

基于 VOSviewer 可视化分析橡胶增塑剂的研究进展



崔浩然¹, 蔡维琪², 高培议², 刘旭², 宁月婷², 孙清宇², 刘丰嘉², 牛世元¹, 王卉卉², 耿赛^{1,*}

¹青岛科技大学化工学院, 山东青岛 266061

²青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东青岛 266061

摘要: 增塑剂是轮胎和橡胶制品中不可缺少的一个组分, 其主要用作橡胶或塑料的合成物质, 加入后可以降低橡胶的玻璃化温度, 令橡胶可塑性、流动性增强。本文通过文献计量的研究方法, 检索 2013-2023 年 CNKI 数据库及 Web of science 数据库中有关橡胶增塑剂研究的相关文献, 采用 VOSviewer 计量分析软件可视化分析近十年间相关文献中关键词、发文量、高被引频次、合作关系及共词聚类等信息变化趋势, 剖析近年来橡胶增塑剂领域的研究态势, 总结阐述橡胶增塑剂的研究现状和研究热点。分析结果表明, 关于橡胶增塑剂的研究自 2016 年起发文量大幅增长, 2016-2023 年间的发文量约占研究期内总量的 83%。橡胶增塑剂的热点研究领域多集中于环保型橡胶增塑剂的研制与应用以及橡胶增塑剂对复合材料性能影响的研究等方面。随着当今人们生活的发展, 环保型增塑剂的技术开发与应用成为一大研究热点。各种不同的研究热点之间有较强的关联性和互补性。

关键词: 增塑剂; 胎面胶; 环保; VOSviewer

DOI: [10.57237/j.cse.2024.02.002](https://doi.org/10.57237/j.cse.2024.02.002)

Research Progress in Visual Analysis of Rubber Plasticizers Based on VOSviewer

Haoran Cui¹, Weiqi Cai², Peiyi Gao², Xu Liu², Yueting Ning², Qingyu Sun², Fengjia Liu², Shiyuan Niu¹, Huihui Wang², Sai Geng^{1,*}

¹Chemical Engineering Institute, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China

²Polymer Science and Engineering College, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: Plasticizer is an indispensable component in tires and rubber products, mainly used as a synthetic material for rubber or plastic. When added, it can reduce the glass transition temperature of rubber and enhance its plasticity and flowability. This article uses bibliometric research methods to search for relevant literature on rubber plasticizers in the CNKI database and Web of Science database from 2013 to 2023. VOSviewer quantitative analysis software is used to visually analyze the trend of information changes in keywords, publication volume, high citation frequency, cooperative relationships, and co word clustering in relevant literature over the past decade, and to analyze the research trend in the field of rubber plasticizers in recent years, Summarize and elaborate on the research status and hotspots of rubber plasticizers. The analysis results indicate that the number of publications on rubber plasticizers has increased significantly since 2016, accounting for approximately 83% of the total number of publications during the research

*通信作者: 耿赛, gengsai@qust.edu.cn

period from 2016 to 2023. The hot research fields of rubber plasticizers mainly focus on the development and application of environmentally friendly rubber plasticizers, as well as the study of the impact of rubber plasticizers on the properties of composite materials. With the development of people's lives today, the technological development and application of environmentally friendly plasticizers have become a major research hotspot. There is strong correlation and complementarity between various research hotspots.

Keywords: Plasticizer; Tread Rubber; Environment Protection; VOSviewer

1 引言

橡胶增塑剂是轮胎和橡胶制品中不可缺少的一个组分，主要应用于橡胶或塑料的合成物质，可以降低橡胶的玻璃化温度，令橡胶的可塑性、流动性增强，便于压延、压出等成型操作，改善某些物理机械性能。橡胶增塑剂的广泛应用使其成为当今一大研究热点，人们根据所需橡胶的性能不断地研究各类橡胶增塑剂的制作方法，但是传统的橡胶增塑剂其本身或者加入到橡胶产品中后的产品在后期会对人类环境造成污染，所以橡胶增塑剂的发展趋势正向着环保方向发展，越来越多人研发并应用环保型增塑剂以降低传统增塑剂对环境的影响。同时，高性能增塑剂的需求也逐渐增加，以满足对橡胶制品性能要求的提升。此外，多功能增塑剂的研发也是发展方向之一，能够改善橡胶的综合性能。新型增塑剂如生物基增塑剂、聚合物增塑剂等也在逐步应用，推动橡胶增塑剂行业的创新与进步。橡胶增塑剂是一种用于增加橡胶材料的柔软度、延展性和可加工性的化学物质。它们与橡胶分子相互作用，降低了橡胶的玻璃化转变温度，使其变得更加柔软和易于加工。橡胶增塑剂通常是液体或固体，并可以溶解在橡胶中，或者以分散物的形式存在。它们通过在橡胶链上插入或与橡胶链进行相互作用，改变了橡胶材料的结构和性能。橡胶增塑剂还可以提高橡胶的拉伸强度和抗撕裂性能，同时改善其耐磨损、耐寒性和耐化学性。常见的橡胶增塑剂包括邻苯二甲酸酯、磺化酚醛树脂、脂肪酸酯等。橡胶增塑剂在橡胶制品的生产中得到广泛应用，例如橡胶轮胎、橡胶密封件、橡胶管材、橡胶地板等。它们能够改善橡胶材料的可加工性和性能，满足不同应用领域对橡胶制品的要求。

2 基于 VOSviewer 的橡胶增塑剂文献研究的可视化分析

2.1 近十年发文量变化分析

本文基于中国知网（CNKI）和 Web of Science（WOS）数据库，以“橡胶增塑剂”和“Rubber plasticizer”为检索词，在中国知网检索出相关领域研究文献 116 篇，WOS 483 篇，以此为样本进行分析。图 1 为 2013-2023 年每年发文量的趋势图。由图可知，2013-2018 年间 WOS 数据库的发文量缓慢上升，橡胶增塑剂研究正处于初步发展阶段；2018-2023 年间与橡胶增塑剂相关的发文量大幅上升，表明该方向研究热度持续升高，橡胶增塑剂的优异性能已被发掘。其中 2020-2023 期间发文量增长率达到 87%，研究处于快速发展阶段，说明近两年关于橡胶增塑剂的研究理论正在进行当中，研究热度持续高涨。

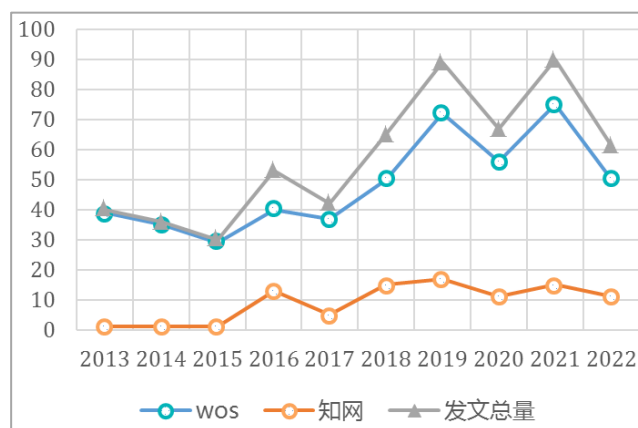


图 1 2013-2023 年每年发文量趋势图

2.2 被引频次变化分析

文献的被引频次可以在一定程度上反映文章的研究的热度和文章质量，通过对相关领域文章被引频次进行分析可以明确该领域较为热门的研究方向，并且

为后续工作和研究提供参考。

表 1 列出了 CNKI 数据库中 Top10 的高引文献，其发表时间集中在 2015—2021 年之间。CNKI 数据库有关“橡胶增塑剂”的中文文献被引次数总体处于较高

水平，其中来自肖英（第一作者）在 2020 年发表于橡胶科技的文章《环保型橡胶增塑剂的发展概况》被引次数最多，为 607 次。

表 1 CNKI 数据库中发表时间在 2013—2023 年之间 Top10 的高引文献

序号	文献名	第一作者	来源	发表年	被引频次
1	环保型橡胶增塑剂的发张概况	肖英	橡胶科技	2017	607
2	改性环氧大豆油的制备及其对天然稳胶性能的影响	张群	北京化工大学	2016	416
3	环保稳胶增塑剂 A1220 的开发及应用	冯涛	石油炼制与化工	2019	188
4	环保型橡胶增塑剂的研制及其充油丁苯稳胶的性能	于恩强	橡胶科技	2015	168
5	环保型橡胶增塑剂 HJA 系列产品及其应用	冯涛	橡胶科技	2017	157
6	环烷基减四线馏分油加氢精制-糠醛萃取制备环保橡胶增塑剂的研究	于恩强	石油炼制与化工	2021	131
7	生产高芳烃含量橡胶增塑剂的两股粮醒萃取组合工艺	杨文中	石油炼制与化工	2018	110
8	粮醛萃取-高压加氢组合工艺生产高芳橡胶增塑剂的研究	蔡烈重	石油与天然气化工	2018	99
9	环保型橡胶增塑剂在半钢子午线轮胎胎面胶中的应用	冯涛	橡胶科技	2016	94
10	减二线馏分油生产稳胶增塑剂 A0709 的工艺研究	冯涛	石油炼制与化工	2018	90

表 2 列出了 WOS 数据库中 Top10 的高引文献，其发表时间集中在 2014—2020 年。英文文献的研究深度和热度显著高于中文期刊，WOS 中检索出的 483 篇文章共被引用 7072 次，平均每篇文献被引 14.64 次。来自 Surya, Indra 于 2013 年发表的文章《Alkanolamide as an accelerator, filler-dispersant and a plasticizer in silica-filled natural rubber compounds》被引次数最多，达

到 72 次。作者采用半高效硫化体系研究了烷醇酰胺（ALK）在天然橡胶（NR）二氧化硅补强中的应用可行性，提出了一种烷酰胺作为二氧化硅填充天然橡胶化合物的促进剂、填料分散剂和增塑剂方法，探究了复合产品扭矩差异、拉伸模量、拉伸强度、硬度和交联密度，发现此种方法下的产品性能有很大程度的提升。[1]

表 2 WOS 数据库中发表时间在 2013—2022 年之间 Top10 的高引文献

序号	文献名	第一作者	来源	发表年	被引频次
1	Alkanolamide as an accelerator, filler-dispersant and a plasticizer in silica-filled natural rubber compounds	Surya	POLYMER TESTING	2013	72
2	Cardanol: a green substitute for aromatic oil as a plasticizer in natural rubber	Mohapatra, S	JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS	2014	68
3	Investigating the combined impact of plasticizer and shear force on the efficiency of low temperature reclaiming of ground tire rubber (GTR)	Formela, K	POLYMER DEGRADATION AND STABILITY1	2016	61
4	Improved electromechanical properties of silicone dielectric elastomer composites by tuning molecular flexibility	Yang, D	COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY	2018	56
5	PVC-Based Ion-Selective Electrodes with a silicone Rubber Outer Coating with Improved Analytical Performance	Joon, NK	ANALYTICAL CHEMISTRY9	2019	49
6	Effect of different plasticizers on the properties of bio-based thermoplastic elastomer containing poly(lactic acid) and natural rubber	Tanrattanakul V	EXPRESS POLYMER LETTERS	2014	47
7	Continuous production of liquid reclaimed rubber from ground tire rubber and its application as reactive polymeric plasticizer	shi, JW	POLYMER DEGRADATION AND STABILITY	2014	47
8	Thermosetting epoxy resin/thermoplastic system with combined shape memory and self-healing properties	Yao, YT	SMART MATERIALS AND STRUCTURES	2016	46
9	Bend, Twist, and Turn: First Bendable and Malleable	Yeo, JCC	ADVANCED	2020	45

序号	文献名	第一作者	来源	发表年	被引频次
	Toughened PLA Green Composites		FUNCTIONAL MATERIALS		
10	Softwood-ignin/natural rubber composites containing novel plasticizing agent: Preparation and characterization	Datta, J	INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS	2017	44

2.3 作者及其合作关系

WOS 数据库中的 483 篇文献共有 1825 个作者，发文量最多的作者为中国工程院院士张立群，共发表相关文章 16 篇。发文量排名前十的作者 65% 为中国的学者，可见中国在该领域的研究力量较强。图 2 是 2013-2023 近十年来橡胶增塑剂相关研究主要作者的合作关系图，图中球的大小代表作者出现的频次，球越大说明该作者发文量越多；颜色和距离代表相互合作的紧密关系，相同颜色的作者密切性越大。从图中可以看到 6 个核心作者群，且以张立群为主的作者群球最大，这也证明了张立群院士在橡胶增塑剂这个研

究领域巨大的贡献。其中 6 个核心作者群发文量最多的分别是张立群、Suksaeree Jirapornchai、Nando Golok B、陈杰、Dagnac Thierry。五位作者的主要发文量和被引频次如图 3 所示。由图可知，张立群发文数量为 16 篇，被引频次为 399 次，其被引频次最高的一篇文章是《Improved electromechanical properties of silicone dielectric elastomer composites by tuning molecular flexibility》，为 56 次。作者在文中提出了一种在硅橡胶(SR)复合材料中添加增塑剂调节分子柔韧性来显著改善橡胶机电性能的方法。在复合材料中加入硅油(SO)增塑剂，来削弱分子间的相互作用，并利用溶胀效应来破坏填料网络的结构。[2]

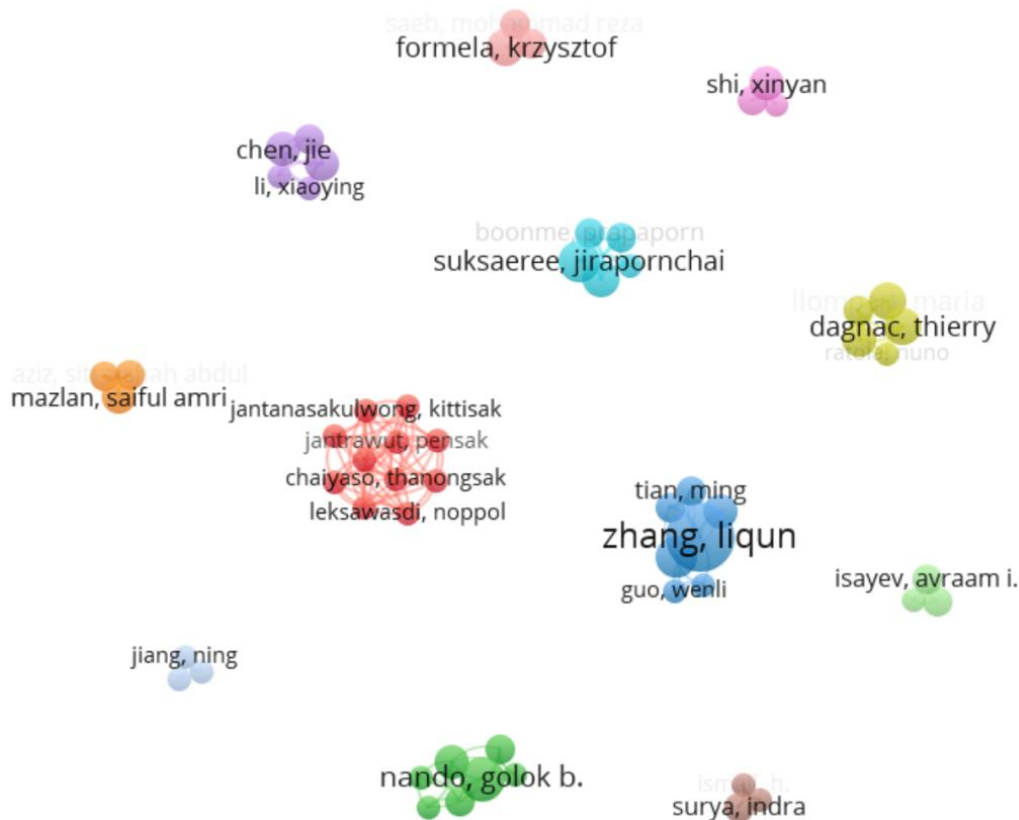


图 2 2013-2022 年 WOS 数据库中主要学者合作关系图

Suksaeree Jirapornchai 发文数量为 7 篇，被引频次为 90 次；Nando Golok B 发文数量为 9 篇，被引频次为 175 次；陈杰发文数量为 5 篇，被引频次为 115 次；Dagnac Thierry 发文数量为 6 篇，被引频次为 165 次。这些作者是橡胶增塑剂研究领域的高产作者及高被引作者，为该领域的研究与发展作出了突出的贡献。

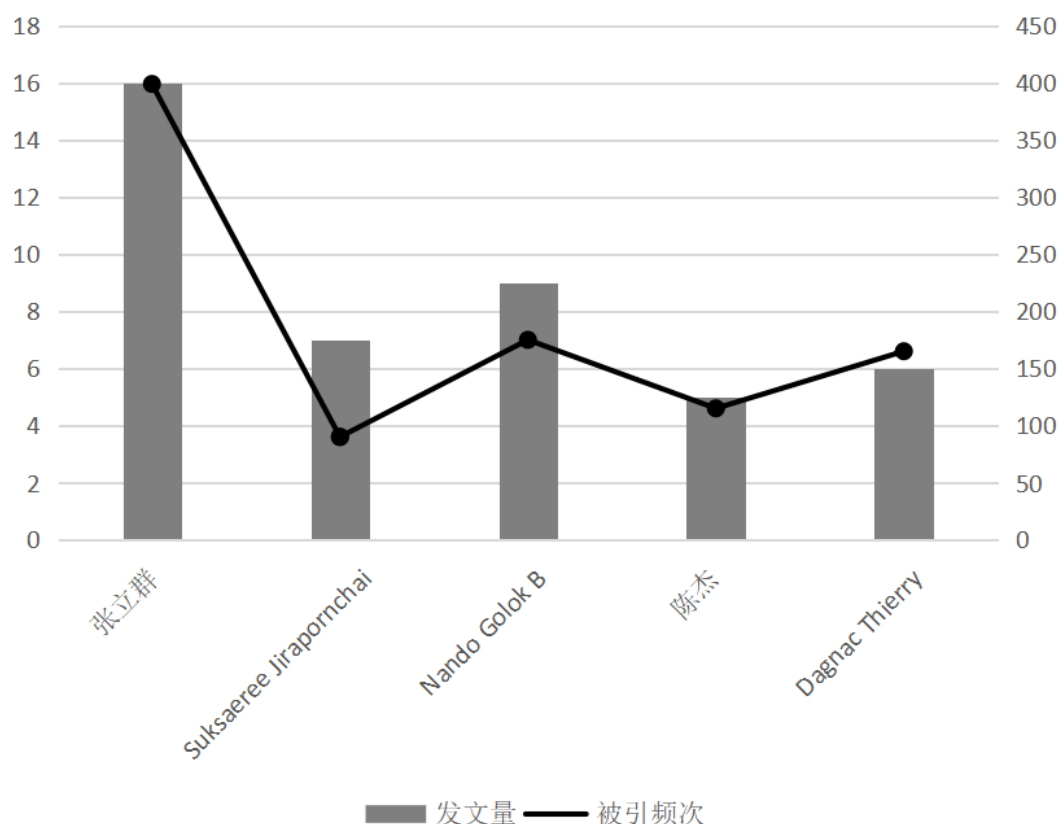


图3 橡胶增塑剂研究领域前5位高产作者发文及被引情况

2.4 研究热点分析

关键词是文章高凝练的点，可以直接反应文章的主要内容，关键词出现的次数越多说明越是该文章的重点。以关键词“Rubber plasticizer”为检索词在 WOS 数据库中检索，共检索出相关文章 483 篇，基于 VOSviewer 软件可视化分析 483 篇文章中的关键词，共有 11293 个关键词，其中频次出现 22 次以上的关键词共有 97 个。去除参考价值不大的关键词后生成共现网络图。如图 4 所示按颜色分为了三个聚类，相同颜色聚类有更强的相关性。

红色聚类出现频次较高的关键词有 oil (油)、performance (性能)、analysis (分析)、compound (复合物)、process (过程) 等，这一聚类主要是对各类橡胶增塑剂的合成方法、应用以及后期对复合材料性能影响的分析研究。其中对绿色环保型橡胶增塑剂研究最多。Dutt, Krishna 在《Synthesis and characterization of polymeric plasticizer from PET waste and its applications in nitrile rubber and nitrile-PVC blend》一文中提出一种 PET 废料中聚合物增塑剂的合成方法，对其进行

了表征并且应用在丁腈橡胶和丁腈-PVC 共混物中。最终发现利用该方法合成的聚合物增塑剂为高性能应用提供了优异的拉伸性能和耐老化性。Imiela, Mateusz 在《Effect of graphite and common rubber plasticizers on properties and performance of ceramizable styrene-butadiene rubber-based composites》研究中对石墨与普通橡胶增塑剂对可陶瓷化丁苯橡胶基复合材料性能影响的差异，研究发现石墨薄片的加入可以增强可挤出性并且保持优良的机械性能和陶瓷化性能之间的最佳平衡。[3]王明超在《高分子增塑剂对 EPDM 绝热层性能影响研究》一文中测试了加入高分子增塑剂的力学性能、烧蚀性能、老化性能、可挥发组分含量和界面粘接性，并与加入与传统增塑剂的材料性能作对比，探究了高分子增塑剂对绝热层的优良影响。[4]全玉勇在《高黏度环保橡胶增塑剂剂的研制及其在轮胎胎面胶中的应用》中探究了一种改性和调和工艺方式对环烷基原油减压馏分材料进行处理的方法，合成了一种高黏度环保型增塑剂，并且研究发现该增塑剂具有含芳香盘结构以及高黏度环保优势。介绍了高黏度环保橡胶增塑剂剂的研制方法以及在胎面上的应用。[5]

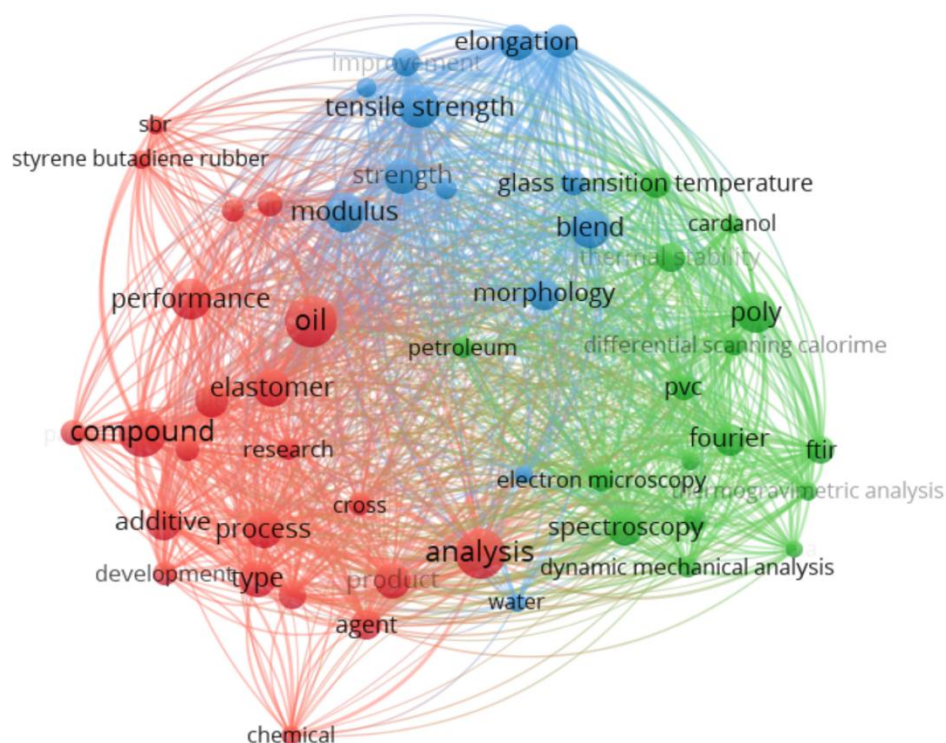


图 4 2013-2023 年 WOS 数据库中高频关键词的共现网络

蓝色聚类出现频次较高的关键词有 **blend**(混合)、**tensile strength**(抗拉力量)、**elongation**(伸长)、**modulus**(模量)等,这一聚类主要研究了合成出的各类增塑剂的性能。杨新华在《加氢脱酸-二段糠醛萃取工艺制备 A 1426 橡胶增塑剂》中提出了一种以中国石油克拉玛依油田九区稠油的减四线馏分油为原料,采用加氢脱酸-二段糠醛萃取的组合工艺制备 A 1426 橡胶增塑剂的方法,并且测试了制备出的橡胶增塑剂的性能,发现其性能指标可以满足橡胶市场对不同芳烃质量分数橡胶增塑剂的需求。[6]此外,杨新华在《环烷基减四线一次抽出油制备环保型芳烃橡胶增塑剂研究》中以环烷基减四线一次抽出油为原料,通过调入不同比例的可回收溶剂对原料进行稀释改善抽提效果。生产了芳烃含量高的环保型芳烃橡胶增塑剂。

绿色聚类出现频次较高的关键词有 **ftir**(红外光谱)、**electron microscopy**(电子显微镜)、**spectroscopy**(光谱学)等,这一部分主要是关于橡胶增塑剂研制与表征过程中所用到的研究方法及仪器的介绍。通过扫描电子显微镜(**SEM**)和透射电子显微镜(**TEM**)等,可以观察橡胶增塑剂与橡胶复合材料的界面结构、形态特征和纳米级分布情况。这有助于了解增塑剂在橡胶中的分散性和相容性,以及增塑剂的晶体结构和晶

型。有助于了解增塑剂与其他添加剂的比例关系,从而优化增塑剂的配方设计。通过电子显微镜在橡胶增塑剂研究中的应用,可以提供增塑剂与橡胶复合材料的微观结构和化学成分信息,有助于优化增塑剂的设计方案和改善橡胶材料的性能。红外光谱可以帮助鉴定和分析橡胶增塑剂中的化学成分。通过比对样品的红外光谱与已知增塑剂的光谱数据库,可以确定增塑剂的种类和含量,并鉴定可能存在的杂质。橡胶增塑剂的效果可以通过红外光谱进行评估。比较未增塑和已增塑橡胶在红外光谱下的吸收峰强度和形状,可以确定增塑剂对橡胶链的影响程度,从而评估增塑剂的增塑效果。红外光谱可以提供橡胶增塑剂分子的结构信息。通过分析红外光谱中的特征吸收峰位置、强度和形状,可以推断增塑剂分子的官能团、键合方式以及分子结构的一些特征。

3 结语

该文章综述了橡胶增塑剂的研究进展,发现人们对橡胶增塑剂的研究日益增长,橡胶增塑剂作为橡胶与塑料等领域不可缺少的材料越来越受到更多的人的关注,人们致力于研究让橡胶可塑性增强、流动性增强,便于压延、压出等成型的橡胶增塑剂,并且通过

各种原料、各种途径来对橡胶增塑剂进行研制并最终应用于橡胶中,致力于提高橡胶的各项性能。同时随着世界局势的变化,人们对橡胶增塑剂的研究从开发与研制各种各样传统橡胶增塑剂阶段正慢慢转向于研制绿色环保型增塑剂。这是由于世界环保问题日益突出,各种针对解决环境问题的条例的制定,对橡胶增塑剂也提出了新的要求,并且欧洲国家和美国等发达国家对绿色环保型轮胎的需求日益增加,为我国轮胎发展提供了一条有效路径。绿色环保型轮胎必须采用无毒、无害的材料制作,而橡胶增塑剂作为轮胎和橡胶制品中不可缺少的组成部分,必须符合无毒、无害、环保的标准。市面上大多数的橡胶增塑剂都不符合欧盟提出的标准,橡胶增塑剂急需像环保型橡胶增塑剂这样的替代品。所以近年来人们的研究重点转向研发环保型橡胶增塑剂。芳香基环保型橡胶增塑剂、植物油环保型橡胶增塑剂、脂肪酸酯类环保型橡胶增塑剂、石油系环保型橡胶增塑剂等橡胶增塑剂的开发与研究既响应了保护世界环境的呼吁,体现了我国大国意识的责任与担当,也为我国绿色环保型轮胎的制作与出口提供多方向的技术支持。环保型橡胶增塑剂的研究值得相关研究人员进一步探索,致力于让中国掌握这项技术的核心命脉。[7-16]

参考文献

- [1] Surya I, Ismail H, Azura A R. Alkanolamide as an accelerator, filler-dispersant and a plasticizer in silica-filled natural rubber compounds [J]. Polymer testing, 2013, 32(8): 1313-1321.
- [2] Yang D, Huang S, Ruan M, et al. Improved electromechanical properties of silicone dielectric elastomer composites by tuning molecular flexibility [J]. Composites Science and Technology, 2018, 155: 160-168.
- [3] Imiela M, Anyszka R, Bieliński D M, et al. Effect of graphite and common rubber plasticizers on properties and performance of ceramizable styrene-butadiene rubber-based composites [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 138: 2409-2417.
- [4] 王明超, 张治焄, 吴磊等. 高分子增塑剂对 EPDM 绝热层性能影响研究 [J]. 固体火箭技术, 2021, 44(04): 527-531.
- [5] 仝玉勇. 高黏度环保橡胶增塑剂的研究及其在轮胎胎面胶中的应用 [J]. 河南建材, 2019(06): 96-97. <https://doi.org/10.16053/j.cnki.hnjc.2019.06.054>
- [6] 杨新华, 吕贞, 教震等. 加氢脱酸-二段糠醛萃取工艺制备 A 1426 橡胶增塑剂 [J]. 石化技术与应用, 2021, 39(05): 335-337. <https://doi.org/10.19909/j.cnki.ISSN1009-0045.2021.05.0335>
- [7] 孙国权, 姚春雷, 全辉等. 环烷基馏分油加氢生产橡胶增塑剂技术开发与应用 [J]. 炼油技术与工程, 2022, 52(12): 1-6.
- [8] 马丙水, 郭春梅, 高志斌等. 浅谈石油系橡胶增塑剂分类方法 [J]. 石油商技, 2021, 39(06): 62-65.
- [9] 于恩强, 于淼, 冯涛等. 芳香基环保橡胶增塑剂在高性能工业胶板中的应用 [J]. 橡胶科技, 2018, 16(08): 36-39.
- [10] 肖英, 刘云龙. 环保型橡胶增塑剂的发展概况 [J]. 橡胶科技, 2017, 15(11): 5-8.
- [11] 王文福. 橡胶增塑剂——石油系芳烃油的改良 [J]. 世界橡胶工业, 2008(08): 8-10.
- [12] 杨新华, 吕贞, 教震等. 环烷基减四线一次抽出油制备环保型芳烃橡胶增塑剂研究 [J]. 石油商技, 2021, 39(04): 40-45.
- [13] 顾善龙. 加氢工艺条件对 N4006 橡胶增塑剂芳烃含量的影响 [J]. 石油商技, 2019, 37(06): 72-77.
- [14] 刘燕, 史晓滔, 乔琦等. 海疆 N4006/N4010 橡胶增塑剂的研制及其在 SBS 体系中的应用 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(03): 221-226. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.201800850>
- [15] 于恩强, 陈宏, 冯涛等. 高粘度环保橡胶增塑剂的研制及其在轮胎胎面胶中的应用 [J]. 轮胎工业, 2019, 39(02): 91-94.
- [16] 张卉. 减三线脱酸油生产橡胶增塑剂的工艺开发及标准化 [C]//《润滑油》编辑部. 中国润滑技术论坛 (2018)暨中国汽车工程学会汽车燃料与润滑油分会第十八届年会论文集. [出版者不详], 2018: 465-470.