

THFS 对沥青感温性能的影响分析

季 节^{1,2}, 武 昊^{1,2}, 索 智^{1,2}, 许 鹰^{1,2}, 李 明³

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京节能减排关键技术协同创新中心, 北京 100044; 3. 北京鑫畅路桥建设有限公司, 北京 101101)

摘 要 目的 分析煤直接液化残渣(Direct Coal Liquefaction Residue, DCLR)中四氢呋喃可溶物(Tetrahydrofuran Soluble, THFS)作为改性剂对沥青感温性能的影响. 方法 采用 SK-90 沥青作为基质沥青, 分别制备不同掺量的 THFS 改性沥青(与基质沥青质量比为 0.4%, 6%, 8%, 10%), 测试 THFS 改性沥青的各项感温性能, 分别计算针入度指数 PI 、针入度黏度指数 PVN 、黏温指数 VTS 、复数模量指数 GTS 和蠕变劲度指数 STS_s , 评价 THFS 对沥青感温性能的影响. 结果 与基质沥青相比, THFS 的加入改善了沥青的感温性, 且随着 THFS 掺量的增加, THFS 改性沥青的 PI 、 PVN 值均增大, VTS 、 GTS 、 STS_s 值均减小, 说明 THFS 的掺量越高, THFS 改性沥青感温性能越好. 结论 THFS 改性沥青的感温性能更为优越, 综合 THFS 改性沥青的各项性能, 推荐 THFS 掺量为 6%~8%.

关键词 道路工程; 煤直接液化残渣; 四氢呋喃可溶物; THFS 掺量; 改性沥青; 感温性能

中图分类号 TU502; U414

文献标志码 A

Analysis on Temperature Susceptibility of Asphalt Binder Affected by THFS

Ji Jie^{1,2}, Wu Hao^{1,2}, Suo Zhi^{1,2}, Xu Ying^{1,2}, Li Ming³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, 100044; 2. Beijing Cooperative Innovation Research Center on Energy Saving and Emission Reduction, Beijing, China, 100044; 3. Beijing Xinchang Road and Bridge Group Co., Ltd., Beijing, China, 101101)

Abstract: To analyze the temperature susceptibility of THFS (tetrahydrofuran soluble), extracted from DCLR (direct coal liquefaction residue), modified asphalt binder, the THFS modified asphalt binders that have the 0.4%, 6%, 8% and 10% THFS content by weight of SK-90 are prepared respectively. The properties of the THFS modified asphalt binders are tested. The temperature susceptibility indexes, such as PI , PVN , VTS , GTS and STS_s , are calculated. The test results indicate that the PI , PVN value increases and the VTS , GTS , STS_s value declines with the THFS content increases, which indicate the THFS modified asphalt binder is less sensitivity to temperature due to

收稿日期: 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478028); 北京教育委员会市属高校创新能力提升计划项目(PXM2015-014210-000003)和北京市百千万人才工程

作者简介: 季节(1972—), 女, 教授, 主要从事道路工程材料研究.

the addition of THFS. The temperature susceptibility is better with higher THFS content. In addition, the optimal THFS content is recommended for 6% ~8% according to the whole properties.

Key words: road engineering; direct coal liquefaction residue; tetrahydrofuran soluble; THFS content; modified asphalt binder; temperature susceptibility.

煤直接液化残渣(Direct Coal Liquefaction Residue, DCLR)是煤直接液化工艺中产生的占原料煤总质量 30% 的副产物^[1-2]. 赵鹏等^[3]分析了 DCLR 的结构组成, 提出 DCLR 可作为沥青改性剂来提高沥青性能. 季节等^[4]分析 DCLR 与石油沥青共混改性后的宏观特性和微观结构组成, 发现 DCLR 对石油沥青的共混物改性主要为物理改性而非化学改性. 金倬伊^[5]研究了制备条件对 DCLR 改性沥青性能的影响, 发现当 DCLR 掺量为 7% 时沥青的针入度比最大. 张艳荣^[6]对两种 DCLR 的四组分分析发现神华 DCLR 的四氢呋喃不溶物与沥青的相容性较差. 由于四氢呋喃不溶物与沥青的相容性较差, 导致 DCLR 改性沥青的低温性能下降. 因此很多学者对 DCLR 进行萃取, 将 DCLR 中四氢呋喃不溶物剔除, 将 DCLR 四氢呋喃可溶物(Tetrahydrofuran Soluble, THFS)加至石油沥青中对其进行改性. Zhao Yongshang^[7]对 DCLR 改性沥青的制备工艺做了研究, 认为制备工艺对 DCLR 改性沥青性能有一定影响. 高妍等^[8]对 DCLR 萃取物中萃取剂的回收技术进行研究, 提出了采用薄膜干燥机回收溶液中萃取剂的方法. 钟金龙等^[9]研究 DCLR 的萃取条件, 认为萃取剂采用煤直接液化本身产生的液化油馏分更有实际意义. 苗强等^[10]分析了 DCLR 特性, 发现了煤直接液化萃取出的沥青类物质可制备碳纤维材料. 常鸿雁等^[11]考察了 DCLR 的热解特性, 发现 DCLR 的失重是由 DCLR 中的重质油热解造成的. Ji Jie 等^[12]对 DCLR 和 TLA 改性沥青性能做了研究, 发现 DCLR 和 TLA 都可改善沥青的高温性能. Zhao Yongshang^[13]对 DCLR 与沥青共混物做了

研究, 随着 DCLR 掺量的增加, DCLR 与沥青共混物的高温性能不断提高. 陈静等^[14]以苯甲醛为交联剂, 采用 THFS 为沥青改性剂, 发现 THFS 掺量为 4% 时沥青的性能最佳.

已有研究主要将 DCLR 或 THFS 作为改性剂改善石油沥青的性能, 并对 DCLR 或 THFS 的掺量、改性沥青制备工艺等进行试验研究, 但很少涉及 DCLR 或 THFS 对沥青感温性能的影响, 而沥青的感温性是沥青性能随温度变化的重要指标. 郭咏梅^[15]用 DSR 评价了多种 SBS 改性沥青的高温性能, 发现 GTS 能更有效地评价 SBS 改性沥青在高温区间的感温性. 王立志^[16]对多种传统沥青及自制改性沥青的感温性进行了研究, 并对感温性评价指标进行了分析与讨论, 建议低温区间的感温性能评价指标采用蠕变劲度指数 STS_s ; 中、高温区间内采用 GTS 作为评价指标. 各学者们主要将 SBS 改性沥青及传统沥青做了感温性能评价, 并没有对 DCLR 或 THFS 改性沥青的感温性能进行评价. 因此, 笔者拟采用 THFS 作为改性剂对石油沥青进行改性, 分析不同掺量下(与基质沥青质量比 0, 4%, 6%, 8%, 10%) THFS 改性沥青的性能, 计算 THFS 改性沥青的各种感温性能指标, 分析 THFS 对沥青感温性能的影响规律, 为 THFS 改性沥青在道路工程中的广泛应用提供理论依据.

1 试验材料及方案

1.1 基质沥青

沥青采用韩国 SK-90 沥青. 对其进行性能测试, 结果见表 1. 其中 PG 等级为 58-22.

表 1 SK-90 沥青性能

Table 1 Physical properties of SK-90 asphalt binder

指标 单位	25 ℃针入 度/0.1 mm	软化 点/℃	10 ℃延 度/cm	60 ℃动力黏 度/(Pa·s)	RTFOT 后的残留物		
					质量变化率/%	针入度比/%	10 ℃残留延度/cm
SK-90	85	51	51.8	218	+0.1	64	10
技术标准	80~100	≥45	≥20	≥160	±0.8	≥57	≥8

1.2 THFS

DCLR 为神华集团生产的副产品. 利用四氢呋喃溶剂对 DCLR 进行萃取, 得到 THFS. 根据文献[17]中的相关试验规程对 THFS 进行性能测试, 密度、软化点、25 ℃针入度的试验方法分别为 JTG E42—2005/T0330—2005, JTG E20—2011/T0606—2011, JTG E20—2011/T0604—2011, 结果见表 2.

表 2 THFS 的性能

Table 2 Physical properties of THFS

密度/(g·cm ⁻³)	软化点/℃	25 ℃针入度/0.1 mm
1.12	140	5

1.3 试验方案

测试不同掺量下的 THFS 改性沥青 15 ℃、25 ℃、30 ℃的针入度以及 135 ℃、160 ℃、170 ℃、180 ℃的黏度, 计算沥青的 PI 、 PVN 和 VTS 值, 评价 THFS 改性沥青的感温性能.

由于我国大部分地区沥青路面在夏季平均最高温度在 50~65 ℃内波动, 同时考虑到在重交通作用时高等级公路温度范围上限还应再增加 10 ℃, 因此试验温度选择在 46~76 ℃, 以 6 ℃为间隔进行 DSR 试验. 试验采

用 AR1500 型高级流变仪, 采用应变控制模式, 施加连续正弦交变荷载, 角速度采用 10 rad/s. ANDERSON^[18]提出利用车辙因子表征沥青的高温抗车辙性能, 车辙因子值越大, 沥青的高温抗车辙能力越强.

SHRP 利用 BBR 测试沥青在低温下 60 s 的蠕变劲度和蠕变速率来表征沥青的低温性能^[19]. 试验温度选择在 -12~0 ℃, 以 6 ℃为间隔进行 BBR 试验.

2 试验结果与讨论

2.1 基于针入度分级体系的 THFS 对沥青感温性的影响

2.1.1 针入度指数 PI

Pfeiffer J P 等^[20]认为, 沥青的针入度对数与温度之间有很好的线性关系. 目前, 人们利用沥青不同温度的针入度计算其 PI 值. PI 值越大, 其感温性越小. PI 的计算式为

$$PI = \frac{20(1 - 25A)}{1 + 50A}.$$

(1)

式中: PI 为针入度指数; A 为针入度温度敏感性系数, A 值可由针入度与温度的半对数关系直线的斜率求出.

不同掺量下 THFS 改性沥青的 PI 值见表 3 和图 1.

表 3 不同掺量下 THFS 改性沥青的 PI

Table 3 The PI of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

THFS 掺量/%	针入度/0.1 mm			R^2	PI
	15 ℃	25 ℃	30 ℃		
0	26.1	81.5	128.2	0.997 1	-0.990 99
4	21.3	58.7	107.8	0.997 8	-0.977 44
6	18.5	52.8	92.1	0.999 8	-0.950 23
8	18.2	54.0	88.7	0.999 5	-0.922 84
10	18.0	49.6	88.4	0.998 9	-0.881 46

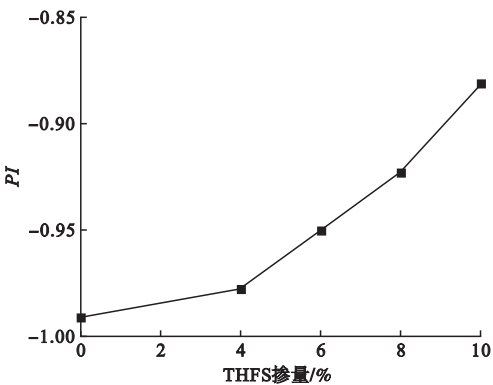


图 1 THFS 改性沥青 *PI* 值随 THFS 掺量的变化
Fig.1 The *PI* of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

由表 3 及图 1 可知:

(1)与 SK-90 沥青相比,THFS 改性沥青 *PI* 值有较大的提高,说明 THFS 的加入,可以改善沥青的感温性能,这主要是由于 THFS 的加入,沥青中的饱和成分使极性芳香分加速缔合,从而形成了沥青质,因而改善了沥青的感温性能。

(2)随着 THFS 掺量的增加,THFS 改性沥青的 *PI* 值呈增大趋势,表示随着 THFS 掺量的增加沥青的感温性越来越低。

(3)当 THFS 掺量在 0~4%,其 *PI* 值的增长幅度较小;当 THFS 掺量在 4%~10%,*PI* 值增长幅度较大,较 0~4% 时的 *PI* 值增长速率提高了 1 倍。

2.1.2 针入度-黏度指数 *PVN*

Rasmussen R O 等^[21]建立了沥青黏度与针入度的关系。Mcleod^[22]提出利用沥青 25℃ 针入度与 135℃ 黏度计算沥青的 *PVN*,*PVN* 值越大,沥青的感温性越小。

$$PVN_{25-135} = \frac{4.258 - 0.79674 \lg P_{25} - \lg \eta_{135}}{0.78511 - 0.15876 \lg P_{25}} \times (-1.5).$$

(2)

式中:*PVN*₂₅₋₁₃₅ 为沥青的针入度黏度指数;*P*₂₅为沥青的 25℃ 针入度,0.1 mm; η_{135} 为沥青 135℃ 运动黏度,mPa·s。

不同掺量下 DCLR 改性沥青的 *PVN* 值见表 4 和图 2。

表 4 不同掺量下 THFS 改性沥青的 *PVN*
Table 4 The *PVN* of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

THFS 掺量/%	25℃ 针入度/ 0.1 mm	135℃ 运动黏度/ (mPa·s)	<i>PVN</i> ₂₅₋₁₃₅
0	81.5	365.8	-0.586 4
4	58.7	465.7	-0.581 1
6	52.8	567.7	-0.414 8
8	54.0	582.3	-0.356 8
10	49.6	627.4	-0.342 4

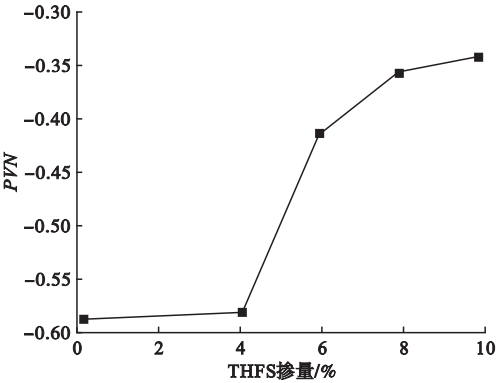


图 2 THFS 改性沥青 *PVN* 随 THFS 掺量的变化
Fig.2 The *PVN* of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

由表 4 及图 2 可知:

(1)与 SK-90 沥青相比,THFS 改性沥青 *PVN* 值有大幅度提高,即 THFS 可以改善沥青在 25~135℃ 的感温性能。

(2)随着 THFS 掺量的增加,THFS 改性沥青的 *PVN* 值在逐渐增大,即 THFS 改性沥青的感温性随 THFS 掺量的增加而不断改善。

(3)与基质沥青相比,当 THFS 掺量在 4%,*PVN* 值没有明显变化;掺量在 4%~6%,*PVN* 增长将近 30%;掺量在 6%~10%,*PVN* 增长速率变缓。可见,THFS 掺量在 6%~8%,可较好改善 THFS 改性沥青的感温性能。

2.1.3 黏温指数 VTS

VTS 反映沥青的黏度随温度而变化的规律,沥青材料的 VTS 直接反映其感温性. VTS 由式(3)得到:

$$\lg\lg(\eta \times 10^3) = m - VTS \times \lg T. \quad (3)$$

表 5 不同掺量下 THFS 改性沥青的 VTS

THFS 掺量/%	运动黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)				VTS
	135 $^{\circ}\text{C}$	160 $^{\circ}\text{C}$	170 $^{\circ}\text{C}$	180 $^{\circ}\text{C}$	
0	365.8	151	132.3	92.25	1.034 1
4	465.7	197	172	120.1	0.969 5
6	567.7	299.9	285.6	201.1	0.685 6
8	582.3	319.5	295	214.3	0.658 2
10	627.4	452	430.2	334.5	0.390 6

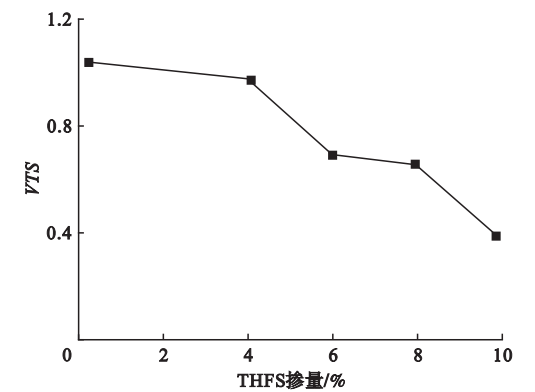


图 3 THFS 改性沥青 VTS 随 THFS 掺量的变化
Fig. 3 The VTS of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

由表 5 及图 3 可知:

(1) 与 SK-90 沥青相比,THFS 改性沥青的 VTS 值有所降低,即 THFS 的加入,可以改善沥青在 135~180 $^{\circ}\text{C}$ 的感温性能.

(2) 随着 THFS 掺量的增加,THFS 改性沥青的 VTS 值呈减小趋势,说明 THFS 对沥青的感温性能随 THFS 掺量的增加而不断改善.

(3) THFS 掺量在 0~4%,其 VTS 变化缓慢;当掺量在 4%~6%, VTS 下降将近 30%;掺量在 6%~8%, VTS 减小速率放缓.可见,THFS 掺量为 4%~6%时,可大幅度改善 THFS 改性沥青的感温性能.因此,

式中: VTS 为沥青的黏温指数; η 为沥青在一定温度下的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; m 为回归常数. VTS 值越小,沥青的感温性越小,根据式(3)计算出不同掺量下 THFS 改性沥青的 VTS ,结果见表 5 和图 3.

THFS 掺量为 6%~8% 时,THFS 感温性能较好.

2.2 基于 SHRP PG 体系的 THFS 对沥青感温性的影响

2.2.1 复数模量指数 GTS

图 4 为不同掺量下 THFS 改性沥青的 DSR 试验结果.

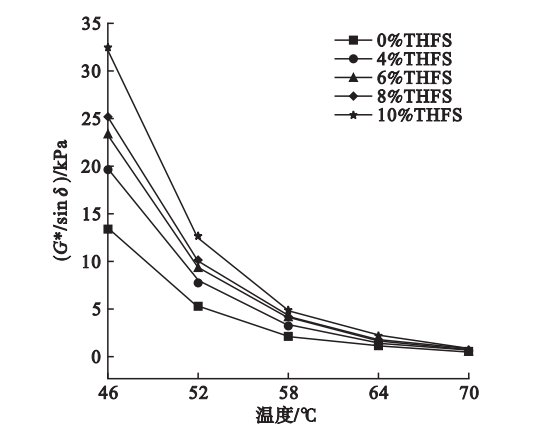


图 4 不同掺量下 THFS 改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 随温度的变化

Fig. 4 The $G^*/\sin\delta$ of THFS modified asphalt binders with temperatures

对不同掺量 THFS 改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 进行回归分析发现,THFS 改性沥青的 $\lg(G^*/\sin\delta)$ 与温度之间均有着很好的线性关系,相关系数 R^2 均在 0.997 以上(见图 5).

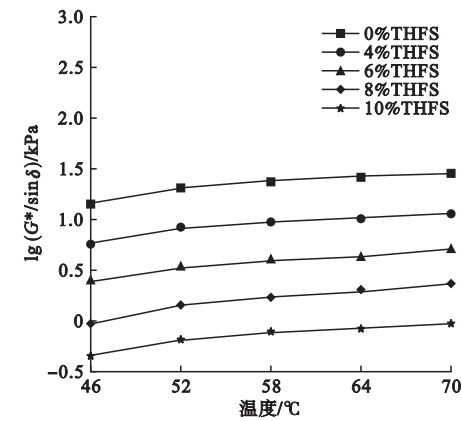


图5 不同掺量下 THFS 改性沥青的 $\lg(G^*/\sin\delta)$ 随温度的变化

Fig. 5 The $\lg(G^*/\sin\delta)$ of THFS modified asphalt binders with temperatures

表6 不同掺量下 THFS 改性沥青的 GTS

Table 6 The GTS of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

DCLR 掺量/%	回归方程	R^2	GTS
0	$\lg(G^*/\sin\delta) = -0.062\ 6T + 4.010\ 9$	0.999\ 0	0.062\ 6
4	$\lg(G^*/\sin\delta) = -0.062\ 4T + 4.149\ 7$	0.998\ 9	0.062\ 4
6	$\lg(G^*/\sin\delta) = -0.062\ 1T + 4.204\ 5$	0.999\ 0	0.062\ 1
8	$\lg(G^*/\sin\delta) = -0.061\ 9T + 4.234\ 7$	0.999\ 0	0.061\ 9
10	$\lg(G^*/\sin\delta) = -0.061\ 5T + 4.277\ 0$	0.999\ 6	0.061\ 5

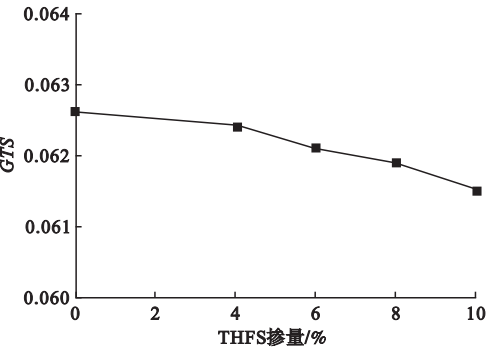


图6 不同掺量下 THFS 改性沥青的 GTS 随 THFS 掺量的变化

Fig. 6 The GTS of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

(2)随着 THFS 掺量的增加,THFS 改性沥青的 GTS 呈减小趋势,即 THFS 对沥青的感温性随 THFS 掺量的增加而不断改善.

2.2.2 蠕变劲度指数 STS_s

对不同掺量下 THFS 改性沥青的 S 和

回归方程为

$$\lg(G^*/\sin\delta) = -GTS \cdot T + K. \tag{5}$$

式中: $G^*/\sin\delta$ 为车辙因子, kPa; GTS 为 $\lg(G^*/\sin\delta)$ 对试验温度线性回归方程斜率的绝对值; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; K 为回归常数;

GTS 反映了 $G^*/\sin\delta$ 随温度变化的幅度,可作为沥青在中高温区域($40 \sim 80\ ^{\circ}\text{C}$)的感温性评价指标. GTS 值越小,沥青的感温性能越好.不同掺量 THFS 改性沥青的 GTS 值见表6与图6.

由表6及图6可知:

(1)与 SK-90 沥青相比,THFS 改性沥青的 GTS 值有所降低,即 THFS 的加入,可以改善沥青在 $40 \sim 180\ ^{\circ}\text{C}$ 的感温性能.

m -值与试验温度进行回归分析,发现 m -值并未存在明显的规律性,而 S 与温度之间存在着良好的线性关系,相关性系数 R^2 在 0.995 以上,见公式(6):

$$\lg(S) = STS_s \cdot T + C. \tag{6}$$

式中: S 为蠕变劲度, MPa; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; C 为回归常数; STS_s 表示 S 对数值 $\lg(S)$ 对温度 T 的斜率.其中 STS_s 为 $\lg(S)$ 对温度 T 的斜率, STS_s 绝对值越大,沥青的温度敏感性大,计算结果见表7与图7.

由表7及图7可知:

(1)与 SK-90 沥青相比,THFS 改性沥青的 STS_s 值有所降低,说明 THFS 可以改善沥青在 $-12 \sim 0\ ^{\circ}\text{C}$ 的感温性能.

(2)随着 THFS 掺量的增加,THFS 改性沥青的 STS_s 值逐渐减小,表示沥青的感温性能随 THFS 掺量的增加而不断改善.

表 7 不同掺量下 THFS 改性沥青的 STS_s

DCLR 掺量/%	回归方程	R^2	STS_s
0	$\lg(S) = -0.054\ 9T + 1.377\ 0$	0.996\ 9	0.054\ 9
4	$\lg(S) = -0.054\ 7T + 1.5653$	1.000\ 0	0.054\ 7
6	$\lg(S) = -0.053\ 5T + 1.662\ 5$	0.995\ 8	0.053\ 5
8	$\lg(S) = -0.051\ 3T + 1.710\ 5$	0.997\ 1	0.051\ 3
10	$\lg(S) = -0.048\ 9T + 1.782\ 8$	0.995\ 4	0.048\ 9

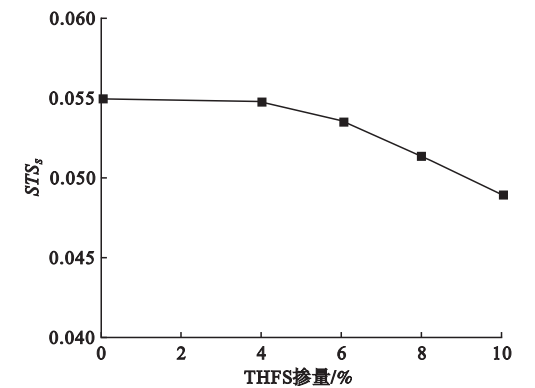


图 7 THFS 改性沥青 STS_s 随 THFS 掺量的变化

Fig. 7 The STS_s of THFS modified asphalt binders with different THFS contents

(3)当 THFS 掺量在 0~4%,其 STS_s 值没有明显变化;当掺量在 4%~10%, STS_s 值逐渐降低,且变化率增大.可见,在不影响 THFS 改性沥青的路用性能情况下,THFS 掺量为 6%~8%时,可大幅度改善 THFS 改性沥青的感温性能.

3 结 论

(1)与 SK-90 基质沥青相比,THFS 加入后,THFS 改性沥青 PI 、 PVN 值均有较大的提高, VTS 、 GTS 、 STS_s 值均有所降低,说明 THFS 的加入,可以改善沥青的感温性能.

(2)随 THFS 掺量的不断增加,THFS 改性沥青的 PI 、 PVN 值不断增大, VTS 、 GTS 、 STS_s 值均呈减小趋势,说明 THFS 的加入且随 THFS 掺量的不断提高会对沥青的感温性起到改善作用.

(3)为了保证 THFS 改性沥青具有良好感温性能和路用性能,建议 THFS 掺量为

6%~8%.

参考文献

[1] SHUI Hengfu,CAI Zhengyi,XU Chunbao. Recent advances in direct coal liquefaction[J]. Energies,2010,3(2):155-170.

[2] LIU Zhenyu,SHI Shidong,LI Yongwang. Coal liquefaction technologies development in China and challenges in chemical reaction engineering [J]. Chemical engineering science, 2010, 65 (1):12-17.

[3] 赵鹏,孙淑君,卢正元,等.煤直接液化残渣性质及高附加值应用研究进展[J]. 洁净煤技术,2009,15(6):33-35.

(ZHAO Peng, SUN Shujun, LU Zhengyuan, et al. Development of property and high added-value utilization of direct coal liquefaction residue[J]. Clean coal technology, 2009, 15 (6): 33-35.)

[4] 季节,石越峰,索智,等.煤直接液化残渣共混改性沥青的性能和微观结构[J]. 北京工业大学学报,2015,41(7):1049-1053.

(JI Jie, SHI Yuefeng, SUO Zhi, et al. Properties and micro-structure of direct coal liquefaction residue blending modified asphalt [J]. Journal of Beijing university of technology, 2015, 41(7):1049-1053.)

[5] 金倬伊.煤直接液化残渣改性沥青的可行性研究[J]. 广州化工,2014,42(3):23-24.

(JIN Zhuoyi. Feasibility study of direct coal liquefaction residue modified asphalt [J]. Guangzhou chemical industry, 2014, 42 (3): 23-25.)

[6] 张艳荣.液化残渣改性道路石油沥青的探索研究[D]. 西安:西北大学,2010.

(ZHANG Yanrong. Study on petroleum asphalt in modified road of liquefaction residue[D]. Xi'an:Northwest University,2010)

[7] ZHAO Yongshang,JI Jie. Study on the performance of direct coal liquefaction residue

- modified mixture asphalt [C]. Asia Pacific Transportation Development Conference, 2014.
- [8] 高妍, 王天宝, 杜皓蕾, 等. 煤直接液化残渣萃取物中萃取剂回收技术研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6): 67-71.
(GAO Yan, WANG Tianbao, DU Haolei, et al. Extractant recycle from raffinate of direct coal liquefaction residue [J]. Clean coal technology, 2015, 21(6): 67-71.)
- [9] 钟金龙, 李文博, 史士东, 等. 煤炭直接液化残渣有机可溶物萃取研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 316-322.
(JIN Zhonglong, LI Wenbo, SHI Shidong, et al. Solvent extraction research on organic matter in direct coal liquefaction residue [J]. Journal of China coal society, 2012, 37(2): 316-322.)
- [10] 苗强. 煤直接液化残渣萃取技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(1): 56-60.
(MIAO Qiang. Status and development progress of direct coal liquefaction residue extraction technologies [J]. Clean coal technology, 2015, 21(1): 56-60.)
- [11] 常鸿雁, 李克健, 章序文, 等. 煤液化残渣及其萃取物的热解特性研究[J]. 神华科技, 2015, 13(6): 70-74.
(CHANG Hongyan, LI Kejian, ZHANG Xuwen, et al. Study on pyrolysis characteristics of coal liquefaction residue and its extract [J]. Shenhua technology, 2015, 13(6): 70-74.)
- [12] JI Jie, YAO Hui, YANG Xu, et al. Performance analysis of direct coal liquefaction residue (DCLR) and trinidad lake asphalt (TLA) for the purpose of modifying traditional asphalt [J]. Arabian journal for science and engineering, 2016, 41(10): 3983-3993.
- [13] JI Jie, ZHAO Yongshang, XU Shifa. Study on properties of the blends with direct coal liquefaction residue and asphalt [J]. Applied mechanics & materials, 2014, 488/489: 316-321.
- [14] 陈静, 孙鸣, 代晓敏, 等. 基于苯甲醛交联剂的煤直接液化残渣改性石油沥青[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(9): 1052-1060.
(CHEN Jing, SUN Ming, DAI Xiaomin, et al. Asphalt modification with direct coal liquefaction residue based on benzaldehyde crosslinking agent [J]. Journal of fuel chemistry and technology, 2015, 43(9): 1052-1060.)
- [15] 郭咏梅. 应用 DSR 评价改性沥青高温区域的感温性[J]. 科学技术与工程, 2012, 36(12): 9890-9893.
(GUO Yongmei. Evaluation on temperature susceptibility of modified asphalt in the high-temperature region using DSR [J]. Science technology and engineering, 2012, 36(12): 9890-9893.)
- [16] 王立志, 魏建明, 张玉贞. 道路沥青温度敏感性指标的分析与讨论[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(21): 5793-5798.
(WANG Lizhi, WEI Jianming, ZHANG Yuzhen. Analysis and discussion on the index of temperature susceptibility for asphalt binders [J]. Science technology and engineering, 2008, 8(21): 5793-5798.)
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard text methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.)
- [18] ANDERSON D A, CHRISTENSEN D W, BAHIA H U, et al. Strategic highway research program SHRP-A-369-binder characterization and evaluation, Volume 3: Physical Characterization [R]. Washington: National Research Council, 1994.
- [19] 丁红霞, 程国香, 张建峰. SHRP 评价改性沥青的性能研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(4): 31-34.
(DING Hongxia, CHENG Guoxiang, ZHANG Jianfeng. Performance evaluation of modified asphalt by SHRP [J]. Petroleum asphalt, 2012, 26(4): 31-34.)
- [20] PFEIFFER J P, VAN DOORMAAL P M. The Rheological properties of asphaltic bitumens [J]. Journal of the institute of petroleum, 1936, 22: 414-440.
- [21] RASMUSSEN R O, LYTTON R L, CHANG G K. Method to predict temperature susceptibility of an asphalt binder [J]. Journal of materials in civil engineering, 2002, 14(3): 246-252.
- [22] MCLEOD W. A 4-year survey of low temperature transverse pavement cracking on three Ontario test roads [J]. AAPT, 1972, 41: 424-493.