

文章编号:1671-1637(2015)04-0001-08

煤直接液化残渣对沥青胶浆黏弹性能的影响

季 节^{1,2}, 石越峰^{1,2}, 索 智^{1,2}, 姚 辉³, 徐世法^{2,4}

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 密歇根理工大学 土木与环境工程系, 密歇根 霍顿 49931; 4. 首都世界城市顺畅交通协同创新中心, 北京 100044)

摘 要:以 SK-90 沥青为基质沥青, 分别制备粉胶比为 1.0、煤直接液化残渣(DCLR)掺量(质量分数)分别为 5%、10%、15%、20% 下的 DCLR 改性沥青胶浆和 SK-90 沥青胶浆。采用动态剪切流变试验和弯曲梁流变试验, 对比分析了 DCLR 对沥青胶浆车辙因子、疲劳因子、蠕变劲度模量和蠕变速率等因素的影响, 揭示了 DCLR 对沥青胶浆黏弹性能的影响规律。试验结果表明: DCLR 会显著增强沥青胶浆的高温性能, 降低沥青胶浆的低温性能和疲劳性能; DCLR 提高了沥青胶浆在高温条件下的弹性及在低温条件下的黏性; 在高 DCLR 掺量下, 沥青胶浆的高温、低温和疲劳性能对温度的敏感度极为显著; 随着 DCLR 掺量的增加, 沥青及胶浆的适用范围越来越窄; 从应用角度考虑, 建议 DCLR 掺量不宜大于 10%, 沥青及胶浆可适用于沥青路面的中面层。

关键词:道路材料; 煤直接液化残渣; DSR 和 BBR 试验; 改性沥青; 沥青胶浆; 黏弹性能

中图分类号: U414.75

文献标志码: A

Influence of direct coal liquefaction residue on viscoelastic properties of asphalt mortar

Ji Jie^{1,2}, Shi Yue-feng^{1,2}, Suo Zhi^{1,2}, Yao Hui³, Xu Shi-fa^{2,4}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing 100044, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, Houghton 49931, Michigan, USA; 4. Beijing Collaborative Innovation Center for Metropolitan Transportation, Beijing 100044, China)

Abstract: SK-90 was taken as base asphalt, filler-asphalt ratio was 1.0, the direct coal liquefaction residue(DCLR) modified asphalt mortars with the DCLR contents as 5%, 10%, 15%, 20% and SK-90 asphalt mortar were produced respectively. The influences of DCLR on asphalt mortar rut factor, fatigue factor, creep stiffness modulus and creep rate were compared by dynamic shear rheometer(DSR) and bending beam rheometer(BBR) tests. The influence rule of DCLR on the viscoelastic properties of asphalt mortar was analyzed. Test result indicates that DCLR can significantly improve the high-temperature properties of asphalt mortar, reduce its low-temperature and fatigue properties. DCLR also increases the elastic properties of asphalt mortar at high temperature and the viscous properties at low temperature. The high-temperature, low-temperature and fatigue properties of asphalt mortar with high DCLR content are very sensitive to temperature. With the increase of DCLR content, the application scopes of asphalt and asphalt

收稿日期: 2015-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478028); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(PXM2013-014210-000165)

作者简介: 季 节(1972-), 女, 河南信阳人, 北京建筑大学教授, 工学博士, 从事道路材料研究。

mortar become more and more narrow. Therefore, in the view of application, the content of DCLR is recommended to be less than 10%, and the asphalt and asphalt mortar can be applied for middle surface layer of asphalt pavement. 11 tabs, 4 figs, 23 refs.

Key words: road material; direct coal liquefaction residue; DSR and BBR tests; modified asphalt; asphalt mortar; viscoelastic property

Author resume: JI Jie(1972-), female, professor, PhD, +86-10-68322100, jijie@bucea.edu.cn.

0 引 言

沥青混合料为黏弹塑性材料,在温度和荷载共同作用下易出现高温变形、低温开裂和疲劳开裂等病害,而在沥青混合料中真正起黏结作用的是沥青与矿粉形成的胶浆^[1]。近代胶浆理论认为沥青混合料是一种多级空间网状结构的分散系,包括粗分散系、细分散系和微分散系 3 级分散系。在这 3 级分散系中,沥青胶浆作为微分散系在填充粗、细集料间空隙的同时对粗集料颗粒起黏聚作用^[2]。虽然沥青胶浆所占的比例相对较小,但它的组成结构却影响着沥青混合料的黏弹特性。而沥青性能、沥青用量、粉胶比以及矿粉性能等又影响着沥青胶浆的性能。程永春等对掺量均为 7% 的石灰岩矿粉沥青胶浆和硅藻土粉沥青胶浆进行了研究,发现硅藻土粉沥青胶浆不仅具有更加优良的抗冲击性能,而且能够承受更大的低温变形^[3];于洪兴等研究了不同粉胶比对沥青胶浆高温性能的影响,发现粉胶比越大,沥青胶浆的高温性能越好^[4];吴玉辉采用 DSR 和 BBR 对不同矿粉含量的沥青胶浆性能进行了研究,提出了合理的粉胶比^[5];李涛等研究了矿粉性质对沥青胶浆性能的影响,发现矿粉的亲水系数与沥青胶浆性能相关性较高,亲水系数值越低的矿粉与胶浆胶结程度越好^[6];刘丽等分析了石灰石矿粉、水泥和消石灰 3 种矿粉对沥青胶浆高温性能的影响,发现水泥和消石灰可以增加沥青胶浆的稠硬性,提高沥青胶浆的抗剪强度、抗车辙因子和黏度,从而有利于改善沥青胶浆的高温性能^[7];冯浩基于动态黏弹力学分析了在不同剪应力水平、角速度、温度和粉胶比条件下,沥青胶浆高温流变特性的变化规律^[8];李平等利用布氏黏度计研究了矿粉对沥青胶浆黏度性能的影响,指出矿粉类型对胶浆黏度有重要影响,随着粉胶比的增加,不同类型矿粉间的差别逐渐加大^[9];张争奇等采用 DSR 和 BBR 对纤维、矿粉和沥青三者组成的沥青胶浆的高低温性能进行了研究,揭示了粉胶比和纤维用量变化对沥青胶浆性能的影响规律^[10]。由以上可知,为了保证沥青胶浆达到良好的

性能,需要对影响沥青胶浆性能的多种因素进行综合考虑,通过改变粉胶比、沥青性质、矿粉性质等手段改善沥青胶浆的性能。

煤直接液化工艺是指在高温(400 ℃ 以上)、高压(10 MPa 以上)、在催化剂和溶剂作用下使煤的分子进行裂解加氢,直接转化成液体燃料,再进一步加工、精制成汽油、柴油等燃料油^[11-12]。煤直接液化残渣(Direct Coal Liquefaction Residue, DCLR)是煤直接液化工艺产生占原料煤总量 30% 的主要副产物,含有 30%~50% 的重质油和沥青烯类物质,能够显著改善沥青的性能,是一种非常好的沥青改性剂^[13-14]。金倬伊分析了 DCLR 的来源和组成特性,研究了 DCLR 制备改性沥青的工艺^[15];赵鹏等分析了 DCLR 的组成、结构和性质,提出了 DCLR 可开发成沥青改性剂^[16];朱伟平对 DCLR 改性沥青的性能进行了研究,分析了不同制备工艺对 DCLR 改性沥青性能的影响规律^[17];季节等对 DCLR 与沥青共混物的性能进行了研究,发现 DCLR 对沥青的高温性能有很好的改善作用^[18];赵永尚等对 DCLR 改性沥青混合料的性能进行了测试,发现 DCLR 的加入可显著提高混合料的抗车辙能力^[19];季节等利用 SHRP PG、针入度分级体系、红外光谱仪和凝胶色谱仪分析 DCLR 与沥青共混改性后宏观性能和微观结构,发现 DCLR 对沥青的共混改性主要为物理改性^[20]。由此可见,目前学者们普遍认为 DCLR 具有高附加值,可进一步开发成沥青改性剂,但研究仍停留在 DCLR 对沥青性能的改性作用方面,涉及到 DCLR 对沥青胶浆乃至混合料性能改性作用的研究却明显不足。同时,学者们对不同因素(矿粉性质、沥青性质、粉胶比等)对普通沥青胶浆性能的作用机理进行了较为广泛的研究,但却几乎没有涉及到 DCLR 改性沥青胶浆的性能,因此,本文借鉴普通沥青胶浆性能的研究方法,采用 DSR 和 BBR 试验手段,分析 DCLR 改性沥青胶浆高温性能、低温性能和疲劳性能的变化规律,进一步发现 DCLR 对沥青胶浆黏弹性能的作用机理,为 DCLR 大规模的应用提供一定的理论支持。

1 原材料及试样制备

1.1 原材料

试验采用的基质沥青为韩国进口的 SK-90 沥青,矿粉为河北三河生产的石灰岩矿粉,DCLR 来自中国神华煤制油化工有限公司内蒙古分公司在煤制油过程中的副产品。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)和《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中的相关规定,分别测试 SK-90 沥青、矿粉和 DCLR 的基本性能、元素组成与组分等技术指标。

1.1.1 SK-90 沥青

SK-90 沥青的主要技术指标见表 1、2,其中 SK-90 沥青的 PG 分级为 PG58-22。

表 1 SK-90 沥青的性能

Tab. 1 Properties of SK-90

| 指标 | | 技术标准 | 测试值 |
|-----------------|-------------|--------|------|
| 25 ℃针入度/0.1 mm | | 80~100 | 85 |
| 软化点/℃ | | ≥45 | 51 |
| 10 ℃延度/cm | | ≥20 | 51.8 |
| 60 ℃动力黏度/(Pa·s) | | ≥160 | 218 |
| RTFOT 后的 残留物 | 质量变化/% | ±0.8 | 0.1 |
| | 针入度比/% | ≥57 | 64 |
| | 10 ℃残留延度/cm | ≥8 | 10 |

表 2 SK-90 沥青的组分

Tab. 2 Compositions of SK-90

| 组分 | 饱和分 | 芳香分 | 胶质 | 沥青质 |
|------|------|------|------|------|
| 含量/% | 11.9 | 53.1 | 23.3 | 11.7 |

从表 1 可知:SK-90 沥青的性能满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中 1-1、1-2、1-3、2-2 及 2-3 区的 90 号 A 级沥青的技术要求,适用范围为各个等级的公路及路面结构中的任何层次。

1.1.2 矿粉

矿粉的主要技术指标见表 3。

1.1.3 DCLR

DCLR 的主要技术指标见表 4、5 和图 1。

(1)由表 4、5 可知:DCLR 在常温下的针入度、延度比较小,比较硬,同时,其沥青质含量比较高(质量分数为 80.2%),胶质、芳香分、饱和分的含量均比较小,体现在宏观性能上是 DCLR 的软化点非常高,延度非常低。另外,DCLR 也是一种碳氢化合物,C、H 元素的含量相对较高(质量分数为 80.21%)。

表 3 矿粉性能

Tab. 3 Properties of mineral powder

| 指标 | | 技术标准 | 测试值 |
|---------------------------|-----------|--------|--------|
| 表观密度/(t·m ⁻³) | | ≥2.5 | 2.732 |
| 含水量/% | | ≤1 | 0.5 |
| 粒度 范围/% | <0.6 mm | 100 | 100.00 |
| | <0.15 mm | 90~100 | 99.75 |
| | <0.075 mm | 75~100 | 88.56 |
| 亲水系数 | | <1 | 0.71 |
| 塑性指数/% | | <4 | 2.8 |

表 4 DCLR 性能

Tab. 4 Properties of DCLR

| 指标 | 密度/(g·cm ⁻³) | 软化点/℃ | 25 ℃针入度/0.1 mm |
|-----|--------------------------|-------|----------------|
| 测试值 | 1.23 | 170 | 2 |

表 5 DCLR 的组分和元素组成

Tab. 5 Compositions and elements of DCLR

| 组分与元素 | 饱和分 | 芳香分 | 胶质 | 沥青质 | C | H | S | N |
|-------|-----|-----|------|------|-------|------|------|------|
| 含量/% | 0.8 | 4.4 | 14.6 | 80.2 | 75.80 | 4.41 | 2.37 | 0.45 |

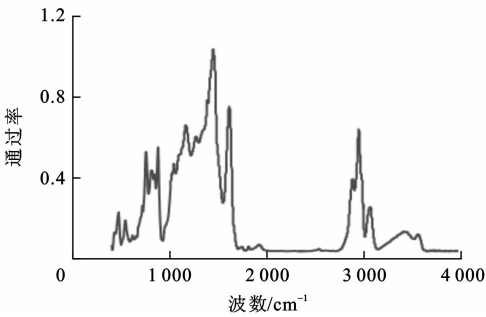


图 1 DCLR 的官能团

Fig. 1 Function group of DCLR

(2)由图 1 可知:DCLR 在主官能团区的特征峰出现在波数 2 920 cm⁻¹和 2 850 cm⁻¹附近,由此判断 DCLR 是一种不饱和烃类化合物,同时,DCLR 在指纹区的特征峰比较多,分别出现在 1 000~1 600 cm⁻¹和 600~800 cm⁻¹等附近,且在 600~800 cm⁻¹的特征峰为双峰,由此可知 DCLR 是一种烷烃取代苯异构体。

1.2 试样制备

本文制备 DCLR 改性沥青及胶浆的方法分为 2 个步骤。

(1)制备 DCLR 改性沥青。将 DCLR 和 SK-90 沥青分别加热至 190 ℃和 120 ℃,使其成熔融状态;将熔融状态下的 DCLR 按外掺方式加入到 SK-90 沥青中,DCLR 掺量分别为 5%、10%、15%和 20%;为了保证 DCLR 与 SK-90 沥青充分共混,采用低速剪切仪将 DCLR 与 SK-90 沥青共混物在 160 ℃条

件下低速($4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)剪切 1.5 h ;将 DCLR 改性沥青保温在 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下备用。

(2)制备 DCLR 改性沥青胶浆。将矿粉加热至 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$;将 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 DCLR 改性沥青与矿粉在固定粉胶比(1.0)条件下搅拌,直至均匀,制备形成 DCLR 改性沥青胶浆备用。

2 DCLR 对沥青性能的影响

不同 DCLR 掺量下改性沥青的主要技术指标及组分等测试结果见表 6、7,由表 6、7 可得如下结论。

表 6 DCLR 改性沥青的性能

Tab. 6 Properties of DCLR modified asphalts

| DCLR 掺量/% | | 5 | 10 | 15 | 20 |
|--|-------------------------------|-------|-------|----------|----------|
| 25 $^{\circ}\text{C}$ 针入度/ 0.1 mm | | 75 | 35 | 32 | 27 |
| 软化点/ $^{\circ}\text{C}$ | | 51.2 | 59.0 | 63.0 | 65.0 |
| 10 $^{\circ}\text{C}$ 延度/cm | | 9.7 | 7.7 | 3.1 | 1.3 |
| 60 $^{\circ}\text{C}$ 动力黏度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$ | | 384.0 | 561.3 | 1\,269.0 | 2\,325.5 |
| RTFOT 后的 残留物 | 质量变化/% | 0.1 | 0.1 | 0.2 | -0.1 |
| | 针入度比/% | 75 | 74 | 61 | 70 |
| | 10 $^{\circ}\text{C}$ 残留延度/cm | 5.3 | 1.5 | 1.3 | 1.2 |

表 7 DCLR 改性沥青的组分

Tab. 7 Compositions of DCLR modified asphalts %

| DCLR 掺量 | 饱和分含量 | 芳香分含量 | 胶质含量 | 沥青质含量 |
|---------|-------|-------|------|-------|
| 5 | 10.8 | 46.6 | 23.9 | 18.7 |
| 10 | 10.4 | 45.2 | 24.2 | 20.2 |
| 15 | 7.6 | 45.0 | 26.8 | 20.6 |
| 20 | 6.8 | 41.3 | 28.8 | 23.1 |

(1)相对于基质沥青,随着 DCLR 的加入及掺量的不断提高,沥青中的饱和分和芳香分逐渐减少,胶质和沥青质逐渐增加,说明 DCLR 的加入改变了沥青原有的胶体结构,使得沥青的胶体结构由溶胶型变为凝溶胶型,进而向凝胶型转化。饱和分和芳香分减少及沥青质增加会显著影响沥青的性能,容易导致沥青的针入度和延度降低,黏度和软化点升高,即沥青具有较低的温度感应性,高温性能好,低温变形能力差。

(2)相对于基质沥青,DCLR 改性沥青的标号会随着 DCLR 的加入及掺量的不断提高而逐渐降低。当 DCLR 掺量小于 10% 时,沥青的技术指标基本上可满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 2-4 区 70 号 B 级沥青或 30 号 B 级沥青的技术要求,而当 DCLR 掺量大于 10% 时,沥青的技术指标已无法满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中任何标号

沥青的技术要求。说明随着 DCLR 掺量的增加,沥青变得越来越硬,高温性能越来越强而低温抗变形能力越来越差。

(3)结合 DCLR 改性沥青的高温及低温性能发现,DCLR 的加入会导致沥青的适用范围越来越窄。当 DCLR 掺量小于 10% 时,沥青使用范围为沥青路面中的中面层(抗车辙结构层)、沥青稳定基层,或用作改性沥青、乳化沥青等的基质沥青;而当 DCLR 掺量大于 10% 时,沥青已无法适用在任何道路结构层中,因此,建议 DCLR 掺量不大于 10% 。

3 DCLR 对沥青胶浆高温性能的影响

利用 AR-1500 型高级流变仪,在 $46\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,角速度均采用 $10\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,温度间隔为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,对 SK-90 沥青胶浆及不同 DCLR 改性沥青胶浆进行 DSR 试验,分别得到相位角(δ)、复数剪切模量(G^*)、车辙因子($G^*/\sin(\delta)$)、疲劳因子($G^*\sin(\delta)$)等参数,本文主要分析加入 DCLR 后对沥青胶浆 $G^*/\sin(\delta)$ 和 $G^*\sin(\delta)$ 的影响。图 2 为 SK-90 沥青胶浆和不同 DCLR 改性沥青胶浆的车辙因子,结论如下。

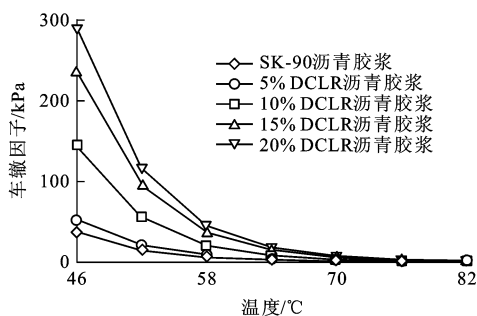


图 2 不同沥青胶浆的车辙因子

Fig. 2 Rut factors of different asphalt mortars

(1)在同一温度条件下,DCLR 沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值均高于 SK-90 沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值,且随着 DCLR 掺量的增加,沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值不断提高。 $G^*/\sin(\delta)$ 值越大表明沥青胶浆的弹性性质越显著,有利于增强沥青胶浆的抗永久变形能力,即 DCLR 的加入可以提高沥青胶浆的高温性能。按照 SHRP 沥青胶结料的 PG 分级标准可以判断,SK-90 沥青胶浆的高温等级为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,而加入 DCLR 后,沥青胶浆的高温等级提升到 $76\text{ }^{\circ}\text{C}$,甚至高达 $82\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明在同一温度下,DCLR 掺量越高,沥青胶浆高温抗永久变形的能力越强,这主要是因为 DCLR 中含有较高的沥青质(80.2%)和较低的饱和分(0.8%),随着 DCLR 掺量的增加,改性沥青中沥

青质含量越来越高,沥青的胶体结构由溶胶型变为凝胶型,进而向凝胶型转化,改性沥青的软化点和黏度明显上升,沥青乃至沥青胶浆的高温性能得到改善。另外,DCLR 中的灰分具有较小的粒径和较大的比表面积,也会导致改性沥青内部产生了较大的比黏附功,而比黏附功的提高意味着沥青乃至沥青胶浆高温性能在不断增强。

(2)在同一掺量条件下,DCLR 沥青胶浆和 SK-90 沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值均随着温度的升高而降低,且呈现指数函数关系单调递减,回归方程式为

$$Y_1 = A_1 e^{B_1 X}$$

式中: Y_1 为沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值; X 为温度; A_1 、 B_1 为与材料性质相关的回归系数,见表 8^[21-23]。

表 8 回归系数 A_1 、 B_1 值

Tab. 8 Values of regression coefficients A_1 and B_1

| 胶浆类型 | A_1 | B_1 | 相关系数 |
|---------|---------|--------|---------|
| SK-90 | 70.061 | -0.800 | 0.995 5 |
| 5%DCLR | 100.000 | -0.802 | 0.995 4 |
| 10%DCLR | 307.160 | -0.864 | 0.997 6 |
| 15%DCLR | 528.910 | -0.868 | 0.998 8 |
| 20%DCLR | 666.580 | -0.886 | 0.999 0 |

方程式相关系数均在 0.99 以上,上述降低速率在不同温度范围内呈现出不同,具体如下。

(1)迅速降低阶段。在 46℃~58℃内,沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值会随着温度的升高而迅速降低,这说明在 46℃~58℃内,沥青胶浆的黏性表现比较明显,高温抗变形能力迅速下降,对温度的敏感性高。

(2)缓慢降低阶段。在 58℃~82℃内,沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值会随着温度的升高而缓慢降低,这说明在 58℃~82℃内,沥青胶浆的弹性性能表现比较明显,高温抗变形能力下降不明显,对温度的敏感性低。

沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值随温度升高而下降的变化速率为(具体计算结果见表 9)

$$G_T = \frac{G^*/\sin(\delta_1) - G^*/\sin(\delta_2)}{T_1 - T_2}$$

式中: G_T 为沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值随着温度升高而下降的变化速率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); $G^*/\sin(\delta_1)$ 为对应 58℃或 82℃时的 $G^*/\sin(\delta)$ 值(kPa); $G^*/\sin(\delta_2)$ 为对应 46℃或 58℃时的 $G^*/\sin(\delta)$ 值(kPa); T_1 为 58℃或 82℃; T_2 为 46℃或 58℃。

从表 8、9 可得如下结论。

表 9 沥青胶浆的 G_T 值

Tab. 9 G_T values of asphalt mortars $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

| 胶浆类型 | 在迅速降低阶段,温度为 46℃~58℃ | | 在缓慢降低阶段,温度为 58℃~82℃ | |
|---------|---------------------|--|---------------------|--|
| | | | | |
| SK-90 | 2.61 | | 0.36 | |
| 5%DCLR | 10.32 | | 0.83 | |
| 10%DCLR | 10.33 | | 1.08 | |
| 15%DCLR | 16.80 | | 1.48 | |
| 20%DCLR | 20.53 | | 1.81 | |

(1)在 46℃~58℃内,沥青胶浆的 G_T 远远大于沥青胶浆在 58℃~82℃的 G_T ,即在 46℃~58℃内沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值变化比较剧烈,而在 58℃~82℃内沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 值变化比较平缓,说明沥青胶浆在 46℃~58℃内对温度的敏感程度远远高于 58℃~82℃内对温度的敏感程度,即沥青胶浆在 46℃~58℃车辙易形成区时,虽然其高温抗变形能力很强,但对温度却十分敏感。

(2)沥青胶浆的 G_T 随着 DCLR 掺量的增加而增加,尤其是在 46℃~58℃车辙易形成区表现更为强烈,这说明沥青胶浆在 46℃~58℃车辙易形成区的高温性能虽然随着 DCLR 掺量的增加而增加,但在高 DCLR 掺量下,沥青胶浆的高温性能对温度极其敏感。

4 DCLR 对沥青胶浆疲劳性能的影响

SHRP 规定用 RTFOT+PAV 阶段后沥青胶结料的疲劳因子 $G^*\sin(\delta)$ 表征沥青材料中温抗疲劳开裂性能。利用 AR-1500 型高级流变仪,在 22℃~40℃内,角速度均采用 $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,温度间隔为 3℃条件下,对 SK-90 沥青胶浆及不同 DCLR 改性沥青胶浆进行 DSR 试验。表 10 为 SK-90 沥青胶浆和不同 DCLR 沥青胶浆的 $G^*\sin(\delta)$ 测试结果,结论如下。

表 10 不同沥青胶浆的疲劳因子

Tab. 10 Fatigue factors of different asphalt mortars

| 胶浆类型 | 不同温度(℃)下疲劳因子/ kPa | | | | | | |
|---------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 40 | 37 | 34 | 31 | 28 | 25 | 22 |
| SK-90 | — | — | 1 028 | 1 575 | 2 547 | 4 117 | 6 376 |
| 5%DCLR | — | — | 1 431 | 2 799 | 4 259 | 6 123 | — |
| 10%DCLR | — | 899 | 1 826 | 2 957 | 4 345 | 6 235 | — |
| 15%DCLR | 1 921 | 3 212 | 4 321 | 4 922 | — | — | — |
| 20%DCLR | 2 145 | 4 022 | 4 998 | 6 087 | — | — | — |

(1)在同一温度条件下,DCLR 沥青胶浆的 $G^*\sin(\delta)$ 均高于 SK-90 沥青胶浆的 $G^*\sin(\delta)$,且随

着 DCLR 掺量的增加在不断升高,说明 DCLR 的加入对沥青胶浆的疲劳性能产生了不利影响。

(2)按照 SHRP 沥青胶结料的 PG 分级标准,PAV 阶段沥青胶结料的 $G^*\sin(\delta)$ 应小于 5 000 kPa,SK-90 沥青胶浆的疲劳温度等级为 25 ℃,而随着 DCLR 的加入及掺量不断增加,其疲劳等级逐渐变为 28 ℃,甚至 34 ℃,说明随着 DCLR 掺量的增加,沥青胶浆的疲劳性能在逐渐降低。

5 DCLR 对沥青胶浆低温性能的影响

利用 TE-BBR 型高级流变仪,对 SK-90 沥青胶浆及不同 DCLR 沥青胶浆进行 0、-6、-12 ℃ 下的 BBR 试验,分别得到蠕变劲度模量(S)、蠕变速率(m)等参数。图 3、4 分别为 SK-90 沥青胶浆和不同 DCLR 改性沥青胶浆的 S 和 m 值,结论如下。

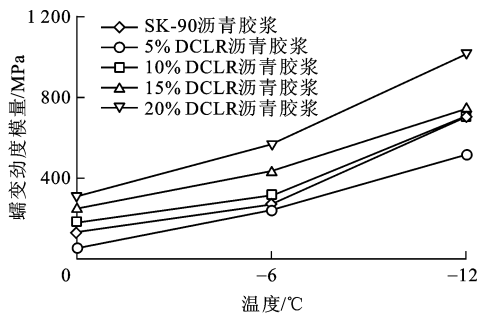


图 3 不同沥青胶浆的蠕变劲度模量

Fig. 3 Creep stiffness moduli of different asphalt mortars

(1)在同一温度条件下,DCLR 沥青胶浆的 S 值均高于 SK-90 沥青胶浆的 S 值, m 值均低于 SK-90 沥青胶浆的 m 值,且随着 DCLR 掺量的增加,这种趋势越来越明显, S 值越大和 m 值越小表明沥青胶浆的黏性性质越显著,即沥青胶浆抵抗变形或阻滞

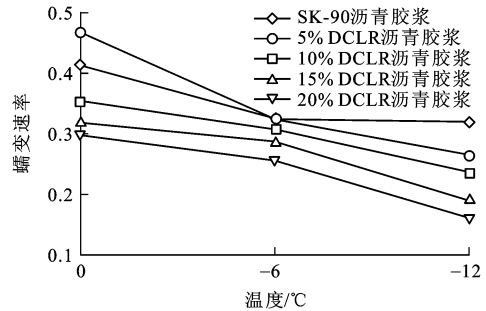


图 4 不同沥青胶浆的蠕变速率

Fig. 4 Creep rates of different asphalt mortars

塑性流动的能力越差,说明 DCLR 的加入对沥青胶浆的低温性能产生了不利影响。

(2)按照 SHRP 沥青胶结料的 PG 分级标准,根据沥青胶结料的 S 值小于 300 MPa, m 值大于 0.3 来判断沥青胶结料的低温等级,其中沥青胶结料的试验温度为其低温等级温度加上 10 ℃,由此可知 SK-90 沥青胶浆的低温等级为 -16 ℃,而随着 DCLR 的加入及掺量不断增加,沥青胶浆的低温等级下降到 -10 ℃甚至到 0 ℃,说明 DCLR 对沥青胶浆低温性能的损伤会随着 DCLR 掺量的增加而越来越明显。这可能是由于 DCLR 中含有大量的沥青质,使改性沥青的延度显著下降,从而使改性沥青乃至胶浆的脆性增大,低温性能也就会受到损伤。

(3)在同一掺量条件下,沥青胶浆的 S 值会随着温度的升高而增加,而 m 值却随着温度的升高而降低,且基本上呈现线性关系,回归方程式为

$$Y_2 = A_2 X + B_2$$

式中: Y_2 为沥青胶浆的 S 或 m 值; A_2 、 B_2 为与材料性质相关的回归系数,具体数值见表 11。上述回归方程式的相关系数在 0.92 以上。

表 11 回归系数 A_2 、 B_2 值

Tab. 11 Values of regression coefficients A_2 and B_2

| 胶浆类型 | 蠕变劲度模量回归分析 | | | 蠕变速率回归分析 | | |
|---------|------------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | A_2 | B_2 | 相关系数 | A_2 | B_2 | 相关系数 |
| SK-90 | 286.34 | -200.31 | 0.921 2 | -0.053 1 | 0.456 2 | 0.926 7 |
| 5%DCLR | 230.36 | -187.36 | 0.987 4 | -0.100 8 | 0.554 9 | 0.945 9 |
| 10%DCLR | 259.38 | -113.89 | 0.920 1 | -0.059 1 | 0.418 3 | 0.984 1 |
| 15%DCLR | 245.28 | -14.14 | 0.980 1 | -0.063 5 | 0.394 0 | 0.924 2 |
| 20%DCLR | 354.00 | -74.66 | 0.975 4 | -0.048 5 | 0.348 7 | 0.994 1 |

(4)DCLR 的加入提高了沥青胶浆的高温性能,但同时降低了其低温性能,且低温性能的下降要明显高于高温性能的提升,因此,应根据当地气候资料,结合路面使用要求综合确定 DCLR 掺量。

6 结 语

(1)DCLR 的加入可以改善沥青及胶浆的高温性能,但对沥青及胶浆的低温性能和疲劳性能有

一定的损伤,且 DCLR 掺量越高,沥青及胶浆高温性能的提高越明显,低温性能和疲劳性能的损伤越显著。

(2)通过对比分析 DCLR 对沥青及胶浆高温、低温和疲劳性能的影响规律,发现随着 DCLR 掺量的增加,沥青及胶浆的适用范围越来越窄。当 DCLR 掺量小于 10%,沥青及胶浆可适用在沥青路面中的中面层(抗车辙结构层)、沥青稳定基层,或用作改性沥青、乳化沥青等的基质沥青,而当 DCLR 掺量大于 10%时,已无法适用在任何道路结构层中,因此,建议 DCLR 掺量不宜大于 10%。

(3)本文仅仅研究了固定粉胶比下的 DCLR 沥青胶浆的性能,粉胶比的变化是否会对 DCLR 沥青胶浆的性能产生影响,以及 DCLR 对沥青混合料的性能影响还有待于进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 邢明亮,陈拴发,关博文,等.高粘沥青胶浆低温性能评价与分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2013,45(3):416-421.
XING Ming-liang, CHEN Shuan-fa, GUAN Bo-wen, et al. Evaluation of asphalt mortar with high viscosity at low temperature[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2013, 45(3): 416-421. (in Chinese)
- [2] 邵显智,谭忆秋,邵敏华.几种矿粉指标对沥青胶浆的影响分析[J].公路,2004(5):122-124.
SHAO Xian-zhi, TAN Yi-qiu, SHAO Min-hua. Analysis of influence of several indexes of mineral filler on asphalt mortar[J]. Highway, 2004(5): 122-124. (in Chinese)
- [3] 程永春,马慧莉,张 鹏,等.不同填料沥青胶浆物理力学性能试验[J].吉林大学学报:工学版,2014,44(6):1628-1632.
CHENG Yong-chun, MA Hui-li, ZHANG Peng, et al. Experimental study of physical and mechanical properties of asphalt mortars with different fillers[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(6): 1628-1632. (in Chinese)
- [4] 于洪兴,吴 琰,魏连雨,等.粉油比对沥青混合料高温稳定性的影响[J].公路交通科技,2005,22(10):5-7,17.
YU Hong-xing, WU Yan, WEI Lian-yu, et al. The effects of filler to bituminous ratio on stability of asphalt mixes at high-temperature[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(10): 5-7, 17. (in Chinese)
- [5] 吴玉辉.矿粉含量对沥青胶浆性能的影响研究[J].公路交通科技,2008,25(9):35-38.
WU Yu-hui. Research on influence of mineral filler content on properties of asphalt mortar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(9): 35-38. (in Chinese)
- [6] 李 涛,扈惠敏.矿粉对沥青胶浆性能的影响[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2013,36(8):983-987.
LI Tao, HU Hui-min. Influence of mineral fillers on properties of asphalt mortar[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 36(8): 983-987. (in Chinese)
- [7] 刘 丽,郝培文,肖庆一,等.沥青胶浆高温性能及评价方法[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):30-34.
LIU Li, HAO Pei-wen, XIAO Qing-yi, et al. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 30-34. (in Chinese)
- [8] 冯 浩.基于粘弹性理论的沥青胶浆试验特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
FENG Hao. Research on characteristics of asphalt mortar based on viscoelastic theory[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [9] LI Ping, KONG Chen-guang, ZHANG Zheng-qi. Influence of filler on asphalt mortar's viscosity[C]//IEEE. 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. New York: IEEE, 2009: 778-780.
- [10] 张争奇,李 平,王秉纲.纤维和矿粉对沥青胶浆性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):15-18.
ZHANG Zheng-qi, LI Ping, WANG Bing-gang. Effect of fiber and mineral filler on asphalt mortar performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 15-18. (in Chinese)
- [11] SHUI Heng-fu, CAI Zheng-yi, XU Chun-bao. Recent advances in direct coal liquefaction[J]. Energies, 2010, 3(2): 155-170.
- [12] LIU Zhen-yu, SHI Shi-dong, LI Yong-wang. Coal liquefaction technologies-development in China and challenges in chemical reaction engineering [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(1): 12-17.
- [13] ZHENG Li-zhen, WANG Xiao-hua, ZHANG Tie-shuan, et al. Research progress in utilizations of coal liquefaction residues[C]//IEEE. 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment. New York: IEEE, 2011: 1627-1630.
- [14] PATEL P. China and South Africa pursue coal liquefaction[J]. MRS Bulletin, 2012, 37(3): 204-205.
- [15] 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):23-24,54.
JIN Zhuo-yi. Feasibility study of direct coal liquefaction residue modified asphalt[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(3): 23-24, 54. (in Chinese)
- [16] 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 Shu-jun, LU Zheng-yuan, et al. Development of property and high added-value utilization of direct coal liquefaction residue[J]. Clean Coal Technology, 2009, 15(6): 33-35. (in Chinese)

- [17] 朱伟平. 煤直接液化残渣改性沥青的研究[J]. 神华科技, 2009, 7(6): 68-71, 85.
ZHU Wei-ping. Study on direct coal liquefaction residue as asphalt[J]. Shen Hua Science and Technology, 2009, 7(6): 68-71, 85. (in Chinese)
- [18] JI Jie, ZHAO Yong-shang, XU Shi-fa. Study on properties of the blends with direct coal liquefaction residue and asphalt[C] // ICAEMAS. 3rd International Conference on Advanced Engineering Materials and Architecture Science. Huhhot: ICAEMAS, 2014: 316-321.
- [19] ZHAO Yong-shang, JI Jie. Study on the performance of direct coal liquefaction residue modified mixture[C]//ASCE. Challenges and Advances in Sustainable Transportation Systems. Reston: ASCE, 2014: 352-357.
- [20] 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 Yue-feng, 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. (in Chinese)
- [21] 李智慧, 谭忆秋. 应用流变学研究沥青胶浆最佳粉胶比的确定方法[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 294-298.
LI Zhi-hui, TAN Yi-qiu. Determination method for the best filler-asphalt ratio of asphalt mortar based on rheology[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014, 34(4): 294-298. (in Chinese)
- [22] 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 Hong-xia, CHENG Guo-xiang, ZHANG Jian-feng. Performance evaluation of modified asphalt by SHRP[J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(4): 31-34. (in Chinese)
- [23] HIRATO T, MURAYAMMA M, SASAKI H. Development of high stability hot mix asphalt concrete with hybrid binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 424-431.

《交通运输工程学报》2016 年征订通知

《交通运输工程学报》是由国家教育部主管、长安大学主办、国务院学位委员会交通运输工程学科评议组、东南大学与西南交通大学共同协办的交通运输领域的学术理论刊物, 两院院士沈志云教授任名誉主任委员; 主要刊载道路与铁道工程、载运工具运用工程、交通运输规划与管理、交通信息工程与控制等领域高水平的学术论文和重大工程实践项目产生的论文; 主要读者对象为国内外交通运输领域的科研人员、工程技术人员及大专院校相关专业的师生。

《交通运输工程学报》为双月刊, 大 16 开本, 160 个页码, 每期定价 100.00 元, 全年共 600.00 元。可到当地邮局订阅, 邮发代号为 52-195, 也可直接汇款至《交通运输工程学报》编辑部订阅。

开户银行: 中国银行西安翠华路支行

账 号: 102407337258

账 户: 长安大学杂志社

邮政编码: 710064

联 系 人: 胡广平

电 话: 029-82334382

地 址: 陕西省西安市南二环路中段长安大学杂志社

E-mail: jygc@chd.edu.cn