

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.12.011

# 基于氢化还原与端基钝化的老化沥青化学修复机制与性能评价

陈辉强<sup>1</sup>, 雷笑秋<sup>1</sup>, 程俊<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 中建一局集团第五建筑有限公司, 北京 100024)

**摘要:**针对废旧沥青因性能劣化引起的再生沥青混合料路用性能不佳的问题, 选用氢化还原剂三乙氧基硅烷将老化沥青中的强极性羰基和亚砷基还原成羟基, 生成极性较低的酯或者醚; 再通过端基钝化剂异氰酸酯与羟基进行酯化反应, 实现端基钝化。通过测试老化沥青各修复阶段的微观化学结构与极性变化, 研究其修复机理; 进而以基质沥青为参比, 分析测试老化沥青性能修复前后的动力粘度和低温性能, 评价氢化还原与端基钝化对老化沥青的化学修复效果。结果表明, 氢化还原与端基钝化使老化沥青的化学结构发生了本质的变化, 三乙氧基硅烷可将老化沥青中羰基和亚砷基还原成羟基, 异氰酸酯可将羟基酯化成酯; 经氢化还原与端基钝化之后, 老化沥青的极性显著减弱, 分子间作用力和粘度明显降低, 低温变形能力得以显著改善, 且老化沥青的低温性能与官能团指数之间具有良好的相关性。

**关键词:**氢化还原; 端基钝化; 老化沥青; 极性; 动力粘度; 低温性能

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)12-114-09

## Mechanism and properties evaluation of chemical remediation of aged asphalt based on hydrogenation reduction and end group deactivation

CHEN Huiqiang<sup>1</sup>, LEI Xiaoqiu<sup>1</sup>, CHENG Jun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering of Chongqing JiaoTong Univesity, Chongqing 400074, P. R. China;

2. The Fifth Construction Co., Ltd., China Construction First Group, Beijing 100024, P. R. China)

**Abstract:** Addressing the issue of poor pavement performance in reclaimed asphalt mixture caused by the deterioration of aged asphalt properties, this study explores the use of triethoxy silane to convert strong polar carbonyl and sulfoxide groups in aged asphalt into hydroxyl groups. Simultaneously, low polarity ester or ether are generated. Subsequently, the hydroxyl groups are esterified with the end group deactivator isocyanate to achieve end group deactivation. The chemical repair mechanism was explored through analyzing the microcosmic chemical structure and polarity changes of aged asphalt at each repair stage. By comparing the results to matrix asphalt, the chemical repair effects of hydrogenation reduction and end-group deactivation on aged asphalt were evaluated by the analysis and testing of dynamic viscosity and low temperature properties of aged asphalt before and after repair. The results show that the chemical structure of aged asphalt is changed by hydrogenation and

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708072)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51708072).

作者简介: 陈辉强(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事道路结构与材料方向研究, (E-mail)chqlxj@126.com。

passivation. The carbonyl and sulfoxide groups in aged asphalt are reduced to hydroxyl groups by triethoxysilane, which are then esterified to ester by isocyanate. After hydrogenation and passivation, the polarity of aged asphalt significantly weakens, leading to a substantial reduction in intermolecular forces and viscosity. Consequently, the low temperature deformation capacity is significantly improved. Furthermore, a strong correlation between low-temperature properties and the functional group index of aged asphalt was observed.

**Keywords:** hydrogenation reduction; end group deactivation; aged asphalt; polarity; dynamic viscosity; low temperature property

当前,废旧沥青混合料的有效循环利用已迫在眉睫。诸多学者围绕沥青老化机制和再生利用开展研究,取得了大量成果。就老化而言,代表性研究成果主要涉及3个方面:沥青老化引起的沥青路用性能衰减<sup>[1-4]</sup>、沥青老化之后的组分与结构变化<sup>[5-7]</sup>以及含氧官能团的增加与碳碳双键的减少等<sup>[8]</sup>;就再生利用而言,相关研究成果主要涵盖热再生、冷再生及近年来兴起的温拌再生。而关于技术手段相对可靠的废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)热再生技术,国内外研究者主要针对再生剂种类<sup>[9]</sup>、RAP的掺量<sup>[10]</sup>、新旧沥青的融合度<sup>[11-14]</sup>等因素对热再生胶结料与混合料的路用性能影响开展了研究,但成果仍然局限于添加型的物理再生,即添加新沥青或添加再生剂的再生。两者均可使老化沥青实现“软化”,其流变性和低温性能得到一定程度改善<sup>[15]</sup>,再生效果相当有限。这是因为,沥青老化的本质既包括轻质组分的流失等物理过程,更包括氧化反应导致官能团变化的化学过程。与之相对应的再生方法也应包括物理与化学手段。部分研究成果忽略了化学手段对老化沥青的修复效果,仅仅通过添加新沥青或者再生剂对小分子物质进行了补充,再生效果不佳也在预料之中。目前,氢化还原已在高聚物的合成中广泛应用<sup>[16]</sup>,但针对老化沥青的性能修复采用氢化还原与端基钝化对其化学结构修复的研究成果,尚未见相关报道。文中首次从端基极化的化学结构重排角度开展对老化沥青的性能修复研究,通过现代微观测试手段研究了沥青分子端基极化老化机制和基于氢化还原和端基钝化的修复机制,最后对比分析化学修复效果,解决RAP掺量与再生混合料性能之间的问题,为RAP的再生利用提供新思路、新理论和新技术。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

1)老化沥青:由重庆渝合(重庆-合川)高速公路废弃混合料经离心抽提制得;2)新沥青:中海70#基质沥青;3)氢化剂三乙氧基硅烷:上海易恩化学技术有限公司;4)钝化剂甲苯二异氰酸酯:南通润丰石油化工有限公司;5)催化剂苯基三氟硼酸钾:上海皓鸿生物医药科技有限公司。沥青的相关技术性能指标如表1所示。

表1 基质沥青和老化沥青的技术性能

Table 1 Technical properties of matrix asphalt and aged asphalt

沥青种类	25 °C针入度/(0.1 mm)	15 °C延度/cm	软化点/°C	135黏度/(mPa·s)
基质沥青	63.3	>100	48.9	428.25
老化沥青	31.6	17.4	63.1	988.31

### 1.2 性能测试

动力粘度试验:采用Brookfield粘度计按GBT22235-2008液体黏度的测定标准测试老化沥青氢化还原和端基钝化前后在不同温度下的动力粘度;

红外光谱(IR)试验:采用Bruker公司生产的VERTEX 70红外分析仪分别老化沥青氢化还原和端基钝化前后的红外谱图,光谱扫描范围4 000~500 cm<sup>-1</sup>,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>,每个试样扫描次数为16次;

介电常数:按GB/T5594.4-2015测试标准采用武汉武高斯特电力设备有限公司生产的WGJSTD-A介质损耗及介电常数测试仪进行测试;

接触角:采用上海轩准仪器有限公司生产的SZ-CAMB1静态接触角测量仪按躺滴法测定老化沥青试验性能修复前后的接触角;

低温弯曲蠕变(BBR)试验:按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程JTG E20-2011》规定的T0728-2000测试方法分别测试老化沥青试验性能修复前后在-12℃和-18℃下的劲度模量 $S$ 和蠕变速率 $m$ 值。

### 1.3 试样制备

依据老化沥青的红外光谱图中含氧基团吸收峰强度计算出羰基和亚砷基的大致含量<sup>[17]</sup>,得到氢化还原剂和端基钝化剂的掺量;再将老化沥青加热至 $130\pm 5$ ℃并恒温,依次加入适量催化剂和氢化还原剂,搅拌条件下完成含氧基团的还原反应,生成部分羟基,取样测试;再加入钝化剂与羟基发生酯化反应,取样测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氢化还原与端基钝化机理分析

沥青分子极化老化产生的含氧官能团势必会显著增加分子间氢键数量并导致分子间的相互作用增强,劣化沥青的性能。因此,通过化学还原的途径将强极性的含氧官能团转化为低极性官能团,同时生成小分子物质尤为关键。老化沥青中的羰基和亚砷基具有较强的氧化性,可采用氢化还原剂三乙氧基硅烷在催化加热条件下与之发生加氢还原反应,将老化沥青中的极性含氧基团还原成低极性的小分子硅醚、硫醚和极性羟基(可能的反应机理分别见图1中的①和②),而含有碳碳双键的钝化剂异氰酸酯与羟基发生端基钝化反应(反应机理见图1中③),可将老化沥青残留的羟基钝化为低极性的酯,并引入碳碳双键,实现对老化沥青的性能修复。但需要探明沥青分子端基极化对沥青性能的影响规律,揭示基于氢化还原和端基钝化的老化沥青性能修复机制。

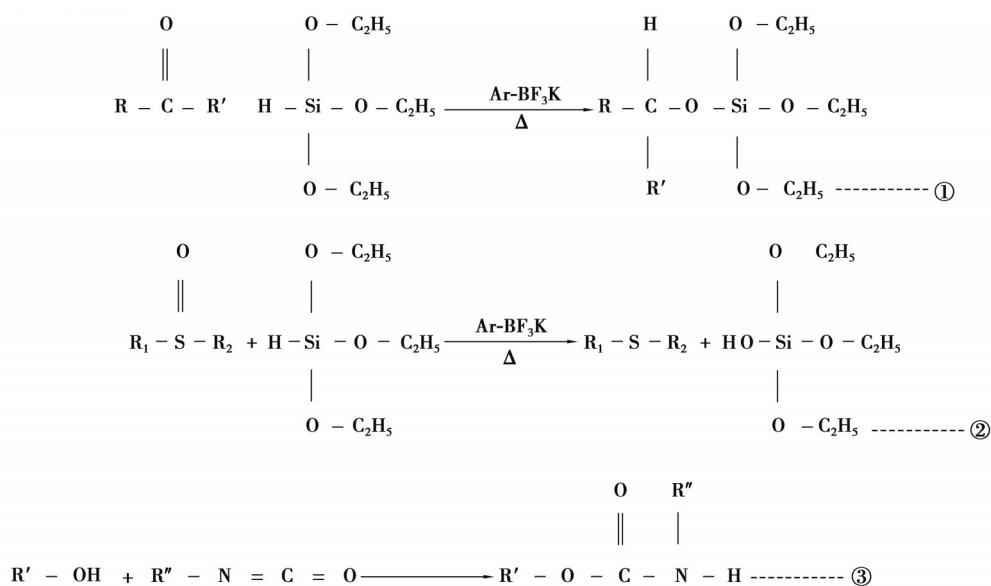


图1 老化沥青氢化还原与端基钝化可能的反应机理

Fig. 1 Possible reaction mechanism of hydrogenation reduction and end group deactivation of aged asphalt

### 2.2 红外光谱分析

通常采用FT-IR波峰的变化评价沥青老化过程中的成分变化,反过来,同样可以通过观察老化沥青在化学修复过程的官能团变化来评价其修复效果。为进一步验证前述氢化还原与端基钝化反应对老化沥青化学结构的影响,文中以基质沥青为参比,通过对比老化沥青氢化还原和端基钝化前后的官能团变化进行表征。各吸收峰的归属如下:在 $1700\text{ cm}^{-1}$ 附近是羰基 $\text{C}=\text{O}$ 振动吸收峰,在 $1030\text{ cm}^{-1}$ 波数附近吸收峰归属于亚砷基 $\text{S}=\text{O}$ 伸缩振动<sup>[13]</sup>,在 $1450\text{ cm}^{-1}$ 附近吸收峰是亚甲基 $-\text{CH}_2-$ 的弯曲振动和甲基 $-\text{CH}_3$ 的不对称弯曲振动的叠加,在 $2260\text{ cm}^{-1}$ 附近是氰基的伸缩振动吸收峰,在 $3300\text{ cm}^{-1}$ 附近是分子间氢键吸收峰<sup>[18-19]</sup>。基质沥青、老化沥青

氢化还原与端基钝化前后的红外光谱如图 2 所示,羰基 C=O 指数 CI 和亚砷基 S=O 指数 SI 计算结果如表 2 所示。

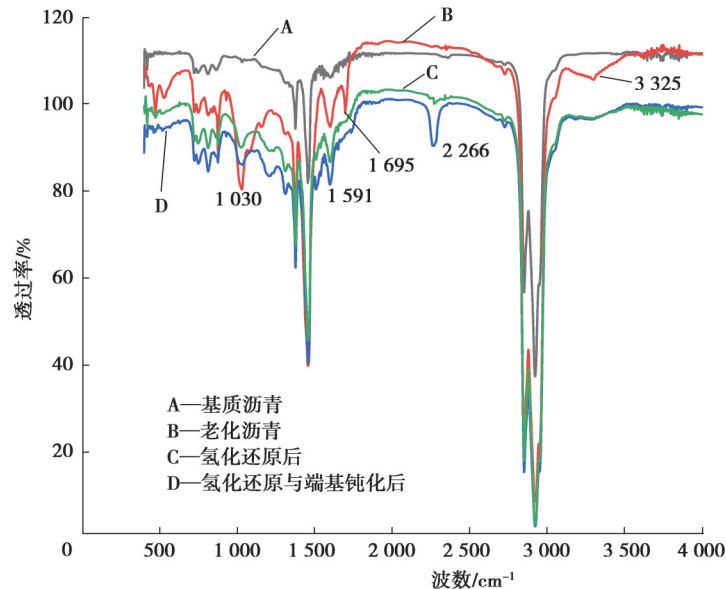


图 2 老化沥青氢化还原与端基钝化前后的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectra of aged asphalt before and after hydrogenation reduction and end group deactivation

图 2 表明,在波数  $1\ 370\sim 1\ 480\ \text{cm}^{-1}$  区间同时存在 C-CH<sub>3</sub> 或 C-CH<sub>2</sub> 的较强对称弯曲振动与非对称弯曲振动吸收峰,说明几种沥青分子内均存在饱和碳氢结构,只是 C-CH<sub>3</sub> 和 C-CH<sub>2</sub> 的比重略有区别而已。与基质沥青相比,老化沥青在波数  $1\ 030\ \text{cm}^{-1}$  与  $1\ 700\ \text{cm}^{-1}$  附近均出现了较显著的吸收峰,二者分别归属于亚砷基和羰基的特征吸收峰,表明吸氧老化在沥青的老化过程中起主导作用,这正是沥青老化的本质特征与标志。另外,相较于基质沥青,老化沥青在  $3\ 300\ \text{cm}^{-1}$  附近还出现了新的较强吸收峰,这是由于沥青在老化过程中极性增加导致分子间氢键数量增大所致。在催化作用下经氢化还原之后,老化沥青中亚砷基吸收峰的强度明显减弱,羰基吸收峰基本消失。结合表 2 计算结果可知,氢化还原使亚砷基指数和羰基指数分别降低约 70% 和 80%,表明绝大部分含氧基团被氢化还原,也验证了 2.1 节中反应式①和②的存在;经异氰酸酯端基钝化之后,羟基指数和亚砷基指数小幅降低,且  $2\ 268\ \text{cm}^{-1}$  附近出现的氨基吸收峰,  $1\ 200\ \text{cm}^{-1}$  出现了 C-C(=O)-O 的较强吸收峰,其他吸收峰强度与位置并未发生明显变化,表明异氰酸酯在催化条件下与羟基发生了酯化反应,此红外光谱的分析结果验证了 2.1 节中反应式③关于钝化机理的推断。

表 2 老化沥青氢化还原及端基钝化前后的羰基指数 CI 和亚砷基指数 SI

Table 2 Indexes of hydroxyl and sulfoxide groups before and after hydrogenation reduction and end group deactivation of aged asphalt

修复阶段	$A_{\text{C=O}}$	$A_{\text{S=O}}$	$A_{\text{C-H}}$	CI	SI
老化沥青	812.6352	544.7851	7 675.1055	0.106	0.071
氢化还原后	178.8546	160.3684	8 082.0123	0.022	0.020
氢化还原且端基钝后	124.6987	131.7472	8 642.5683	0.015	0.014

## 2.3 极性测试与分析

高分子材料的极性大小通常采用介电常数和接触角来描述,前者与极性呈正相关,后者与极性呈负相关。

### 2.3.1 介电常数测定

介电常数是反映材料在静电作用下介电性质或极化性质的主要参数。根据介电常数的大小可判别高分

子材料极性的大小。按照 GB1409-88 进行试样制备并测试了基质沥青、老化沥青在氢化还原与端基钝化前后的介电常数,测试结果如图 3 所示。

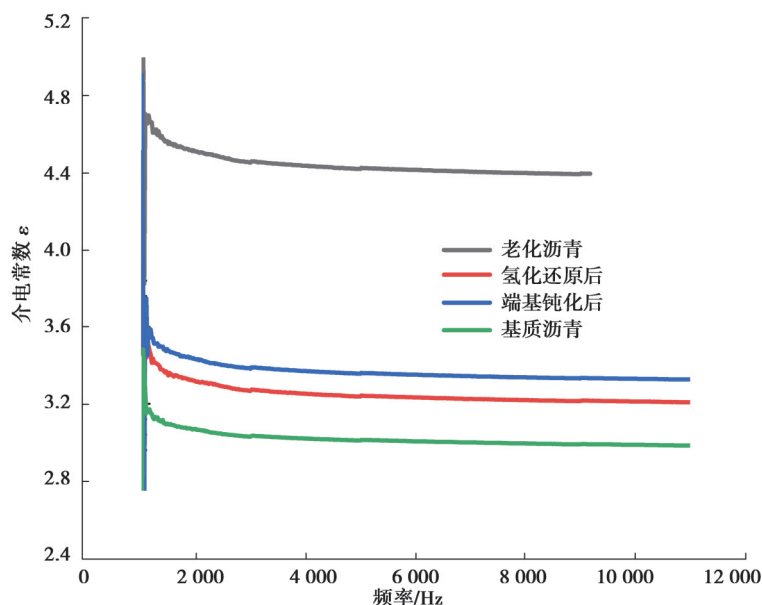


图 3 老化沥青氢化还原与端基钝化前后的介电常数

Fig. 3 Permittivity of aged asphalt before and after hydrogenation reduction and end group deactivation

由图 3 可知,试验频率对沥青的极性影响甚微,各频率下老化沥青的介电常数最大,而基质沥青的介电常数最小,表明氢化还原使老化沥青的介电常数显著降低,进行端基钝化后,其介电常数继续减小,但仍然略高于基质沥青。一方面,说明沥青在老化过程中产生的含氧基团是导致极性增大的主要因素,实质就是一个极性逐渐增大的过程;另一方面,也说明氢化还原和端基钝化能通过减少老化沥青中极性较高的含氧官能团而降低其极性。沥青分子的端基极化对沥青性能影响巨大,其主要特征就是端基的含氧官能团数量陡增,沥青分子极性明显增大导致分子间相互作用显著增强,粘度增大,弹性降低,宏观上体现为性能劣化。氢化还原和端基钝化可较大程度地降低老化沥青的极性,但仍未达到基质沥青的水平。

### 2.3.2 接触角测试

沥青对水的接触角可评价沥青的亲水性,一般认为接触角大于  $90^\circ$ ,为疏水性,表示水对沥青不浸润,反映此时沥青与水的极性差异较大;反之,则为亲水性,表示水对沥青容易浸润,反映此时沥青与水的极性差异较小。因此,也可通过沥青对水的接触角大小评价沥青极性的相对强弱。以基质沥青为参照,  $25^\circ\text{C}$  时老化沥青在氢化还原与端基钝化前后对水的接触角变化情况测试结果如图 4 所示。

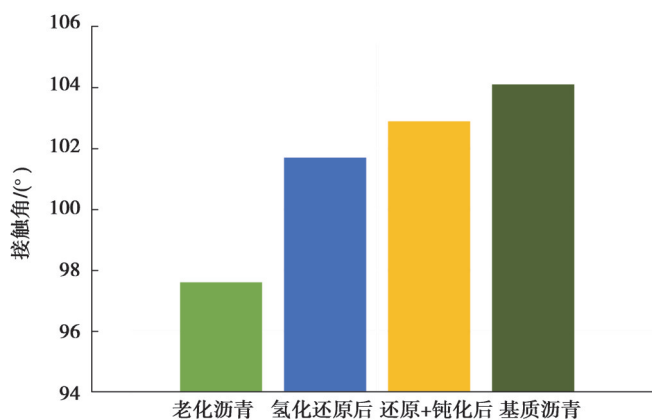


图 4  $25^\circ\text{C}$  时老化沥青在氢化还原与端基钝化前后对水的接触角

Fig. 4 Water contact angle of aged asphalt before and after hydrogenation reduction and end group deactivation at  $25^\circ\text{C}$

从图 4 分析发现,4 种沥青对水的接触角尽管均大于  $90^\circ$ ,宏观上表现为疏水性,但老化沥青的接触角仅为  $97.6^\circ$ ,而经氢化还原和端基钝化后,其对水的接触角增大至  $101.7^\circ$ 和  $102.9^\circ$ ,接近于新基质沥青的  $104.1^\circ$ ,表明老化沥青具有较弱的疏水性和较强的极性,氢化还原将老化沥青中的极性基团(羰基、亚砷基等)还原成羟基和低极性的酯或醚,端基钝化将氢化还原产生的羟基酯化成低极性的酯,二者均引起了老化沥青极性的下降,故接触角增大。

#### 2.4 动力粘度测试与分析

沥青的老化程度可通过测试动力粘度进行直观描述,沥青老化程度与动力粘度呈正相关。其本质原因是老化过程产生了大量的羰基、亚砷基等极性基团,显著增大了沥青分子的极性,从而增强了分子间的相互作用。老化沥青及其氢化还原和端基钝化前后的各温度下的动力粘度测试结果如图 5 所示。

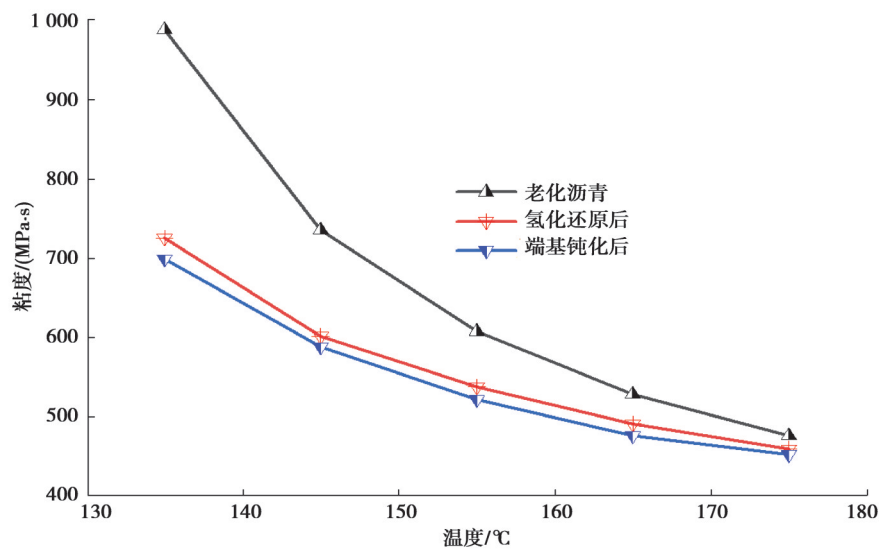


图 5 老化沥青氢化还原与端基钝化前后的动力粘度

Fig. 5 Dynamic viscosity of aged asphalt before and after hydrogenation reduction and end group deactivation

由图 5 可以看出,随着温度升高,各种沥青的动力粘度呈大幅下降趋势,各温度下老化沥青的动力粘度均很高。但经氢化还原之后,老化沥青的动力粘度下降明显,进行端基钝化之后,各温度下的动力粘度继续小幅下降。这是因为沥青老化后,端基分子被极化,极性增大,分子间氢键数量大幅升高,导致分子间作用增强,故粘度较高;氢化还原与端基钝化的实质是改变老化沥青的化学结构而降低其分子间作用力,从而大幅降低其极性,宏观体现为动力粘度下降明显,这与红外光谱、介电常数及接触角的分析结果相呼应。尽管经氢化还原与端基钝化之后,各温度下老化沥青的动力粘度均发生了明显降低,但这种差距随着温度的升高又减小,图像上体现为高温区收敛,主要是因为高温下分子间氢键被破坏,分子间作用力减小。

#### 2.5 BBR 低温弯曲性能

##### 2.5.1 劲度模量和蠕变速率

老化沥青氢化还原和端基钝化前后的低温性能变化通过 BBR 低温弯曲蠕变试验测得的蠕变速率和劲度模量来表征。劲度模量越大,沥青的低温性能越差;蠕变速率越大,沥青的低温抗裂性能就越好。文中将老化沥青氢化还原及端基钝化前后的样品进行 BBR 试验,其蠕变速率  $m$  和劲度模量  $S$  的试验结果如表 3 所示。可以看出,老化沥青在  $-12^\circ\text{C}$  和  $-18^\circ\text{C}$  时的劲度模量  $S$  值分别达到了 144 MPa 和 216 MPa,表明老化沥青产生变形所需的应力较大,表现出显著的脆性特征;先后经氢化还原与端基钝化之后,其劲度模量呈现明显的阶梯式下降,而蠕变速率的变化规律则正好相反,表明氢化还原与端基钝化明显改善了老化沥青的低温性能。

表3 老化沥青氢化还原和端基钝化前后的BBR试验结果

Table 3 BBR test results of aged asphalt before and after hydrogenation reduction and end group deactivation

沥青种类	-12 °C		-18 °C	
	劲度模量 $S/\text{MPa}$	蠕变速率 $m$	劲度模量 $S/\text{MPa}$	$I$
老化沥青	144	0.283	216	0.254
氢化还原后的老化沥青	128	0.297	169	0.291
氢化还原+端基钝化后的老化沥青	122	0.304	147	0.312

## 2.5.2 BBR与FT-IR试验联动分析

以-18 °C的BBR试验结果为例,分析该温度下老化沥青性能修复前后的劲度模量 $S$ 和蠕变速率 $m$ 分别与羰基指数 $CI$ 和亚砷基指数 $SI$ 存在的联系,其关系曲线如图6和图7所示。

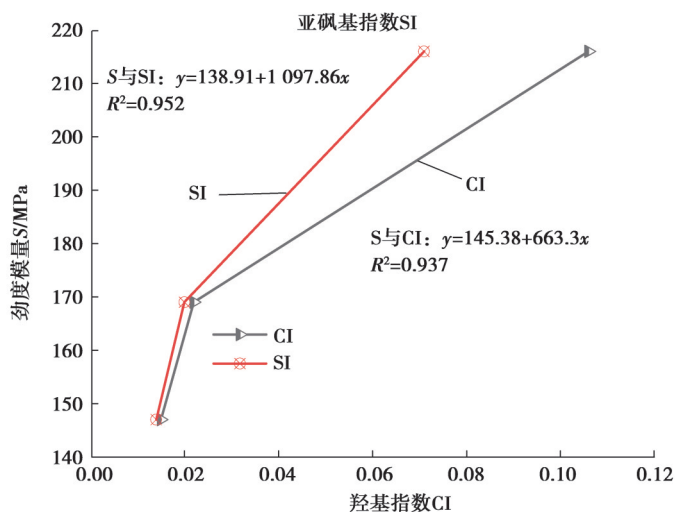


图6 老化沥青化学修复前后的官能团指数与劲度模量的对应关系

Fig. 6 Correspondence between functional group index and stiffness modulus of aged asphalt before and after chemical repair

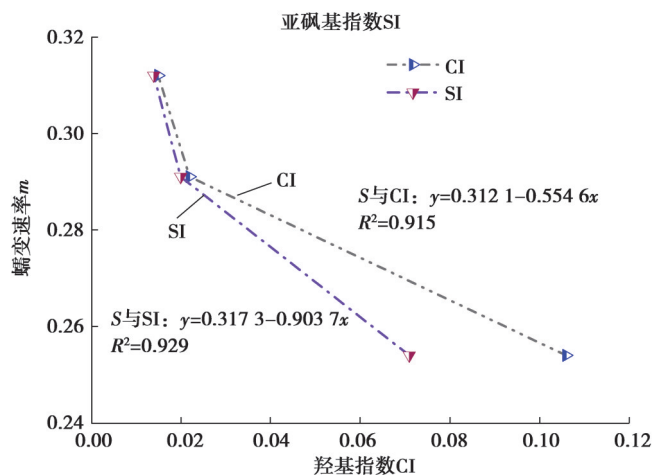


图7 老化沥青修复前后的官能团指数与蠕变速率的对应关系

Fig. 7 Correspondence between functional group index and creep rate of aged asphalt before and after chemical repair

图 6 和图 7 表明,老化沥青的劲度模量与羰基指数和亚砷基指数均存在良好的线性正相关,而老化沥青的蠕变速率与羰基指数和亚砷基指数均存在良好的线性负相关,二者的相关系数均大于 0.9。表明基于氢化还原的老化沥青修复效果,可采用其低温性能的优劣进行评价,且与老化沥青化学修复过程中的微观结构变化存在非常紧密的内在联系。

### 3 结 论

1)在催化加热条件下,三乙氧基硅烷可将老化沥青中极性较高的含氧基团(羰基、亚砷基等)还原成羟基和低极性的酯或醚,异氰酸酯可与羟基发生酯化反应,进一步将羟基转化为酯,同时引入碳碳双键;

2)氢化还原和端基钝化显著降低了老化沥青分子的极性,大幅减小了分子间作用力,从而降低动力粘度,实现修复;

3)经氢化还原和端基钝化之后,老化沥青的劲度模量降低,蠕变速率增大,低温性能得以明显改善,同时,其羰基指数和亚砷基指数显著降低,且低温性能与羰基指数和亚砷基指数之间存在明显相关性。

### 参考文献

- [ 1 ] 崔世彤, 易军艳, 冯德成, 等. 基于 180s 劲度模量的低温开裂指数预测[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(1): 95-102.  
Cui S T, Yi J Y, Feng D C, et al. Prediction of low temperature cracking index based on 180s stiffness modulus[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(1): 95-102.(in Chinese)
- [ 2 ] 谭忆秋, 李冠男, 单丽岩, 等. 沥青微观结构组成研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 1-17.  
Tan Y Q, Li G N, Shan L Y, et al. Research progress of bitumen microstructures and components[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 1-17.(in Chinese)
- [ 3 ] 张含宇, 徐刚, 陈先华, 等. 不同试验方法的老化沥青疲劳性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 168-175.  
Zhang H Y, Xu G, Chen X H, et al. Fatigue property of aged asphalt binders using different experimental methods[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 168-175.(in Chinese)
- [ 4 ] Hofko B, Porot L, Cannone A F, et al. FTIR spectral analysis of bituminous binders: reproducibility and impact of ageing temperature[J]. Materials and Structures, 2018, 51(2): 45.
- [ 5 ] Li F, Zhou S Q, Du Y C, et al. Experimental study on heat-reflective epoxy coatings containing nano-TiO<sub>2</sub> for asphalt pavement resistance to high-temperature diseases and CO/HC emissions[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 47(4): 20180548.
- [ 6 ] 陈辉强, 李成林, 孙建邦, 等. 考虑紫外辐射的交互老化对 SBR 改性沥青流变性能的影响及其老化机理[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(7): 54-62.  
Chen H Q, Li C L, Sun J B, et al. Effect of interactive aging considering ultraviolet on rheological properties of SBR modified asphalt and analysis of the aging mechanism[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(7): 54-62.(in Chinese)
- [ 7 ] Yu B, Gu X Y, Wu M, et al. Application of a high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(3): 753-765.
- [ 8 ] Chen A Q, Liu G Q, Zhao Y L, et al. Research on the aging and rejuvenation mechanisms of asphalt using atomic force microscopy[J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 177-184.
- [ 9 ] 王岚, 张乐, 刘旸. 老化前后沥青与胶粉相容性的分子动力学研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 474-479.  
Wang L, Zhang L, Liu Y. Molecular dynamics study on compatibility of asphalt and rubber powders before and after aging[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 474-479.(in Chinese)
- [ 10 ] Zhou Z, Gu X Y, Dong Q, et al. Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 294-303.
- [ 11 ] Mogawer W S, Booshehrian A, Vahidi S, et al. Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(sup2): 193-213.



- [12] 罗浩原, 黄晓明. 废油再生沥青二次老化后的性能与组分变化[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 98-110.  
Luo H Y, Huang X M. Research on change of performance and component of recycled oil regenerated asphalt during secondary aging[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 98-110.(in Chinese)
- [13] Haghshenas H F, Kim Y R, Kommidi S R, et al. Evaluation of long-term effects of rejuvenation on reclaimed binder properties based on chemical-rheological tests and analyses[J]. Materials and Structures, 2018, 51(5): 1-13.
- [14] 姜严旭, 顾兴宇, 周洲. RAP掺量对热再生沥青混合料水温耐久性能的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 368-372.  
Jiang Y X, Gu X Y, Zhou Z. Effect of reclaimed asphalt pavement content on durability performance of hot recycled asphalt mixture[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 368-372.(in Chinese)
- [15] 况栋梁, 刘文昌, 张阳, 等. 基于表面润湿理论的再生剂-老化沥青界面扩散行为评价[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 58-67.  
Kuang D L, Liu W C, Zhang Y, et al. Evaluation of interface diffusion behavior between rejuvenator and aged asphalt based on surface wettability theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 58-67.(in Chinese)
- [16] 刘建辉, 王星旸. 苯基三氟硼酸钾催化的硅烷还原羰基化合物成醇反应[J]. 有机化学, 2019, 39(4):1411-1416.  
Liu, J H, Wang X Y. Potassium phenyltrifluoroborate-catalyzed reduction of aldehydes and ketones into alcohol with silanes [J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2019, 39(4):1411-1416. (in Chinese)
- [17] 高桂海, 郭宁, 钱波. 沥青组分对沥青抗老化性能影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 69-73.  
Gao G H, Guo N, Qian B. Influence of asphalt components on anti-aging performance of asphalt[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(4): 69-73.(in Chinese)
- [18] 刘芳, 王旗, 张翥, 等. 老化对废机油再生沥青流变特性的影响及机理[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 95-100.  
Liu F, Wang Q, Zhang X, et al. Influence and mechanism of aging on the rheological properties of recycled asphalt binders with waste engine oil[J]. Materials Reports, 2022, 36(16): 95-100.(in Chinese)
- [19] 秦绪隆, 韩福社. 气相色谱法辅助分析环状1, 3-二羰基化合物的去对称对映选择性还原反应机理[J]. 分析化学, 2022, 50(2): 290-299.  
Qin X L, Han F S. Study on reaction mechanism of desymmetric enantioselective reduction of cyclic 1, 3-diketones aided by gas chromatography[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2022, 50(2): 290-299.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)