

文章编号:1007-9629(2024)09-0853-08

煤直接液化残渣复合改性沥青胶浆的流变特性

季 节^{1,2,3,4,*}, 张梓源^{1,2,4}, 董元帅⁵, 文 龙⁶, 马 童^{1,2,4}

(1.北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044; 2.北京建筑大学 住房城乡建设部建筑垃圾资源化工程技术创新中心,北京 100044; 3.北京建筑大学 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心,北京 100044; 4.北京建筑大学 北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心,北京 100044; 5.中咨数据有限公司 北京 100097; 6.清华大学 土木水利学院,北京 100084)

摘要:为探究煤直接液化残渣(DCLR)复合改性沥青胶浆的流变特性,针对3种沥青胶浆(DCLR复合改性沥青胶浆、DCLR改性沥青胶浆和SK-90沥青胶浆)设计了4种粉胶比.采用动态剪切流变(DSR)试验、弯曲梁流变(BBR)试验、差示扫描量热(DSC)试验和扫描电镜(SEM)试验对沥青胶浆的流变特性进行探究.结果表明:DCLR复合改性沥青胶浆的耐热性较好,热稳定性较强,高温抗流动变形能力显著强于SK-90沥青胶浆;DCLR复合改性沥青胶浆的温度敏感性显著下降,低温流变性显著强于DCLR改性沥青胶浆;相比SK-90沥青胶浆和DCLR改性沥青胶浆,DCLR复合改性沥青胶浆的综合高低温性能最优.

关键词:道路工程;煤直接液化残渣;粉胶比;沥青胶浆;流变性能;微观机制

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.09.011

Rheological Properties of Direct Coal Liquefaction Residue Composite Modified Asphalt Mortar

Ji Jie^{1,2,3,4,*}, ZHANG Ziyuan^{1,2,4}, DONG Yuanshuai⁵, WEN Long⁶, MA Tong^{1,2,4}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Engineering Technology Innovation Center of Construction and Demolition Waste Recycling, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Collaborative Innovation Center of Energy Conservation & Emission Reduction and Sustainable Urban-Rural Development in Beijing, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 5. CHECC Data Co. Ltd., Beijing 100097, China; 6. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to investigate the rheological properties of direct coal liquefaction residue (DCLR) composite modified asphalt mortar, four filler-bitumen ratios were designed for three types of asphalt mortars (DCLR composite modified asphalt mortar, DCLR modified asphalt mortar and SK-90 asphalt mortar). Dynamic shear rheology (DSR) test, bending beam rheology (BBR) test, differential scanning calorimetry (DSC) test, and scanning electron microscopy (SEM) test were used to investigate the rheological properties of the mortars. The results show that DCLR composite modified asphalt mortar has better heat resistance, stronger thermal stability, and the high temperature resistance to flow deformation is significantly stronger than SK-90 asphalt mortar. The temperature

收稿日期:2024-03-30;修订日期:2024-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078025);“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB2601200);北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220109);北京建筑大学研究生创新项目(PG2024045)

第一作者(通讯作者):季 节(1989—),女,河南信阳人,北京建筑大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jijie@bucca.edu.cn

sensitivity of DCLR composite modified asphalt mortar is significantly reduced and its low temperature rheology is significantly better than that of the DCLR modified asphalt mortar. Compared to SK-90 asphalt mortar and DCLR modified asphalt mortar, DCLR composite modified asphalt mortar has the best overall high and low temperature performance.

Key words: road engineering; direct coal liquefaction residue (DCLR); filler-bitumen ratio; asphalt mortar; rheological property; microscopic mechanism

为实现可持续发展的目标,固体废弃物(固废)在道路工程中的应用成为解决环境问题的重要途径之一^[1-2].煤直接液化残渣(DCLR)是煤在直接液化过程中经减压蒸馏后剩余的残留物,成分与沥青相似,作为一种潜在资源,其在道路工程中的应用受到广泛关注^[3-4].

张雅婕等^[5]对DCLR结构进行研究,发现其与天然湖沥青(TLA)结构相似,是潜在的沥青改性剂.季节等^[6]和石越峰^[7]确定DCLR的最佳掺量和剪切温度等后,发现其虽然对基质沥青的改善效果显著增强,但DCLR改性沥青在低温性能方面仍存在缺陷^[8-9].为改善其低温性能,众多学者对其进行二次改性,发现苯甲醛(BENZ)与邻苯二甲酸二辛酯(DOP)复合增容对DCLR改性沥青的低温性能改善效果最佳^[10-12].前述研究表明,DCLR复合改性沥青在高低温条件下表现出良好的性能,然而关于DCLR复合改性沥青胶浆的研究尚显不足.为探究DCLR复合改性沥青胶浆的流变特性,有必要深入研究其在高低温条件下的流动变形能力^[13-15].

鉴于此,本研究针对3种沥青胶浆(DCLR复合改性沥青胶浆、DCLR改性沥青胶浆和SK-90沥青胶浆),设计了4种粉胶比(m_f/m_b ,质量比,文中涉及的粉胶比、掺量等均为质量比或质量分数).采用动态剪切流变(DSR)试验、弯曲梁流变(BBR)试验、差示扫描量热(DSC)试验和扫描电镜(SEM)试验,探究了粉胶比对这3种沥青胶浆流变特性的影响,并从热解特性和微观结构角度,对其高低温流变特性进行验证.

1 试验

1.1 原材料

基质沥青采用韩国SK公司产SK-90沥青;DCLR为中国神华煤制油化工有限公司煤液化工工艺副产物;增容剂(BENZ)和增塑剂(DOP)分别由国药集团化学试剂有限公司和山东新正化工有限责任公司生产;矿粉采用石灰岩矿粉.

根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》和JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》,对原材料性能进行测试,相关性能见课题组前期的研究^[12].

1.2 沥青胶浆制备

(1)按照文献[6]制备DCLR改性沥青和DCLR复合改性沥青.2种改性沥青中的DCLR掺量均为11.5%.其中DCLR复合改性沥青在DCLR改性沥青基础上掺加了2.5%的BENZ和1.6%的DOP,该组合下其性能提升效果最显著^[12].

(2)先将矿粉预先加热至120℃;再使用电动搅拌机,在135℃下将SK-90沥青、DCLR改性沥青和DCLR复合改性沥青分别与矿粉进行剪切共混.在4种粉胶比(0.6、0.8、1.0、1.2)条件下,制备得到3种沥青胶浆,编号分别为SK-90-AM、DCLR-M-AM和DCLR-CM-AM.

1.3 试验方法

1.3.1 动态剪切流变试验

依照JTG E20—2011中的T 0628—2011《沥青流变性质试验(动态剪切流变仪法)》,对沥青胶浆进行46、52、58℃下的DSR试验,得到其相位角(δ)和复数剪切模量(G^*),计算沥青胶浆的车辙因子($G^*/\sin \delta$),以分析沥青胶浆的高温抗流动变形能力.

1.3.2 弯曲梁流变试验

依照JTG E20—2011中的T 0627—2011《沥青弯曲蠕变劲度试验(弯曲梁流变仪法)》,对沥青胶浆进行-6、-12、-18℃下的BBR试验,得到其劲度模量(S)和蠕变速率(m),以分析沥青胶浆的低温流变性能.

1.3.3 差示扫描量热试验

依照GB/T 19466.1—2004《塑料 差示扫描量热法(DSC)第1部分:通则》,采用DSC 200F3(NETZSCH)型差示扫描量热仪,对沥青胶浆进行DSC试验.试验在-80~120℃下进行,升温速率为10℃/min,得到各沥青胶浆的总吸热量(Φ_T)和吸热峰能量值(Φ_P),计算其玻璃化转变温度(T_g),从热解特性角度对沥青胶浆的高低温流变特性进行

分析.

1.3.4 扫描电镜试验

依照 JY/T 010—1996《分析型扫描电子显微镜方法通则》,采用 TESCAN MIRA4 型 SEM,对沥青胶浆微观形貌进行观察,从结构特征角度对沥青胶浆的高低温流变特性进行验证.

2 结果及分析

2.1 高温性能

2.1.1 车辙因子

不同粉胶比条件下沥青胶浆车辙因子随温度的变化如图1所示.

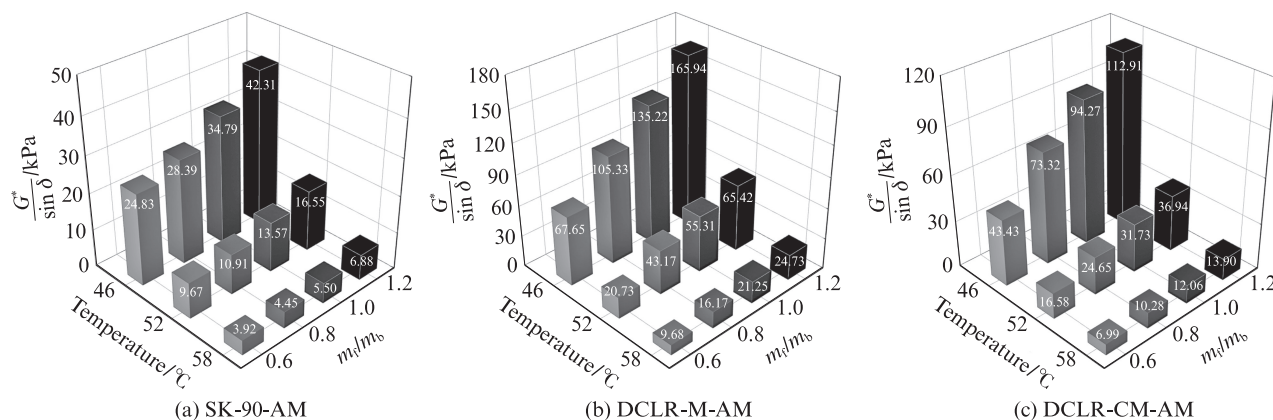


图1 不同粉胶比条件下沥青胶浆车辙因子随温度的变化

Fig. 1 Change of rutting factor with temperature of asphalt mortars at different filler-bitumen ratios

由图1可见:

(1) 不同试验温度和粉胶比条件下,与SK-90-AM相比,DCLR-M-AM和DCLR-CM-AM的车辙因子均有显著提升.这主要是因为高速剪切过程提升了DCLR与沥青的相容性,使沥青分子之间的范德华力提高^[16],增强了沥青胶浆的耐热性;同时,DCLR中的四氢呋喃不溶物是以灰分形式存在的,具有粒径小、表面粗糙等特点,能有效增加胶浆内部的黏附功^[17],显著提高沥青胶浆的高温抗流动变形能力.

(2) 不同试验温度和粉胶比条件下,与DCLR-M-AM相比,DCLR-CM-AM的高温抗流动变形能力略有降低.这主要是因为复合改性过程中,BENZ和DOP中的醛基和酯基与沥青中极性较强的官能团相互作用,减小了沥青中重质组分间的运动阻力^[18],削弱了DCLR与沥青共混产生的范德华力,促进了沥青的流动和DCLR的分散,导致沥青的耐热性受到影响,胶浆的高温性能下降.

(3) 各试验温度下,随着粉胶比的增加,3种沥青胶浆的车辙因子均有提高.相较SK-90-AM,DCLR-M-AM和DCLR-CM-AM高温抗流动变形能力的提升受矿粉掺量的影响更为显著.这主要是因为矿粉的强化效应与沥青种类有关^[19],沥青的高温稳定性越好,矿粉的强化效应就越强.与SK-90基质沥青相比,2种改性沥青的热稳定性较好,表明矿粉对2种改性沥青胶浆的高温性能提升效果更加

显著.

2.1.2 热流量

不同粉胶比条件下,3种沥青胶浆热流量随温度的变化如图2所示.各沥青胶浆的总吸热量(Φ_T)及吸热峰能量值(Φ_P)也绘于图2中,其中 $\Phi_{T,0.6}$ 和 $\Phi_{P,0.6}$ 分别表示粉胶比为0.6胶浆的总吸热量和吸热峰能量值,其他依此类推.

由图2可见:

(1) 不同粉胶比条件下,3种沥青胶浆的 Φ_T 均值 $\bar{\Phi}_T$ 由大到小依次为SK-90-AM、DCLR-CM-AM、DCLR-M-AM. Φ_T 越大,分子热运动越剧烈,分子间作用力就越弱,表现为胶浆的热稳定性越差^[20].与基质沥青SK-90相比,DCLR改性沥青和DCLR复合改性沥青中能产生较强的分子间作用力,且这2种改性沥青吸附矿粉的能力更强,其高温性能受到的矿粉强化效益提升显著,使得相同粉胶比条件下,2种改性沥青胶浆的高温抗流动变形能力显著强于SK-90-AM,具有更好的热稳定性,与DSR试验分析中结论相符.

(2) 不同粉胶比条件下,3种沥青胶浆的 Φ_P 总体呈现SK-90-AM>DCLR-CM-AM>DCLR-M-AM. Φ_P 越大,胶浆的温度敏感性越低^[21].说明DCLR-M-AM的高温抗流动变形能力虽然较强,但其对温度的敏感性较高;而复合改性后DCLR-CM-AM不仅具有较好的高温流变性,还在一定程度上缓解了胶浆的温度敏感性.

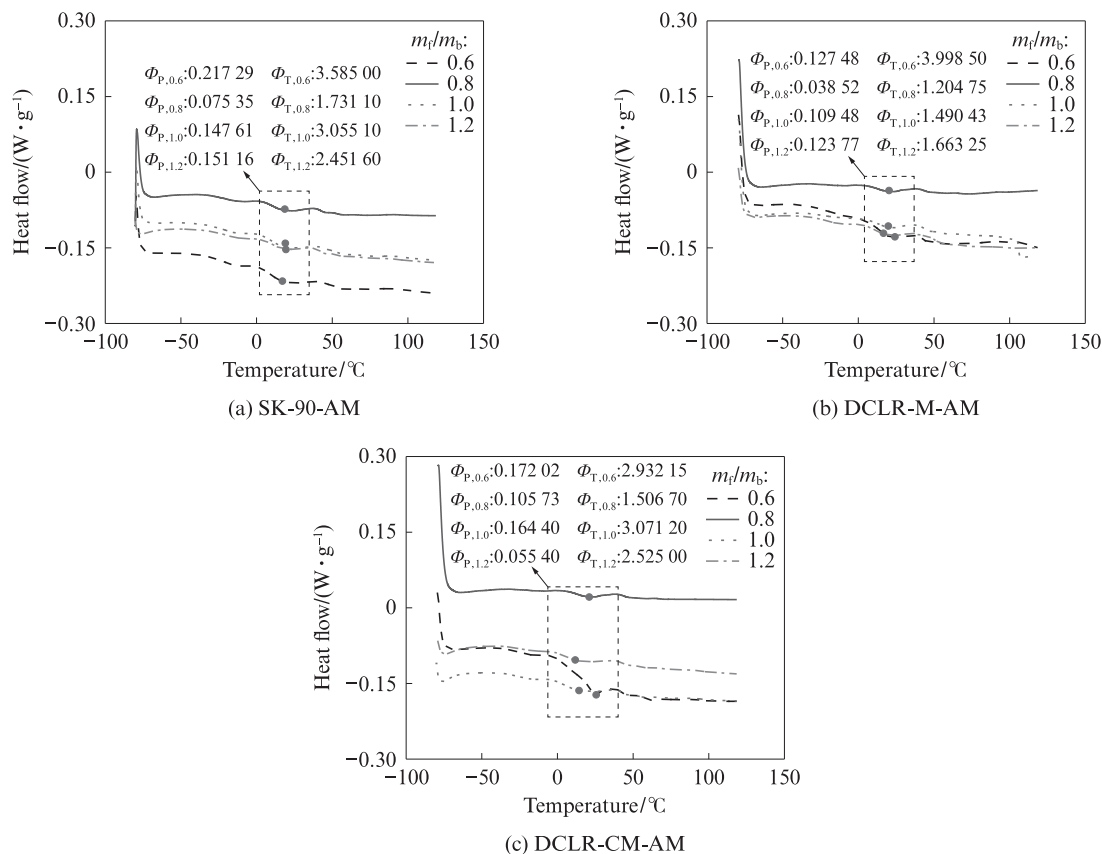


图2 不同粉胶比条件下沥青胶浆热流量随温度的变化

Fig. 2 Change of heat flux with temperature of asphalt mortars at different filler-bitumen ratios

上述试验分析表明,DSC 试验数据与 DSR 试验数据具有较强的一致性.不同粉胶比条件下,沥青胶浆的 Φ_T 越小,矿粉与沥青的融合程度越好.当粉胶比为 0.8 时,3 种沥青胶浆的 Φ_T 在 4 种粉胶比中最小.

2.2 低温性能

2.2.1 劲度模量与蠕变速率

不同粉胶比条件下沥青胶浆劲度模量和蠕变速率随温度的变化如图 3、4 所示.

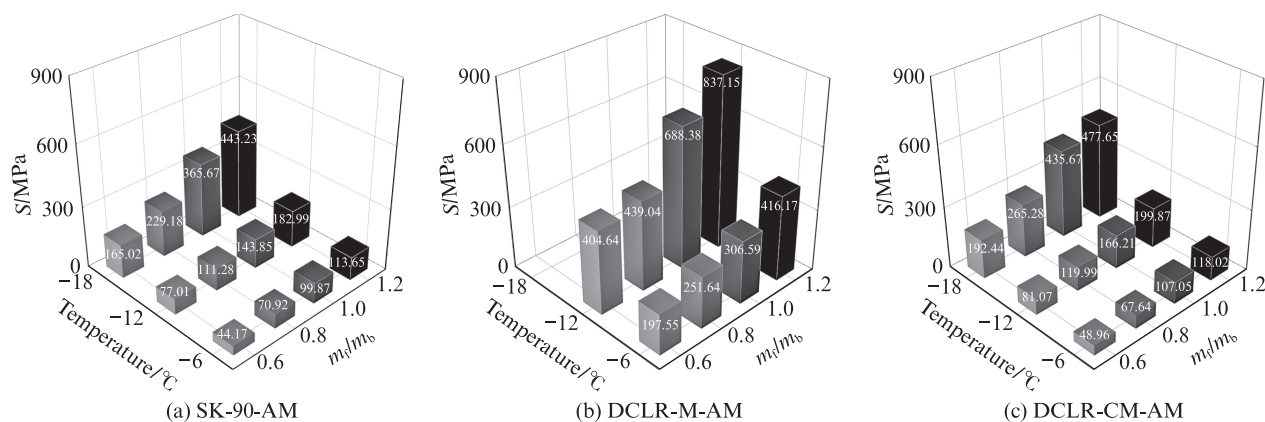


图3 不同粉胶比条件下沥青胶浆劲度模量随温度的变化

Fig. 3 Change of stiffness modulus with temperature of asphalt mortars at different filler-bitumen ratios

由图 3、4 可见:

(1) 各试验温度下,随着粉胶比的增加,3 种沥青胶浆的劲度模量不断提高,蠕变速率不断降低.沥青胶浆的劲度模量越大、蠕变速率越小,其低温性能就越差.这主要是因为,随着粉胶比的增加,沥青胶浆

中越来越多的沥青被矿粉吸附,导致其流动性和柔韧性降低,低温性能变差,低温流变性显著衰退.

(2) 不同试验温度和粉胶比条件下,DCLR-CM-AM 的劲度模量显著低于 DCLR-M-AM,蠕变速率显著高于 DCLR-M-AM,且胶浆所承受的

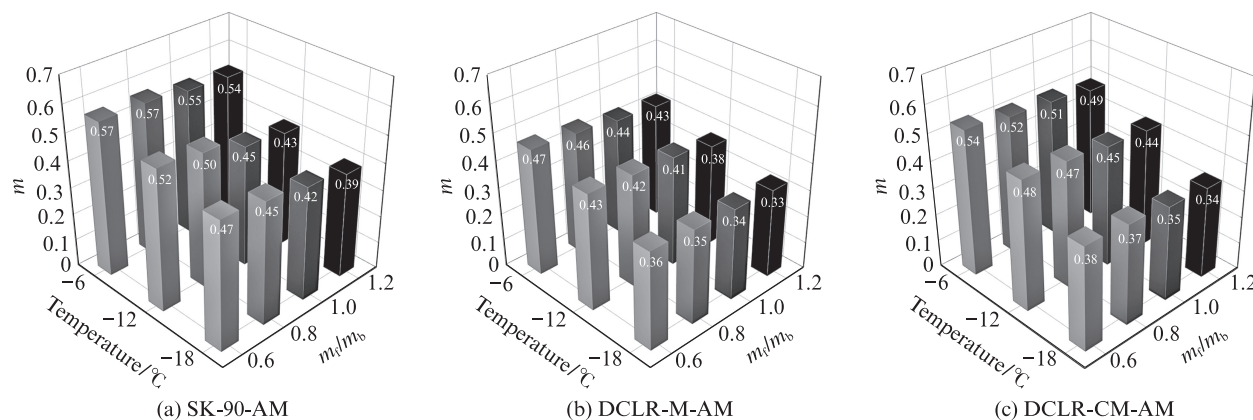


图4 不同粉胶比条件下沥青胶浆蠕变速率随温度的变化
Fig. 4 Change of creep rate with temperature of each asphalt mortars at different filler-bitumen ratios

低温等级有所提升.这主要是因为,复合改性增加了聚合体系的可塑性和柔韧性,增强了DCLR与石油沥青的相容性,使胶浆低温流变性得到显著提升.

(3)不同试验温度和粉胶比条件下,DCLR-CM-AM的劲度模量略高于SK-90-AM,蠕变速率略低于SK-90-AM.这主要是因为,DCLR中的四氢呋喃不溶物富集灰分,会吸附胶浆中的沥青,使胶浆变硬、变脆,进而导致低温流变性变差.

2.2.2 玻璃化转变温度

各沥青胶浆玻璃化转变温度(T_g)随粉胶比的变化如图5所示.

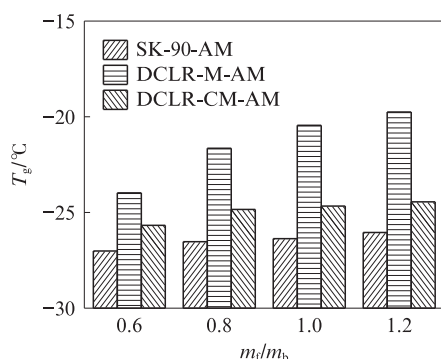


图5 沥青胶浆玻璃化转变温度随粉胶比的变化
Fig. 5 Change of glass transition temperature of asphalt mortars with filler-bitumen ratios

由图5可见:

(1)不同粉胶比条件下,3种沥青胶浆的玻璃化转变温度总体呈现DCLR-M-AM>DCLR-CM-AM>SK-90-AM.玻璃化转变温度能够反映沥青中典型组分含量,DCLR改性沥青中饱和分、芳香分和胶质含量较低,沥青质含量较高,导致DCLR-M-AM玻璃化转变温度较高^[22],不能有效松弛因温度降低而产生的应力,低温流变性较差.复合改性增强了DCLR与石油沥青的相容性,使得DCLR-CM-AM玻璃化转

化温度显著降低,低温流变性明显提升;但DCLR-CM-AM中四氢呋喃不溶物的存在在一定程度上阻碍了沥青中分子链段的运动^[23],提高了胶浆的玻璃化转变温度,导致其低温流变性略弱于SK-90-AM,这与BBR试验所得结论一致.

(2)随着粉胶比的增加,3种沥青胶浆的玻璃化转变温度均有不同程度的提升,这主要是因为随着矿粉的加入,更多的沥青分子吸附在矿粉颗粒表面,使得沥青分子链段的运动变得困难,而玻璃态转变温度代表高分子材料链段开始运动或运动被冻结时的温度,是沥青流动性参量^[24].相比DCLR-M-AM,DCLR-CM-AM的玻璃化转化温度提升更为平缓,与SK-90-AM变化趋势大体一致,其低温流变性受粉胶比影响较低.

2.3 最佳粉胶比

在不同粉胶比和试验温度条件下,对3种沥青胶浆的车辙因子平均值($\overline{G^*}/\sin \delta$)、劲度模量平均值($\overline{S}$)、蠕变速率平均值($\overline{m}$)进行皮尔逊相关性分析,结果如图6所示.

由图6可见:

(1)3种沥青胶浆的 $\overline{G^*}/\sin \delta$ 与其 $\overline{S}$ 具有良好的负相关性,与其 $\overline{m}$ 具有良好的正相关性,相关系数均在0.950以上.说明沥青胶浆的高温稳定性与低温抗裂性在一致性上存在矛盾——相同温度环境下,随着粉胶比的变化,胶浆高温稳定性好时,其低温性能相对薄弱.为更准确地分析沥青胶浆流变性,需要综合考虑沥青胶浆的高低温性能,以确定沥青胶浆的最佳粉胶比.

(2)在各试验温度下,DCLR-CM-AM的高温指标与低温指标之间的相关系数均在0.990以上,较其他2种胶浆大,说明其高低温性能更容易协调.

最佳粉胶比的确定需要兼顾沥青胶浆高低温性

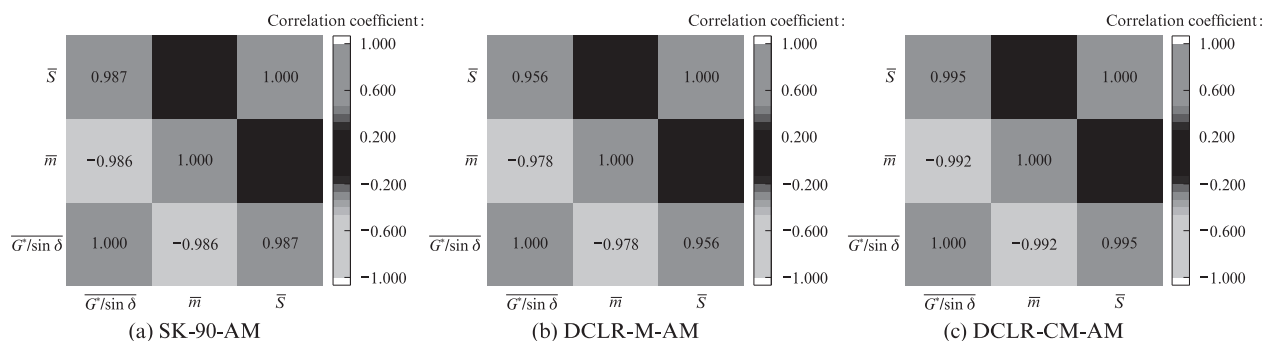


图6 沥青胶浆高低温性能相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of high and low temperature performances of asphalt mortars

能的平衡,保证其在更广的温度范围内具有较好的高低温性能.鉴于此,本文利用高温临界破坏温度($T_{\text{cri,h}}$)与低温临界破坏温度($T_{\text{cri,l}}$)的差值(适用温域)作为最佳粉胶比选取的主要依据^[26].对各沥青胶浆在不同试验温度下的车辙因子、劲度模量和蠕变速率进行拟合^[25],得到各胶浆在不同粉胶比条件下的 $T_{\text{cri,h}}$ 和 $T_{\text{cri,l}}$,如图7所示.其中 1st、2nd、3rd 和 4th 分别代

表胶浆在不同粉胶比条件下适用温域由大到小的排序.

由图7可见:以适用温域为评价标准,3种沥青胶浆的最佳粉胶比均为0.8,与DSC试验所得结论一致;在最佳粉胶比下,DCLR-CM-AM的适用温域更大,相比其他2种沥青胶浆,其综合高低温性能最优.

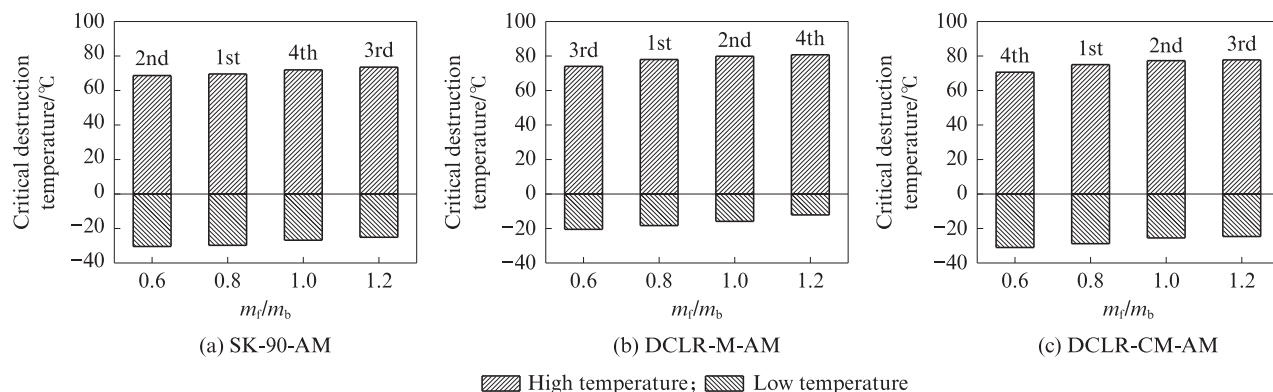


图7 沥青胶浆高低温临界破坏温度

Fig. 7 High and low temperature critical destruction temperatures of asphalt mortars

2.4 扫描电镜照片

粉胶比为0.8时3种沥青胶浆在不同位置处的SEM照片如图8所示.

由图8可见:

(1)沥青胶浆中的细颗粒增多,比表面积增大,增强了颗粒与沥青的黏附功^[27],从而显著提升了沥青胶浆的抗高温流动变形能力.3种沥青胶浆中,DCLR-M-AM中矿粉、四氢呋喃不溶物和DCLR残渣等颗粒物较多,胶浆产生的黏附功最大;DCLR-CM-AM经复合改性后,DCLR残渣大幅减少,胶浆产生的黏附功较大;SK-90-AM中仅存在矿粉细颗粒,胶浆产生的黏附功较小.因此DCLR-CM-AM的抗高温流动变形能力较SK-90-AM有显著提升,较DCLR-M-AM略低,这与DSR试验结论一致.

(2)沥青胶浆中结团现象越明显,矿粉的分散性就越差,矿粉不能被沥青完全包裹,团聚并散落的矿粉导致胶浆中的沥青与矿粉无法形成均匀稳定形态.当外界温度变化时,胶浆整体感温性不均匀^[28],低温环境下团聚位置易产生应力集中现象.DCLR-CM-AM的团聚现象较DCLR-M-AM有明显缓解,但较SK-90-AM明显劣化.说明DCLR-CM-AM的低温流变性相比DCLR-M-AM有显著提升,略低于SK-90-AM,这与BBR试验结论一致.

(3)SK-90-AM的高温抗流动变形能力较弱,DCLR-M-AM的低温流变性较弱.相比上述2种沥青胶浆,DCLR-CM-AM具有较好的高温抗流动变形能力和低温流变性,这与沥青胶浆适用温域结论一致.

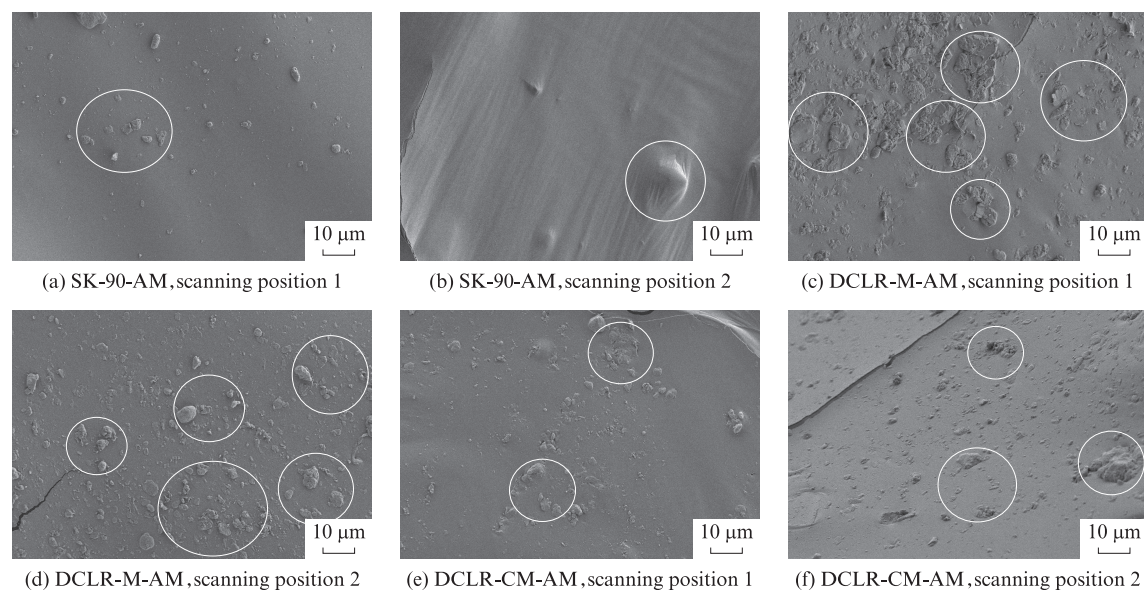


图8 粉胶比为0.8时沥青胶浆的SEM照片

Fig. 8 SEM images of asphalt mortars under filler-bitumen ratio of 0.8

3 结论

(1)DCLR中的四氢呋喃不溶物具有较大的比表面积,在胶浆内部能够产生较大的黏附功,使得DCLR-CM-AM的高温抗流动变形性能较SK-90-AM有显著提升.复合改性降低了沥青分子之间的作用力,导致其高温抗流动变形性能略弱于DCLR-M-AM;但复合改性使DCLR-CM-AM对温度的敏感性得到有效缓解.

(2)复合改性增强了DCLR与石油沥青的相容性,提高了聚合体系的柔韧性.相较DCLR-M-AM,DCLR-CM-AM受粉胶比变化影响程度低.由于DCLR-CM-AM中存在的四氢呋喃不溶物会吸收胶浆中的自由沥青,使胶浆变硬、变脆,导致其低温流变性能略弱于SK-90-AM.

(3)3种沥青胶浆的最佳粉胶比均为0.8.该粉胶比条件下,相比另外2种胶浆,DCLR-CM-AM的低温流变性较好,高温抗流动变形能力较强.在后续相关研究中,为确保沥青混合料体系中沥青胶浆流变性能良好,有效发挥矿粉的强化作用,建议将粉胶比取为0.8来进行配合比设计.

参考文献:

- [1] 马璐璐,张翥,刘芳,等.赤泥-粉煤灰稳定煤矸石基层强度特性及机理[J].建筑材料学报,2023,26(7):762-770.
MA Lulu, ZHANG Xiao, LIU Fang, et al. Strength characteristics and mechanism of red mud-fly ash stabilized coal gangue base[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7): 762-770. (in Chinese)
- [2] 高颖,王伟赫,李彦苍,等.聚合物预浸改性钢渣及其混合料

力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(10):1101-1108.

GAO Ying, WANG Weihe, LI Yancang, et al. Mechanical properties of polymer prepreg modified steel slag and its mixture [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10): 1101-1108. (in Chinese)

- [3] 李贞,王俊章,申丽明,等.煤制油工艺及煤制油残渣综合利用综述[J].环境工程,2021,39(5):135-141,149.
LI Zhen, WANG Junzhang, SHEN Liming, et al. An overview of coal-to-liquid technology and comprehensive utilization of coal-to-liquid residue[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(5): 135-141, 149. (in Chinese)
- [4] JI J, WANG Z, LI P F, et al. A review on direct coal liquefaction residue applied in asphalt pavements [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 395: 136273.
- [5] 张雅婕,薛永兵,刘振民.煤直接液化残渣性能及应用研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(5):60-67.
ZHANG Yajie, XUE Yongbing, LIU Zhenmin. Research progress on the properties and applications of direct liquefaction residue of coal[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(5): 60-67. (in Chinese)
- [6] 季节,徐新强,许鹰,等.煤直接液化残渣改性沥青胶浆性能研究[J].燃料化学学报,2021,49(8):1095-1101.
JI Jie, XU Xinqiang, XU Ying, et al. Research on performance of direct coal liquefaction residue modified asphalt mortar [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(8): 1095-1101. (in Chinese)
- [7] 石越峰.煤直接液化残渣改性沥青的制备及其性能研究[D].北京:北京建筑大学,2017.
SHI Yuefeng. Research on preparation and performances of direct coal liquefaction residue modified asphalt [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017. (in Chinese)
- [8] JI J, SUO Z, ZHANG R, et al. Effect of physical hardening on low temperature performance of DCLR modified asphalt [J].

- Construction and Building Materials, 2021, 295:123545.
- [9] 许鹰, 季节, 索智, 等. DCLR改性沥青宏观性能与微观相对分子质量分布关系[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5):939-944.
XU Ying, JI Jie, SUO Zhi, et al. Relationship between performance of direct coal liquefaction residue modified asphalt and microscopic relative molecular mass distribution[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5):939-944. (in Chinese)
- [10] 季节, 苑志凯, 魏建明, 等. 煤直接液化残渣改性沥青低温性能的改进[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(4):166-173.
JI Jie, YUAN Zhikai, WEI Jianming, et al. Improvements of low-temperature properties of direct coal liquefaction residue modified asphalt[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science), 2019, 43(4):166-173. (in Chinese)
- [11] 季节, 李辉, 王佳妮, 等. 增容剂对煤直接液化残渣改性沥青低温性能的影响[J]. 燃料化学学报, 2019, 47(8):925-933.
JI Jie, LI Hui, WANG Jian, et al. Effect of compatibilizer on low-temperature performances of modified asphalts from direct coal liquefaction[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2019, 47(8):925-933. (in Chinese)
- [12] 徐新强. 单一/复合增容方式下煤直接液化残渣与道路石油沥青相容性研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2022.
XU Xinqiang. Study on compatibility between direct coal liquefaction residue and asphalt under single/composite compatibilization mode[D]. Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022. (in Chinese)
- [13] HAJIKARIMI P, EHSANI M, HALOUI Y E, et al. Fractional viscoelastic modeling of modified asphalt mastics using response surface method[J]. Construction and Building Materials, 2022, 317:125958.
- [14] 杨丽娟, 龙念泉, 王岚, 等. 基于Burgers模型的温拌胶粉沥青胶浆低温流变特性[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(12):1313-1320.
YANG Lijuan, LONG Nianquan, WANG Lan, et al. Low-temperature rheological properties of warm-mixed crumb rubber asphalt mortar based on burgers model[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1313-1320. (in Chinese)
- [15] 冯新军, 赵梦龙, 陈旺, 等. 煤矸石粉沥青胶浆路用性能及微观机理研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):113-119.
FENG Xinjun, ZHAO Menglong, CHEN Wang, et al. Research of road performances and microcosmic mechanisms of coal waste powder asphalt mortar[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):113-119. (in Chinese)
- [16] 季节, 索智, 石越峰, 等. 煤直接液化残渣与沥青共混后的性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(5):33-38.
JI Jie, SUO Zhi, SHI Yuefeng, et al. Experimental study on properties of asphalt blended with direct coal liquefaction residue[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(5):33-38. (in Chinese)
- [17] 季节, 石越峰, 索智, 等. 煤直接液化残渣对沥青胶浆黏弹性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(4):1-8.
JI Jie, SHI Yuefeng, SUO Zhi, et al. Influence of direct coal liquefaction residue on viscoelastic properties of asphalt mortar[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(4):1-8. (in Chinese)
- [18] 季节, 黄昶惟, 马童, 等. 增容剂对煤直接液化残渣与石油沥青相容性的改善效果评价[J]. 中国公路学报, 2023, 36(6):1-13.
JI Jie, HUANG Changwei, MA Tong, et al. Evaluation of compatibilizers for improving compatibility between direct coal liquefaction residue and asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(6):1-13. (in Chinese)
- [19] CHEN L, CHEN J Y, LI M L, et al. Research on high-temperature rheological performance of fiber reinforced high-viscosity asphalt mastics[J]. Construction and Building Materials, 2023, 397:132397.
- [20] LU P Z, MA Y H, YE K, et al. Analysis of high-temperature performance of polymer-modified asphalts through molecular dynamics simulations and experiments[J]. Construction and Building Materials, 2022, 350:128903.
- [21] YIN P, PAN B F. Evaluation of temperature sensitivity of recycled asphalt based on numerical analysis model and thermal analysis kinetics[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344:128153.
- [22] LESUEUR D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 145(1/2):42-82.
- [23] 熊锐, 刘子铭, 杨晓凯, 等. 煤矸石粉/水镁石纤维改性沥青混合料路用性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(2):71-75.
XIONG Rui, LIU Ziming, YANG Xiaokai, et al. Research on road performance of coal gangue powder and brucite fiber modified asphalt mixture[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017, 34(2):71-75. (in Chinese)
- [24] APOSTOLIDIS P, ELWARDANY M, ANDRIESCU A, et al. Study of phase behavior of epoxy asphalt binders using differential scanning calorimetry[J]. Construction and Building Materials, 2023, 369:130566.
- [25] 包建业. 胶粉对SBS改性沥青流变特性及微观结构的影响[J]. 中外公路, 2019, 39(3):251-255.
BAO Jianye. Effects of rubber powder on rheological properties and microstructure of SBS modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3):251-255. (in Chinese)
- [26] 楼梁伟. 有砟轨道沥青级配碎石基层复合改性沥青性能研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(4):127-132.
LOU Liangwei. Study on performance of composite modified asphalt in ballast track subgrade bed consisted of asphalt graded crushed stone[J]. Railway Engineering, 2020, 60(4):127-132. (in Chinese)
- [27] TAN Y Q, GUO M. Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47:254-260.
- [28] 豆怀兵, 陈拴发, 祝斯月, 等. 高粘改性沥青胶浆粘弹特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4):53-57.
DOU Huaibing, CHEN Shuanfa, ZHU Siyue, et al. Research on viscoelastic property of high viscosity modified asphalt mortar[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(4):53-57. (in Chinese)