

生物柴油低温过滤阻塞性能的影响因素及评价方法

夏鑫, 蔺建民, 李妍, 杨鹤, 陶志平, 丁晓亮

(中石化石油化工科学研究院有限公司, 北京 100083)

摘要:生物柴油低温过滤阻塞性能差是阻碍生物柴油发展的重要原因之一。为了加强生物柴油行业规范化,促进生物柴油产业健康发展,综述了生物柴油低温过滤阻塞性能的影响因素和评价方法,并根据不同影响因素提出了建议。生物柴油中饱和脂肪酸甲酯、脂肪酸甘油酯、游离甘油、甾醇糖苷均会影响生物柴油低温过滤阻塞性能。可通过调变生物柴油分子结构,添加流动性改进剂和冷冻分离饱和脂肪酸甲酯等方法,减少饱和脂肪酸甲酯对生物柴油低温过滤阻塞性能的负面影响。ASTM D7501是评价生物柴油低温过滤阻塞性能的有效方法。在ASTM D7501基础上,制定的适用于我国生物柴油低温过滤阻塞性能评价的试验方法,对于促进我国生物柴油产品品质提升具有现实意义。

关键词:生物柴油;低温过滤阻塞性能;影响因素;冷浸过滤试验法

中图分类号:TK428.9;TQ517 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)05-0103-06

Influencing factors and evaluation methods of low-temperature filtration blocking performance of biodiesel

XIA Xin, LIN Jianmin, LI Yan, YANG He, TAO Zhiping, DING Xiaoliang

(SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Poor biodiesel low-temperature filtration blocking performance is one of the important reasons hindering the development of biodiesel. In order to strengthen the standardization of biodiesel industry and promote the healthy development of biodiesel industry, the influencing factors and evaluation methods of low-temperature filtration blocking performance of biodiesel were reviewed, and suggestions were made according to different influencing factors. Saturated fatty acid methyl esters, fatty acid glycerides, free glycerol, sterol glycosides in biodiesel can affect the low-temperature filtration blocking performance of biodiesel. The negative effect of saturated fatty acid methyl esters on the low-temperature filtration blocking performance of biodiesel can be reduced by modifying the molecular structure of biodiesel, adding flow improver and freezing separation of saturated fatty acid methyl esters. ASTM D7501 is an effective method to evaluate the low-temperature filtration blocking performance of biodiesel. The standard method of evaluating the low-temperature filtration blocking performance of biodiesel in China developed on the basis of ASTM D7501, is of practical significance to promote the quality improvement of biodiesel products in China.

Key words: biodiesel; low-temperature filtration blocking performance; influencing factor; cold soak filtration test

收稿日期:2022-03-19;修回日期:2023-02-18

基金项目:中国石油化工股份有限公司合同项目(121031)

作者简介:夏鑫(1994),男,助理工程师,硕士,研究方向为生物柴油性能研究及燃料添加剂产品开发(E-mail)xiaxin_001@163.com。

通信作者:蔺建民,教授级高级工程师(E-mail)linjm.ripp@sinopec.com。

生物柴油作为一种可再生能源,在世界范围内受到广泛关注,美国、巴西、阿根廷、马来西亚及欧盟成员国是全球范围内推广生物柴油的主要国家,我国政府也十分重视和鼓励生物柴油产业的健康发展^[1]。尤其在“碳达峰、碳中和”的迫切要求下,生物柴油因有效的碳减排作用而被认为具有良好的应用前景^[2]。国务院在《2030年前碳达峰行动方案

通知》中指出,积极扩大先进生物液体燃料等新能源、清洁能源在交通运输领域应用。此外,在我国高原地区,柴油机是主要的运载动力机械,受大气压力和温度的影响,柴油机会出现功率下降、油耗增加甚至冒黑烟等问题^[3],在一定程度上增加了我国高原地区对柴油的需求量,且会对环境造成不良影响。有研究指出,在高原环境条件下,燃用含生物柴油的柴油调合燃料,可降低碳氢化合物、CO 和碳烟排放,NO_x排放也有所改善^[4-5];另外,由于生物柴油含有 10% 左右的氧原子,在一定程度上弥补了因高原缺氧而导致发动机燃烧效率下降的问题^[6]。在柴油中加入生物柴油,一方面可以降低柴油使用量,另一方面可以降低柴油机排放量以缓解环境压力^[7]。

生物柴油具有十六烷值高、硫含量低等特点,可由动植物油脂、废弃油脂为原料进行生产,可以用作柴油发动机燃料及柴油调合燃料,而低温过滤阻塞性能是衡量生物柴油及柴油调合燃料产品品质的一项重要指标,也是制约生物柴油应用的重要因素之一^[8]。低温过滤阻塞性能差的生物柴油及柴油调合燃料可能产生以下问题:①发动机滤网阻塞,造成发动机启动困难和排烟量增加;②发动机过滤器堵塞,严重时会造成整车故障;③在发动机中形成树脂状物质,导致发动机熄火;④引发燃油分配器故障。有报道称^[9],在低温环境下,生物柴油或柴油调合燃料的凝固点、冷滤点及浊点等指标虽然能够满足产品标准的技术要求,但是仍有发动机供油受阻的现象出现,说明凝固点、冷滤点、浊点等性能技术指标尚不能很好地反映生物柴油及柴油调合燃料的低温过滤阻塞性能。因此,有必要开展生物柴油低温过滤阻塞性能的相关研究工作,以保障生物柴油及柴油调合燃料产品品质和使用性能。

本文综述了生物柴油(脂肪酸单烷基酯,本文以典型的脂肪酸甲酯为例)低温过滤阻塞性能影响因素和评价方法,并根据不同影响因素提出针对性建议,以期为加强生物柴油行业规范化,促进生物柴油产业积极健康发展提供参考。

1 生物柴油低温过滤阻塞性能的影响因素及应对策略

1.1 饱和脂肪酸甲酯

生物柴油是以饱和脂肪酸甲酯及不饱和脂肪酸甲酯为主要成分的混合物,不同原料制备的生物柴油其脂肪酸甲酯饱和度差异较大^[8],而脂肪酸甲酯的饱和度是影响生物柴油低温流动性能的

因素之一。表 1 列举了 10 种典型脂肪酸甲酯及其熔点。

由表 1 可见,饱和脂肪酸甲酯的熔点与碳链长度呈线性相关,且饱和脂肪酸甲酯的熔点高于不饱和脂肪酸甲酯的熔点。因此,在低温条件下饱和脂肪酸甲酯更易从生物柴油中结晶析出,且生物柴油中的饱和脂肪酸甲酯占比越高,低温流动性越差^[10-13],更易引起发动机滤网堵塞和输油管阻塞等问题,使得柴油调合燃料低温过滤阻塞性能变差。此外,陈五花等^[14]研究发现,脂肪酸甲酯的碳原子数对生物柴油的低温过滤阻塞性能也有影响,在低温条件下高碳原子数的脂肪酸甲酯更易结晶析出。这是因为对于同系物而言,分子量决定了分子结晶的难易程度,分子量越高,分子间作用力越强,分子越易结晶^[15],低温过滤阻塞性能越差。

表 1 脂肪酸甲酯及其熔点

脂肪酸甲酯	分子量/(g/mol)	熔点/°C
月桂酸甲酯(C12:0)	214.3	4.5
肉豆蔻酸甲酯(C14:0)	242.4	18.5
棕榈酸甲酯(C16:0)	270.4	30.5
硬脂酸甲酯(C18:0)	298.5	39.1
花生酸甲酯(C20:0)	326.5	51.5
山嵛酸甲酯(C22:0)	354.6	55.0
木蜡酸甲酯(C24:0)	382.66	57.0
油酸甲酯(C18:1)	296.4	-20.0
亚油酸甲酯(C18:2)	294.4	-35.0
亚麻酸甲酯(C18:3)	292.4	-55.0

注:熔点数据参照文献[16]

针对生物柴油低温过滤阻塞性能差的问题,开展生物柴油饱和脂肪酸甲酯结晶机制的研究十分必要。蔡玲玲等^[17]认为生物柴油中的饱和脂肪酸甲酯在低温条件下经历“成核—生长—聚集”3 个过程,形成的三维立体网状结构将饱和脂肪酸甲酯及其他小分子包裹,最终形成结晶并析出。基于这一认识,通过调变生物柴油分子结构^[18],添加流动性改进剂^[19],冷冻分离饱和脂肪酸甲酯^[20]等方法,可改善生物柴油低温过滤阻塞性能。

1.2 脂肪酸甘油酯及游离甘油

以油脂(主要成分甘油三酯)和脂肪醇为原料,通过酯交换反应制备脂肪酸单烷基酯作为生物柴油,是目前最广泛的生物柴油生产方式,其广义酯交换反应示意图如图 1 所示。

由图 1 可知,酯交换反应是可逆反应,产物中除了目标产物脂肪酸单烷基酯外,还有脂肪酸单

甘油酯、脂肪酸二甘油酯以及脂肪酸三甘油酯等副产物。值得注意的是,脂肪酸单甘油酯、脂肪酸二甘油酯以及脂肪酸三甘油酯均具有较高的熔点^[21],低温条件下会在生物柴油中形成结晶而对生物柴油产品的过滤性能和流动性能产生不利影响,而低温条件下过滤性能和流动性能差的生物柴油会堵塞发动机过滤器和滤网,导致发动机功率下降或发动机启动困难。

另一方面,脂肪酸单甘油酯、脂肪酸二甘油酯以及脂肪酸三甘油酯的存在会导致生物柴油产品的浊点升高,而浊点升高会使得生物柴油在低温条件下的结晶量增加,导致生物柴油产品的低温过滤阻塞

性能变差。Yu等^[22]研究了甘油酯类化合物对大豆油来源的生物柴油低温性能的影响,发现体积分数为0.1%的饱和脂肪酸单甘油酯或饱和脂肪酸二甘油酯就能使生物柴油的浊点升高3~5℃,当饱和脂肪酸二甘油酯在生物柴油中的体积分数提高至1%时,生物柴油的浊点提高28℃,而饱和脂肪酸单甘油酯在生物柴油中的体积分数提高至1%时,生物柴油的浊点升高32℃。另外,生物柴油中残留的饱和脂肪酸三甘油酯不仅影响生物柴油的低温性能,而且会显著增加生物柴油的黏度^[23],从而使柴油调合燃料低温过滤阻塞性能变差。

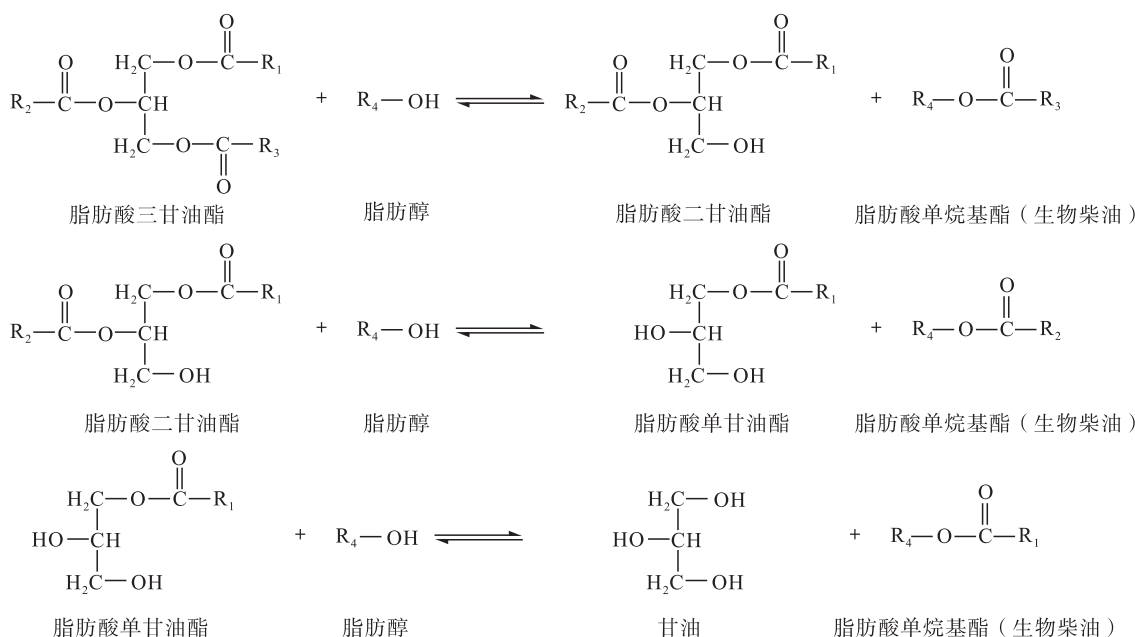


图1 油脂制备生物柴油的广义酯交换反应示意图

针对饱和脂肪酸单甘油酯含量影响生物柴油及柴油调合燃料低温过滤阻塞性能的问题,EN 14214对生物柴油在不同温度环境条件的脂肪酸单甘油酯含量提出了建议,具体含量建议如表2所示。同时,欧盟对各成员国按照自身情况合理控制柴油调合燃料中的饱和脂肪酸单甘油酯含量的建议如表3所示。

表2 EN 14214对生物柴油中脂肪酸单甘油酯含量(质量分数)的建议

等级	限值/%
1	≤0.15
2	≤0.30
3	≤0.40
4	≤0.50
5	≤0.60
6	≤0.70

表3 EN 14214对柴油调合燃料中饱和脂肪酸单甘油酯含量的建议

建议地区	饱和脂肪酸单甘油酯含量/(mg/L)
瑞典全年	≤20
挪威冬季	≤30
挪威夏季	≤70
北欧冬季	≤55
北欧夏季	≤90
南欧冬季	≤70
南欧夏季	≤90

由表2可知,生物柴油中的脂肪酸单甘油酯的质量分数可以作为衡量生物柴油产品品质等级的技术指标之一,生物柴油中的脂肪酸单甘油酯的质量分数越低,其低温过滤阻塞性能越好,生物柴油产品的品质等级越高。由表3可知,为了保障柴油调合燃料在冬季低温环境下的使用性能,须将柴油调合

燃料的饱和脂肪酸单甘油酯含量控制在较低范围。

游离甘油(熔点 17.9 °C)是生物柴油的不良组分^[24],因为甘油黏度较高^[25],会阻塞发动机供油系统并腐蚀发动机,因此游离甘油也是影响生物柴油低温过滤阻塞性能的因素之一。基于这一基本认识,美国 ASTM D6751 及欧洲 EN 14214 均要求生物柴油中的游离甘油的质量分数不大于 0.02%,我国 GB/T 20828—2014 对生物柴油中的游离甘油含量也提出了质量分数不大于 0.02% 的要求。

1.3 甾醇糖苷

生物柴油中所含的微量甾醇糖苷主要有两个来源:一是植物油中天然存在的甾醇糖苷,在生物柴油生产过程中难以分离或转化而残留在生物柴油产品中;二是天然存在于植物油中的脂溶性酰化甾醇糖苷,在酯交换反应过程中转化为甾醇糖苷^[26]。目前,已在生物柴油中发现 4 种甾醇糖苷^[27],即菜油甾醇糖苷、芸苔甾醇糖苷、豆甾醇糖苷和谷甾醇糖苷,其中谷甾醇糖苷的熔点较高,为 240 °C^[28]。甾醇糖苷不能通过常规分离方法从生物柴油中脱除。不同植物油来源的生物柴油其甾醇糖苷含量差异较大,大豆油和棕榈油来源的生物柴油含有高达 2 300 mg/kg 的甾醇糖苷,而玉米油来源的生物柴油含有 500 mg/kg 的甾醇糖苷,葵花籽油来源的生物柴油仅含有 200 mg/kg 的甾醇糖苷^[29]。张春辉等^[27]探讨了甾醇糖苷对生物柴油品质的影响,认为虽然生物柴油中仅含有微克级的甾醇糖苷,但是甾醇糖苷在长时间的低温储存条件下会不断富集、分离、凝结和沉降,最终导致生物柴油低温过滤阻塞性能下降,引起滤网堵塞等问题。

美国 ADM 公司的研究报道指出^[28],极微量的甾醇糖苷是影响生物柴油低温过滤阻塞性能的重要因素,因为甾醇糖苷可促进生物柴油中的饱和脂肪酸单甘油酯结晶,从而促使生物柴油低温过滤阻塞性能恶化,即使在室温条件下,也能观察到 10 ~ 15 μm 的离散颗粒状聚集物存在。如果甾醇糖苷以较高含量在生物柴油中长时间存在,在低温条件下,则会加剧结晶物的形成。诸多研究结果也证实了甾醇糖苷对于生物柴油低温过滤阻塞性能的显著不利影响^[30-31];但是没有公开的文献资料提出针对甾醇糖苷引起生物柴油低温过滤阻塞性能问题的解决措施和方法。

2 生物柴油低温过滤阻塞性能的评价方法及其应用

2.1 ASTM D7501 评价法

美国明尼苏达州在 2005 年冬季出现生物柴油

调合燃料阻塞滤清器导致大范围事故,引起了生物柴油行业对于生物柴油低温过滤阻塞性能的关注,这也促使了生物柴油行业联合美国材料与试验协会(ASTM)开展试验方法研究,以适用于考察生物柴油在低温条件下的过滤阻塞倾向性,制定了 ASTM D7501《Standard test method for determination of fuel filter blocking potential of biodiesel (B100) blend stock by cold soak filtration test (CSFT)》,并于 2009 年 6 月正式发布实施,经过多次修订,现行标准版本为 ASTM D7501-21,并作为 ASTM D6751 的规范性引用文件,规定 1-B 级 BD100 生物柴油的冷浸滤过时间不大于 200 s,2-B 级 BD100 生物柴油的冷浸滤过时间不大于 360 s。ASTM D7501 标准的发布实施,为评价生物柴油在低温条件下的过滤阻塞性能提供了一种廉价易行且有效的试验方法。另外,该方法为考察生物柴油低温过滤阻塞性能的影响因素提供了一种试验手段,因而得到了较为广泛的应用。

Pfalzgraf 等^[32]采用 ASTM D7501 冷浸过滤试验法对比了脂肪酸单甘油酯、甾醇糖苷对大豆油生物柴油的浊点及过滤阻塞性能的影响,发现相比浊点,冷浸滤过时间能够更加准确地评价生物柴油的低温过滤阻塞性能;此外,通过冷浸过滤试验法,可以更好地考察微量高熔点化合物对于生物柴油低温过滤阻塞性能的影响。Plata 等^[33]采用 ASTM D7501 试验法考察了甾醇糖苷、水分、脂肪酸单甘油酯对棕榈油生物柴油低温过滤阻塞性能的影响,结果表明,甾醇糖苷是影响棕榈油生物柴油低温过滤阻塞性能的重要因素,在不含有其他影响过滤性能的微量组分的情况下,在脂肪酸单甘油酯的质量分数低于 0.37%、甾醇糖苷含量低于 37 mg/L 时,生物柴油具有较好的低温过滤阻塞性能,可以保障生物柴油产品在储存和运输过程中不会出现过滤阻塞风险。Paryanto 等^[34]对 ASTM D7501 试验法进行了优化,发现为保障柴油调合燃料的过滤阻塞性能,在室温条件下,B10 中的脂肪酸单甘油酯质量分数建议上限在 0.33% ~ 0.51% 之间,B20 中的脂肪酸单甘油酯质量分数不应高于 0.62%,B30 中的脂肪酸单甘油酯质量分数建议上限在 0.40% ~ 0.62% 之间。另外,生物柴油在柴油调合燃料中的比例越高,其过滤阻塞性能越差,这是因为随着生物柴油比例的增加,柴油调合燃料中脂肪酸单甘油酯的含量也随之增加,对柴油调合燃料的过滤阻塞性能产生了负面影响。储存温度越低,柴油调合燃料的过滤阻塞性能越差。

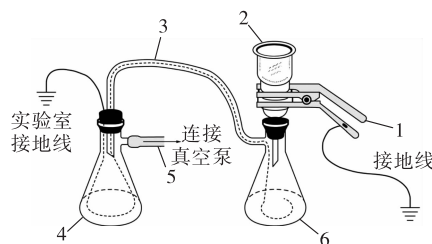
ASTM D7501 冷浸过滤试验法不仅可以直接评

价生物柴油低温过滤阻塞性能,也可以间接评价用于精制生物柴油的吸附剂性能,因此,该标准试验方法为评价用于精制生物柴油的吸附剂性能以及开发吸附剂产品提供了思路。

2.2 我国评价法(冷浸过滤试验法)

当环境温度低于生物柴油浊点时,生物柴油或柴油调合燃料会导致发动机过滤器堵塞,而前期我国尚无测定生物柴油及柴油调合燃料过滤阻塞性能的方法标准,因此生物柴油及柴油调合燃料的应用仍存在安全风险。为更好地规避上述风险并进一步完善我国生物柴油标准体系,中石化石油化工科学研究院有限公司制定了我国首个生物柴油过滤阻塞性能评价方法标准。该标准适用于评价浊点低于20℃的BD100生物柴油的过滤阻塞性能。首先将300 mL BD100生物柴油试样在 (4.5 ± 0.5) ℃条件下贮存16 h,然后加热至 (25 ± 1) ℃,最后将试样在70~85 kPa的真空条件下通过一装有0.7 μm单层玻璃纤维过滤膜的过滤系统,报告滤过时间。评价

生物柴油低温过滤阻塞性能的试验装置示意图如图2所示。由图2可知,低温过滤阻塞性能试验装置系统应具有良好的密封性和完整性,因为过滤速率不仅受试样中固体物质的影响,还受过滤操作系统特征的影响,例如真空的恒定性,真空表的精度,过滤系统中配件和耦合器的完整性,过滤器的质量及其与过滤设备的密封性等。



注:1. 夹钳;2. 漏斗;3. 真空管;4. 安全瓶;5. 真空泵;6. 接收瓶

图2 低温过滤阻塞性能评价装置示意图

该标准中对仪器设备的规格提出了具体的要求,关键技术参数如表4所示。

表4 低温过滤阻塞性能评价试验方法关键技术参数

序号	装置设置	技术参数	备注
1	漏斗	体积容量为300 mL	
2	玻璃纤维过滤膜	直径47 mm,标称孔径0.7 μm	置于不锈钢滤膜托板上
3	真空管	胶管	耐油且耐溶剂
4	接收瓶	体积容量为1 L	硼硅玻璃材质
5	安全瓶	体积容量为1 L	硼硅玻璃材质
6	真空泵	自由空气排量为25~30 L/min	不建议使用水吸式真空泵
7	烘箱	温度为 (90 ± 2) ℃	干燥玻璃纤维滤膜30 min

开展低温过滤阻塞性能评价试验的关键在于选用合适的玻璃纤维过滤膜以及实现所需的真空系统,真空系统应能够在安全瓶内产生70~85 kPa的绝对压力,在真空系统单元组件装有安全瓶的情况下,可在30~40 s内将绝对压力降低至所需水平。

该评价方法具有装置构造简单、操作简便、重复性和再现性良好,对于生物柴油试样有较好的区分度等特点;此外,该试验方法可以间接对生物柴油中的微量高熔点化合物的含量作出评价,弥补了生物柴油低温过滤阻塞性能评价指标的不足。综上,将生物柴油冷浸过滤试验法制定为石化行业标准,为保障生物柴油及柴油调合燃料的产品品质提供了技术支撑。目前该方法已作为行业标准发布,行标号为NB/SH/T 6052—2022,本标准将作为考察生物柴油产品低温过滤阻塞性能的关键试验方法在生物柴油生产、销售和应用等环节应用。

3 结语

(1)生物柴油中的高熔点化合物是影响生物柴

油低温过滤阻塞性能的主要原因,其中饱和脂肪酸甲酯对生物柴油的低温过滤阻塞性能有一定的影响,脂肪酸甘油酯以及甾醇糖苷虽然在生物柴油中的含量低,但是对生物柴油低温过滤阻塞性能的影响更为显著。

(2)ASTM D7501作为评价生物柴油低温过滤阻塞性能的试验方法得到较为广泛的应用,通过该方法可以较好地评价微量化合物对于生物柴油低温过滤阻塞性能的影响。

(3)生物柴油冷浸过滤试验法具有操作简单,重复性和再现性好,应用前景广泛等特点,参考ASTM D7501制定适用于我国生物柴油产品低温过滤阻塞性能评价方法的石化行业标准,以建立、健全我国生物柴油标准体系,对保障生物柴油及柴油调合燃料的产品品质具有现实意义。

参考文献:

[1] 李顶杰,张丁南,李红杰,等.中国生物柴油产业发展现状及建议[J].国际石油经济,2021,29(8):91-98.

- [2] 孙绍晖, 孙培勤, 常春, 等. 我国生物质能源现代化应用前景展望(四): 生物质能源转化生命周期分析[J]. 中外能源, 2014, 19(9): 26-33.
- [3] YU L, GE Y, TAN J, et al. Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes[J]. Fuel, 2014, 115: 220-226.
- [4] JIA G, TIAN G, ZHANG D. Effects of plateau environment on combustion and emission characteristics of a plateau high-pressure common-rail diesel engine with different blending ratios of biodiesel[J]. Energies, 2022, 15(2): 550-565.
- [5] 周明, 沈颖刚, 黄金凤. 高原环境下不同配比生物柴油混合燃料排放特性的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011, 38(1): 59-63.
- [6] 沈颖刚, 李伟东, 陈贵升, 等. 高原环境下喷孔直径对不同掺混比生物柴油燃烧与排放的影响[J]. 内燃机工程, 2016, 37(4): 76-83.
- [7] 焦宇飞, 刘瑞林, 任露, 等. 柴油机不同海拔条件下燃用生物柴油研究进展及发展方向[J]. 军事交通学院学报, 2019, 21(8): 40-46.
- [8] 韩伟, 黄凤洪, 杨涓, 等. 生物柴油低温流动性及改进方法研究进展[J]. 化工进展, 2007, 26(10): 1395-1399.
- [9] 蔺建民, 夏鑫, 陶志平. 欧洲生物柴油产品标准体系发展对我国的启示[J]. 现代化工, 2021, 41(8): 1-7.
- [10] 陈秀, 袁银男, 王利平, 等. 脂肪酸甲酯结构对生物柴油低温流动性的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(1): 31-34.
- [11] 梅德清, 谭文兵, 张永涛, 等. 基于差示扫描量热法和热力学模型的生物柴油结晶行为分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 206-211.
- [12] 梅德清, 谭文兵, 袁银男. 利用热力学相平衡分析生物柴油晶体析出规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 223-228.
- [13] 孙玉秋, 陈波水, 孙玉丽, 等. 生物柴油低温流动性能研究[J]. 精细石油化工, 2009, 26(2): 65-69.
- [14] 陈五花, 陈建, 蒋金兴, 等. 生物柴油在低温下析出晶体的热力学规律研究[J]. 石油炼制与化工, 2014, 45(3): 14-17.
- [15] 陈秀, 袁银男, 来永斌, 等. 生物柴油组成与组分结构对其低温流动性的影响[J]. 石油学报: 石油加工, 2009, 25(5): 673-677.
- [16] GERHARD K, JURGEN K, JON V G. The biodiesel handbook[M]. Champaign, Illinois: AOCs Press, 2010.
- [17] 蔡玲玲, 袁银男, 陈秀, 等. 棕榈油生物柴油低温流动性能及结晶形态的研究[J]. 石油化工, 2015, 44(3): 358-361.
- [18] ABDERRAHIM B, NOUREDDINE E B, KALID H, et al. Biodiesel production from biobutanol. Improvement of cold flow properties[J]. Chem Eng J, 2014, 238: 234-241.
- [19] WANG J, CAO L, HAN S. Effect of polymeric cold flow improvers on flow properties of biodiesel from waste cooking oil[J]. Fuel, 2014, 117: 876-881.
- [20] 张杰. 冷冻结晶脱除生物柴油中的饱和脂肪酸甲酯[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [21] LATIFA S, EIJI M, HARUO K. Solidification behavior of acylglycerols in fatty acid methyl esters and effects on the cold flow properties of biodiesel[J]. J Am Oil Chem Soc, 2021(7): 727-735.
- [22] YU L, LEE I, HAMMOND G E, et al. The influence of trace components on the melting point of methyl soyate[J]. J Am Oil Chem Soc, 1998, 75(12): 1821-1824.
- [23] 巫森鑫. 生物柴油低温流动性能影响因素的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [24] 蔺建民, 张永光, 杨国勋, 等. 柴油机燃料调合用生物柴油国家标准的编制[J]. 石油炼制与化工, 2007, 38(3): 27-32.
- [25] 郑志远, 贺然, 董爱国, 等. 甘油的黏度对激光等离子体推进的影响[J]. 物理实验, 2012, 32(2): 7-9.
- [26] LACOSTE F, DEJEAN F, GRIFFON H, et al. Quantification of free and esterified sterol glucosides in vegetable oils and biodiesel[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2010, 111(8): 822-828.
- [27] 张春辉, 张晶, 忻耀年. 甾基糖苷对生物柴油品质的影响[J]. 中国油脂, 2010, 35(3): 51-53.
- [28] LEE I, PFALZGRAF L M, POPPE G B, et al. The role of sterol glucosides on filter plugging[EB/OL]. (2007-04-06) [2022-03-19]. <http://www.biodieselmagazine.com/articles/1566/the-role-of-sterol-glucosides-on-filter-plugging>.
- [29] DUNN R O. Effects of minor constituents on cold flow properties and performance of biodiesel[J]. Prog Energ Combust Sci, 2009, 35(6): 481-489.
- [30] TANG H, STEVEN S O, NG K Y S. Fuel properties and precipitate formation at low temperature in soy-, cottonseed-, and poultry fat-based biodiesel blends[J]. Fuel, 2008, 87(13): 3006-3017.
- [31] MENDOZA FLOREZ L, PLATA V, GAUTHIER P, et al. Characterization of precipitate formed above and below the cloud point of palm oil biodiesel[J]. Chem Eng J, 2015, 43: 475-480.
- [32] PFALZGRAF L, LEE I, FOSTER J, et al. The effect of minor components on cloud point and filterability[EB/OL]. (2017-11-01) [2022-01-11]. <http://www.biodieselmagazine.com/articles/1916/the-effect-of-minor-components-on-cloud-point-and-filterability>.
- [33] PLATA V, GAUTHIER - MARADEI P, KAFAROV V. Influence of minor components on precipitate formation and filterability of palm oil biodiesel[J]. Fuel, 2015, 144: 130-136.
- [34] PARYANTO I, PRAKOSO T, SUYONO E A, et al. Determination of the upper limit of monoglyceride content in biodiesel for B30 implementation based on the measurement of the precipitate in a biodiesel-petrodiesel fuel blend (BXX) [J/OL]. Fuel, 2019, 258: 116104 [2022-03-19]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116104>.