评价[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):140-146.

KONG Xiangjun, LI Fuqi, YANG Weicai, et al. Synthesis and performance evaluation of modified imidazoline asphalt emulsifier for micro-surfacing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(2):140-146.

## Synthesis and performance evaluation of modified imidazoline asphalt emulsifier for micro-surfacing

KONG Xiangjun<sup>1</sup>, LI Fuqi<sup>2</sup>, YANG Weicai<sup>3</sup>, FAN Weiyu<sup>1</sup>, YAO Yan<sup>1</sup>, LIU Nana<sup>1</sup>, LUO Hui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. CNOOC (Qingdao) Heavy Oil Processing Engineering Research Center, Qingdao 266500, China;  
3. Huangdao Experimental Middle School, Qingdao 266400, China)

**Abstract:** On the basis of molecular structure design, the steric hindrance of modified imidazoline emulsifier was enhanced through synthesized multiple hydrophilic groups and graft modification. The modified imidazoline with slow-breaking and quick-setting performance for micro-surfacing was prepared using the lauric acid, tetraethylenepentamine and methyl acrylate, in which the online infrared spectrometer was used to track the characteristic absorption peak changes during the synthesis process. The results show that the synthesized emulsifier presents good surface activities, showing CMC of 23.99  $\mu\text{g}/\text{g}$  and the surface tension of 24.36  $\text{mN}/\text{m}$ . The prepared asphalt emulsion has uniform particles of 3.09  $\mu\text{m}$ . It also meets the technical requirements for micro-surfacing at the emulsifier dosage of 1.5%, in which the mixing time with aggregate can reach 206 s.

**Keywords:** emulsifier; asphalt emulsion; slow-breaking and quick-setting; micro-surfacing

微表处是修复道路车辙及其他多种路面病害最经济有效的手段之一<sup>[1-3]</sup>。微表处用乳化沥青要求

为阳离子型<sup>[4-12]</sup>,与集料要有足够的可拌和时间,还要在摊铺后能迅速破乳成型,快速开放交通。目前

收稿日期:2015-09-27

基金项目:中国海洋石油公司科技项目子项目(YQQD-FC/2014-0029)

作者简介:孔祥军(1982-),男,博士研究生,研究方向为精细化工与沥青材料。E-mail:kongxiangjun1982@163.com。

通讯作者:范维玉(1957-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为精细化工与沥青材料。E-mail:fanwyu@upc.edu.cn。

微表处用乳化沥青大多存在可拌和时间短、对不同沥青及集料适应性差、慢裂性能难以保证等问题,严重影响微表处施工质量和进度<sup>[13-14]</sup>。咪唑啉型沥青乳化剂具有良好的乳化能力,李莉等<sup>[15]</sup>采用环烷酸和二乙胺合成了咪唑啉阳离子沥青乳化剂,李稳宏<sup>[16]</sup>等采用脂肪酸与二乙烯三胺制备了SM型阳离子咪唑啉沥青乳化剂,但上述均限于普通乳化沥青。孔祥军等<sup>[17]</sup>采用含空间位阻基团的有机酸合成咪唑啉型乳化剂,获得了较好的慢裂快凝效果。笔者在对乳化剂原料及乳化剂结构进行分子模拟及其亲油亲水特性研究的基础上,以月桂酸与四乙烯五胺合成咪唑啉中间体,以丙烯酸甲酯对咪唑啉中间体进行接枝改性合成微表处用乳化沥青乳化剂,通过所合成乳化剂分子结构中多个亲水基团、以及接枝改性后增加对极性基团空间位阻的作用,进一步延长乳化沥青微粒在集料表面的吸附破乳时间,以更好地满足慢裂快凝性能的要求。

## 1 实验

### 1.1 试剂和仪器

试剂:四乙烯五胺、月桂酸、盐酸、二甲苯、无水乙醇、丙烯酸甲酯,均为分析纯,国药集团化学试剂

有限公司生产;基质沥青为某AH-90沥青;SBR胶乳固含量为60%。

仪器:雷磁PHS-3C型pH计;React IR IC10在线红外光谱测试系统;Dataphysics DCAT21型表面张力仪;德国HerberPink胶体磨;LS-POP(6)型激光粒度仪。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 乳化剂的合成

将摩尔比为1:1.05的月桂酸、四乙烯五胺加入到反应器中,加入一定量携水剂二甲苯,搅拌升温回流,在回流温度下发生酰胺化反应,反应一定时间后,将二甲苯蒸出,抽真空至真空度为0.096 MPa升温至240℃进行环化反应一定时间,制得咪唑啉中间体。咪唑啉合成反应过程中采用React IR IC10在线红外光谱系统进行监测。

将与咪唑啉中间体摩尔比1:1.1的丙烯酸甲酯配制质量分数为50%的乙醇溶液,缓慢滴加入咪唑啉中,40℃搅拌条件下反应12h,反应结束后,减压蒸出乙醇和未反应的丙烯酸甲酯,得到产物。

乳化剂合成的反应方程见图1。

将产物配成不同浓度的水溶液,测定其表面张力。

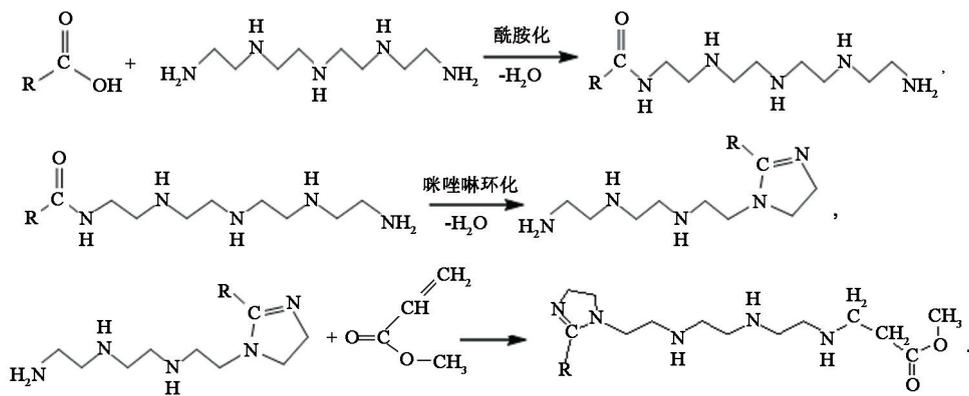


图1 乳化剂的合成反应

Fig.1 Synthetic reaction of emulsifiers

#### 1.2.2 乳化沥青制备

配制一定浓度的乳化剂水溶液400g,加入SBR胶乳,加热至40~60℃,搅拌使其溶解,调节pH值至2。称取600g沥青,加热至135℃。启动胶体磨,将乳化剂水溶液注入胶体磨中,再缓慢将沥青倒入胶体磨中进行剪切、乳化1min得乳化沥青。

#### 1.2.3 乳化沥青性能测试

参照交通部JTJ052-2000《公路工程沥青及沥

青混合料试验规程》中BCR型乳化沥青技术指标要求,对制备的乳化沥青进行筛上剩余量、电荷、恩格拉黏度、蒸发残留物含量、蒸发残留物性质(针入度、软化点、延度、溶解度)和贮存稳定性测试。

参照交通部JTJ052-2000《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中T0659-1993《乳化沥青与矿料的拌和试验》,测定乳化沥青与矿料的可拌和时间。

## 2 结果分析

### 2.1 咪唑啉的合成

咪唑啉的合成装置见图2,反应过程中在线红外三维谱图见图3。

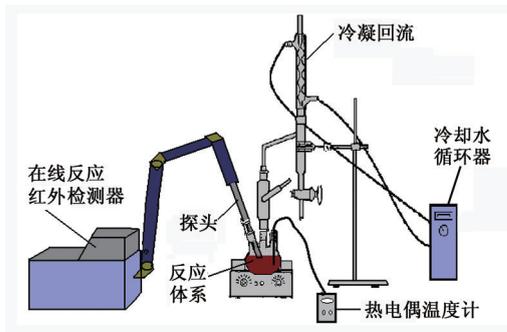


图2 乳化剂合成装置示意图

Fig.2 Experimental device for emulsifier synthesis

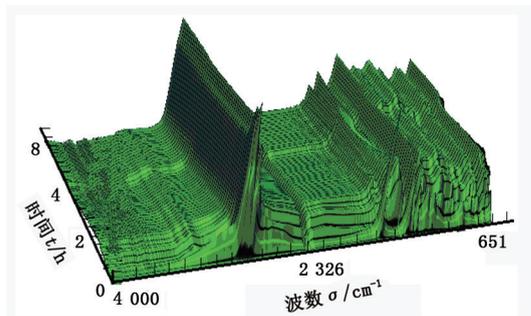


图3 红外三维谱图

Fig.3 Three-dimensional stack plot of IR spectra

图3中 $x$ 轴为波数, $y$ 轴为吸收强度, $z$ 轴为时间,从红外三维谱图中观察某特定波数的吸收峰随时间的变化情况,图中峰面积的变化可以代表物质浓度的变化。

#### 2.1.1 酰胺化反应

咪唑啉合成反应分为酰胺化反应和环化反应<sup>[18]</sup>,其中酰胺化反应在携水剂回流条件下进行,通过计量反应生成的水来判断反应进程,由生成水计算反应转化率随时间的变化趋势,结果见图4。

由图4可知,随着反应的进行,反应生成的水不断由携水剂携带出反应体系,转化率逐渐升高,当反应进行到3.5 h后,转化率随时间的变化曲线趋于平缓,说明酰胺化阶段基本完成,此时蒸出携水剂二甲苯,开始升温至环化温度进行环化反应。

#### 2.1.2 环化反应

利用在线红外监测反应体系中各官能团的特征吸收峰强度变化<sup>[18]</sup>,从图2三维谱图中提取1710  $\text{cm}^{-1}$ (羧酸羰基特征吸收峰)、1550  $\text{cm}^{-1}$ (酰胺 II

带)、1609  $\text{cm}^{-1}$ (咪唑啉环  $\text{C}=\text{N}$  特征吸收峰)的峰强度随反应时间的变化,见图5。

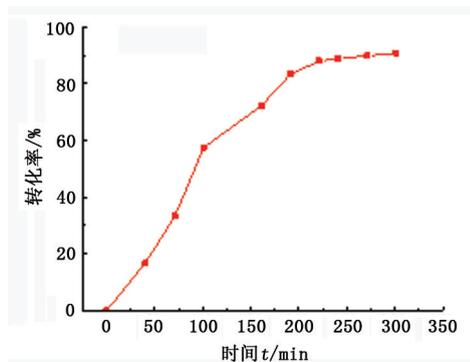


图4 酰胺化转化率随反应时间的变化

Fig.4 Variation of plot of conversion with reaction time

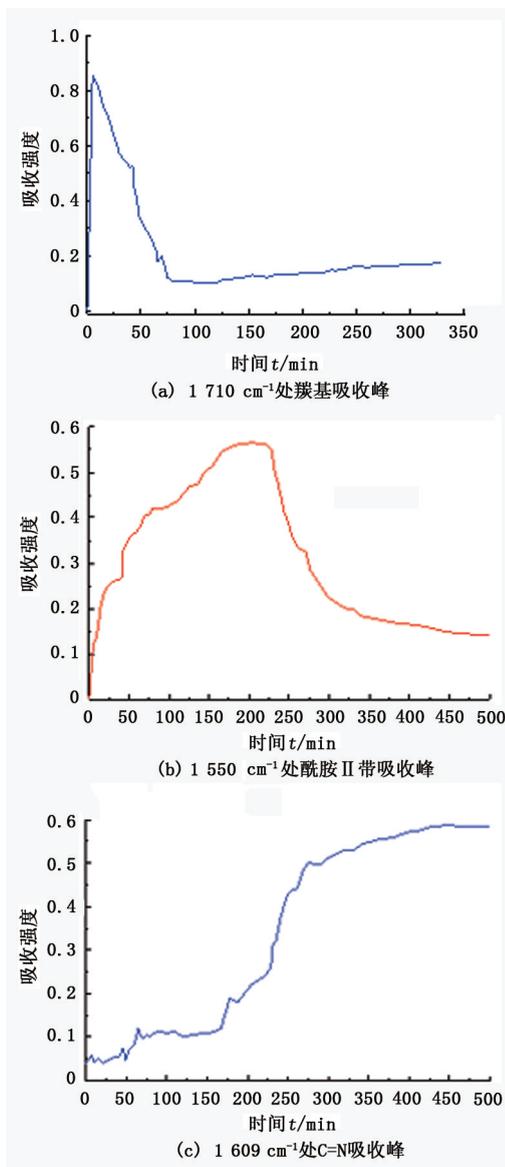


图5 吸收曲线

Fig.5 Absorbance curves

从图5看出,反应起始阶段,在加入月桂酸后,监测到体系中出现 $1710\text{ cm}^{-1}$ 处羰基的强吸收峰,随着反应进行,此特征吸收峰强度迅速降低,同时出现 $1550\text{ cm}^{-1}$ (酰胺II带)的特征吸收峰并逐渐增强,3.5 h后其强度变化逐渐趋于平缓,这与以出水量计算转化率的变化趋势一致。此时升温至 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行环化反应, $1550\text{ cm}^{-1}$ (酰胺II带)的特征吸收峰强度逐渐降低,体系中出现了 $1609\text{ cm}^{-1}$ 的咪唑啉环 $\text{C}=\text{N}$ 特征吸收峰,并且强度逐渐增强,继续反应4 h后,吸收峰强度变化趋于平缓,说明环化反应趋于平衡。

## 2.2 咪唑啉改性

反应结束后减压蒸出乙醇和未反应的丙烯酸甲酯,得到产物,收率为98.06%。产物红外谱图见图6。

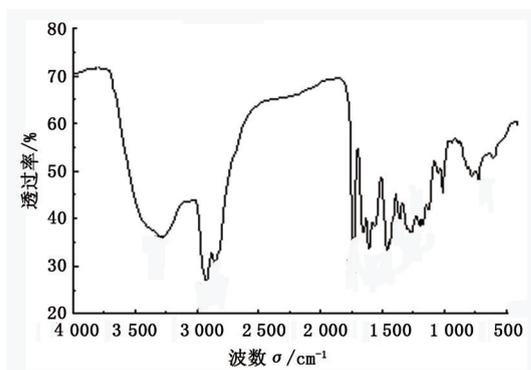


图6 改性咪唑啉的红外光谱图

Fig. 6 Infrared spectrum of modified imidazoline

从图6看出, $3292\text{ cm}^{-1}$ 处为 $-\text{NH}$ 的反伸缩振动峰; $2924\text{ cm}^{-1}$ 和 $2853\text{ cm}^{-1}$ 处为 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$ 的 $-\text{CH}$ 伸缩和反伸缩振动吸收峰, $1462\text{ cm}^{-1}$ 和 $1360\text{ cm}^{-1}$ 处分别为 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}$ 的剪式振动峰, $723\text{ cm}^{-1}$ 处为 $-\text{CH}_2$ 的面内弯曲振动峰; $1609\text{ cm}^{-1}$ 处为咪唑啉环上 $\text{C}=\text{N}$ 特征吸收峰, $1268\text{ cm}^{-1}$ 处为 $\text{C}-\text{N}$ 特征吸收峰; $1739\text{ cm}^{-1}$ 处为酯基的 $\text{C}=\text{O}$ 键的伸缩振动峰, $1200\text{ cm}^{-1}$ 处为 $\text{C}-\text{O}$ 键的伸缩振动峰。在反应产物的红外谱图中并未出现丙烯酸甲酯中的 $\text{C}=\text{C}$ 双键的特征吸收峰,说明丙烯酸甲酯已反应完全。这些红外吸收峰的出现表明了咪唑啉经改性生成了目标产物。

## 2.3 乳化剂表面活性的测定

将上述制备的咪唑啉乳化剂配制不同浓度的水溶液,测定 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下表面张力 $\sigma$ ,以 $\sigma$ 对 $\lg c$ 作图,如图7所示。

从图7看出,曲线存在一拐点,在 $\lg c = -4.62$ 处,即临界胶束浓度(CMC)为 $23.99\text{ }\mu\text{g/g}$ ,同时测

得在此浓度下的表面张力 $\sigma_{\text{CMC}}$ 为 $24.36\text{ mN/m}$ 。本文合成的改性咪唑啉型沥青乳化剂临界胶束浓度较小,降低水溶液表面张力的能力较强,表面活性高。

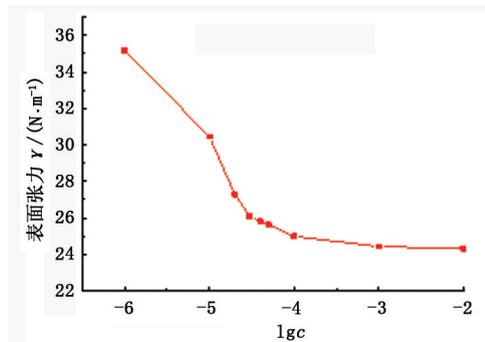


图7 乳化剂表面张力随浓度的变化曲线

Fig. 7 Variety of  $\lg c$  with  $\gamma$  of asphalt emulsifier

## 2.4 乳化剂的应用性能

### 2.4.1 乳化剂乳化性能

以合成的乳化剂分别配制1.00%、1.25%、1.50%、1.75%和2.00%的水溶液,考察乳化剂用量对乳化沥青贮存稳定性的影响。乳化沥青制备条件为:沥青AH-90,沥青用量60.0%,SBR用量3.0%,沥青温度 $135.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,皂液温度 $55.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,皂液pH值2.0。

乳化剂用量对乳化沥青贮存稳定性的影响见表1。

表1 乳化剂用量对乳化沥青贮存稳定性的影响

Table 1 Influence of emulsifier addition on stability of emulsion

乳化剂用量/%	贮存稳定性/%	
	1 d	5 d
1.00	1.13	5.42
1.25	0.94	3.21
1.50	0.23	0.96
1.75	0.22	0.87
2.00	0.29	0.85

从表1看出,当乳化剂用量在1.25%以上时,乳化沥青1 d和5 d的贮存稳定性可以满足指标要求(1 d贮存稳定性小于1.0%,5 d贮存稳定性小于5.0%),当乳化剂用量大于1.50%后,乳化沥青的贮存稳定性变化不大。在乳化沥青体系中,乳化剂在沥青和水的界面上定向排列,产生界面吸附现象,乳化沥青贮存稳定性与乳化剂分子在微粒表面的吸附量有关,随着在乳化沥青分散体系中乳化剂浓度的增加,乳化剂在油水界面上的吸附量先逐渐增大而后由于达到吸附饱和趋于稳定,因此在乳化沥青的贮存稳定性亦呈现相同的趋势。综合考虑成本和

乳化沥青性能,确定乳化剂用量为 1.50%。

乳化剂用量 1.50% 时制备的乳化沥青的粒度分布如图 8 所示。

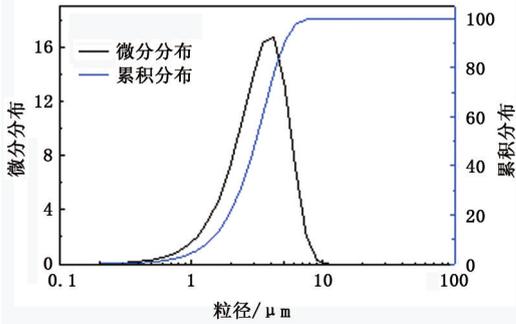


图 8 乳化沥青粒度分布

Fig. 8 Particle size distribution of asphalt emulsion

由图 8 看出,乳化沥青体系中沥青微粒呈正态分布,体积平均粒径  $D(4,3)$  为  $3.09 \mu\text{m}$ ,  $D90$  为  $4.87 \mu\text{m}$ ,即累积分布值为 90% 的粒径在  $4.87 \mu\text{m}$  以内,说明所制备的乳化沥青颗粒分布均匀细腻,形成的沥青微粒主要介于  $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ,沥青相分散均匀,粒径分布窄,沥青微粒间不易相互碰撞聚并而导致破乳,因此稳定性良好。

### 2.4.2 乳化沥青性能

对照微表处用乳化沥青的技术指标要求,乳化剂用量 1.50% 所制备的乳化沥青各项性能指标测定结果见表 2。从表 2 看出,所制备的乳化沥青满足微表处用乳化沥青的各项指标要求。

表 2 微表处用乳化沥青性能指标测定结果

Table 2 Performance of asphalt emulsion for micro-surfacing

试验项目	筛上剩余量 (1.18 mm 筛)/ %	电荷	恩格拉黏 度( $E_{25}$ )	蒸发残留 物含量/ %	蒸发残留物性质				贮存稳定性/%	
					针入度 (25 °C)	软化 点/°C	延度 (5 °C)/cm	溶解度 (三氯乙烯)/%	1 d	5 d
试验结果	0.01	+	10.83	63.8	73	54.5	31	99.9	0.23	0.96
技术要求	$\leq 0.1$	+	3-30	$\geq 60$	40 ~ 100	$\geq 53$	$\geq 20$	$\geq 97.5$	1	5
试验方法	T 0652	T 0653	T 0622	T 0651	T 0604	T 0606	T 0605	T 0607	T 0655	

### 2.4.3 可拌和时间

对制备的乳化沥青进行拌和试验,矿料级配采用公路沥青路面施工技术规范 JTGF40-2004 中微表处 MS-3 型级配组成,级配曲线如图 9 所示。拌和试验条件为:油石比(沥青占矿料的比例)7.2%,填料用量 2.0%,外加水量 6.0%,拌和试验温度 25.0 °C。

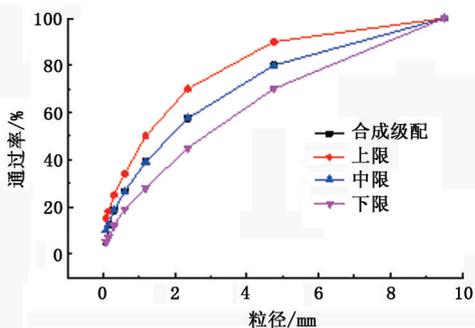


图 9 微表处混合料级配曲线

Fig. 9 Asphalt mixture grading curves for micro-surfacing

拌和试验结果表明,在相同的拌和试验条件下,由改性咪唑啉型乳化剂制备的乳化沥青与集料的可拌和时间为 206 s,远大于微表处用乳化沥青的指标要求(120 s),乳化沥青与集料的配伍性良好,摊铺后试样呈黑色,石料与沥青裹覆良好。

### 2.5 改性咪唑啉型乳化剂慢裂快凝机理

在乳化沥青体系中,沥青乳化剂作为两亲分子,

其亲油基插入沥青微粒,亲水基插入水相,从而在沥青和水的界面形成界面吸附膜。在乳化过程中,界面膜的形成降低了界面张力,同时排布在界面膜外层的乳化剂亲水基与水分子以氢键方式缔合在一起,形成水合层。通常亲水基越多,亲水性越强,则缔合的水分子就越多,水合层越厚且牢固。当阳离子乳化沥青与石料拌合时,乳液中游离的乳化剂分子首先向石料表面吸附,其次界面膜中的乳化剂亲水基向石料表面定向吸附发生重新排布,由此在乳化剂分子牵引下沥青微粒向石料表面靠近,原有的界面膜破裂,沥青微粒产生形变裹覆于石料表面<sup>[19]</sup>。在此过程中,界面膜上的水合层起到缓冲作用。

本文中研究的改性咪唑啉型乳化剂亲水基为多胺基基团,亲水基数量多,亲水性强,形成的水合层牢固,乳化沥青与石料拌和时界面膜不易破裂;其次,多胺基的亲水基形成多头亲水活性基团,当与石料接触时,部分胺基上的阳离子电荷被中和,而剩余部分头基仍然保留阳离子性,此时由于库仑力静电排斥作用,在石料表面优先吸附的乳化剂分子与乳化沥青微粒界面膜上的乳化剂分子产生排斥,从而有效延缓乳化剂极性基团与石料的接触过程;此外,经丙烯酸甲酯改性后的咪唑啉乳化剂分子,亲水基端的空间位阻增加,降低了亲水基与石料直接接触

的机会,进一步延缓了与石料的接触过程、延长了可拌和时间,从而使乳化沥青具有优异的慢裂快凝性能。

### 3 结 论

(1)以月桂酸、四乙烯五胺和丙烯酸甲酯为原料合成的改性咪唑啉型沥青乳化剂具有高表面活性、低临界胶束浓度(23.99  $\mu\text{g/g}$ )和低表面张力(24.36  $\text{mN/m}$ )的特点。用该乳化剂制备的乳化沥青粒度小(3.09  $\mu\text{m}$ )、颗粒均匀、贮存稳定性好。

(2)制备的阳离子乳化沥青各项指标均满足微表处用乳化沥青的技术要求,可拌和时间长达 206 s。

(3)用丙烯酸甲酯对咪唑啉中间体进行接枝改性,可增加含氮极性基团周围的空间位阻,延长乳化沥青微粒在集料表面的吸附破乳时间,利用乳化剂分子结构中的多个亲水基端对乳化沥青破乳速度的延缓作用,使乳化沥青具有优异的慢裂快凝性能。

### 参考文献:

- [1] PITTENGER D M, GRANSBERG D D, ZAMAN M, et al. Comparative analysis of microsurfacing and portland cement slurry seal for rut filling[C]. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 2014.
- [2] ERWIN T, TIGHE S L. Safety effect of preventive maintenance; a case study of microsurfacing[J]. Transportation Research Record (Journal of the Transportation Research Board), 2008,2044(1):79-85.
- [3] THEVNIN T, COUSSON A. Evaluation of a modification of current micro-surfacing mix design procedures [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2011, 42(2):254-258.
- [4] 王磊,吕璞,郝培文.微表处混合料路用性能影响因素[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(2):29-33.  
WANG Lei, LÜ Pu, HAO Peiwen. Factors affecting pavement performance of micro-surfacing mixture [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014,34(2):29-33.
- [5] 王长安,吴育良,郭敏怡,等.乳化沥青及其乳化剂的发展与应用[J].广州化学,2006,31(1):54-60.  
WANG Chang'an, WU Yuliang, GUO Minyi, et al. Development and applications of bitumen emulsion and its emulsifiers [J]. Guangzhou Chemistry, 2006,31(1):54-60.
- [6] 张倩,张彤,王月欣,等.慢裂快凝型阳离子沥青乳化剂的合成及其性能研究[J].日用化学工业,2012,42(6):432-435.  
ZHANG Qian, ZHANG Tong, WANG Yuexin, et al. Synthesis and properties of cationic emulsifier used for preparing slow-breaking and quick-setting type asphalt [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2012, 42(6):432-435.
- [7] PETER S. Cationic slurry seal emulsifiers: 4997481[P]. 1991-03-05.
- [8] 邓朝霞,傅和青,黄洪,等.阳离子沥青乳化剂研究进展[J].粘接,2006,27(4):32-34.  
DENG Zhaoxia, FU Heqing, HUANG Hong, et al. Progress on research of cationic bitumen emulsifier [J]. Adhesion in China, 2006,27(4):32-34.
- [9] 彭煜,孔祥军,蔺习雄.高性能阳离子乳化沥青的研制[J].石油沥青,2009,23(5):34-39.  
PENG Yu, KONG Xiangjun, LIN Xixiong. Development of high-performance Cationic emulsified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2009,23(5):34-39.
- [10] 陈玉成,林榕光. AY-1 型阳离子沥青乳化剂的研制[J].贵州大学学报,2002,19(4):346-349.  
CHEN Yucheng, LIN Rongguang. A preparation of AY-1 cationic bituminous emulsifier [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2002,19(4):346-349.
- [11] 王月欣,张彤,张倩.阳离子沥青乳化剂的研究进展[J].化学世界,2011(6):376-380.  
WANG Yuexin, ZHANG Tong, ZHANG Qian. A review of research on cationic bitumen emulsifier [J]. Chemical World, 2011(6):376-380.
- [12] PETER S. High viscosity cationic slow-set and medium-set emulsions:6077878[P]. 2000-06-20.
- [13] DENNIS K. Emulsifier and method of using in mixing grade emulsions:5137572[P]. 1992-08-11.
- [14] 徐剑,秦永春.微表处混合料可拌合时间的影响因素[J].公路交通科技,2002,19(1):4-7.  
XU Jian, QIN Yongchun. Impact factors on mixable time for micro-surfacing mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002,19(1):4-7.
- [15] 李莉,张承红,杨郭.沥青乳化剂的合成及乳化性能研究[J].化工时刊,2006,20(8):40-41.  
LI Li, ZHANG Chenghong, YANG Guo. Synthesis of a new asphalt emulsifier and its emulsification performance [J]. Chemical Industry Times, 2006,20(8):40-41.
- [16] 李稳宏,王维周,贺建勋. SM 型阳离子咪唑啉沥青乳化剂的合成研究[J].石油化工,1995,24(5):328-330.  
LI Wenhong, WANG Weizhou, HE Jianxun. The synthesis and application of imidazoline chloride cationic as-

- phalt emulsifier for highway construction [J]. *Petrochemical Technology*, 1995, 24(5):328-330.
- [17] 孔祥军, 彭煜, 地力拜·马力克, 等. 含空间位阻基团的沥青乳化剂合成及性能[J]. *石油学报(石油加工)*, 2013(1):81-85.  
KONG Xiangjun, PENG Yu, DILIBAR Malik, et al. Synthesis and performance test of bitumen emulsifier containing steric hindrance groups [J]. *Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section)*, 2013(1):81-85.
- [18] ZHANG L, YU P, LI F. Synthesis process of long-chain alkyl amide imidazoline by react IR [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2010(1):022.
- [19] 施来顺, 曹晓新, 郭之宁, 等. 影响阳离子乳化沥青破乳时间因素的探讨[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2003, 33(1):97-100.  
SHI Laishun, CAO Xiaoxin, GUO Zhining, et al. Factors influencing the breaking time of cationic emulsifier bituminous mixture[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2003, 33(1):97-100.

(编辑 刘为清)