

二聚酸合成及应用研究进展

王宜迪¹, 张雁玲¹, 王所伟², 程瑾¹, 李秀峥¹, 李澜鹏¹, 曹长海¹

(1. 中石化(大连)石油化工研究院有限公司, 辽宁 大连 116045; 2. 山东华泰英特罗斯化工有限公司, 山东 东营 257000)

摘要:旨在提升我国二聚酸工业化水平和产品竞争力,从合成和应用两个方面对近年来二聚酸的研究进展进行了综述。二聚酸以 C18 不饱和脂肪酸为原料,通过 Diels - Alder 反应或碳正离子反应机制经催化聚合或热聚合制备得到,通过分子蒸馏提纯后二聚酸含量可高达 98% 以上;二聚酸在合成聚酰胺树脂、聚酯类化合物、氢化二聚酸以及生产润滑剂和腐蚀抑制剂等方面均有应用。建议进一步对二聚酸合成机制、合成工艺及下游产品的应用进行深入研究。

关键词:二聚酸;合成工艺;应用领域

中图分类号:TQ2;TQ645

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2024)05-0078-05

Progress in synthesis and application of dimer acid

WANG Yidi¹, ZHANG Yanling¹, WANG Suwei², CHENG Jin¹,
LI Xiuzheng¹, LI Lanpeng¹, CAO Changhai¹

(1. SINOPEC Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Co., Ltd., Dalian 116045, Liaoning, China; 2. Shandong Huatai Interox Chemical Co., Ltd., Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: In order to enhance the industrialization level and product competitiveness of dimer acid, the research progress on dimer acid from two aspects of the synthesis and application in recent years were reviewed. Dimer acid can be obtained by catalytic dimerization or thermal dimerization of C18 unsaturated fatty acids through Diels - Alder reaction or carbocation reaction mechanism, and the content of dimer acid can reach more than 98% by molecular distillation. Dimer acid has been used in the synthesis of polyamide resin, polyester compounds, hydrogenated dimer acid and production of lubricants and corrosion inhibitors. Further studies of the synthesis mechanism, synthesis technology and downstream product application of dimer acid should be performed.

Key words: dimer acid; synthesis process; application field

二聚酸因分子中含有两个羧基团而得名,是 C18 不饱和脂肪酸在一定条件下反应生成以 C36 为主要成分的二聚体化合物^[1],因此二聚酸为一类物质的统称。二聚酸的基本结构大致分为 3 类:单环型,双环型和无环型^[1]。商品化的二聚酸主要是以上 3 类结构组成的混合物。二聚酸为生物基来源,

其分子质量适中,分子中既有长的柔性碳链,又具有相对刚性的环状结构;不仅兼具极性和非极性基团,还具有羧基和双键等性质活泼的反应性基团,独特的物理化学性质使其成为一种重要的化工产品,在聚氨酯、聚酯、润滑剂、燃料添加剂等领域均有着十分重要的用途。国外最早于 20 世纪初对二聚酸进行研究,20 世纪 40 年代初开始了二聚酸的工业化生产。我国从 1977 年开始二聚酸的开发研制^[1],但发展较慢,目前国内高品质二聚酸的生产厂家很少。由于二聚酸合成原料来源的不同,二聚酸的合成机制及合成工艺一直是研究的热点,而且随着国内对二聚酸需求量的不断增加,如何提高二聚酸的收率和质量逐渐成为人们关注的焦点。因此,本文通过

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2024-01-08

基金项目:中国石油化工集团公司资助项目“航空燃料抗磨添加剂制备技术研究”(合同号 117019-3)

作者简介:王宜迪(1991),女,助理研究员,研究方向为生物质资源化利用(E-mail) wangyidi.fshy@sinopec.com。

通信作者:曹长海,副研究员(E-mail) caochanghai.fshy@sinopec.com。

对二聚酸的合成原料、合成机制、合成工艺、分离纯化以及应用研究情况进行综述,以期为提升我国二聚酸的工业化水平和产品竞争力提供方向。

1 二聚酸的合成

1.1 合成原料

不饱和脂肪酸是制备二聚酸最关键的原料,理论上,油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸都可用于二聚酸的合成,当原料中亚油酸含量高时,二聚酸产率较高,且分离难度相对较低。在发达国家,造纸的原料多数为木本植物,其副产物妥尔油脂脂肪酸价格低廉,并且由于其成熟的纯化工艺,妥尔油脂脂肪酸中油酸和亚油酸总含量不低于97%,松香酸含量不大于2%^[2],色泽好,如美国 Ingevity 公司的 ALTAPYNE L-1A 妥尔油脂脂肪酸和日本 Harima 公司的 HARTALL FA-1 妥尔油脂脂肪酸是合成二聚酸的优良原料。在我国,造纸的原料多数为草本植物,并且缺乏成熟的妥尔油脂脂肪酸纯化工艺,导致其在数量、质量及价格上都无法满足二聚酸的生产,因此常采用大豆油脂脂肪酸、棉籽油脂脂肪酸、米糠油脂脂肪酸等植物油不饱和脂肪酸作为原料生产二聚酸。但近年来,随着全球对环境保护的日益重视,造纸行业受到严格限制和管控,妥尔油脂脂肪酸的供应出现紧缺,二聚酸的生产原料逐渐转向了植物油不饱和脂肪酸。

1.2 合成机制

目前,二聚酸的合成机制尚未明确,研究人员提出多种不同的机制,一般认为是多不饱和脂肪酸双键先共轭化形成共轭双键,然后按 Diels-Alder 反应机制^[3],通过亲电加成在共轭双键处形成六元环;而单不饱和脂肪酸的聚合则认为是碳正离子机制,即在催化剂的作用下,单不饱和脂肪酸双键处形成碳正离子,还可能涉及到氢转移,从而形成无环的二聚酸^[4]。碳正离子机制对不饱和脂肪酸具有一定的不确定性,伴有双键异构化、支链化、内酯化等副反应。

1.3 合成工艺

根据是否使用催化剂,二聚酸的合成方法可以分为催化二聚法和热二聚法。在催化二聚法中,催化剂主要作用于双键的共轭或者碳正离子的形成,催化剂主要分为均相催化剂和非均相催化剂。不饱和脂肪酸的二聚反应可以在碱/碱金属盐等均相催化剂的作用下进行^[5],同时,L酸和B酸同样可以用于催化不饱和脂肪酸的二聚反应^[6],但存在副反应多,二聚酸收率低等缺点,且难以从聚合体系中分离二聚酸。非均相催化剂因易于从反应体系中分离回收再利用而在工业中得到更广泛的使用,脂肪酸二

聚反应中研究最多的非均相催化剂为黏土及黏土材料^[7-9],如膨润土、蒙脱土、白土等,其催化活性主要依靠其分子结构层间的酸性中心,分别为可以接受孤对电子的层间阳离子(L酸中心)和氢离子,以及层间阳离子结合的极化水分子(B酸中心)^[3]。对催化剂进行改性也可提高二聚酸的收率,原理是通过合理的改性增加反应原料与催化剂之间的传质,使反应原料与催化剂的活性位点充分有效地接触,以此提高二聚酸的收率。例如:插层改性^[10-12]和金属盐/酸溶液浸渍^[13-14]等方法可以增加黏土类催化剂的层间距,提高催化剂亲油性,增加催化剂催化位点等;利用球磨辅助机械搅拌的方式可以“破坏”催化剂表面,产生高催化活性的新生表面,从而使得催化剂与反应原料充分接触,有效提高液固相传质^[15]。在添加催化剂的同时,还可添加一定量的催化助剂,如碱土金属盐类、水、CO₂等,通过降低反应温度、减少脱羧反应以及改变二聚酸和三聚酸合成比例等,进一步提高二聚酸的选择性和品质^[16-18]。除上述黏土类催化剂外,还有研究以分子筛为催化剂催化植物油不饱和脂肪酸合成二聚酸^[19],分子筛的结构及性质对二聚酸的结构有显著影响,通过调控分子筛催化剂的酸性位点和结构,可以实现产物二聚酸的结构(线性/环状比例)控制。与传统的黏土类催化剂相比,分子筛催化剂更加环保,重复利用性好,有助于二聚酸以及下游产品的生产和利用,以满足不同工业用途。

根据二聚酸合成机制,Diels-Alder 反应不需要催化剂,最早报道的二聚酸聚合方法也为热二聚法,此工艺的原料为多不饱和脂肪酸,其反应温度较高(260~400℃)^[20],热聚合速率也相对较慢,易造成脱羧等副反应。但在共轭双烯和亲双烯存在的体系中,在低于220℃的条件下即可完成二聚酸的合成,且反应效率高^[21],例如,共轭亚油酸的热聚合速度是非共轭亚油酸的5倍,甚至更多,共轭亚麻酸热聚合速度超出非共轭亚麻酸70倍^[21]。因此,原料脂肪酸的组成是决定合成工艺的关键因素。桐油酸为具有共轭双键的脂肪酸,其作为共轭双烯体的同时又充当亲双烯体,通过 Diels-Alder 反应,200℃可得到相应的二聚酸,并且二聚酸的组成主要为单环结构^[22-23]。热聚合因无需使用催化剂,不涉及后续催化剂的分离,因此避免了分离所带来的产品损失和催化剂污染环境等问题,具有环保的优点。

1.4 分离纯化

纯度较高的二聚酸为浅黄色黏稠状液体,随着纯度的降低,二聚酸呈红棕色。市场上二聚体含量

大于 98% (HPLC) 的高纯二聚酸产品,黏度为 5 000 ~ 7 000 mPa · s(25 °C),Fe - Co 比色小于 4.5,二聚体含量为 75% ~ 85% 时,其产品黏度为 6 500 ~ 9 000 mPa · s(25 °C),Fe - Co 比色通常要求小于 7^[24]。一般来说,随着二聚酸产品中二聚体含量的降低、三聚体含量的增大,产品黏度增大,Fe - Co 比色增大。二聚酸的纯度和其应用领域相互关联,随着高新技术的发展,高纯度二聚酸的应用范围越来越广,用量也日益增长。

常压下,油酸和亚油酸的沸点约为 360 °C,二聚酸沸点则高达 667 °C 以上^[25],且由于原料和产品中含有碳碳双键,在加热时容易氧化变质,因此常用的减压蒸馏无法生产高纯度的二聚酸产品。我国研发生产二聚酸的初期,只能生产二聚酸含量在 70% 左右的红棕色粗品,产品中还含有约 10% 的单酸和 20% 的多聚酸,无法满足聚酰胺树脂聚合的使用要求^[26-27]。随后国内开始引进先进的纯化工艺——分子蒸馏,其操作真空度高、操作温度低、物料受热时间短,适用于沸点高、热敏性物料的有效无损分离。二聚酸的分离提纯通常需要二级分子蒸馏,在合适的温度和压力条件下,一级分子蒸馏用于去除粗品中的单酸,还可以有效脱除产品(相对分子质量 1 000 以下)中的杂质和色素^[28],二级分子蒸馏用于去除粗品中的三聚酸、多聚酸等重组分,因此分子蒸馏生产的二聚酸产品的色泽和品质优于传统蒸馏法生产的,当分子蒸馏级数达到三级以上时,产品的二聚酸含量可高达 98% 以上^[29]。鉴于以上优点,分子蒸馏成为工业上二聚酸分离纯化的主要方法,但同时也存在设备装置前期成本投入大、处理能力有限等问题,有必要进一步对工业设计和分离纯化工艺进行优化,使其更有效地用于二聚酸的分离纯化。

2 二聚酸的应用

二聚酸是一种重要的油脂化学品,其分子质量适中,分子中既有非极性长碳链,又有极性的羧基,具备“两亲”分子的性质,羧基和双键官能团又使其能进行多项化学反应,包括酯化反应、氢化反应、聚合反应,同时还能够与卤化物、胺、环氧乙烷、碱金属氢氧化物、两性氢氧化物等反应,独特的物理化学性质使其可以作为众多精细化学产品的基本原料。

2.1 合成聚酰胺树脂

二聚酸存在两个具有反应活性的羧基,是生产聚酰胺树脂的理想原料,这也是二聚酸最大的用途^[30],据统计,二聚酸全球总产量中有 70% ~ 80%

用于生产聚酰胺树脂^[27]。二聚酸的质量、纯度对聚酰胺树脂产品的品质影响较大^[31]。通过相应的工艺配方和措施可以调节聚酰胺树脂的性能指标。特殊的结构性质赋予二聚酸型聚酰胺树脂聚合物优异的柔韧性、粘合力、防腐性能以及防锈蚀性能。采用二聚酸合成的聚酰胺树脂有非反应型和反应型两种,前者称为非活性聚酰胺树脂或中性聚酰胺树脂,分子中不含有活性反应基团,主要用作生产油墨、热熔胶和涂料等;后者称为活性聚酰胺树脂,常温下是液体,具有良好的醇溶性,分子中含有反应性的仲胺基,能与多种官能团键合,一般用作环氧树脂或酚醛树脂的固化(熟化)剂。

目前,绝大部分的二聚酸型聚酰胺树脂作为油墨和热熔胶的生产原料。高进等^[32]以二聚酸、乙二胺为主要原料,通过缩聚反应制备了醇溶性好、冻点低、软化点及黏度合格的油墨用聚酰胺树脂。王霄丹等^[33]以二聚酸、二元胺以及蓖麻油酸为主要原料,制备了一种改性醇溶性聚酰胺树脂油墨用料,其具备优越的抗冻性、抗凝胶性,同时其流动性及颜料润湿性良好。高建舟^[34]以二聚酸与乙二胺为原料合成二聚酸酰胺树脂热熔胶,具有良好的热稳定性。相比于其他热熔胶,聚酰胺类热熔胶具有粘接强度高、柔韧性较好、耐热性和耐介质性佳等优点,可用于木材、金属、陶瓷等众多材料的粘接。周宏福等^[35]以二聚酸、癸二酸、乙二胺与聚醚胺为原料合成出用于热熔胶的聚酰胺树脂,其具有成对软化点高、拉伸强度和伸长率高、耐低温性能优异、成型速度快等特点。

2.2 合成聚酯类化合物

二聚酸另一个主要应用领域是与乙二醇及其他多元醇反应生成聚酯类化合物,孙晴卿等^[36]在 160 ~ 220 °C 下以二聚酸为原料采用熔融聚合法合成的聚酯多元醇可以用于聚氨酯材料的生产。许延卿等^[16]将二聚酸与乙二醇缩合制得聚酯二元醇,再通过与甲苯二异氰酸酯、丙烯酸羟乙酯反应引入丙烯酸酯基团,制得了可光固化的聚氨酯丙烯酸酯树脂,与传统的热塑性聚氨酯相比,其在力学性能、耐水解性和耐化学药品性等方面更胜一筹。

2.3 合成氢化二聚酸

二聚酸分子中残留的双键在一定程度上影响其在高温条件下的稳定性,而含双键的二聚酸经催化加氢可得到氢化二聚酸,而氢化二聚酸分子中不存在双键,因此其柔韧性、热稳定性等性能更好,使用范围更广^[37]。氢化二聚酸羧基通过可控化学修饰

赋予其许多功能特性,例如,黄能坤等^[38]利用不同乙二醇醚对氢化二聚酸的羧基进行修饰,制备出具有不同乙氧基官能团数目的新型氢化二聚酸乙二醇醚酯增塑剂,增塑聚氯乙烯(PVC)后的制品的断裂伸长率提高了125%,拉伸强度提高了11.29 MPa,在正己烷中的迁移性降低了14.25%,70℃下的挥发性降低了5.29%,初始热分解温度($T_{5\%}$)提高了27.2℃,表现出优越的增塑性能。此外,氢化二聚酸在共聚尼龙的合成和应用上也展现出优异的性能,以氢化二聚酸替代二聚酸进行共聚反应对共聚物的玻璃化转变温度(T_g)和熔化温度(T_m)影响较小,但可显著影响共聚物的结晶温度(T_c)、结晶度(X_c)、拉伸强度、断裂伸长率、抗弯强度、缺口冲击强度等性能^[39]。

2.4 生产润滑剂及腐蚀抑制剂

二聚酸在油品、有机溶剂中具有良好的溶解性,其分子中含有极性的羧基及较长的非极性碳链,对金属具有较强的吸附力,涂覆于金属表面可以形成疏水性多分子层膜,在燃料油抗磨、金属加工以及润滑防腐等领域均有应用。

张雁玲等^[40]考察了3种不同原料来源的二聚酸对航空煤油润滑性的改善作用以及平均成膜率和平均摩擦系数的变化情况,并用测量显微镜分析试验球的磨痕形貌。结果表明,二聚酸能够在摩擦副金属表面发生化学吸附,形成具有较好润滑作用的含氧化学保护膜,从而起到抗磨效果,添加20 mg/L的二聚酸,可使航空煤油磨痕直径(WSD)不大于0.65 mm。杨雷等^[41]以二聚酸和羟乙基磺酸钠为原料合成了羟乙基磺酸钠二聚酸酯水溶性绿色切削液添加剂,并且将其应用于全合成切削液中,当添加量为2%时,最大无卡咬负荷(PB)值为635.2 N,具有优良的摩擦学性能,同时其防锈性能可通过GB/T 6144—2010《合成切削液》中的腐蚀性能试验。汽油、柴油中添加二聚酸能提高防锈作用和淤渣分散能力,减少内燃机汽缸和活塞上的附着物,降低摩擦率;在刹车油中添加适量二聚酸衍生物,可以提高防锈性能和滑动性^[8]。

2.5 其他应用

二聚酸分子中含有亲油基团,羧基可与不同亲水基团反应,其产品可以应用于石油开采领域,如用作石油开采钻井液^[42-43]。二聚酸还是合成二腈类、二胺类、二异氰酸酯类等有机产品的重要中间体。以二聚酸为原料合成的不同类型化合物可应于环氧树脂固化剂^[44]、功能性涂料^[45]、包装薄膜^[46]、发动

机配件结构材料^[47]等方面。

3 结语

二聚酸具有分子质量适中、结构独特、生物基来源、衍生物应用范围广等优点,国内外对二聚酸及其衍生物化学品的开发和应用研究都十分重视。近十年来,我国涌现出一批生产二聚酸的企业,但依旧存在产品品质良莠不齐的问题。此外,在二聚酸合成方面,二聚酸合成机制尚不明确,催化体系催化效率有待提升,也需进一步解决存在的危废问题;在二聚酸应用方面,存在下游产品的精细化、高端化能力不足等问题,现阶段的下流应用忽视了不同原料和生产工艺合成的二聚酸中无环结构/单环结构/双环结构三者比例不同对产品性能造成的影响。因此,相关研发工作应该从合成原理、合成工艺优化整合、下游产品开发三方面深入,进一步明确二聚酸合成反应机制,开发环境友好的二聚酸工业化生产以及高效催化体系,同时开展不同应用场景下二聚酸生产工艺方面的改进。随着二聚酸制备及纯化技术的不断发展,二聚酸的应用范围势必在现代高新技术工业中得到拓展,从而进一步提升我国二聚酸工业化水平和产品竞争力。

参考文献:

- [1] 赵澄海. 二聚酸的合成与分离研究[D]. 广州:华南理工大学, 2003.
- [2] 无锡市致远化学品有限公司[EB/OL]. [2024-01-08]. http://www.wxzyhxp.com/products_53/115.html.
- [3] 冯光柱. C₃₆二聚脂肪酸基聚酯及其衍生物的合成、性能与动力学研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [4] COLJA N, LAANE M, CROSS G A, et al. (Bio) dimerisation of unsaturated fatty acids[J]. Recl Trav Chim, 1991, 110(5): 195-198.
- [5] ELSASSER A F, MCCARGAR L A. Method of preparing dimeric fatty acids and/or esters thereof containing low residual interesters and the resulting dimeric fatty acids and/or dimeric fatty esters:US6187903[P]. 2001-02-03.
- [6] JANUS E, BITTNER B. Triethylsulfonium bistriflimide as the reaction medium in catalyzed and uncatalyzed cycloaddition[4+2][J]. Catal Lett, 2010, 134(1/2): 147-154.
- [7] 历福强, 蔡丽英, 赵素英, 等. 膨润土结构和组成对催化棉籽油酸二聚反应的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 696-701.
- [8] 田力. 蒙脱土催化脂肪酸合成二聚酸的研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2016.
- [9] 汪之禾, 王菊香, 陆向红, 等. 白土催化合成二聚酸联产油酸工艺研究[J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(2): 463-470.
- [10] BRIGATTI M F, GALAN E, THENG B K G. Developments

- in clay science: Handbook of clay science[M]. Oxford: Elsevier, 2006.
- [11] 陆向红, 崔艳帅, 计建炳, 等. 改性活性白土催化油酸合成二聚酸[J]. 石油化工, 2015, 44(4): 483-488.
- [12] 黄雪, 尹垚骐, 张步宁, 等. 蒙脱土结构和性质对催化不饱和脂肪酸二聚化反应的影响[J]. 化工学报, 2017, 68(S1): 210-217.
- [13] 赵素英. 一种合成二聚酸的改性膨润土催化剂: CN201810245884.5[P]. 2018-09-28.
- [14] 胡冬冬. 机械活化法制备二聚酸[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [15] 胡冬冬, 钱行, 计建炳, 等. 球磨法强化活性白土催化二聚酸合成[J]. 材料科学与技术, 2018, 37(5): 1902-1907.
- [16] 许延卿, 聂俊, 姚森, 等. 以生物基二聚脂肪酸制备聚氨酯丙烯酸酯树脂及其性能研究[J]. 涂料工业, 2020, 50(8): 1-7.
- [17] 朱雷, 陈坤雄, 赵素英, 等. CO₂ 环境下油酸聚合制二聚酸的工艺[J]. 化工进展, 2013, 32(9): 2216-2220.
- [18] 杨胜. 二聚酸的制备工艺及其应用[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(3): 141-142.
- [19] ZHANG J W, NUÑEZ A, STRAHAN G D, et al. An advanced process for producing structurally selective dimer acids to meet new industrial uses[J/OL]. Ind Crops Prod, 2020, 146: 112132 [2024-01-08]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112132>.
- [20] 崔艳帅. 脂肪酸制备二聚酸的工艺研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [21] 冯跃. 二聚酸聚合工艺控制要点[J]. 化学工程与装备, 2014(8): 92-94.
- [22] 曹长海, 李澜鹏, 王宜迪, 等. 一种二聚酸及其合成方法: CN111099985B[P]. 2017-12-06.
- [23] 曹长海, 李澜鹏, 王宜迪, 等. 一种桐油基二聚酸及其合成方法: CN201711277177.6[P]. 2017-12-06.
- [24] 江西艾图瑞克实业有限公司[EB/OL]. [2024-01-08]. <http://www.aturex.com/aturexchem/index-cn.htm>.
- [25] 盖化德化工网[EB/OL]. [2024-01-08]. <https://china.guidechem.com>.
- [26] 杨兴明, 郭允奎, 陆韩涛. 用分子蒸馏技术精制二聚酸的研究[J]. 广东化工, 1993(1): 22-24.
- [27] 张衡, 费菲. 二聚酸聚酰胺树脂制备工艺及问题探讨[J]. 粮食与油脂, 1999(2): 13-18.
- [28] 冯武文, 杨村, 于宏奇. 分子蒸馏技术与日用化工(II): 分子蒸馏技术在日化工业中的应用及前景[J]. 日用化学工业, 2002, 32(6): 73-75.
- [29] 王勇, 吴长年, 蒋腾, 等. 高纯二聚酸清洁生产技术分析[J]. 化工环保, 2006(4): 321-324.
- [30] 陈焕章, 王春芳. 二聚酸的生产与应用[J]. 化工时刊, 1994, 8(12): 10-12.
- [31] FREITAS R F R, KLEIN C, PEREIRA M P, et al. Lower purity dimer acid based polyamides used as hot melt adhesives: Synthesis and properties [J]. J Adhes Sci Technol, 2015, 29(17): 1860-1872.
- [32] 高进, 胡忠新, 杨翠莲, 等. 油墨用醇溶性聚酰胺树脂的合成与性能研究[J]. 枣庄学院学报, 2012, 29(2): 131-134.
- [33] 王霄丹, 王浩. 一种改性醇溶性聚酰胺树脂及其制备方法: CN202210638268.2[P]. 2022-08-30.
- [34] 高建舟. 二聚酸聚酰胺热熔胶的合成与改性[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [35] 周宏福, 王建斌, 白战争. 单体组成对聚酰胺热熔胶性能影响的研究[J]. 化学与黏合, 2011, 33(3): 17-19, 39.
- [36] 孙晴卿, 段正康, 彭欢, 等. 基于二聚酸的聚酯多元醇的合成及其热塑性聚氨酯弹性体的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2010, 24(S2): 469-472.
- [37] FENG G D, HU L H, MA Y, et al. An efficient bio-based plasticizer for poly(vinyl chloride) from waste cooking oil and citric acid: Synthesis and evaluation in PVC films[J]. J Clean Prod, 2018, 189: 334-343.
- [38] 黄能坤, 王梓雯, 王文耕, 等. 新型氢化二聚酸乙二醇醚酯的合成及其增塑 PVC 性能[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2638-2646.
- [39] 贾凤. 二聚酸基共聚尼龙的制备、结构与性能[D]. 南京: 南京工业大学, 2013.
- [40] 张雁玲, 王姝凡, 王宜迪, 等. 二聚酸抗磨剂对航空煤油润滑性的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(4): 63-68.
- [41] 杨雷, 李圣辉, 林财. 二聚酸酯的合成及在全合成切削液中的应用[J]. 韶关学院学报, 2020, 41(6): 49-52.
- [42] 蒋官澄, 贺垠博, 黄贤斌, 等. 二聚酸-有机胺共聚物及其制备方法和应用以及油包水乳化钻井液提切剂及钻井液: CN201510277996.5[P]. 2015-05-27.
- [43] HUANG X B, SUN J S, LV K H, et al. An alternative method to enhance W/O emulsion stability using modified dimer acid and its application in oil based drilling fluids [J]. RSC Adv, 2018, 8(46): 26318-26324.
- [44] 郭焕, 吕政昊. 低分子聚酰胺固化剂合成的影响因素分析[J]. 化学与黏合, 2018, 40(3): 192-195.
- [45] LI S, YANG X, HUANG K, et al. Design, preparation and properties of novel renewable UV-curable copolymers based on cardanol and dimer fatty acids[J]. Prog Org Coat, 2014, 77(2): 388-394.
- [46] 陆云帆. 二聚酸聚酰胺薄膜改性及其性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [47] 武嘉, 李迎春, 王朝进, 等. 一种含“星型”交联的配位耐高温聚酰胺材料及其制备方法: CN202111280041.7[P]. 2021-10-29.