

生物柴油对冷补沥青混合料性能的影响研究

李仕宏¹, 卫琳琳¹, 金永波¹, 杨航¹, 范桂丽¹, 保令湛², 颜峰^{2*}

(1. 云南交投公路建设第五工程有限公司, 云南 昆明 650000;
2. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:针对传统冷补沥青混合料(CPAM)稀释溶剂用量大、孔隙率高及早期强度不足等问题,采用生物柴油-柴油复配体系为环保型稀释剂,通过粘度、粘附性试验及红外光谱分析,揭示生物柴油对沥青流变特性与界面作用的调控规律,并结合间接拉伸与车辙试验量化其力学及耐久性影响。生物柴油通过酯基物理分散使沥青60℃粘度降幅达61%,集料裹覆率提升至100%;掺量40%时CPAM动稳定度达9027次/mm,较纯柴油体系提升94.7%,高温抗变形能力接近热拌沥青;环氧基团三维交联网络增强界面粘结,残留稳定度达88.9%,冻融劈裂强度比达94.3%。生物柴油兼具稀释与改性双重效应,为CPAM提供绿色高效路径。

关键词:道路工程;生物柴油;冷补沥青;粘附性;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)10-0179-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.030

Research on the effects of biodiesel on the performance of cold patch asphalt mixture

LI Shi-hong¹, WEI Lin-lin¹, JIN Yong-bo¹, YANG Hang¹, FAN Gui-li¹,
BAO Ling-chen², YAN Feng^{2*}

(1. Yunnan Communications Investment Highway Construction Fifth Engineering Co., Ltd.,
Kunming 650000, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of
Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The traditional cold patch asphalt mixture (CPAM) has problems such as large amount of diluent, high porosity of the mixture and insufficient early strength. This study uses the biodiesel-diesel composite system as an environmentally friendly diluent. Through Brookfield rotational viscosity test, adhesion test and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) analysis, the regulation law of biodiesel on the rheological properties and interfacial interaction of asphalt is revealed. The influence of biodiesel on the mechanical properties and durability of CPAM was quantified by the indirect tensile test and the rutting test. The test results show that biodiesel significantly reduces the 60℃ rotational viscosity of asphalt by 61% through the physical dispersion effect of ester groups (C=O), and increases the aggregate coating rate to 100%. When the content of biodiesel reaches 40%, the dynamic stability of CPAM reaches 9027 times/mm, which is 94.7% higher than that of the pure diesel system, the high-temperature anti-deformation ability is close to the level of hot-mixed asphalt. The three-dimensional cross-linked network formed by epoxy groups significantly enhances the asphalt-aggregate interface bonding. The residual stability increases to 88.9%, and the freeze-thaw splitting strength ratio reaches 94.3%. Biodiesel has the dual effects of a diluent and a modifier, it provides a green and efficient technical path for CPAM, promoting the sustainable development of road repair materials.

Key words: road engineering; biodiesel; cold patch asphalt; adhesion; road performance

冷补沥青混合料(CPAM, Cold Patch Asphalt Mixture)由乳化沥青或稀释沥青与未加热的冷骨料在常温下拌和而成。其在经济、生态和生产方面较热拌沥青(Hot mix asphalt)具有显著优势而逐渐成为路面材料的研究热点之一^[1-4]。但它也存在一些缺陷,其中包括较高的孔隙率、早期强度弱以及达到完全强度需要极长的固化时间等是现在的CPAM

存在的主要问题^[5-7]。传统的冷拌沥青通常使用煤油和柴油作为稀释剂,需要添加大量的柴油和煤油来满足施工所需的流动性。大剂量掺入溶剂不但会对环境造成不利影响,同时还会导致冷补料的性能不足以及成本较高等问题^[8]。

生物柴油是一种酯基富氧的可再生燃料,生物柴油主要由各种原料生产,如藻类、动物脂肪、微生

收稿日期:2025-12-05;修回日期:2026-08-03

基金项目:昆明理工大学分析测试基金(2023T20120128);昆明理工大学大学生创新创业训练计划项目(S202510674199)

作者简介:李仕宏(1970-),男,本科,高级工程师,研究方向为高速公路低碳建造,1332782023@qq.com;颜峰(1979-),男,硕士,副教授,研究方向为路面结构与材料的宏观力学行为,通讯联系人,yanfeng@kust.edu.cn。

植物油和植物油(大豆油、菜籽油和棕榈油)^[9]。生物柴油具有优异的生物降解性^[10],降解速度比石油柴油快 3~4 倍,另外,生物柴油的处理、运输和储存也比石油柴油更安全^[11]。生物柴油的润滑性能更好,Shahid 等^[12]报道称,生物柴油可以以任意比例与柴油进行混合得到生物柴油混合物,其混合物具有较高的润滑性能。Zargar 等^[13]和 Sun 等^[14-15]使用各种流变学测试探索了废食用油(WCO)和 WCO 生产生物柴油的残渣对老化沥青的影响。同时,Sun 等^[16]发现由 WCO 制备生物柴油的衍生物可以降低复数模量和蠕变刚度,同时增加沥青的 m 值和相位角,提高了沥青的抗热裂性。生物柴油的衍生物可以增加沥青中饱和化合物和芳香族化合物的比例,这可以避免老化沥青中高度氧化组分的聚集^[17-18]。

针对生物柴油制备冷拌沥青的性能研究较少,并且生物柴油与柴油的互溶能更有效降低的沥青粘度。采用 Brookfield 旋转粘度、粘附性、傅里叶变换红外光谱以及混合料的路用性能来综合评价生物柴油作为冷补沥青混合料稀释剂的效果。为进一步探讨生物柴油稀释冷补沥青混合料的优化设计提供一定的理论支撑。

1 原材料

1.1 生物柴油

生物柴油取自云南某生物柴油生产厂家,整体呈金黄色,液体清澈且无可见杂质,流动性极佳。其主要加工工艺是利用废动植物油(包括地沟油和化油等),经过杂质过滤和除水处理后,进行酯化反应并进行蒸馏提纯,最终获得生物柴油。生物柴油中主要含有脂类、醇类和酸类等成分,其中部分成分在化学组成上与沥青中的芳香族化合物和烷烃类相似,因此生物柴油能够很好的溶于沥青中。生物柴油的低粘度以及高润滑性能可以很好的稀释沥青,同时,生物柴油的低酸值减少了对沥青的水损害^[19-20]。生物柴油的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 生物柴油的技术指标

	试验结果
20℃ 比重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.881
闪点/℃	135
酸值/($10^{-2}\text{ mg KOH}\cdot\text{mL}^{-1}$)	1.03
十六烷值/CN	58
硫含量/%	≤0.01
碘值/($10^{-2}\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)	106

1.2 柴油

选用路面工程中普遍使用的 0# 柴油作为稀释剂,其技术指标如下表 2 所示。

表 2 0# 柴油的技术指标

检测项目	试验结果	中国标准
标准密度(20℃)/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.839	GB/T 1884
酸值/($10^{-2}\text{ mg KOH}\cdot\text{mL}^{-1}$)	4.75	GB/T 258
运动粘度(20℃)/($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	4.35	GB/T 265

1.3 辅助添加剂

以环氧树脂和固化剂作为辅助添加剂来增强稀释沥青与集料之间的黏结效应,其中环氧树脂选用双酚 A 型环氧树脂,固化剂选用改性胺类固化剂。

1.4 基质沥青

以 70# 道路石油沥青作为制备冷补沥青的基质沥青,同时选用路面工程中普遍使用的 0# 柴油作为稀释剂,与生物柴油共混来对基质沥青进行稀释以满足施工和易性的要求。70# 基质沥青的技术指标如表 3 所示。

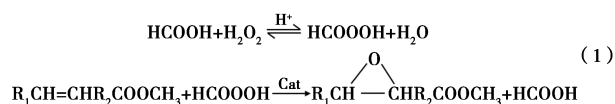
表 3 70# 基质沥青的技术指标

测试指标	测试结果	测试标准 (JTG E20—2011)
针入度(25℃)/0.1 mm	63.8	T0604
延度(10℃)/cm	46	T0605
软化点/℃	49.4	T0606
动力粘度(60℃)/(Pa·s)	3.11	T0620
闪点/℃	>300	T0611
薄膜烘箱试验后(163℃,5 h)		
质量损失/%	0.18	T0609
针入度(25℃)/0.1 mm	55.4	T0604
延度(10℃)/cm	13	T0605

2 稀释沥青的制备

2.1 生物柴油预处理

在生物柴油中,脂肪酸甲酯的含量占比最大,通过对生物柴油进行预处理,获得含有环氧脂肪酸甲酯的生物柴油,以促进环氧体系结构的形成,增强冷补沥青的性能。环氧脂肪酸甲酯的合成是在酸性条件下,甲酸与双氧水反应生成环氧化剂过氧甲酸,过氧甲酸随后作用于脂肪酸甲酯中的双键,其主要反应方程式如式(1)所示^[21]。



将生物柴油、甲酸按 1:0.1 的比例加入三口烧瓶中,磁力搅拌以帮助反应物充分混合。反应温度为 60℃,在预定温度下缓慢滴加过氧化氢,保持反应 4 h。反应结束后,将反应混合液转移至分液漏斗中,静置使其分层,然后弃置下层水,再用碱溶液调整 pH≈7。最后将粗产品减压蒸馏即可得到目标产物即带环氧树脂胺甲酯的生物柴油。

采用的稀释剂配比为生物柴油:柴油:环氧树脂:固化剂=(10~40):(90~60):25:25,并以生物柴油:柴油:环氧树脂:固化剂=0:100:25:25 作为对照组。

2.2 布氏粘度测试

冷补沥青的粘度和工作性能取决于稀释剂的掺量,合理的选用稀释剂的粘度可以保证冷补沥青具备优异的施工和易性和长期存储性。选用 4 种不同质量比(柴油:生物柴油=90:10、80:20、70:30、60:40)的柴油和生物柴油制备稀释沥青,根据 ASTM D 4402^[22]的要求,使用 NDJ-1C Brookfield 旋转粘度计对 CPA 在 20、40、60、80℃下的粘度进行测试以初步评价其施工和易性,同时也测试了柴油(D)和生物柴油(Biodiesel)以及辅助添加剂(add)在不同温度下的布氏粘度,结果如表 4 所示。

表 4 稀释剂布氏粘度测试结果

材料	20℃	40℃	60℃	80℃
D/(mPa·s)	2.5	1.5	0.8	0.3
Biodiesel/(mPa·s)	41.5	19.0	6.0	2.5
add/(mPa·s)	107.0	45.5	21.0	6.5

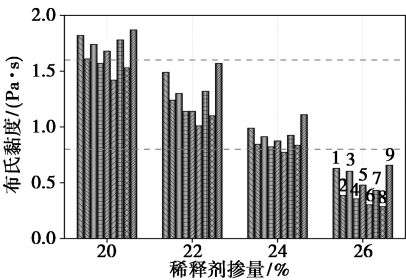
由表 4 可知,各种试剂的粘度随着温度上升不断下降,同时,不论是柴油或生物柴油还是辅助添加剂的粘度都远远小于基质沥青的粘度。柴油一直被用作沥青的稀释溶剂,而生物柴油具备出色的润滑效果,根据相似相容的原理,在二者的互相混溶下能够更好的降低基质沥青的粘度。

2.3 冷补沥青的制备与初选

本文选用 70# 沥青作为基质沥青,选用 0# 柴油和生物柴油作为稀释剂,辅助添加剂作为增粘剂制备 CPA。按照下述工艺进行 CPA 制备:将基质沥青置于 135℃的烘箱中加热,保温 2 h 后取出。将室温下的稀释剂(柴油和生物柴油)按设定的比例加入到基质沥青中,并保持其温度为 60~70℃,使用高速搅拌器以 1 000 r/min 搅拌 30 min 制得稀释沥青;待稀释沥青冷却至室温,将计算用量的辅助添加剂加入到稀释沥青中,使用高速剪切仪以 2 000 r/min 剪

切 10 min。

粘度通常被用作判定 CPA 是否满足施工和易性的指标,在本文中根据不同的柴油和生物柴油比例以及稀释剂比例设计了几种不同的 CPA 配方。首先通过粘度试验对这几种配方进行初选,为了使 CPA 能更均匀的涂敷在骨料上,通常要求其在 60℃下的旋转粘度在 0.8~1.6 Pa·s 之间^[23]。将柴油和生物柴油按照不同的质量比以及不同的稀释剂质量与基质沥青比测试其 Brookfield 粘度。为保证粘度的准确性,对每种配比进行两次粘度测试。CPA 样品的具体配比和测试结果列于图 1 中,其中生物柴油和柴油分别为 B 和 D,辅助添加剂为 add,分别测试了稀释剂掺量为 20%、22%、24% 和 26% 下 60℃的 CPA 样品的布氏粘度。



1—10B+90D+add;2—10B+90D;3—20B+80D+add;
4—20B+80D;5—30B+70D+add;6—30B+70D;
7—40B+60D+add;8—40B+60D;9—100D+add

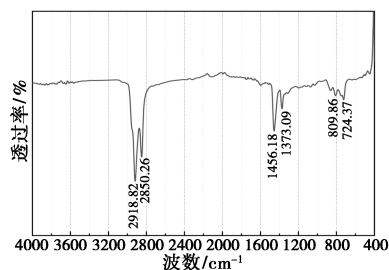
图 1 CPA 在 60℃下的 Brookfield 粘度测试结果

根据图 1 可知,生物柴油与柴油共混的稀释效果要比纯柴油的稀释效果好。当稀释剂的掺量从 20%增加到 26%时,CPA 的布氏粘度降低了约 61%。相较于辅助添加剂来说,生物柴油掺量的增加对 CPA 的粘度影响较小。同时,在稀释剂掺量为 20%、22%和 24%时,生物柴油与柴油比例为 3:7 的时候会达到最低粘度。60℃的 CPA 样品布氏粘度应在 0.8~1.6 Pa·s 之间才能满足施工和易性的要求,这对应与稀释剂的掺量分别为部分 20%、22%以及部分 24%的范围内。因此,主要以 22%这一掺量用作后续 CPA 的测试以及混合物的制备,其粘度范围在 0.995~1.49 Pa·s 之间,满足所需设计的 CPA 粘度要求。

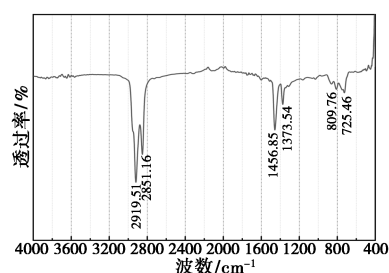
2.4 FT-IR 测试分析

为了解 CPA 的作用机理,本研究采用 Nicolet iS20 型傅里叶变换红外光谱对 CPAL 进行了红外光谱分析,以确定稀释剂添加前后沥青粘结剂官能团的变化。首先用浓度为 0.05 g/mL 的二硫化碳

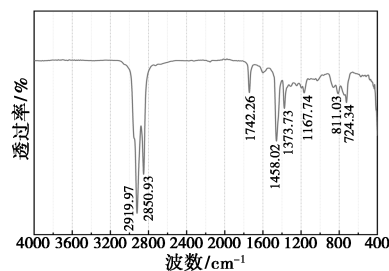
(CS₂)溶解沥青,然后将溶解均匀的溶液滴到溴化钾晶片上。最后,将在汞灯下干燥的样品放入仪器中。扫描波数为400~4 000 cm⁻¹,扫描64次。其中沥青与CPAL的红外光谱如图2所示。



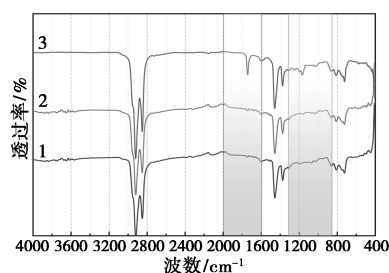
(a) 基质沥青



(b) 基质沥青+柴油



(c) 基质沥青+柴油+生物柴油



1—基质沥青;2—沥青+柴油;3—沥青+柴油+生物柴油

(d) 3种沥青红外测试结果对比图

图2 基质沥青和CPA的红外光谱

红外光谱可以通过判断特征峰的变化来识别沥青中的官能团。根据图2的红外光谱对比可以得出以下结论。

(1) 基质沥青和CPA在2 918、2 850、1 456、1 373、724 cm⁻¹波数附近有明显的特征峰。羟基(O—H)的吸收峰出现在2 918 cm⁻¹,亚甲基(CH₂)的反对称振动峰出现在2 850 cm⁻¹。芳香环(C=C)

的对称对称和不对称拉伸和弯曲振动分别出现在1 456、1 373 cm⁻¹处。顺式烯烃(CH)的面外弯曲振动吸收峰出现在724 cm⁻¹处^[24]。

(2) CPAL红外光谱中波数为1 742 cm⁻¹附近表现出明显的特征峰,表现为酯基(C=O)的伸缩振动吸收峰,而1 705 cm⁻¹处却没有出现羧基的吸收峰,说明环氧脂肪酸甲酯与CPA中的羧基发生反应。此外,在1 167 cm⁻¹处出现了羧酸酯(O=C—O—C)的吸收峰,这进一步说明环氧脂肪酸甲酯与CPA发生了反应^[25-26]。

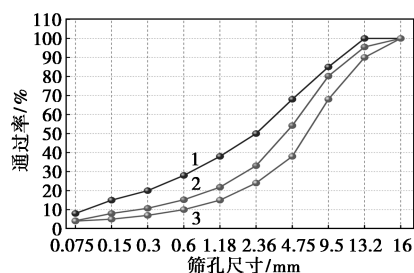
(3) 对比基质沥青和CPAL的红外光谱可以发现,生物柴油中的脂肪酸会溶解于沥青中,导致沥青的(C=O)基团被消耗,并且产生新酮羧基酸。另外,虽然基质沥青和CPA的特征峰基本一致,波峰位置大致相邻,但是,也产生了新的物质。从而可以看出,CPA的制备属于一种复杂的物理反应过程^[27]。

3 冷补沥青混合料的制备与测试

骨料级配对于CPAM的初始强度影响较大,因此选用骨架碎石级配能为CPAM提供足够的抗剪强度,同时连续级配的骨料结构能提高路面的耐久性、可加工性和抗车辙性,并且能够满足强度要求且不易损坏^[28-29]。本文骨料选用10~20 mm、5~10 mm玄武岩以及0~5 mm石灰石填料制备CPAM,骨料的物理性能见表5。本文设计了一种骨架级配,图3为CPAM的粗、细集料级配曲线,满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的要求。

表5 骨料的物理性质

粒径/mm	表观密度/(g·cm ⁻³)	吸水率/%	压碎值/%
10~20	2.878	0.52	11.22
5~10	2.865	0.52	11.22
3~5	2.843	0.38	—
0~3	2.826	0.38	—



1—级配上限;2—目标级配;3—级配下限

图3 制备混合料的骨料级配曲线

CPA 与骨料的黏附性决定了 CPAM 的性能优异与否,而且对施工和易性以及坑槽的耐久性也有很大的影响。如果黏附性较差,将会造成混合料之间粘结力不足,使得摊铺压实后的 CPAM 松散,稳定性差,导致坑槽修复失败。因此,CPAM 与集料的黏附性是表征 CPAM 是否合格的核心指标,针对 CPAM 的黏附性进行研究是非常有必要的。

3.1 黏附性试验

在针对本文中的黏附性试验研究中,除了考虑 CPA 黏附性的问题,也需要满足 CPA 的最佳掺量。CPA 掺量不但对施工和易性有影响,同时也关乎 CPAM 的路用性能的优异。如果 CPA 掺量不足,则会导致 CPAM 无法被均匀裹附,出现未被涂布的白色骨料情况,进而使得混合料粘结不足,难以形成较高的强度。如果 CPA 掺量过高,容易导致 CPAM 过油,以及 CPA 析出进而使 CPAM 发生团聚等问题^[30]。因此,选用合适的 CPA 掺量不但可以避免对 CPAM 的拌和产生影响,也可以使 CPAM 的性能达到最佳。

根据所设计的级配,选取 4.7%、5.2%、5.7%、6.2%和 6.7% 5 种不同的 CPA 掺量,通过黏附性试验来对 CPA 的最佳掺量进行选取,以确保 CPAM 性能达到最佳。将图 3 中的骨料级配以相同的工艺进行拌和,每组 CPAM 样品均准备 500 g 试样,然后称取 50 g 放入沸水中,保持沸腾匀速搅拌 2 min。然后随机挑选 100 粒骨料置于白纸上,检查骨料是否完全被 CPA 覆盖,统计表面被完全覆盖的骨料数目记为 N ,其黏附率 $P_{粘}$ 计算如式(2)所示。

$$P_{粘} = (N/100) \times 100\% \tag{2}$$

黏附率越高则代表所用 CPA 黏附性越好,黏附性能结果如表 6 所示。

表 6 CPA 的黏附率

CPA 掺量/% $m_B:m_D:m_{add}$	涂覆率/%				
	4.7	5.2	5.7	6.2	6.7
10:90:30	93	97	99	100	100
20:80:30	93	96	100	100	100
30:70:30	91	96	99	100	100
40:60:30	92	98	99	100	100
40:60:0	0	0	0	0	0

从表 6 中可以看出,当 CPA 掺量为 4.7%和 5.2%时,CPAM 的裹附率明显较低,有大量白色料存在,说明 CPA 掺量较低,集料表面沥青膜较薄。当 CPA 掺量为 5.7%和 6.2%时,集料表面变油并有

光泽,沥青膜较为均匀,油湿状态相对适中。当 CPA 掺量为 6.7%时,集料表面的 CPA 过多,出现沥青流动的现象。同时,辅助添加剂能够有效提升 CPA 的黏附性,未添加辅助添加剂的 CPAM 经水煮后全部脱落,而掺加辅助添加剂的 CPAM 的黏附性则明显提升。因此,CPA 的最佳掺量选用为 6.2%。

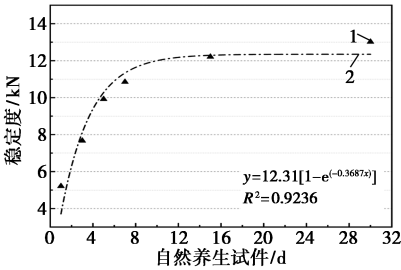
3.2 环氧冷补沥青混合料强度增长规律

考虑到 CPAM 的力学性能要求,结合以上种种性能指标,本文选择使用基质沥青:环氧体系 = 80:20,稀释剂掺量为 22% (生物柴油:柴油 = 30:70),沥青用量为 6.2% 为代表,来探究 CPAM 的强度增长规律及固化度发展趋势。

使用 Origin 中的 BoxLucas 模型对 CPAM 的稳定度进行拟合,其函数形式如式(3)所示。由图 4 可以看出,CPAM 在常温养护的前 10 d 中强度增长迅速,当养护时间达到 15 d 后基本达到最大强度。

$$y = a(1 - e^{bx}) \tag{3}$$

式中, y (kN) 为 CPAM 的稳定度; x (d) 为 CPAM 的养护时间; a (12.31)、 b (-0.3687)、 e 为拟合参数。



1—稳定度;2—稳定度拟合曲线

图 4 稳定度增长拟合曲线

3.3 车辙试验

沥青混合料的高温稳定性是指其在高温下抵抗变形流动的能力,动态稳定性是反应沥青高温稳定性的重要指标。本文通过车辙试验研究了生物柴油对于 CPAM 高温稳定性的影响。按照制备 CPAM 的方式制备车辙试件,考虑到稀释沥青类 CPAM 成型初期呈松散状态,为保证测试试件的前期性能具备代表性。在车辙试样成型时,使用车辙仪往返碾压 4 次,带模在自然环境下养生 3 d 后将试件置于 110℃烘箱中 12 h,立即使用车辙轮碾成型仪往返碾压 8 次,然后将试件放置于室外通风处在自然环境下养生 7 d,最后在 60℃试验环境下测其动稳定度,轮压为 0.7 MPa,记录 3 个重复的平均值以评估 CPAM 的动态稳定性(DS, cycle/mm)。根据中国

JTG E20—2011 标准,动态稳定性计算公式如式(4)所示:

$$DS = \{[(t_1 - t_2) \times N] / (d_2 - d_1)\} \times C_1 \times C_2 \quad (4)$$

式中, DS (cycle/mm)为沥青混合料的动态稳定性; d_1 (mm)是在时间 t_1 (min)下的变形; d_2 (mm)是在时间 t_2 (min)下的变形; C_1 (在本研究中等于1.0)是机器类型的系数; C_2 (在本研究中等于1.0)是标本的系数; N (等于42次/min)是车轮的往返移动速度,试验结果如图5所示。

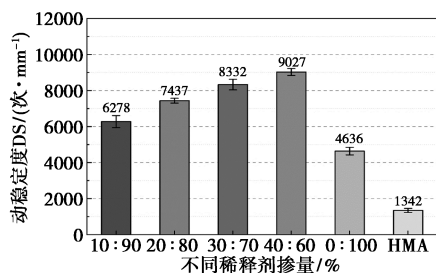


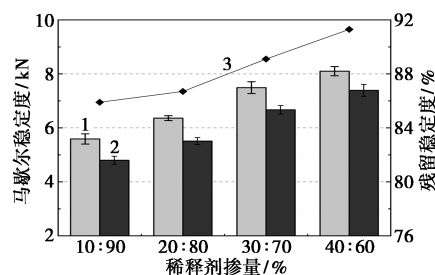
图5 不同稀释剂掺量下的高温性能试验结果

通过修正后的测试方法对车辙试模进行处理以及辅助添加剂的作用下,各组的动稳定度都满足热拌沥青混合料车辙试验 ≥ 800 (times/mm)的要求。随着生物柴油的掺入,CPAM的动稳定度较单用柴油时产生了上升的趋势,说明生物柴油的掺入使得沥青混合料抗高温变形的能力逐渐提高,其中当生物柴油的掺量达到40%的时候获得最大的动稳定度,达到了9027(times/mm),较仅用柴油作为稀释剂时的4636(times/mm)提升了约94.7%的高温性能。CPAM的环氧基团与固化剂发生反应,形成了三维交联结构,将沥青嵌锁在网状结构中,显著提高了混合料的抗永久变形能力,能够达到热拌沥青混合料的高温性能要求。

3.4 浸水马歇尔试验

沥青路面水损害是指在路区有水的情况下,由于车辆荷载的反复作用,水逐渐从沥青膜表面进入骨料,进而导致沥青膜脱落,沥青涂层油膜被破坏,沥青与骨料分离,使路面损坏。当沥青混合料中稀释剂未完全挥发时,沥青与集料之间的附着力不足,使沥青与集料表面分离,进而从集料表面脱落,造成水损害。引入适量的生物柴油可以增强水稳定性,添加到沥青后,生物柴油中的环氧脂肪酸甲酯与环氧树脂共同作用,大大增加了沥青与集料之间的结合力。浸水马歇尔试验是评价稀

E20—2011)进行。



1—0 h 马歇尔稳定度;2—48 h 马歇尔稳定度;3—残留稳定度

图6 不同稀释剂掺量下的马歇尔试验结果

从图6中可以看出,随着生物柴油的增加,沥青混合料的残余稳定度不断上升,当生物柴油的掺量从10%增加到40%时,其残留稳定度从84.5%升高到88.9%,说明随着环氧基团的不断增加,环氧体系逐渐成型,有效提高了CPAM的抗水损害性能,且随着掺量的增多使其在沥青中的交联点更多,从而提高CPAM水稳定性的目的。

4 结论

以生物柴油-柴油复配体系作为环保型稀释剂,制备冷补沥青(CPA),通过Brookfield旋转粘度试验及傅里叶变换红外光谱分析,揭示了生物柴油对沥青流变特性与界面作用的调控规律;并通过粘附性试验和路用性试验对比分析了生物柴油对冷补沥青混合料(CPAM)的路用性能的影响,主要结论如下。

(1)生物柴油通过出色的润滑性能提高了包裹率和施工和易性,同时增加了CPA环氧基团含量。环氧体系形成三维交联结构能够促进沥青与集料之间的粘结,提高沥青混合料的耐水损害性能。

(2)在相同的稀释剂掺量下,CPAM的路用性能随着生物柴油的增加而增加,其中强度和高温性能较掺加柴油的情况下都得到较大的提高,其中高温性能提升了约94.7%,性能也与热拌沥青混合料接近。

(3)生物柴油可以降低柴油用量,显著改善CPAM的路用性能。100:14:8的CPAM试样的各项性能均优于100:22:0的CPAM试样,说明使用生物柴油替代柴油掺加的同时,能显著改善CPAM的路用性能。

参考文献

- [1] Al-Busaltan S, Nageim A H, Atherton W, et al. Mechanical properties of an upgrading cold-mix asphalt using waste materials[J].

- Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24 (12) : 1484 - 1491.
- [2] Lu S M, Lu C, Tseng K T, *et al.* Energy-saving potential of the industrial sector of Taiwan [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21 : 674-683.
- [3] Jain S, Singh B. Cold mix asphalt: An overview [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280 : 124378.
- [4] Yu J, Feng Z, Chen Y, *et al.* Investigation of cracking resistance of cold asphalt mixture designed for ultra-thin asphalt layer [J]. Construction and Building Materials, 2024, 414 : 134941.
- [5] Nai Y, Jalili M. Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (3) : 1338 - 1343.
- [6] 李谋玉. 关于冷补沥青混合料胶结料的研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [7] 曹安贞, 徐海峰, 樊亮, 等. 冷拌沥青混合料技术现状评述 [J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51 (5) : 118-122.
- [8] Kim K H, Lee L S, Amirkhanian N S. Effects of warm mix asphalt additives on performance properties of polymer modified asphalt binders [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 37 (1) : 17-24.
- [9] Saifuddin N, Samiuddin A, Kumaran P. A review on processing technology for biodiesel production [J]. Trends in Applied Sciences Research, 2015, 10 (1) : 1-37.
- [10] Aransiola E, Ojumu T, Oyekola O, *et al.* A review of current technology for biodiesel production: State of the art [J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 61 : 276-297.
- [11] Atadashi I, Aroua M, Aziz A. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14 (7) : 1999-2008.
- [12] Shahid M E, Jamal Y. A review of biodiesel as vehicular fuel [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 12 (9) : 2484-2494.
- [13] Zargar M, Ahmadinia E, Asli H, *et al.* Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 233/234 : 254-258.
- [14] Sun Z, Yi J, Huang Y, *et al.* Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102 : 496-504.
- [15] Sun Z, Yi J, Huang Y, *et al.* Investigation of the potential application of biodiesel by-product as asphalt modifier [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17 (3) : 737-752.
- [16] Sun Z, Yi J, Chen Z, *et al.* Chemical and rheological properties of polymer modified bitumen incorporating bio-oil derived from waste cooking oil [J]. Materials and Structures, 2019, 52 (5) : 1-11.
- [17] Wang J, Yu X, Ding G, *et al.* Influence of asphalt solvents on the rheological and mechanical properties of cold-mixed epoxy asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2021, 310 : 125245.
- [18] Gong M, Yang J, Zhang J, *et al.* Physical-chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105 : 35-45.
- [19] Oldham D, Rajib A, Dandamudi K, *et al.* Transesterification of waste cooking oil to produce a sustainable rejuvenator for aged asphalt [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 168 : 105297.
- [20] Zhao Y, Chen M, Zhang X, *et al.* Effect of chemical component characteristics of waste cooking oil on physicochemical properties of aging asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2022, 344 : 128236.
- [21] 杨坤于, 英瑜, 盖世伟, 等. 环氧脂肪酸甲酯合成研究 [J]. 四川化工, 2009, 12 (1) : 10-13.
- [22] ASTM D 4402. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer [S]. USA: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [23] 徐茜, 耿立涛, 魏雪, 等. 含餐厨废油的道路坑槽修补用冷补沥青室内性能评价 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (1) : 156-161.
- [24] Zhang H, Zheng F, Zhang J, *et al.* Contributions of fourier-transform infrared spectroscopy technologies to the research of asphalt materials: A comprehensive review [J]. Fuel, 2024, 371 : 132078.
- [25] Sun H, Yang P, Fan H, *et al.* Study on the graft modification of PVC with epoxy fat acid methyl ester and the plasticizing properties [J]. Acta Polymerica Sinica, 2014, 14 (2) : 233-238.
- [26] Zhao Y, Chen M, Wu S, *et al.* Rheological properties and microscopic characteristics of rejuvenated asphalt using different components from waste cooking oil [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370 : 133556.
- [27] Wei H, Wang Y, Li J, *et al.* Optimization design of cold patching asphalt liquid based on performance experiments and statistical methods [J]. Construction and Building Materials, 2023, 391 : 131881.
- [28] Pouranian R M, Haddock E J. Determination of voids in the mineral aggregate and aggregate skeleton characteristics of asphalt mixtures using a linear-mixture packing model [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188 : 292-304.
- [29] Wang F, Xiao Y, Cui P, *et al.* Effect of aggregate morphologies and compaction methods on the skeleton structures in asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 263 : 120220.
- [30] Zhang Z, Fang Y, Yang J, *et al.* A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 9 (2) : 151-166. ■