

文章编号:1673-5005(2017)01-0156-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.01.021

# 催化油浆对沥青抗老化性能的影响及 机制研究

范维玉, 翟哲, 姚艳, 南国枝, 梁明, 罗辉

(中国石油大学重质油国家重点实验室, 山东青岛 266580)

**摘要:**南美重油中掺加油浆后,通过实沸点蒸馏制备 AH-70 沥青;分别采用薄膜烘箱实验法(TFOT)和加速老化实验法(PAV)模拟沥青的短期和长期老化,考察不同的油浆掺量对沥青短期和长期抗老化性的影响,并对老化机制进行研究。结果表明:南美重油掺加0%、3%、6%、9%和12%油浆后分别切割到425、430、430、430、435℃可得到AH-70沥青;随着油浆掺加比例的增大,经短期老化后沥青的残留针入度比、15℃残留延度降低,软化点升高率增大;沥青经过长期老化后,残留针入度比降低、软化点升高率增大;沥青在短期老化中没有发生明显的官能团氧化反应,随掺加油浆比例的增大,沥青中轻组分的挥发和芳香分、胶质的缩合加剧是导致沥青短期抗老化性逐渐变差的原因;沥青经长期老化后,发生氧化生成亚砷和羰基官能团,油浆中的芳烃化合物可有效地抑制沥青氧化反应中的自由基反应,但芳香分、胶质的缩合加剧仍导致沥青长期抗老化性逐渐变差。

**关键词:**催化油浆; 沥青; 实沸点蒸馏; 抗老化性能; 红外谱图

**中图分类号:**U 414      **文献标志码:**A

**引用格式:**范维玉,翟哲,姚艳,等.催化油浆对沥青抗老化性能的影响及机制研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):156-163.

FAN Weiyu, ZHAI Zhe, YAO Yan, et al. Research of effect and mechanism of FCC slurry on the aging resistance of asphalt [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41 (1) : 156-163.

## Research of effect and mechanism of FCC slurry on the aging resistance of asphalt

FAN Weiyu, ZHAI Zhe, YAO Yan, NAN Guozhi, LIANG Ming, LUO Hui

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** AH-70 asphalts were obtained using FCC slurry with heavy crude oil from South America as the feedstock through true boiling point distillation instrument. The thin film oven test (TFOT) and pressure aging vessel (PAV) were applied to simulate the short-term and long-term aging of asphalt respectively, through which the effect and mechanism of FCC slurry on the two anti-aging processes were investigated. It is found that AH-70 asphalts can be produced from the blending of heavy oil and FCC slurry (0%, 3%, 6%, 9%, and 12% by weight of heavy oil, respectively) at the final boiling point of 425, 430, 430, 430, and 435 °C accordingly. With the increase of the blending ratio for FCC slurry, the retained penetration and ductility at 15 °C of the TFOT aged asphalts are reduced. Meanwhile, the growth rate of softening point is increased. After PAV aging, the retained penetration is declined and the growth rate of softening point is also improved. And there is no significant oxidation reaction of functional groups during the TFOT aging process. As the increase of FCC slurry, the volatilization of light components and the condensation of aromatics/resins are the main reasons of deteriorating the TFOT aging performance of asphalt. After PAV aging, the sulfoxide and carboxyl groups are formed in the asphalt. Also, it is found that the aromatics in FCC slurry can inhibit the free radical reaction in the aging process of asphalt. However, the condensation of aromatics and resins still damages the PAV anti-aging property.

收稿日期:2016-09-23

基金项目:中国石油天然气集团公司重点项目(15370502000070)

作者简介:范维玉(1957-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为沥青材料。E-mail:fanwyu@upc.edu.cn。

**Keywords:** FCC slurry; asphalt; true boiling point distillation; anti-aging property; infrared spectroscopy

催化裂化油浆中含有大量芳烃,蜡含量低,可以有效改善沥青性质。目前利用催化裂化油浆这一贫蜡富芳组分作改性剂生产高等级道路沥青<sup>[1-2]</sup>主要研究方向有:①先将油浆进行改质,改质后的油浆经蒸馏得到残渣,将残渣与渣油调和生产道路沥青<sup>[3]</sup>;②渣油与油浆掺兑后进行溶剂脱沥青,得到的脱油沥青作为道路沥青产品<sup>[4]</sup>;③油浆与原油混炼来生产合适的道路沥青产品<sup>[5]</sup>;④将油浆与废胶粉改性沥青混合生产乳化沥青<sup>[6]</sup>;⑤通过催化剂催化油浆与煤的反应制备改性剂,对沥青进行改性来

生产合格的产品<sup>[7]</sup>。笔者采用原油与油浆混炼的方法制备 AH-70 沥青,对其进行短期和长期老化研究;根据沥青老化前后的宏观性质变化,通过红外分析与组分分析相结合的方法探讨催化油浆对沥青抗老化性能的影响及影响机制。

## 1 实验

### 1.1 原料及仪器

实验原料为南美重油(以下简称“重油”)及某催化油浆,原料性质见表1。

表1 原料性质分析

Table 1 Property analysis of raw materials

原料	密度(20℃) $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	运动黏度(50℃) $\mu/(mm^2 \cdot s^{-1})$	硫质量 分数/%	饱和分质量 分数/%	芳香分质量 分数/%	胶质质量 分数/%	沥青质质量 分数/%
重油	0.9730	445.6	3.98	36.55	31.84	22.64	8.97
油浆	0.9823	284.6	0.37	43.28	42.98	11.33	2.41

由表1可知,重油密度和黏度较大,沥青质含量较高,硫含量高达3.98%,属于典型的高硫重质原油;相比较而言,油浆的密度高于重油,但运动黏度和硫含量要低于重油,其芳香分含量高达42.98%,可作为生产道路沥青的优质调和原料。

实验仪器:TDS-1-L-04A型实沸点蒸馏仪(北京奥普伟业科技有限公司);NEXUS型红外光谱仪(美国Thermo Nicolet公司);82A型沥青薄膜烘箱(无锡市石油仪器设备有限公司);9300E/SC型压力老化容器(Prentex USA)。

### 1.1 实验方法

(1)AH-70沥青的制备。首先以重油为原料进行实沸点蒸馏,制备得到AH-70沥青;然后在重油中分别内掺3%、6%、9%、12%的油浆进行实沸点蒸馏,分别得到AH-70沥青样品。

(2)沥青模拟老化实验。对得到的5个沥青样品进行TFOT和PAV实验,分别用来模拟沥青的短期老化和长期老化。TFOT实验按GB/T 5304-2001标准进行;PAV的条件为:100℃,20h,2.1MPa。参照标准为SH-T 0774-2005(PAV法)。

(3)沥青老化前后宏观性能分析及微观表征。参照JTG F40-2004对沥青的针入度、软化点、延度等宏观性质进行分析;以残留针入度比、残留延度及软化点升高率作为沥青抗老化性能评价指标。采用IR对沥青老化前后官能团的变化进行分析,其中羰基、亚砷吸收峰可对沥青老化进行较好的表征<sup>[8]</sup>。参照NB/SH/T 0509-2010标准对沥青的四组分进

行分析。

## 2 结果分析

### 2.1 AH-70 沥青老化前后基本性质

#### 2.1.1 AH-70 沥青原样性质

对重油及掺加油浆后的重油进行实沸点蒸馏,得到不同针入度范围的沥青。在不同温度下制备的沥青针入度结果见图1。

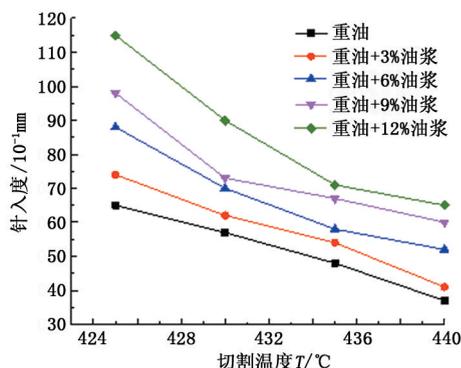


图1 原料在不同切割温度下的针入度曲线

Fig.1 Curves of penetrations for raw materials at different cutting temperatures

由图1看出,重油及掺加不同含量油浆后的重油分别切割到425、430、430、430和435℃时可得到AH-70沥青;对重油及掺加油浆后的重油进行实沸点蒸馏切割,制备的沥青针入度均随切割温度的升高而减小;在相同的切割温度下,油浆的掺加比例越大,沥青针入度越大。这是由于在实沸点蒸馏过程中,原料中轻组分沸点较低,绝大部分随轻馏分被蒸

馏出来,而稠环芳烃等沸点较高,残留在蒸馏残渣中;油浆中稠环芳烃含量较高,原油掺加油浆混炼之后,在渣油中引入了更多稠环芳烃等轻组分,从而在

相同切割温度下制得沥青的针入度较大。

重油及掺加油浆后制得 AH-70 沥青的基本性质如表 2 所示。

表 2 AH-70 沥青原样性质分析

Table 2 Property analysis of original AH-70 asphalts

油浆掺加量/%	针入度(25℃)/10 <sup>-1</sup> mm	延度(15℃)/cm	软化点/℃	溶解度/%	闪点(开口杯法)/℃	密度(25℃) ρ/(kg·m <sup>-3</sup> )	蜡质量分数/%
0	65	>150	49.3	99.86	308	1034.9	1.52
3	74	>150	47.8	99.92	306	1032.2	1.78
6	70	>150	48.4	99.90	298	1028.8	2.04
9	73	>150	48.0	98.85	298	1023.1	2.23
12	71	>150	47.4	99.87	280	1022.8	2.27

由表 2 看出,沥青样品的 15℃ 延度均大于 150 cm,且溶解度均大于 99%。随着油浆掺加比例的增大,沥青的闪点降低、密度减小,说明掺加油浆后制得沥青中轻组分含量增多。与此同时,沥青中蜡含量逐渐升高,这主要是催化油浆中蜡含量较高所致。

2.1.2 AH-70 沥青老化后基本性质

美国战略公路研究计划(SHARP)认为,旋转薄膜烘箱实验(RTFOT)可模拟沥青的短期老化行为;而经 RTFOT 老化后的沥青剩余物,再经过压力老化(PAV)可反映沥青 5 a 的老化情况。与此同时,薄

膜烘箱实验(TFOT)与 RTFOT 可互相代替<sup>[9]</sup>。本文中采用 TFOT、PAV 分别模拟沥青的短期和长期老化。

一般通过分析沥青老化前后的宏观性质评价其抗老化性能,如残留针入度比、软化点升高率、残留延度、60℃ 动力黏度变化等可作为沥青的老化指标<sup>[10]</sup>。本文中采用沥青老化后的残留针入度比、软化点升高率、残留延度作为沥青抗老化性能的评价指标。沥青经过 TFOT、PAV 老化实验后性质分析结果如表 3 所示。

表 3 老化后沥青性质分析

Table 3 Property analysis of AH-70 asphalts after aging

油浆掺加量/%	TFOT				PAV		
	残留针入度比/%	软化点升高率/%	残留延度(10℃)/cm	残留延度(15℃)/cm	残留针入度比/%	软化点升高率/%	残留延度(15℃)/cm
0	73.8	6.1	8.8	61.6	43.1	23.5	5.7
3	72.9	8.4	9.0	62.4	42.9	25.9	5.8
6	70.7	8.9	9.4	54.0	42.7	28.3	5.4
9	64.3	12.1	10.0	44.6	38.5	28.7	6.1
12	60.2	14.8	9.4	40.3	36.6	31.4	5.8

由表 3 可知,随着油浆掺加比例的增大,沥青 TFOT 后的残留针入度比和 15℃ 残留延度逐渐减小,软化点升高率逐渐变大,说明掺加油浆比例越大,沥青的短期抗老化性越差;然而,沥青老化后的 10℃ 残留延度变化趋势不明显,这是因为沥青经过 TFOT 之后 10℃ 残留延度均很小,致使其无论是否掺加油浆变化趋势均不明显。随着油浆掺加比例的增大,经过 PAV 后沥青的残留针入度比降低、软化点升高率增大,说明沥青的长期抗老化能力逐渐变差;15℃ 残留延度随油浆掺加比例的变化趋势不明显,这是由于沥青经过 PAV 后,其 15℃ 残留延度均变得很小,因此 5 种沥青的差别不是很大。由此可以看出,当沥青老化增强到一定程度后,残留延度不能用以表征其抗老化性的强弱。

与 TFOT 相比,同一沥青经 PAV 实验后的残留针入度比明显降低、软化点升高率变大,15℃ 残留延度降低。由此可以看出,沥青经过 PAV 后的性能变得更差。沥青的短期老化是指在其拌合与铺筑过程中的老化;而长期老化是指沥青在路面使用时,长期暴露于外界环境中,受温度、光照、降水等综合因素影响发生的老化<sup>[11]</sup>。针对沥青 TFOT 和 PAV 后宏观性质的变化,对其短期老化和长期老化机制进行探讨具有重要的理论和实际意义。

2.1.3 AH-70 沥青老化前后四组分

沥青的组分组成与其宏观性质密切相关,一般轻组分越多,沥青越软。对掺加油浆制备的 5 种沥青原样、TFOT 后、PAV 后的组分组成进行分析,其中(原样-TFOT)/原样为沥青经 TFOT 后,(饱和分+

芳香分)/(胶质+沥青质)相比于原样的减小率;同理,(原样-PAV)/原样为沥青经 PAV 后,(饱和分+芳香分)/(胶质+沥青质)相比于原样的减小率。沥青四组分结果见表 4~6。

表 4 原样沥青四组分分析结果

Table 4 Component analysis results of original AH-70 asphalts

油浆掺加量/%	饱和分质量分数/%	芳香分质量分数/%	胶质质量分数/%	沥青质质量分数/%	(饱和分+芳香分)/(胶质+沥青质)
0	15.25	41.40	28.49	14.86	1.31
3	15.88	42.89	28.55	12.68	1.43
6	17.19	44.62	26.26	11.92	1.62
9	18.49	46.86	23.30	11.34	1.89
12	19.92	47.81	21.60	10.67	2.10

表 5 沥青 TFOT 后四组分分析结果

Table 5 Component analysis results of AH-70 asphalts after TFOT

油浆掺加量/%	饱和分质量分数/%	芳香分质量分数/%	胶质质量分数/%	沥青质质量分数/%	(饱和分+芳香分)/(胶质+沥青质)	(原样-TFOT)/原样
0	13.26	39.41	29.52	17.81	1.11	0.15
3	12.02	40.12	27.74	20.12	1.09	0.24
6	12.26	38.45	27.47	21.82	1.03	0.36
9	11.47	35.56	26.39	26.58	0.89	0.53
12	11.27	34.79	26.42	27.52	0.85	0.60

表 6 沥青 PAV 后四组分分析结果

Table 6 Component analysis results of AH-70 asphalts after PAV

指标	饱和分质量分数/%	芳香分质量分数/%	胶质质量分数/%	沥青质质量分数/%	(饱和分+芳香分)/(胶质+沥青质)	(原样-PAV)/原样
0	10.33	37.82	27.88	23.97	0.93	0.29
3	9.86	37.23	29.65	23.26	0.89	0.38
6	10.04	36.24	27.33	26.39	0.86	0.47
9	9.66	34.88	24.70	30.76	0.80	0.58
12	9.17	33.12	25.38	32.33	0.79	0.62

由表 4~6 可知,对于原样沥青,随着油浆掺加比例的增大,其饱和分、芳香分含量逐渐升高,而胶质和沥青质含量逐渐降低,(饱和分+芳香分)/(胶质+沥青质)逐渐变大,说明沥青中轻组分逐渐增多。

与此同时,沥青经 TFOT 实验后,其饱和分、芳香分的含量均降低,胶质含量有所增加,沥青质的含量明显升高。且随着油浆掺加比例的增大,相比于原样沥青,5 种沥青中饱和分、芳香分含量降低幅度逐渐增大,这说明沥青中轻组分在 TFOT 中挥发性逐渐增强;而沥青质含量的增加幅度逐渐变大,表明在 TFOT 中芳香分、胶质缩合生成沥青质的反应程度随掺加油浆比例的增大而加深;对于(原样-TFOT)/原样,掺加油浆比例越大,其值越大,表示沥青经 TFOT 后组分组成变化是逐渐增大的。由此可知,随着油浆掺加比例的增大,沥青在 TFOT 实验中组分组成变化逐渐变大,其主要原因是轻组分的挥发和芳香分、胶质缩合生成沥青质的反应程度增加。

表 5 为经过 TFOT 后,沥青样品的四组分变化结果。

对 PAV 后的沥青进行四组分分析,表 6 为分析结果。

沥青经 PAV 实验后四组分分析结果表明,与 TFOT 后沥青相比,5 种沥青中的饱和分、芳香分含量均略微下降,沥青质含量均升高,(饱和分+芳香分)/(胶质+沥青质)逐渐减小;但胶质的含量变化趋势不明显,这主要由胶质的含量受芳香分转化为胶质的速率及胶质转化为沥青质的速率双重决定,相对速率的不同导致胶质含量有增有减。随油浆掺加比例的增大,相比于 TFOT 后的沥青,5 种沥青中饱和分、芳香分含量降低幅度接近,而沥青质含量的增加幅度逐渐变大;(原样-PAV)/原样的值逐渐增大,说明沥青经 PAV 后组分组成变化逐渐增大。可见,相比于 TFOT 实验,沥青经 PAV 实验后组分的变化主要由芳香分和胶质的缩合引起,且油浆掺加比例越大,缩合程度越大。

## 2.2 AH-70 沥青老化机制

沥青的老化是一个缓慢的过程,其在老化过程中主要发生了两种不可逆变化:一方面是饱和分、芳

香分等轻组分的挥发,同时伴随着芳香分、胶质缩合为沥青质;另一方面是某些官能团发生了氧化反应,一些活泼的官能团如酮、羧酸、芳香族中的脂肪烃侧链等易被氧化<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2.1 短期老化

目前,红外分析被广泛地应用于基质沥青和改性沥青的老化机制研究<sup>[14-15]</sup>。对 AH-70 沥青 TFOT 实验前后的红外谱图进行测定,结果如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可知,重油制备的沥青经 TFOT 前后官能团没有发生明显变化。在 2960、2870、1450、1380  $\text{cm}^{-1}$  附近有明显吸收峰,这是  $-\text{CH}_3$  的面内不对称伸缩、面内伸缩、面内不对称弯曲和面内对称弯曲峰。

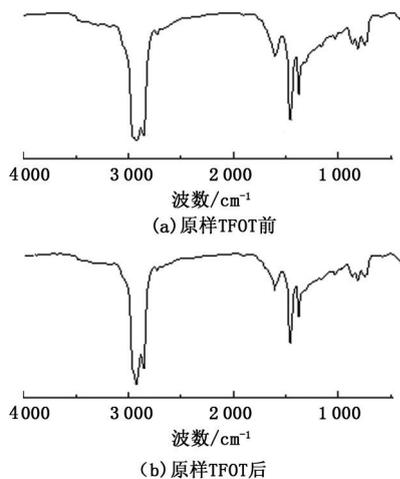


图 2 重油制备的 AH-70 沥青 TFOT 前后的红外谱图  
Fig. 2 Infrared spectra of AH-70 asphalt prepared by heavy crude oil before and after TFOT

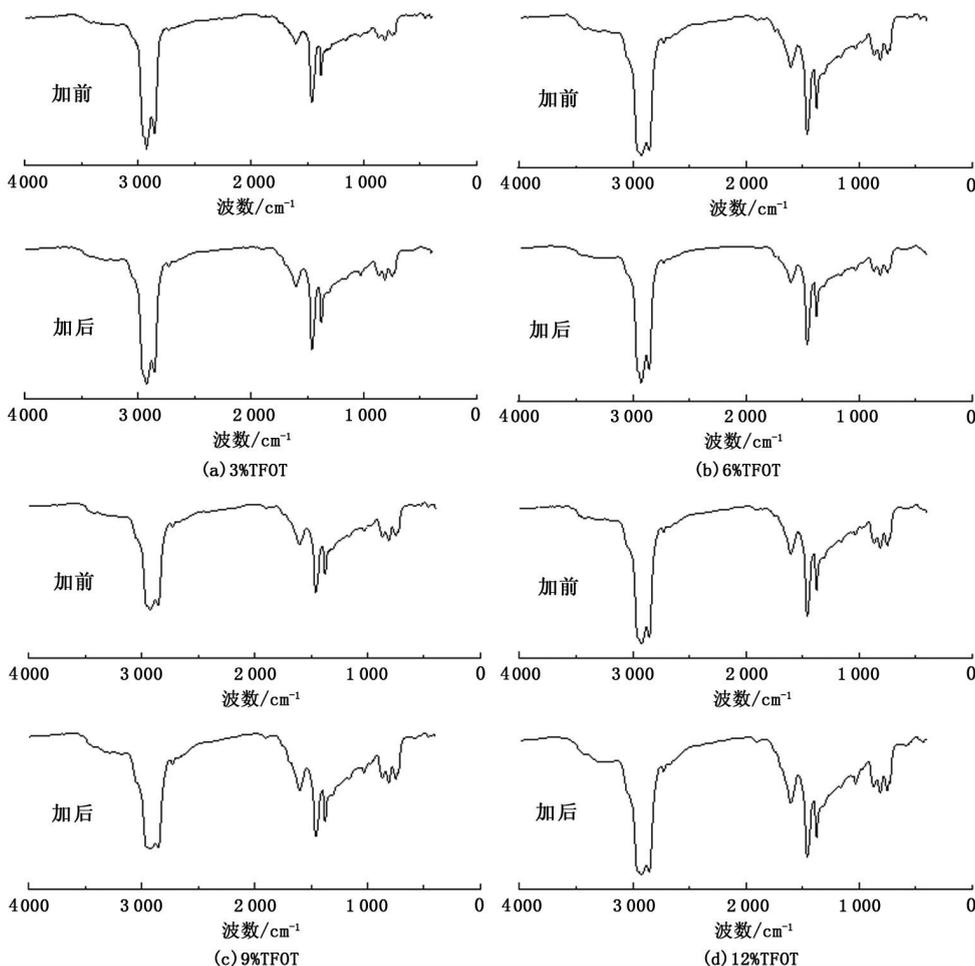


图 3 掺加油浆制备的 AH-70 沥青 TFOT 前后的红外谱图

Fig. 3 Infrared spectra of AH-70 asphalts prepared by heavy crude oil with different proportions of FCC slurry before and after TFOT

比较图 2 和图 3 可知,掺加油浆前后制备的沥青中所含官能团类型相近。而图 3 表明,掺加油浆后制备的沥青在 TFOT 后也均未发生明显的官能团变化,

这说明无论掺加油浆与否,在 TFOT 过程中沥青均没有发生显著的氧化反应,故官能团氧化不是导致掺加油浆后沥青短期抗老化性变差的原因。同时由沥青

组分分析可知,油浆掺加比例越大,轻组分的挥发和芳香分、胶质缩合生成沥青质的反应程度增加。所以,沥青短期抗老化能力逐渐变差的原因是由轻组分的挥发及芳香分、胶质缩合反应的加剧造成的。

掺加油浆制备的沥青短期抗老化能力差的主要原因是由其体系的稳定性决定的。沥青体系可看作是沥青质构成一种网状结构,其中内嵌一些油分构成的<sup>[16]</sup>。这种体系可分为分散相和分散介质,分散相主要是以沥青质为核心,附以部分胶质构成的;分散介质主要是由胶质及部分油分组成。分散介质和分散相的相对含量决定了整个体系的稳定性,体系中胶质越多,其对沥青质的胶溶能力越强,体系越稳定<sup>[17]</sup>;而体系中饱和分和芳香分会降低沥青质的胶溶能力,致使其稳定性变差。掺加油浆之后,在制备的沥青中引入了更多饱和分和芳香分,而沥青中胶质含量降低,使沥青体系的稳定性变差。从宏观上来看,这主要表现为掺加油浆制备的沥青短期抗老化性逐渐变差。

### 2.2.2 长期老化

对上述制备的 5 种沥青 PAV 前后官能团的变化进行红外谱图分析,分析结果如图 4 和图 5 所示。

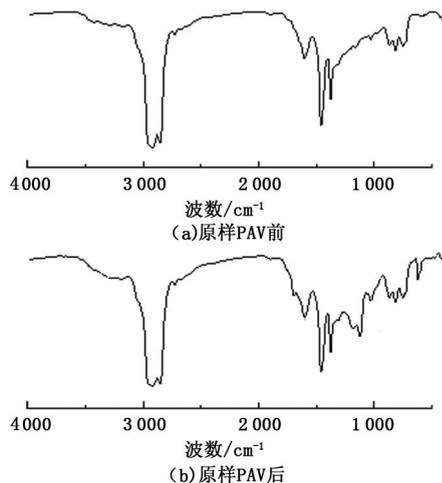


图 4 重油制备的沥青 PAV 前后红外谱图分析

Fig. 4 Infrared spectra of AH-70 asphalt prepared by heavy crude oil before and after PAV

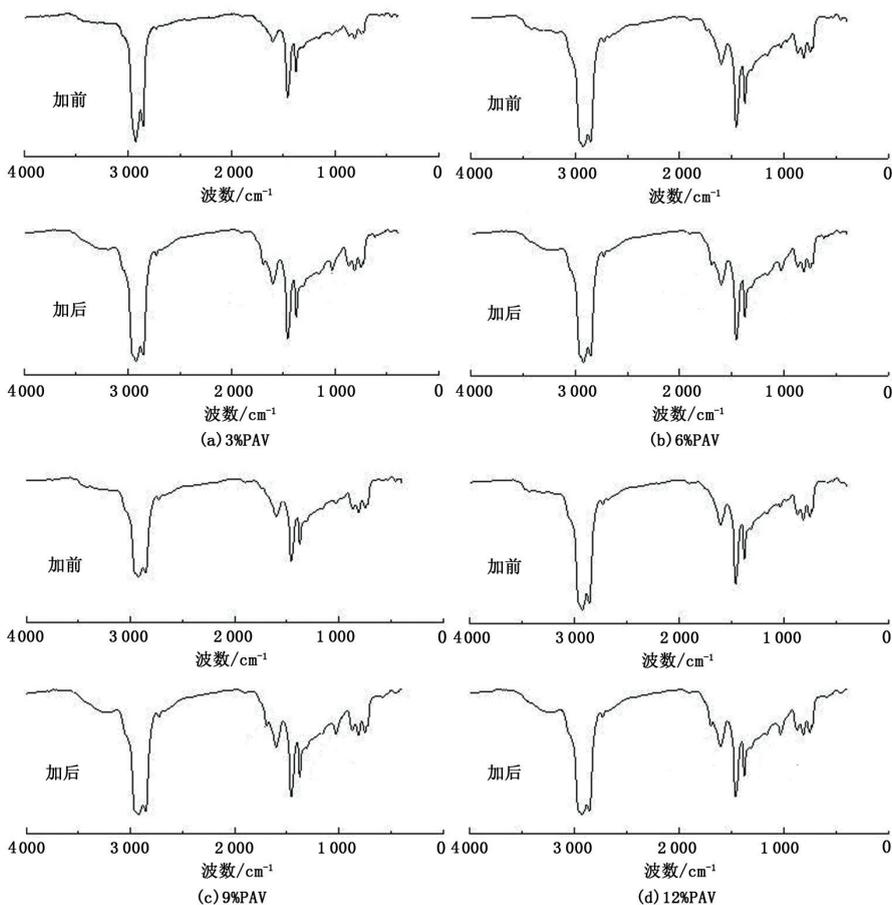


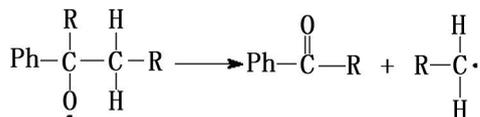
图 5 掺加油浆制备的 AH-70 沥青 PAV 前后红外谱图分析

Fig. 5 Infrared spectra of AH-70 asphalts prepared by heavy crude oil with different proportions of FCC slurry before and after PAV

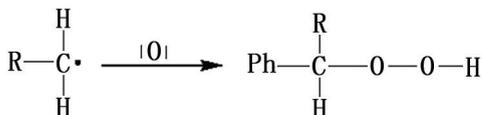
由图4和图5可知,沥青经过PAV实验后,在1030、1680  $\text{cm}^{-1}$ 附近均形成了新的吸收峰,1030  $\text{cm}^{-1}$ 处为亚砷吸收峰,1680  $\text{cm}^{-1}$ 处为羰基吸收峰,说明沥青经过长期老化后均发生了氧化反应。由前述沥青四组分分析可知,沥青在TFOT过程中主要发生了轻组分的挥发及芳香分、胶质的缩合;相比于TFOT,沥青在PAV实验后主要发生了芳香分、胶质的缩合;且油浆掺加比例越大,反应程度越剧烈。综上所述,随油浆掺加比例的增大,制备的沥青长期抗老化性逐渐变差的原因是由于缩合反应的加剧造成的。

除此之外,重油未掺加油浆制备的沥青在PAV实验后红外谱图中620和1120  $\text{cm}^{-1}$ 处出现明显的吸收,这是烷氧亚砷基团的红外吸收峰,是由沥青中的硫醚氧化形成的。而掺加油浆后都没有产生这两个吸收峰。研究表明<sup>[18]</sup>,沥青的氧化属于自由基反应。由此推测,基团烷氧亚砷在沥青氧化过程中生成的机制如下。

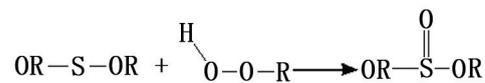
(1) 烷氧自由基的分解:



(2) 自由基的氧化:



(3) 硫醚的氧化:



在油浆中存在大量芳香化合物,其可作为供氢剂在热作用下生成氢自由基阻断自由基氧化成过氧化物。这可能是掺加油浆制备的沥青经过长期老化未形成烷氧亚砷的原因。

### 3 结论

(1) 随着油浆掺加比例的增大,经TFOT后沥青的残留针入度比和15  $^{\circ}\text{C}$ 延度降低,软化点升高率增大,10  $^{\circ}\text{C}$ 延度变化不明显;PAV实验后,沥青残留针入度比降低、软化点升高率增大、15  $^{\circ}\text{C}$ 延度变化不明显。

(2) 随油浆掺加比例的增大,沥青在短期老化过程中轻组分的挥发及芳香分、胶质缩合为沥青质的反应加剧,但均没有发生明显的官能团氧化反应,前者是导致掺加油浆后沥青短期抗老化能力逐渐变

差的主要原因。

(3) 在长期老化过程中,无论掺加油浆与否,沥青均发生氧化反应生成亚砷和羰基官能团。沥青经过长期老化之后,其抗老化性随油浆掺加比例的增大而变差主要是由于芳香分、胶质缩合为沥青质的反应加剧引起的。

### 参考文献:

- [1] 张兆前,李正,朱根权,等. 催化裂化油浆利用的技术进展[J]. 化工进展,2007,26(11):1559-1562.  
ZHANG Zhaoqian, LI Zheng, ZHU Genquan, et al. Technical progress of utilization of fluid catalytic cracking slurry[J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2007,26(11):1559-1562.
- [2] 林秀丽,卢春燕,马海桐,等. 催化裂化油浆综合利用的发展趋势[J]. 广东石油化工学院学报,2011,21(3):8-11.  
LIN Xiuli, LU Chunyan, MA Huitong, et al. Development for integrated utilization of FCC slurry oil[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2011,21(3):8-11.
- [3] 王先峰,徐幸,向丽,等. 催化裂化油浆交联缩合生产道路沥青研究[J]. 炼油技术与工程,2008,38(10):5-8.  
WANG Xianfeng, XU Xing, XIANG Li, et al. Study on producing paving asphalts with condensed FCC slurry[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2008,38(10):5-8.
- [4] 刘以红,宋艳茹. 催化裂化油浆在生产优质道路沥青中的应用[J]. 石油化工高等学校学报,2004,17(3):58-61.  
LIU Yihong, SONG Yanru. Production of paving asphalt by solvent deasphalting of vacuum residue and RCC decant oil[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2004,17(3):58-61.
- [5] 杨光,陈东魁,钱军. 催化油浆与南美重油混合生产道路沥青技术研究[J]. 石油沥青,2013,27(5):18-21.  
YANG Guang, CHEN Dongkui, QIAN Jun. Research on production of road asphalt by mixing FCC slurry with south American heavy crude oil[J]. Petroleum Asphalt, 2013,27(5):18-21.
- [6] ZHOU X, WANG F, YUAN X, et al. Usage of slurry oil for the preparation of crumb-rubber-modified asphalt emulsions[J]. Construction and Building Materials, 2015, 76:279-285.
- [7] XUE Y, YANG J, LIU Z, et al. Paving asphalt modifier from co-processing of FCC slurry with coal[J]. Catalysis today, 2004,98(1):333-338.

- [8] XIANG L, CHENG J, KANG S. Thermal oxidative aging mechanism of crumb rubber/SBS composite modified asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 169-175.
- [9] LU X, ISACSSON U. Effect of aging on bitumen chemistry and rheology[J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(1): 15-22.
- [10] 李宁利, 张彩利, 肖庆一, 等. 沥青老化性能评价指标[J]. *河北工业大学学报*, 2013(2): 80-83.  
LI Ningli, ZHANG Caili, XIAO Qingyi, et al. Evaluation index of the performance of aging resistance of asphalt[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2013(2): 80-83.
- [11] 田小草, 郑健龙, 张起森. 老化对沥青胶结料常规指标的影响[J]. *石油沥青*, 2004, 18(2): 11-15.  
TIAN Xiaoge, ZHENG Jianlong, ZHANG Qisen. Effect of aging on conventional index of asphalt binder[J]. *Petroleum Asphalt*, 2004, 18(2): 11-15.
- [12] 陈华鑫, 陈拴发, 王秉纲. 基质沥青老化行为与老化机制[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2009, 39(2): 125-130.  
CHEN Huaxin, CHEN Shuanfa, WANG Binggang. The aging behavior and mechanism of base asphalts[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2009, 39(2): 125-130.
- [13] FERNANDEZ-GOMEZ W D, QUINTANA H A R, DAZA C E, et al. The effects of environmental aging on Colombian asphalts[J]. *Fuel*, 2014, 115: 321-328.
- [14] MOUILLET V, LAMONTAGNE J, DURRIEU F, et al. Infrared microscopy investigation of oxidation and phase evolution in bitumen modified with polymers[J]. *Fuel*, 2008, 87(7): 1270-1280.
- [15] SUN L, WANG Y, ZHANG Y. Aging mechanism and effective recycling ratio of SBS modified asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 70: 26-35.
- [16] YIN J M, WANG S Y, LÜ F R. Improving the short-term aging resistance of asphalt by addition of crumb rubber radiated by microwave and impregnated in epoxidized soybean oil[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 712-719.
- [17] 李生华, 刘晨光. 减压渣油的胶体结构及其形成[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1997, 21(6): 71-76.  
LI Shenghua, LIU Chenguang. Colloidal structures and their formation in petroleum vacuum residua[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1997, 21(6): 71-76.
- [18] OUYANG C, WANG S, ZHANG Y, et al. Improving the aging resistance of asphalt by addition of zinc dialkyldithiophosphate[J]. *Fuel*, 2006, 85(7): 1060-1066.

(编辑 刘为清)