第 52 卷 第 5 期：2253-2260 高电压技术 Vol.52, No.5: 2253-2260
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250435

天然酯低温流动性与抗氧化性的关联机制及组分优化

冯大伟[1,2,3]，李嘉豪[1,2]，闫晓宇[1,2]，朱　亮[1,2]，刘易汶[1,2]
（1. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学电气工程学院)，天津 300401；
2. 河北省柔性直流输电装备与技术实证重点实验室，天津 300401；
3. 顺特电气设备有限公司，佛山 528000）

摘　要：天然酯绝缘油的抗氧化性较差，长期应用时易氧化劣化，可能导致油道堵塞和绝缘失效等问题，限制了天然酯绝缘油的广泛应用。该文研究了不同天然酯组分和倾点的构效关系，分析了不同脂肪酸组分对氧化诱导时间的影响规律及其分子机制；然后从天然酯组分构成出发，构建了天然酯抗氧化性和倾点预测模型，经验证具有较好的预测效果；最后基于遗传算法对大豆油成分进行了优化，计算出抗氧化大豆基天然酯绝缘油的理想组分为棕榈酸($C_{16:0}$):硬脂酸($C_{18:0}$):油酸($C_{18:1}$):亚油酸($C_{18:2}$):亚麻酸($C_{18:3}$)=11.08:4.08:83.50:1.34:0。研究结果为高性能天然酯绝缘油制备奠定了理论基础。

关键词：天然酯绝缘油；密度泛函理论；抗氧化性；低温流动性能；协同优化

Correlation Mechanism Between Low-temperature Fluidity and Antioxidant Activity of Natural Esters and Composition Optimization

FENG Dawei[1,2,3], LI Jiahao[1,2], YAN Xiaoyu[1,2], ZHU Liang[1,2], LIU Yiwen[1,2]
(1. Key Lab of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province(School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology), Tianjin 300401, China;
2. Hebei Key Laboratory of Equipment and Technology Demonstration of Flexible DC Transmission, Tianjin 300401, China;
3. SUNTEN Electrical Equipment Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: Practical application of natural ester insulating oils is constrained by their inherent oxidative instability, and prolonged service may lead to oxidation degradation, potentially causing oil channel blockage and insulation failure. This study systematically investigates the structure-property relationships between natural ester compositions and their pour point characteristics, while elucidating the influence patterns of various fatty acid components on oxidation induction time through molecular mechanism analysis. Building upon these fundamental insights, we developed predictive models for both oxidation resistance and pour point characteristics based on compositional parameters of natural esters, which demonstrated satisfactory predictive accuracy through validation. To achieve performance optimization, genetic algorithm was employed to conduct multi-objective component optimization of soybean oil. The ideal composition for high-performance soybean-based natural ester insulating oil was determined as $C_{16:0}$:$C_{18:0}$:$C_{18:1}$:$C_{18:2}$:$C_{18:3}$= 11.08:4.08:83.50:1.34:0. This optimized formulation simultaneously enhances oxidation stability while maintaining appropriate low-temperature fluidity. The composition performance correlation model and optimization method established in this study provide theoretical guidance for the design of high-performance natural ester insulating oil.

Key words: natural ester insulating oil; density functional theory; oxidation resistance; low temperature flow performance; collaborative optimization

0　引言

《中国制造 2025》强调绿色发展是突破资源、能源和环境瓶颈的关键。油浸式变压器作为电力系统中的核心装备[1]，其传统绝缘介质矿物油存在燃点低、泄漏污染、不可再生等不足。天然酯凭借其高燃点、易生物降解、可再生和电气性能良好等优势[2-3]，被认为是矿物油的理想替代品[4-6]。世界各国相继研发出不同型号的天然酯绝缘油，并在实际变压器中已有大量示范应用[7-8]。其中，正泰电气以

基金资助项目：国家自然科学基金(52207152)；中国博士后科学基金(2025M770479)；河北工业大学学科交叉方向研究生培养资助项目(XKJC-2024020)；河北省省级科技计划(21567605H).
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207152), China Postdoctoral Science Foundation (2025M770479), Cross-disciplinary Graduate Program of HEBUT Under Grant (XKJC-2024020), Science & Technology Program of Hebei (21567605H).

大豆基天然酯代替传统矿物油，制造出电压等级为750 kV 的天然酯变压器，目前已在国家电网试运行，是当前最高电压等级的天然酯变压器。虽然商用天然酯已有大量应用，但限于其自身分子结构，抗氧化性差仍是待突破的瓶颈问题，尤其是抗氧化性还与低温流动性之间存在矛盾耦合关系[7]。

国内外针对该问题开展了大量研究。在低温流动性方面，Serrano 和何抗抗等通过分析饱和脂肪酸含量与冷滤点的非线性关联，发现饱和脂肪酸可以显著提高冷滤点[8-9]。Ramos 等根据饱和脂肪酸熔点计算了天然酯的长链饱和系数，并基于此构建了冷滤点预测模型，发现不饱和脂肪酸对低温性能有显著的提升作用[10]。Pérez 等采用饱和长链脂肪酸滤除技术，有效改善了植物油的低温流动性能[11]。在抗氧化性方面，Konsoula 等发现芝麻提取物由于含有木脂素和酚类化合物成分，可以增加植物油的抗氧化性能[12]。Moser 和陈朋等发现多不饱和脂肪酸的氧化速度明显快于其他脂肪酸[13-14]。Shahabuddin 和 Pantoja 等通过分析脂肪酸组成和抗氧化性的关系，发现脂肪酸的氧化安定性和不饱和度呈正相关[15-16]。Pullen 等总结了脂肪酸的不饱和程度与氧化安定性的关系，发现双烯丙基位点的存在显著降低了植物油的抗氧化性[17]。以上研究虽然定性分析了碳双键对低温流动性和抗氧化性的影响规律，但天然酯低温流动性和抗氧化性与其分子成分之间的定量关系缺乏研究，限制了天然酯的性能提升。

本文开展天然酯低温流动性与抗氧化性关联机制及协同优化研究。基于天然酯成分测试，构建抗氧化性和低温流动性与分子组分间的定量关系，进而求解两参数协同优化的方法，为高性能天然酯绝缘油制备奠定理论基础。

1 实验

1.1 实验材料

实验选取常见植物油作为研究对象，包括大豆油、葵花籽油、亚麻籽油、核桃油、菜籽油、玉米油、芝麻油和橄榄油作为实验原料油，均为植物油的压榨型原料油，未添加任何种类的抗氧化剂和抗凝剂。为获得更多基础样品数据，将大豆油、菜籽油和亚麻籽油按体积比(1:4、2:3、3:2、4:1)两两混合，制备了 12 组天然酯混合物，按体积比(2:3:5、2:5:3、5:2:3)制备了 3 组三元天然酯混合物。

1.2 天然酯脂肪酸组成测定

按照 GB/T 5009.168《食品中脂肪酸的测定》，首先对天然酯进行甲酯化处理，再采用带有氢离子火焰离子化检测器的 Agilent 7890B 型气相色谱仪，对植物油脂肪酸组成进行测定。测试过程中，采用高纯氮气作为流动相载气，选用硝基对苯二酸改性的聚乙二醇强极性色谱柱分离，并对关键参数进行了精确设置，具体参数见表 1。选用脂肪酸甲酯标准溶液进行标定，以精准确定各脂肪酸甲酯的保留时间。

1.3 天然酯倾点测试

参考 GB/T 3535《石油产品倾点测定法》，采用倾点测试仪对天然酯样品的倾点进行测定。首先，将待测样品放入附带温度计的试管中，并置于测试仪内进行降温。从初始温度起，以恒定速率降温，样品每降低 3 ℃，迅速取出试管并充分倾斜，观察样品流动性。流动性减弱时，将降温间隔调整为 1 ℃，直至样品首次丧失流动性，记录此刻的温度。重复 3 次测量，取平均值作为样品的倾点。

1.4 天然酯氧化诱导时间测试

变压器运行过程中绝缘油温度为 50~70 ℃，氧气含量也较低，氧化劣化速度缓慢。搭建的天然酯抗氧化性测试平台如图 1 所示，为快速获得其抗氧化性能，本文依据 GB/T 21121《动植物油脂-氧化稳定性的测定(加速氧化测试)》标准，采用 120 ℃和 10 L/h 恒定体积流量的空气，对其氧化诱导时间

表 1 气相色谱关键参数表

Table 1 Parameters table of gas chromatography

参数	模式
控制模式	28 psi，恒压模式
进样口温度/℃	25
分流比	70:1
FID 温度/℃	280
进样量/μL	1

注：1 psi ≈ 6.895 kPa。

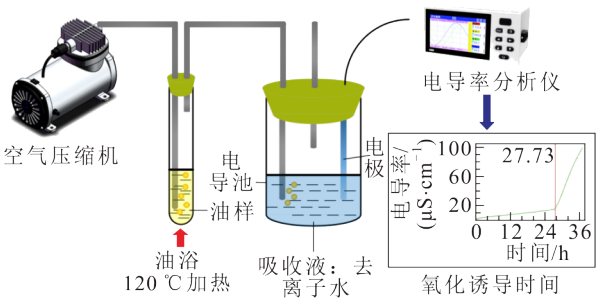


图 1 天然酯氧化安定性测试平台原理图

Fig.1 Testing platform for natural ester oxidation stability

开展了测试。测试具体步骤如下：准确称取 3.0 g 油样，置于预热至 120 ℃的恒温反应容器中，随后向电导率测量池内注入 50 mL 去离子水并安装电极与电导率记录仪，以 10 L/h 的恒定流量持续通入净化干燥空气；实时监测电导率变化曲线，通过计算其二阶导数极值点确定氧化诱导时间，所得天然酯氧化过程中电导率变化曲线如图 2 所示。平行实验重复 3 次后取算术平均值作为测试结果。

2 实验结果与分析

2.1 天然酯脂肪酸组成测试结果

考虑到植物品种、生长环境及加工工艺对天然酯脂肪酸成分存在影响，本研究对天然酯样品进行脂肪酸成分的精准测定，以消除原料差异性对预测模型建立的干扰。天然酯组分种类多样，脂肪酸超过 30 余种。其中，$C_{16:0}$(棕榈酸)和 C_{18}(油酸、亚油酸等)碳链占比显著高于其他碳链长度的脂肪酸组分，占总比例的 98%以上。为了方便研究天然酯组分对抗氧化性能的影响规律，本文按照天然酯的脂肪酸结构进行分类[18-19]，具体方法为：根据脂肪酸含有的 C═C 双键数量，将其分为：不含 C═C 双键的棕榈酸($C_{16:0}$)和硬脂酸($C_{18:0}$)、含有一个 C═C 双键的油酸($C_{18:1}$)、含有两个C═C双键的亚油酸($C_{18:2}$)以及含有 3 个 C═C 双键的亚麻酸($C_{18:3}$)，并忽略其他含量较低的成分。采用归一化算法，通过计算各脂肪酸色谱峰面积相对有效成分峰面积总和的百分比，如式(1)所示，来确定各组分的百分含量，得到各脂肪酸含量见表 2。

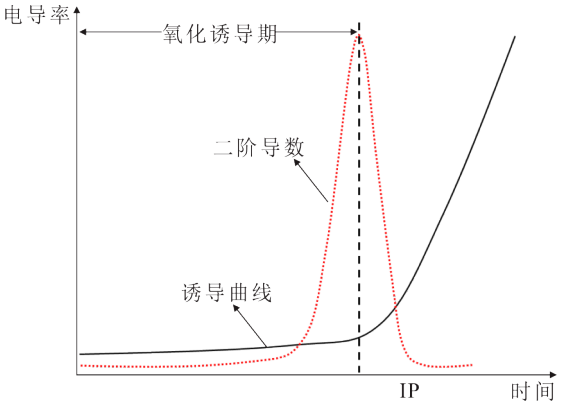


图 2 电导率变化曲线示意图

Fig.2 Schematic diagram of conductivity change curve

表 2 天然酯各脂肪酸含量及性能测试结果

Table 2 Content and performance test results of various fatty acids in natural esters

天然酯种类	体积比	$C_{16:0}$/%	$C_{18:0}$/%	$C_{18:1}$/%	$C_{18:2}$/%	$C_{18:3}$/%	倾点/℃	氧化诱导时间/min
芝麻油		8.67	5.56	39.42	45.28	1.07	−8	157
橄榄油		11.34	3.59	75.24	8.51	1.32	−12	243
玉米油		12.47	1.8	29.09	55.19	1.45	−13	181
葵花籽油		6.25	3.38	31.11	58.41	0.85	−14	58.39
核桃油		6.91	2.82	17.75	61.43	11.09	−18	96.75
亚麻籽油		5.82	4.55	20.37	17.29	51.97	−14	10.13
菜籽油		4.68	1.94	62.86	21.81	8.71	−20	184.83
大豆油		11.08	4.07	26.06	52.76	6.03	−13	97.4
大豆油：菜籽油	1:4	5.92	2.33	55.43	27.87	8.45	−20	157
	2:3	7.41	2.8	47.11	34.73	7.95	−17	150.25
	3:2	8.81	3.23	39.14	41.21	7.61	−15	123.25
	4:1	10.15	3.68	31.11	47.58	7.48	−14	115
菜籽油：亚麻籽油	1:4	5.59	3.96	29.83	18.03	42.59	−14	22.5
	2:3	5.29	3.39	38.55	18.94	33.83	−15	46
	3:2	5.09	2.91	46.74	19.88	25.38	−17	69.5
	4:1	4.83	2.44	54.62	20.51	17.6	−19	75.75
大豆油：亚麻籽油	1:4	7.11	4.37	21.94	25.31	41.27	−13	31.75
	2:3	8.34	4.31	22.47	32.68	32.2	−14	50
	3:2	9.16	4.28	22.23	38.48	25.85	−14	66.75
	4:1	10.39	4.21	22.62	46.82	15.96	−13	88.25
大豆油：菜籽油：亚麻籽油	2:3:5	6.80	3.54	35.46	27.12	27.08	−16	80
	2:5:3	6.46	3.25	40.41	26.76	23.12	−15	114.6
	5:2:3	7.96	3.70	31.73	34.28	22.33	−18	88.7

$$Y_{\mathrm{i}}=\frac{A_{\mathrm{si}}}{\Sigma A_{\mathrm{si}}} \tag{1}$$

式中：Y_{i} 为样品中某个脂肪酸占总脂肪酸的百分比，%；A_{si} 为各脂肪酸甲酯的峰面积。

2.2 天然酯倾点测试结果及分析

为方便进行比较，天然酯倾点测试结果也列在表 2 中。葵花籽油和核桃油饱和脂肪酸含量相当，但核桃油的不饱和脂肪酸(亚油酸和亚麻酸)含量更高，因此具有更低的倾点，这与前人所得结论[20-21]一致。大豆油相较于菜籽油具有更多的亚油酸和亚麻酸含量，但其倾点反而更高，主要原因是其饱和脂肪酸含量更高，这表明饱和脂肪酸劣化天然酯低温流动性的效果更明显。

相关系数常用来描述两种变量之间的线性相关程度，较为常用的为 Pearson 相关系数，以变量 X、Y 举例，计算式为：

$$\rho_{x,y}=\frac{E(XY)-E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2)-E^2(X)}\sqrt{E(Y^2)-E^2(Y)}} \tag{2}$$

式中：$\rho_{\mathrm{x,y}}$ 表示变量 X、Y 之间的 Pearson 相关系数；E 代表变量的数学期望。依次选取天然酯 5 种主要成分的含量作为变量 X，天然酯的倾点作为变量 Y，计算得出不同脂肪酸含量 $C_{16:0}$、$C_{18:0}$、$C_{18:1}$、$C_{18:2}$ 和 $C_{18:3}$ 与天然酯倾点的 Pearson 相关系数分别为 0.58、0.73、−0.31、0.21 和−0.03，取绝对值后绘制雷达图如图 3 所示。结果表明饱和脂肪酸与倾点呈显著正相关性，因此降低倾点需要有效控制并降低饱和脂肪酸含量。

图 4 构建了天然酯不饱和脂肪酸与倾点的三元相图。随着饱和脂肪酸组分增高，倾点快速升高。天然酯中不饱和脂肪酸组分 $C_{18:1}$ 和 $C_{18:2}$ 含量提升导致倾点降低，$C_{18:3}$ 含量在 12 %以下时亦展现相同趋势。然而，当 $C_{18:3}$ 含量超过 12 %后，倾点却随着 $C_{18:3}$ 含量的增加而升高，Yuan 等也曾发现类似的规律[22]。这可能是由于 $C_{18:3}$ 碳链中含有 3 个不饱和碳双键，在自然界中存在 8 种亚麻酸顺式和反式异构体[23]。反式脂肪酸由于较小的键角，使碳链呈现出较强的刚性，其倾点相较于顺式亚麻酸高出 40~80 ℃。因此随着天然酯中亚麻酸含量升高，反式亚麻酸的含量也随之上升，倾点随之提高。

采用多元非线性回归方法分析天然酯的组分和倾点间的映射关系，选取了 $C_{18:0}$、$C_{18:0}$、$C_{18:1}$、$C_{18:2}$ 和 $C_{18:3}$ 这 5 种脂肪酸作为自变量，倾点作为因变量，构建了多元回归预测模型，预测模型如式(3)所示。

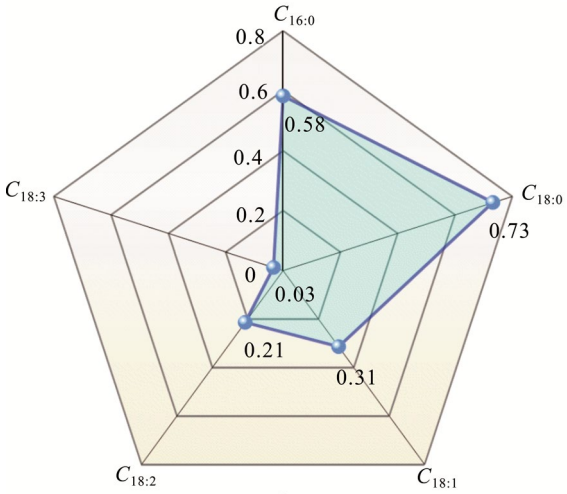


图 3 天然酯组分-倾点相关系数绝对值雷达图

Fig.3 Radar chart of absolute correlation coefficient between natural ester composition and pour point

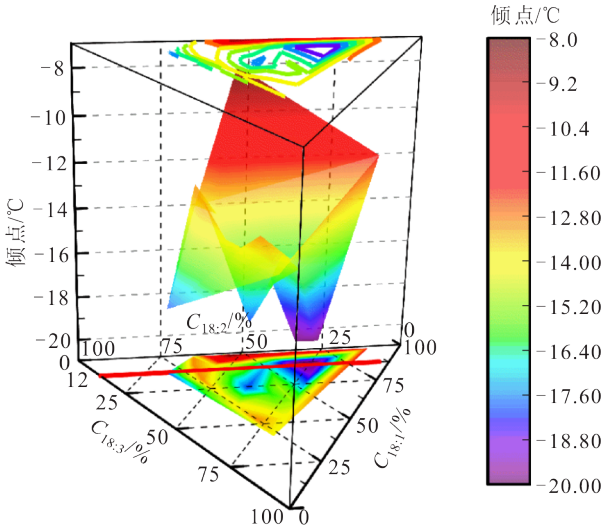


图 4 天然酯组分-倾点三元相图

Fig.4 Ternary phase diagram between natural ester components and pour point

$$\begin{aligned}P=&6.385C_{16:0}-26.679C_{16:0}^2-6.858C_{18:0}+\\&127.225C_{18:0}^2+2.08C_{18:1}-1.05C_{18:1}^2+\\&1.467C_{18:2}^2+1.205C_{18:3}+\\&0.007C_{18:3}^2-141.665\end{aligned} \tag{3}$$

式中：P 表示天然酯的倾点；$C_{16:0}$ 表示棕榈酸质量占比；$C_{18:0}$ 表示硬脂酸质量占比；$C_{18:1}$ 表示油酸质量占比；$C_{18:2}$ 表示亚油酸质量占比；$C_{18:3}$ 表示亚麻酸质量占比。

2.3 氧化诱导时间测试结果及分析

不同天然酯的氧化诱导时间如表 2 所示。橄榄油中饱和脂肪酸和油酸含量远高于其他植物油，其

氧化诱导时间也最长，达 243 min。亚麻籽油的氧化诱导时间最小，为 10.13 min，表明亚麻籽油不稳定容易发生氧化，这主要是由于其含有高比例的不饱和脂肪酸，亚麻酸达 51.97%，不适合用于炼制绝缘油。混合酯的氧化诱导时间呈现相同规律，饱和脂肪酸和油酸含量增加将提高氧化诱导时间。玉米油、葵花籽油和大豆油的成分类似，氧化诱导时间却存在较大差别，主要是因为葵花籽油中天然抗氧化剂以 α-生育酚为主，α-生育酚相较于其他生育酚抗氧化性较弱，并且多酚含量较少，而玉米油含有较多的维生素 E，使它具有更好的氧化稳定性[24-25]。

脂肪酸的饱和度与天然酯的氧化诱导时间存在显著相关性[26]。图 5 展示了天然酯样品氧化诱导时间与其脂肪酸组成的变化关系。图中，饱和脂肪酸表示棕榈酸和硬脂酸，$C_{18:1}$、$C_{18:2}$ 和 $C_{18:3}$ 分别表示油酸、亚油酸和亚麻酸。

不同脂肪酸组分对氧化稳定性的影响呈现显著差异。具体表现为：饱和脂肪酸含量与氧化诱导时间存在正相关性，但该组分的增加会快速增加天然酯的倾点，导致其低温流动性变差。相比之下，油酸对氧化稳定性的提升作用最为显著，高油酸型天然酯的氧化诱导时间最高，同时不会降低天然酯的低温流动性。而亚油酸和亚麻酸则表现出显著负相关性，尤其是亚麻酸含量增加会大幅降低抗氧化性。主要原因是碳双键数量多的脂肪酸与氧气的反应活性更强[27]，尤其是含有双烯丙基[28]的多不饱和脂肪酸，在氧化过程中形成共振稳定的戊二烯基自由基中间体，并且通过共轭作用形成二烯氢过氧化物，显著提高氧化活性，如图 6 所示。

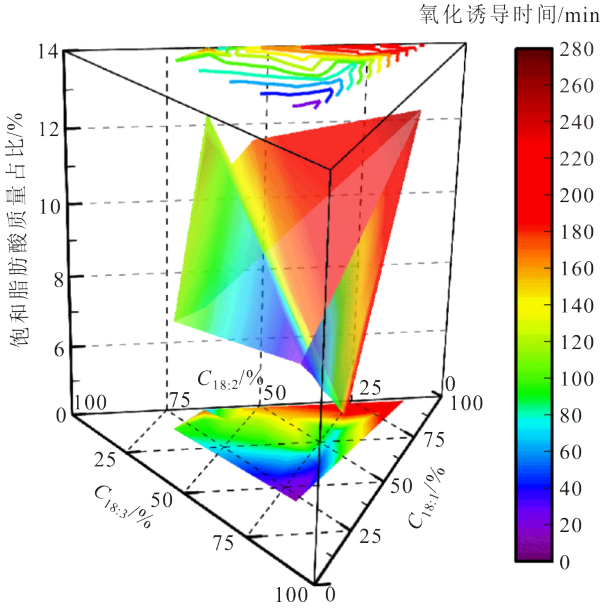


图 5 天然酯组分-氧化诱导时间四元相图

Fig.5 The ternary phase diagram between natural ester components and oxidation induction time

有机化合物的反应活性可通过其前线分子轨道能级差异与分子表面静电势特征共同表征。基于天然酯分子模型的仿真分析发现，不饱和脂肪酸的最高占有轨道集中于碳链中的 C=C 双键及其相邻区域，如图 7 所示，表明该位点在化学反应中更易

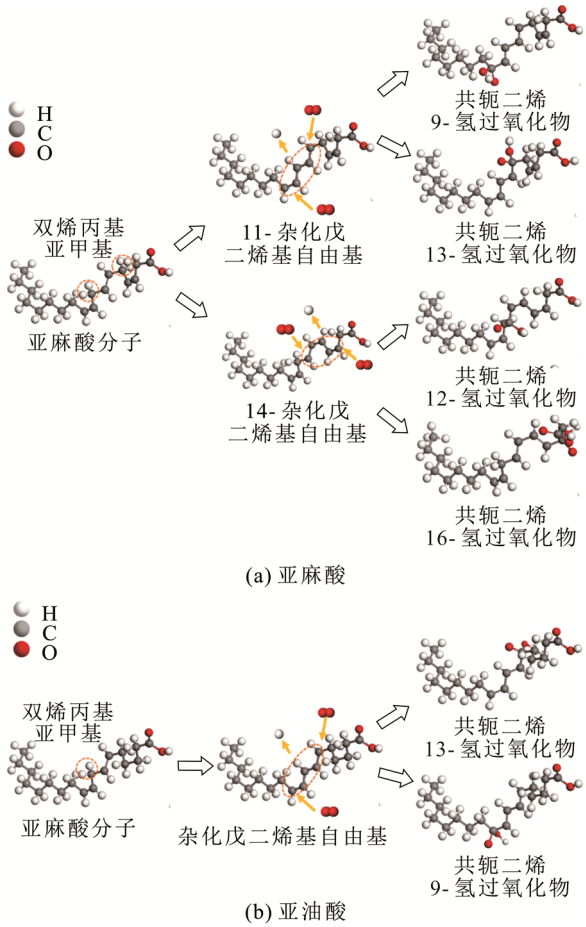


图 6 多不饱和脂肪酸初始氧化过程

Fig.6 Initial oxidation process of polyunsaturated fatty acid

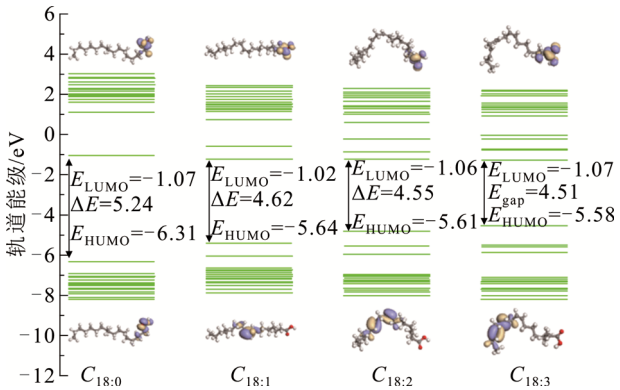


图 7 不同脂肪酸轨道能级分布图

Fig.7 The orbital energy of different fatty acid

失去电子，反应活性强。进一步计算显示，随着分子内 C═C 双键数量的增加，轨道能级差 ΔE 逐渐减小，这是由于不饱和双键降低了电子转移的能垒，从而显著提升了反应活性[29]。通过分子表面静电势分析发现，天然酯脂肪酸链中 C═C 双键区域呈现明显的电负性特征，如图 8 所示。这源于 sp^2杂化碳原子的 π 电子云在分子表面高度暴露，形成局部强静电势场。由于 π 电子云结构的相对松散性，双键区域的电子更易与外界物质发生相互作用。综上研究表明，C═C 双键通过双重机制增强氧化敏感性：一方面降低轨道能级差以促进电子迁移，另一方面通过分子表面静电势重构暴露高反应活性位点。这些特性使不饱和脂肪酸更易与氧气反应，导致其抗氧化性能显著弱化。

天然酯作为多种甘油脂肪酸的混合物，其抗氧化性由多种脂肪酸的协同效应决定。将测试得到的氧化诱导时间结果进行拟合，结合现已有的脂肪酸相对氧化速率[30-32]，推导出了天然酯氧化诱导时间预测模型，如式(4)所示。

$$I = 140C_{16:0} + 152C_{18:0} + 80.133C_{18:1} - 147C_{18:2} - 340.68C_{18:3} + 176.26 \tag{4}$$

式中：I 表示天然酯的氧化诱导时间。天然酯氧化诱导时间预测模型的 R^2 为 0.953，具有较好的准确性。该模型简化了评估流程，为天然酯绝缘油抗氧化性的快速预测提供了依据。需要说明的是，上述公式仅能用于无抗氧化剂天然酯的氧化诱导时间预测，若添加抗氧化剂，氧化诱导时间将由抗氧化剂的添加量和天然酯的分子成分共同决定。

基于实验结果，对天然酯中 C═C 数量与低温流动性能及抗氧化性能之间的关联关系进行拟合，如图 9 所示。结果发现随着 C═C 数量的增加，天然酯的氧化诱导时间呈线性下降趋势，但同时倾点降低，表明低温流动性能增强。可见，天然酯的低温流动性和抗氧化性存在矛盾耦合关系。为了优化天然酯的综合性能，需建立一种多目标协同优化策略，通过分子组分的精细调控实现两项关键性能的均衡提升。

3 天然酯低温流动性与抗氧化性协同优化

3.1 预测模型验证

为了验证上述模型的准确性，以大豆油、菜籽油、葵花籽油作为原料油按照体积比为 35:40:25 制备了混合油，经测试其脂肪酸质量比例 $C_{16:0}$、$C_{18:0}$、$C_{18:1}$、$C_{18:2}$ 和 $C_{18:3}$ 分别为 8.59%、3.10%、53.08%、

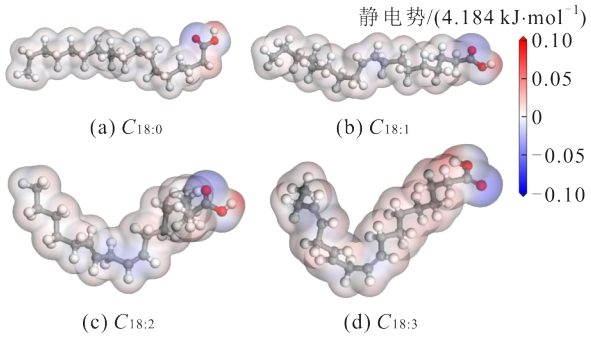


图 8 不同组分分子表面静电势分布图

Fig.8 Molecular electrostatic potential distribution of different components

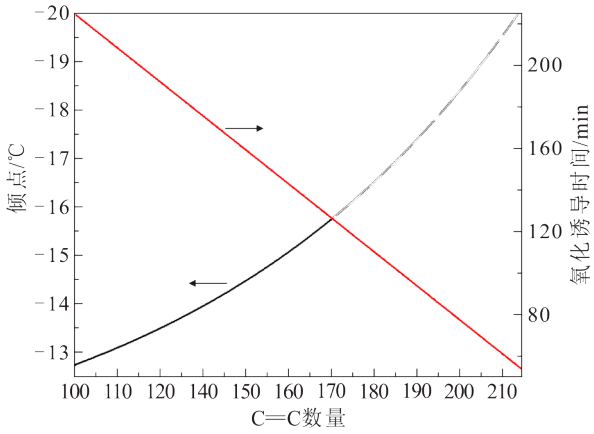


图 9 植物油组分-性质关系图

Fig.9 Relationship diagram between plant oil component and property

29.32%、5.92%。采用计算模型该混合油的倾点为−15 ℃，氧化诱导时间为 172.24 min。根据 1.3 节的测试方法，该混合油的倾点实测值为−15 ℃，与预测结果一致，氧化诱导时间实测值为 168.8 min，与预测值相比误差仅 2%。以上测试结果初步验证了天然酯倾点和氧化诱导时间计算式的有效性。同时，依据 GB/T 507《绝缘油击穿电压测定法》，将混合油进行干燥后进行了工频击穿电压测试，结果为 68.5 kV，显著高于 DL/T 1811《电力变压器用天然酯绝缘油选用导则》要求的阈值 40 kV，初步验证了优化后组分的天然酯同样具有良好的绝缘性能。

3.2 天然酯优化组分计算

大豆油是世界上年产量最大的几种植物油之一，具有价格低、分布广等特点，被广泛用作天然酯绝缘油的原料油，例如商用天然酯绝缘油 FR3、泽电 VS100 等均采用大豆油。然而，从抗氧化性方面考虑，大豆油并非最佳选择。虽然可采用添加剂

对其抗氧化性和低温流动性进行提升，但添加剂的添加量存在限制，未能实现材料本身的性能提升。为了优化大豆油的组分，使其能够通过氢化等化学工艺实现其抗氧化性的提升，同时保证低温流动性良好，对大豆油的分子组分进行优化计算。

根据前文得到的植物油性能预测模型，选用遗传算法应用于天然酯组分优化求解。遗传算法通过模拟生物进化过程中的选择、交叉和变异等过程，通过多次迭代求解最优组合。该算法具有高度的鲁棒性，适用于解决复杂的函数优化和组合优化问题。在天然酯绝缘油的组分配比问题中，遗传算法能够有效地平衡低温流动性能与抗氧化性能之间的矛盾，求解出理想组分配比。本文组分优化通过MATLAB 中 Ga 优化工具实现。

天然酯的抗氧化性直接决定其长期运行可靠性，因此选取最大氧化诱导时间作为优化目标，即将式(4)作为适应度函数。DL/T 1811《电力变压器用天然酯绝缘油选用导则》要求倾点低于−10 ℃，为求得天然酯优化后的最优组分，并适应化学工艺改性的要求，选取标准要求倾点临界值以及大豆油自身组分作为模型的约束条件，即倾点≤−10 ℃、$C_{16:0}$≥11.08% 、 $C_{18:0}$≥4.07% 、 $C_{18:1}$≥26.06% 、$C_{18:2}$≤52.76%、$C_{18:3}$≤6.03%。算法参数的选择会对结果产生影响，为了得到可靠的计算结果，测试了不同参数下的最佳适应度。种群大小选择 40、60、80、和 100 这 4 个梯度，交叉概率选择 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 这 6 个梯度，变异函数形式选择适合带约束优化的 Mutation Adaptive Feasible，最大迭代次数选择 500 以保证充分收敛，不同参数测试结果如图 10 所示。计算结果均在 500 次以内完成收敛，可以观察到，参数对最佳适应度影响较小，计算结果普遍在 261 左右。在种群大小选择 40、交叉概率选择 0.9 时，最佳适应度达到了最高值 262.87。此时天然酯的最优组分配比为 $C_{16:0}$:$C_{18:0}$:$C_{18:1}$:$C_{18:2}$:$C_{18:3}$=11.08:4.08:83.50:1.34:0，即大部分亚油酸和亚麻酸都转化为油酸，可以实现在保持良好的低温流动性能的同时，提升了大豆油的抗氧化性能。经过预测，该组分配比下的天然酯绝缘油的氧化诱导时间为 262.87 min，相较于原油约提高了 169%。

变压器使用环境多样，严寒天气环境中应用对低温下流动性存在更高的需求，此时需要对抗氧化性与低温流动性协同提升，才能满足应用需求。在优化过程中，可以通过调整约束条件，例如倾点

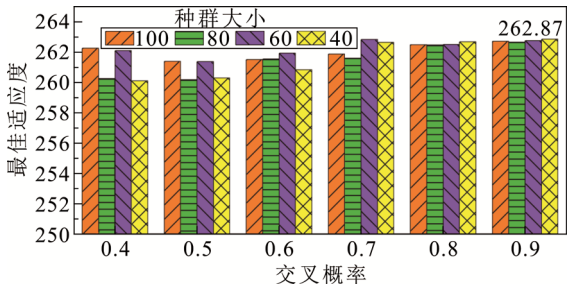


图 10 不同参数下最佳适应度

Fig.10 Optimal fitness under different parameters

≤−15 ℃时，计算得最优脂肪酸组分 $C_{16:0}$:$C_{18:0}$:$C_{18:1}$:$C_{18:2}$:$C_{18:3}$=11.08:4.07:54.34:30.5:0.01，氧化诱导时间为 196.63 min。相较于优化前大豆油的倾点更低，同时氧化诱导时间提升了 101.88%，实现了低温流动性和抗氧化性的协同优化。后续本团队将开展化学改性方法研究，获得实现理想组分配比的改性方法。

4 结论

1）通过对天然酯进行组分和性能测试，揭示了倾点与脂肪酸组分之间的构效关系，采用多元非线性回归理论构建了天然酯组分-倾点预测模型。

2）通过分析天然酯组分和氧化诱导时间测试结果，得到了不同脂肪酸组分对氧化诱导时间的影响规律，并认为碳双键通过降低轨道能级差和分子表面静电势重构暴露活性位点的双重机制增强了氧化敏感性；进而从天然酯组分构成出发，构建了天然酯氧化诱导时间预测模型。

3）天然酯的低温流动性和抗氧化性之间存在矛盾耦合关系；以大豆油成分为基础，考虑标准要求和成分限制，确定了具有最长氧化诱导时间的大豆基天然酯绝缘油的最优组分 $C_{16:0}$: $C_{18:0}$:$C_{18:1}$:$C_{18:2}$:$C_{18:3}$=11.08:4.08:83.50:1.34:0，氧化诱导时间提升 169%。

参考文献 References

[1] 徐 晴，郝 建，叶文郁，等. 三元混合绝缘油热裂解过程与产气特性[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1026-1037.
XU Qing, HAO Jian, YE Wenyu, et al. Microscopic mechanism of thermal cracking and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1026-1037.

[2] 赵一晖，罗 尧，黄正勇，等. 油溶性聚倍半硅氧烷提升天然酯绝缘油抗氧化性能[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2854-2863.
ZHAO Yihui, LUO Yao, HUANG Zhengyong, et al. Improving oxidation resistance of natural ester insulating oil by oil-soluble polysesquioxane[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2854-2863.

[3] 张钧奕，郝 建，张静文，等. 三元混合绝缘油雷电冲击流注放电

发展特性仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5436-5448.
ZHANG Junyi, HAO Jian, ZHANG Jingwen, et al. Development characteristics of lightning impulse discharge streamer of three-element mixed insulation oil based on simulation research[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5436-5448.
[4] 陈 晗，黄正勇，魏 聪，等. 电-热-流多场作用下天然酯绝缘油杂散气体产生特性[J]. 高电压技术，2025，51(9)：4740-4751.
CHEN Han, HUANG Zhengyong, WEI Cong, et al. Stray gassing production characteristics of natural ester insulating oil under the coupling effects of electric, thermal and fluid fields[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(9): 4740-4751.
[5] 鲁博文，郑智博，甘汶艳，等. 热老化对油中纤维折射率变化的影响机制[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2539-2549.
LU Bowen, ZHENG Zhibo, GAN Wenyan, et al. Mechanism of refractive index change in oil-impregnated fibers due to thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2539-2549.
[6] 高 路，徐 浩，吕泽鹏，等. 油纸复合绝缘组成类型对电荷输运特性的影响[J]. 高电压技术，2025，51(1)：309-321.
GAO Lu, XU Hao, LÜ Zepeng, et al. Effect of composition of oil-paper insulation on charge transport characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 309-321.
[7] HEMALATHA N, KAMARAJA A S, BHUVANESH A, et al. Analysis on insulating characteristics of natural high oleic ester and mineral oil based blended oil under accelerated thermal aging exposure[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(23): 30383-30400.
[8] SERRANO M, OLIVEROS R, SÁNCHEZ M, et al. Influence of blending vegetable oil methyl esters on biodiesel fuel properties: oxidative stability and cold flow properties[J]. Energy, 2014, 65: 109-115.
[9] 何抗抗，杨 超，蔺华林，等. 生物柴油的组成对低温流动性的影响[J]. 应用化工，2017，46(6)：1062-1064，1070.
HE Kangkang, YANG Chao, LIN Hualin, et al. The influence of composition of biodiesel on the cold flow properties[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(6): 1062-1064, 1070.
[10] RAMOS M J, FERNÁNDEZ C M, CASAS A, et al. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 261-268.
[11] PÉREZ Á, CASAS A, FERNÁNDEZ C M, et al. Winterization of peanut biodiesel to improve the cold flow properties[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7375-7381.
[12] KONSOULA Z, LIAKOPOULOU-KYRIAKIDES M. Effect of endogenous antioxidants of sesame seeds and sesame oil to the thermal stability of edible vegetable oils[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(9): 1379-1386.
[13] MOSER B R. Influence of blending canola, palm, soybean, and sunflower oil methyl esters on fuel properties of biodiesel[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(6): 4301-4306.
[14] 陈 朋，余 辉，陈江波，等. 植物绝缘油主要组分的理化与电气性能研究[J]. 绝缘材料，2014，47(3)：45-49.
CHEN Peng, YU Hui, CHEN Jiangbo, et al. Physical-chemical and electrical properties study of main components in vegetable insulating oils[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 45-49.
[15] SHAHABUDDIN M, KALAM M A, MASJUKI H H, et al. An experimental investigation into biodiesel stability by means of oxidation and property determination[J]. Energy, 2012, 44(1): 616-622.
[16] PANTOJA S S, DA CONCEIÇÃO L R V, DA COSTA C E F, et al. Oxidative stability of biodiesels produced from vegetable oils having different degrees of unsaturation[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 293-298.
[17] PULLEN J, SAEED K. An overview of biodiesel oxidation stability[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 5924-5950.
[18] DUNN R O. Correlating the cloud point of biodiesel with its fatty acid methyl ester composition: multiple regression analyses and the weighted saturation factor (wSF)[J]. Fuel, 2021, 300: 120820.
[19] HUANG Y D, LI F S, BAO G R, et al. Modeling the effects of biodiesel chemical composition on iodine value using novel machine learning algorithm[J]. Fuel, 2022, 316: 123348.
[20] CUI Z H, HUANG S, WANG M, et al. Improving the CFPP property of biodiesel via composition design: an intelligent raw material selection strategy based on different machine learning algorithms[J]. Renewable Energy, 2021, 170: 354-363.
[21] DUNN R O. Correlating the cold filter plugging point to concentration and melting properties of fatty acid methyl ester (biodiesel) admixtures[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(1): 501-515.
[22] YUAN M H, CHEN Y H, CHEN J H, et al. Dependence of cold filter plugging point on saturated fatty acid profile of biodiesel blends derived from different feedstocks[J]. Fuel, 2017, 195: 59-68.
[23] ALI ABD EL-AAL Y, ABDEL-FATTAH D M, AHMED K E D. Some biochemical studies on *trans* fatty acid-containing diet[J]. Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews, 2019, 13(3): 1753-1757.
[24] 刘 阳，王春立，曹培让，等. 7 种食用植物油物性及氧化稳定性评价[J]. 中国油脂，2017，42(10)：63-68.
LIU Yang, WANG Chunli, CAO Peirang, et al. Physicochemical properties and oxidative stability evaluation of seven kinds of edible vegetable oils[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(10): 63-68.
[25] FORCE E M, DUNFORD N T, SALAS J J. Sunflower: chemistry, production, processing, and utilization[M]. Illinois, USA: AOCS Press, 2015: 710.
[26] ISLAM M, MUZOLF-PANEK M, FORNAL E, et al. DSC isothermal and non-isothermal assessment of thermo-oxidative stability of different cultivars of *Camelina sativa* L. seed oils[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(18): 10013-10026.
[27] DUNN R O. Effect of antioxidants on the oxidative stability of methyl soyate (biodiesel)[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(10): 1071-1085.
[28] KODALI D R. Oxidative stability measurement of high-stability oils by pressure differential scanning calorimeter (PDSC)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(20): 7649-7653.
[29] FRANKEL E N. Lipid oxidation[M]. 2nd ed. Sawston, UK: Woodhead Publishing Limited, 2005: 486.
[30] 王淳纯，覃小丽，阚建全，等. 量子化学计算法比较不同脂肪酸分子的反应活性位点[J]. 食品科学，2021，42(8)：74-80.
WANG Chunchun, QIN Xiaoli, KAN Jianquan, et al. Comparison of reactive sites of different fatty acid molecules by quantum chemistry calculation[J]. Journal of Future Foods, 2021, 42(8): 74-80.
[31] 廖瑞金，梁帅伟，李 剑，等. 矿物油和天然酯混合绝缘油的理化特性和击穿电压研究[J]. 中国电机工程学报，2009，29(13)：117-123.
LIAO Ruijin, LIANG Shuaiwei, LI Jian, et al. Study on the physics and chemistry characteristics and breakdown voltage of a mixed insulation oil composed of mineral oil and natural easter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 117-123.
[32] SHAHIDI F, ZHONG Y. Lipid oxidation and improving the oxidative stability[J]. Chemical Society Reviews, 2010, 39(11): 4067-4079.



FENG Dawei
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

冯大伟(通信作者)
1992—，男，博士，副教授，博导
主要从事环保型绝缘材料、电气设备绝缘的在线检测与故障诊断等方面的研究工作
E-mail: josaturday@hebut.edu.cn



LI Jiahao

李嘉豪
2001—，男，硕士生
主要从事天然酯绝缘油相关领域的研究工作
E-mail: 1554407550@qq.com

收稿日期 2025-04-02 在线出版日期 2025-08-29 编辑 曹昭君