

我国聚烯烃产业的现状及发展前景

乔金樑*

(中石化(北京)化工研究院有限公司 北京 100013)

摘要: 聚烯烃作为全球消费量最大的合成高分子材料,在我国发展迅速,目前我国已成为世界最大的生产国和消费国。本文概述了我国聚烯烃产业的发展历程与现状,并对发展前景进行了展望。首先简单介绍了我国聚烯烃产业的历史与现状,通过实例阐述了基础研究在推动产业发展中的重要作用,最后针对我国聚烯烃产业存在的问题,提出基础研究应重点关注的研究方向,强调除进行跟踪创新需要的基础研究外,还应该重视原创性技术开发需要的基础研究。

关键词: 中国聚烯烃产业; 产业发展史; 基础研究; 技术自主创新

Current Status and Development Prospects of China's Polyolefin Industry

QIAO Jin-liang*

(SINOPEC (Beijing) Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100013)

Abstract: Polyolefins are the most consumed synthetic polymer materials globally, and China is the world's largest producer and consumer. This article will introduce the current status of China's polyolefin industry and provide an outlook on its future prospects. Firstly, the author gives a brief introduction on the history and current situation of China's polyolefin industry, and then provides some examples of the important contributions made by fundamental research to the development of China's polyolefin industry. Finally, in response to the challenges of China's polyolefin industry, the author gives some suggestions that fundamental research should focus on, emphasizing that fundamental research for both tracking innovation and original technology development are all important for polyolefin industry.

Keywords: China polyolefin industry; Industrial development history; Basic research; Technological innovation

引用: 乔金樑. 我国聚烯烃产业的现状及发展前景. 高分子通报, 2026, 39(2), 287–293.

Citation: Qiao, J. L. Current status and development prospects of China's polyolefin industry. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(2), 287–293.

聚烯烃是世界消费量最大的合成高分子材料,年消费量超过2亿吨,广泛应用于农业、能源和医疗等领域,是国民经济的重要支柱产业。我国作为全球最大的聚烯烃生产国和消费国,其年产值已超过5000亿元。

1 我国聚烯烃产业发展的历史和现状

我国的聚烯烃产业在较短时间内实现了从“零”到“世界第一”的跨越式发展。20世纪60年

代,采用自主研发的小型间歇液相本体法聚丙烯装置,我国首次实现了聚烯烃产品工业化生产,标志着从无到有的重大突破。然而,由于间歇本体技术竞争力不足,20世纪70年代,我国开始引进国外先进技术建设聚烯烃生产装置。改革开放以来,我国聚烯烃产业进入快速发展阶段,产品逐步实现国产化替代,大部分产品摆脱了对进口的依赖。

与我国国民经济的高速发展类似,我国聚烯烃产业也呈现出惊人的增长势头。20世纪70年代,曾有一家国外知名企业表示,如果中国的聚丙烯年产能达到30万吨,将允许中国企业免费使用其聚丙烯技术。然而,出乎意料的是,我国聚丙烯年产能不仅迅速突破30万吨,更在2023年达到3800万吨,并于2024年成为净出口国,年产能超过4000万吨。目前,我国聚烯烃的年产能已突破7000万吨,约占全球总产能的30%。

我国聚烯烃产业能够实现快速发展,不仅得益于国内经济增长和制品出口的拉动,基础研究也发挥了重要的支撑作用。自成立以来,中国石化与高校及科研院所的学者进行了广泛而深入的合作,持续立项支持聚烯烃领域的基础研究。同时,公司还联合国家自然科学基金委员会设立了联合基金,支持了多支聚烯烃基础研究队伍的创新性工作,促进了我国聚烯烃基础研究的发展。国家在聚烯烃的基础研究领域也给予了大力支持,1999年和2005年,国家科技部连续2次批准设立了聚烯烃相关的国家重点基础研究发展计划(973计划)^[1,2]。1999年,在“973”计划相关项目中设立了“双首席”科学家制度。该制度由企业界科研人员提出技术需求,学术界的高水平学者则从高分子物理的基础研究出发,在理论上深入探讨聚烯烃的结构与性能之间的关系。企业界技术人员将基础研究成果应用于工业生产,取得了一系列创新成果并实现商业化,有力推动了我国高性能聚烯烃产业的发展。例如,通过系统研究乙烯在聚丙烯分子链间分布对高速双向拉伸聚丙烯(BOPP)树脂拉伸稳定性的影响,首席科学家杨玉良率领基础研究团队提出了高速BOPP拉伸稳定性的分子结构模型(图1),设计了满足高速拉膜工艺所需聚丙烯树脂的分子链结构,突破了国外公司“高速BOPP树脂等规度必须小于96%”的技术壁垒,成功实现了等规度 $\geq 98\%$ 的高速高强度BOPP树脂的产业化^[3],全面替代了进口产品,

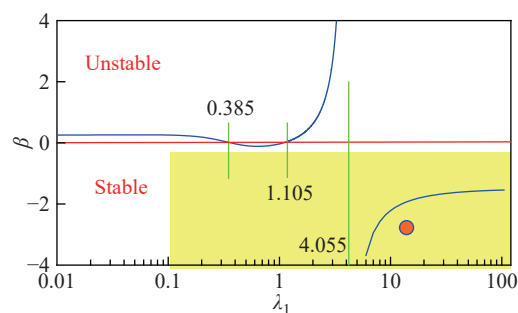


图1 高速BOPP拉伸稳定性的分子结构模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of stretching stability model of high-speed BOPP

促进我国BOPP产能从不足30万吨跃升至800万吨以上,荣获2004年度国家科技进步二等奖。在此基础上,中国石化北京化工研究院还发明了用外给电子体替代乙烯调控聚丙烯等规结构分布的新方法(图2),制备出多种传统方法难以制备的高性能聚丙烯树脂。其中,均聚高速BOPP树脂突破了“高速BOPP树脂必须共聚少量乙烯”的传统共识,首创了大分子量组分低规整度、小分子量组分高规整度的均聚聚丙烯树脂产品。该方法不仅适合制备高速均聚BOPP树脂,也是制备低VOC聚丙烯和低可溶物含量聚丙烯的重要方法。采用该方法还可制备均聚、无规和抗冲高熔体强度聚丙烯树脂。该项技术已成为我国新一代聚丙烯工艺的核心技术,已在20套工业装置上成功应用^[4],获得2012年度国家发明二等奖。2005年设立的聚烯烃“973”项目通过基础研究,设计并产业化了共聚单体在乙烯分子链间合理分布的高性能聚乙烯压力管材树脂(PE-100)^[5],不仅使我国摆脱了依赖进口的局面,还实现了向发达国家的出口,获得了中国石化科技进步一等奖。

通过“973”项目的实施,我国聚烯烃产业不仅成功实现了多个替代进口高端产品的产业化,还显著提升了“举一反三”的技术创新能力,推动了我国聚烯烃产业技术水平的持续进步。20世纪90年代,经国家发展和改革委员会(原国家计委)批准,于北京化工研究院建立了聚烯烃国家工程研究中心。在“973”项目的推动下,该中心建立了我国首个聚烯烃微观结构表征实验室,并建成了国内第一套制备型升温淋洗分级装置。通过系统研究共聚单体和等规结构在分子链间的分布及其对聚烯烃性能的影响(图3),研究团队提出了“共聚单体和等规结构分布是聚烯烃高性能化的

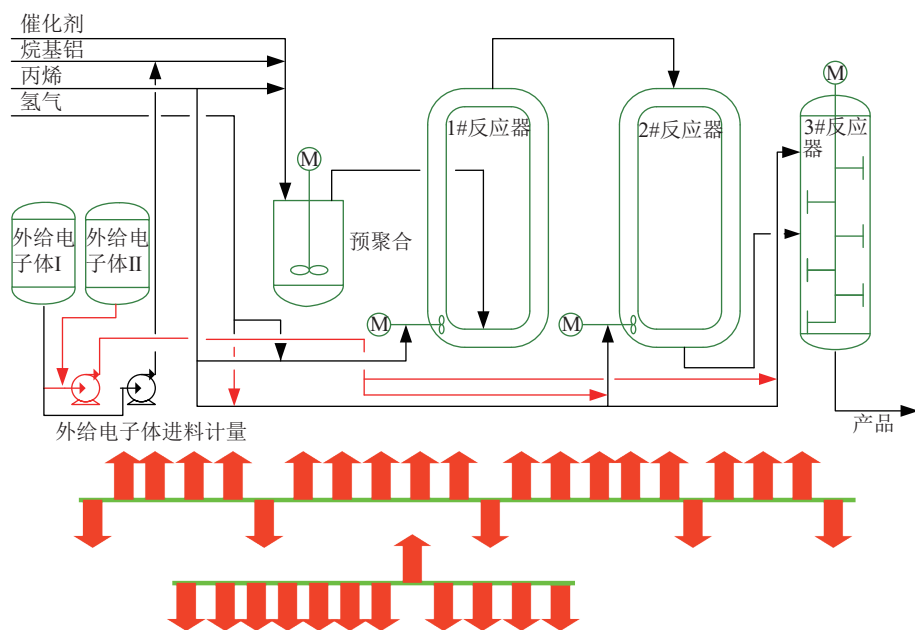


图2 用外给电子体调控聚丙烯等规结构分布示意图

Figure 2 Schematic diagram of PP stereoregular distribution controlled by external electron donor

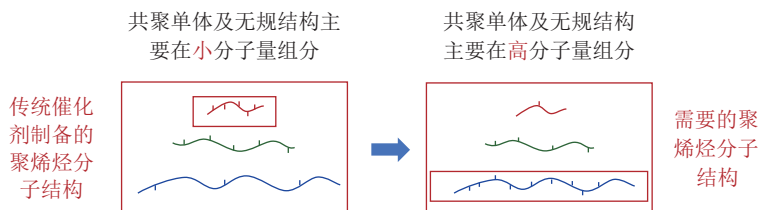


图3 共聚单体和等规结构在分子链间的分布及其对聚烯烃性能的影响示意图

Figure 3 Schematic diagram of the comonomer distribution and stereoregular distribution among molecular chains and their influence on the properties of polyolefins

共性关键科学问题”^[1]。通过控制共聚单体和等规结构分布,开发并实现了多种原创及高性能聚烯烃新材料的产业化,为我国聚烯烃产业从跟踪创新向原始创新的转变做出了重要贡献。开发的新产品,包括G树脂、抗菌防霉聚丙烯树脂、高熔体高抗冲聚丙烯树脂、直接聚合法耐高击穿电压聚丙烯树脂等原创新产品不仅大量替代了进口,还开拓了许多聚烯烃应用新领域。其中,首创的透明聚丙烯G树脂实现了共聚单体向高分子量组分移动,同时满足了高透明和低可溶物含量的要求,成为第一个被国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)立项,进行结构与性能关系研究的中国首创商业化高分子新材料(图4)。

2 我国聚烯烃产业面临的主要挑战与机遇

尽管我国的聚烯烃产业发展很快,但在聚烯

烃产品和技术等方面仍面临诸多挑战。除全球普遍存在的“白色污染”“绿色发展”和“产能过剩”的问题外,我国还面临“结构性过剩”和“乙烯原料成本高”等特有挑战。在聚乙烯相关产业方面,我国企业严重缺乏竞争实力。不仅原料成本远远高于其他主要聚乙烯生产国,并且在高压聚乙烯和溶液聚合技术方面缺少研究基础和技术积累,致使我国的聚乙烯树脂进口依赖度一直居高不下。此外,超高压聚乙烯电缆料、烯烃离子聚合物、特种极性聚烯烃、低缠结超高分子量聚乙烯(UHMWPE)和茂金属催化剂制备的聚乙烯(mPE)等产品也严重依赖进口。要扭转这种局面,必须利用我国未资源化利用的低成本原料以降低产品成本,并开发具有自主知识产权的高压聚合技术和溶液聚合技术。

在聚丙烯相关产业方面,我国不存在原料成本过高和明显技术短板的问题,进口依赖度较低,



**INTERNATIONAL UNION OF
PURE AND APPLIED CHEMISTRY**
Advancing Chemistry Worldwide

President Prof. N. Kalita Z. Tarasova (Russia)	Vice President Prof. Q. Ping Zhou (China)	Secretary General Prof. Richard Hartshorn (New Zealand)
Past President Dr. Marc C. Casu (USA)	Treasurer Mr. Colin J. Humphris (UK)	Executive Director Dr. Lynn M. Soley (USA)

February 24, 2017

Prof. Jiliang Qiao
Beijing Research Institute of Chemical Industry
SINOPEC
No. 14 Beisanhuan Donglu
Chaoyang District
Beijing
China

APPROVAL OF PROJECT TITLED "STRUCTURE AND PROPERTIES OF TRANSPARENT POLYPROPYLENE WITH VERY LOW SOLUBILITY" (#2016-028-1-400)

Dear Professor Qiao,

The Polymer Division (Division IV) has reviewed the proposal entitled: "Structure and Properties of Transparent Polypropylene with Very Low Solubility" and has approved this project. The total sum of USD 4000 has been allocated for the project over its lifetime of three years, starting immediately.

Please be aware that Technical Reports and Recommendations resulting from IUPAC Projects should be published in *Pure and Applied Chemistry*. The procedure is described at www.iupac.org/what-we-do/recommendations/procedure-for-publication/. The Bureau has established a procedure to allow publication in other journals in exceptional circumstances where it can be demonstrated by the Task Group and the Division or Standing Committee that publication in another journal is in the best interests of IUPAC. Approval for such an exception should be requested by the Division President from the Secretary General. This request should of course explain why publication in another journal would be preferable to publication in *Pure and Applied Chemistry*.

Please send requests for claim forms to receive payment for project expenses to Enid Weatherwax (enidweatherwax@iupac.org) at the IUPAC Secretariat; see the following page for

IUPAC Secretariat P.O. Box 11257 Research Triangle Park, North Carolina 27699 USA
T +1 919 485 3131 F +1 919 485 3130 secretariat@iupac.org www.iupac.org

instructions www.iupac.org/projects/claim-of-expenses/. As Task Group Chair, you are responsible for the approval and monitoring of all expenses associated with your project. You also have the autonomy to appoint Task Group Member(s), while duly informing the Secretariat. Additional information for Task Group Chairs has been compiled and a copy is enclosed for your records*.

Correspondence regarding the technical aspects of the project should be with Division IV. Interim and final reports will be expected in due time.

Thank you for your contribution to IUPAC's work.

With all best wishes,



Prof. Richard Hartshorn
Secretary General

cc: Prof. Greg Russell, Prof. Michael Walter, Prof. Jiacong He, Dr. Fabienne Meyers

* encl - also available at www.iupac.org/projects/information-for-task-group-chairs/

图4 IUPAC 对 G 树脂进行结构与性能关系研究的立项通知

Figure 4 IUPAC project approval notice for the study of the structure-property relationship of G resin

并已成为产品净出口国。然而,行业面临生产能力过剩、内卷严重,多数生产企业处于亏损状态。为实现扭亏为盈,除需要开发丙烯基弹性体、聚丙烯高压电缆专用料和茂金属聚丙烯等高附加值产品外,还需拓展聚丙烯木材、箱包、防弹材料等聚丙烯应用新领域,推动行业从产能过剩转向供需平衡甚至供不应求。

在其他高性能聚烯烃产业方面,我国存在明显技术短板的产品包括聚 1-丁烯 (PB-1)、聚 4-甲基 1-戊烯 (PMP)、环烯烃聚合物 (COC、COP)、双向拉伸聚乙烯 (BOPE) 树脂等宽分子量分布聚乙烯、无规聚丙烯和固相接枝聚烯烃,急需开发 PB-1 应用技术、降冰片烯和 4-甲基 1-戊烯等单体的低成本制备技术、聚烯烃固相接枝新技术和溶液聚合新工艺等。

3 通过基础研究促进我国聚烯烃产业发展的建议

在低成本乙烯原料方面,国外有富含乙烷的油田伴生气和页岩气,可以用极低的成本制备乙烯。我国缺乏低成本乙烷资源,聚乙烯成本远远高于主要竞争对手。幸运的是,我国近年来开发

了聚合分离技术,有望将数千万吨未资源化利用的烃类混合物转化为低成本乙烯原料(图 5)^[6]。当前亟需加快该基础研究成果的工业化进程,特别是要开发连续聚合工艺技术,并不断开发聚合分离技术制备的烯烃-马来酸酐交替共聚物的高端应用领域。

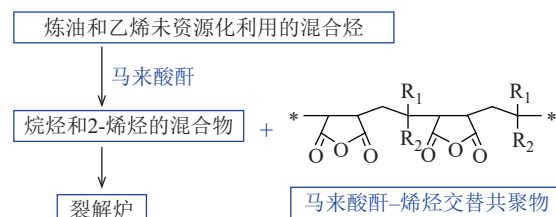


图5 聚合分离过程示意图

Figure 5 Schematic diagram of separation through polymerization

乙烯高压聚合技术生产的特色产品主要包括超高压电缆料和极性聚烯烃等^[1,3]。除通过跟踪创新开发具有自主知识产权的高压聚合技术外,还应基于基础研究,采用低压溶液聚合技术开发相关产品。溶液聚合技术特别适合制备软质和宽分子量分布聚烯烃产品,也可通过沉淀聚合制备低缠结高纯 UHMWPE 等产品^[1]。我国在烯烃溶

液聚合方面缺乏相关基础研究和技術积累。没有高温溶液聚合催化剂的研究基础, 尚未建立相图、结构分级、竞聚率测试等基础研究平台, 不具备开发先进工艺技术的基本条件。生产成本和产品性能落后于国外领先企业。急需建立研究平台, 并进行以应用为导向的基础研究。

其他高性能聚烯烃主要包括低缠结UHMWPE树脂、高强度UHMWPE纤维用树脂、mPE和茂金属催化剂制备聚丙烯(mPP)、COC、COP、PMP、PB-1和接枝改性聚烯烃等^[1~3]。在这些方面我国已具备了较好的研究基础, 但仍缺乏针对产业需求的基础研究。

针对我国在聚烯烃领域所面临的问题, 特别是高性能聚烯烃材料可能存在的“卡脖子”问题, 我们亟需在以下几个方面进行深入的基础研究。除了开展跟踪创新所需的基础研究外, 还应该进行原创技术开发相关的基础研究, 以推动我国聚烯烃产业逐步实现从跟跑向并跑, 乃至领跑的转型。

(1) 催化剂方面: 催化剂是高性能聚烯烃发展的灵魂, 也是我国有一定优势的行業。我国在传统的齐格勒-纳塔催化剂方面与世界水平没有明显差距, 也取得了有目共睹的成就。北京化工研究院20世纪80年代就向美国著名公司授权了聚丙烯催化剂专利使用权的许可^[1], 许可费用至今仍是该类专利技术对外许可的天花板。近期他们还基于新型内给电子体的创新, 发明了国际上活性最高的商业化聚丙烯催化剂, 并开发了与之配套的直接本体聚合法生产高纯净聚丙烯技术, 通过原创技术实现了超纯聚丙烯商业化生产, 成功应用于电容器等需要耐高击穿电压的领域。中国科学院化学研究所等单位的科研人员还发明并产业化了CS-1等性能优异的聚丙烯催化剂。然而, 在茂金属催化剂方面, 特别是用于高温溶液聚合的茂金属催化剂, 我国仍存在明显差距, 尽管如此, 迎头赶超的可能性依然很大。在非茂单活性中心催化剂方面, 我国拥有扎实的的研究基础和高水平人才队伍^[7~13], 只要研究人员将研究重心从论文导向转为应用导向, 深入开展基础研究, 便有望率先实现产业化, 并采用低压聚合工艺生产出目前只能通过高压聚合装置生产的极性聚烯烃等产品。目前, 我国需要重点开发高温烯烃溶液聚合催化剂, 并应用于POE等溶液聚合工艺生产的产品中。mPE同样属于需求量巨大且对外依

度很高的产品, mPE催化剂使用的主要原料, 包括硅胶载体和甲基铝氧烷(MAO), 甚至一些茂金属化合物, 均完全依赖进口。此外, 我国乙烯的生产成本显著高于大部分mPE生产国, 导致我国mPE产品市场竞争力相对较弱。我们除努力开发国产助催化剂MAO和硅胶载体外, 还应该创新硼类化合物等有望替代MAO的助催化剂和新型茂金属化合物, 不断降低生产成本, 提高产品性能。

(2) 特种高性能聚烯烃方面: PMP和COC是2个最值得我国开发的产品。PMP所用单体4-甲基-1-戊烯是由丙烯二聚制备的, 而我国丙烯严重过剩, 如果能在丙烯二聚催化剂方面有创新性突破, 对我国丙烯产业链的健康发展十分重要。COC产品的主要技术瓶颈则是共聚单体降冰片烯的成本太高, 如果能开发出降冰片烯低成本制备技术, COC将被更加广泛地应用, 这将极大地缓解我国乙烯原料成本高的劣势。

(3) 超高压聚烯烃电缆料方面: 我国在超高压输电方面具有明显优势, 使我国在西电东送、智能电网建设和新能源利用等方面高速发展。但是, 我们使用的高压(最高达800 kV)电缆料全部依赖进口。我们不仅要开发高纯聚乙烯产品, 并通过在聚乙烯和聚丙烯中添加具有电荷分散作用的纳米粒子提高电缆料的耐压等级, 还应探索制备高纯聚丙烯电缆料的可能性, 力争早日解决我国超高压电缆料完全依赖进口的局面。

(4) 在烯烃溶液聚合方面: 我们应重点补齐基础研究的短板, 建立高温溶液聚合催化剂、相图、结构分级、竞聚率测试等基础研究平台。不仅采用高温溶液聚合开发乙烯基弹性体、丙烯基弹性体、宽分子量分布聚烯烃、无规聚丙烯等超软和宽分子量分布聚烯烃材料, 也应探索采用沉淀聚合制备这些产品和低缠结UHMWPE新技术, 还可以采用溶液聚合或沉淀聚合方法进行颠覆性创新。例如: 开发原创烯烃嵌段共聚物(OBC)制备新技术; 开发耐极性官能团的单中心催化剂及助催化剂, 制备含羰基、酯基、羟基的功能化聚烯烃, 制备极性POE、极性聚乙烯、烯烃离子聚合物(萨林树脂)等高性能聚烯烃产品; 开发宽分子量分布聚烯烃树脂, 使低分子量组分与高分子量组分在不同反应器生成并通过溶液共混, 克服传统工艺的相分离问题, 并在高性能薄膜(BOPE等)用树脂、大型中空容器用树脂、厚壁管材用树脂等方

面进行应用。

(5) 乙烯相关聚烯烃方面: 我国相对其他主要生产国, 原料成本过高, 降低成本是未来 5~10 年技术开发的重点。我国有数千万吨烯烃和烷烃的混合物, 很难分离, 不能低成本资源化利用。聚合分离技术有望将混合物中的烯烃转化为高附加值的“马来酸酐-烯烃交替共聚物”, 不能聚合部分则可作为低成本乙烯裂解原料, 成本与页岩气相当。因此, 聚合分离是使我国石化产业扭亏为盈的重要研究开发方向。

聚合分离技术是中国石化在杨万泰院士“自稳定沉淀聚合”技术基础上开发的原创技术。目前, 该技术已在镇海炼化和北京化工研究院天津中试基地分别建立了 2 套年产 500 吨的中试装置。该技术可以大幅度降低乙烯裂解原料成本并缓解新建乙烯装置原料不足的问题, 还可生产多种高附加值聚合物新产品^[14-22], 应引起我国石油化工领域的重点关注。

(6) 丙烯相关聚烯烃方面: 我国存在的主要问题是产能严重过剩, 需要开发新的应用领域。在这方面我们已具备了一些研究基础, 在 5~10 年内实现突破的可能性很大。例如, 采用机头拉伸取向加工技术制备聚丙烯木材、箱包和防弹材料等有望大幅度提高聚丙烯的消费量, 使聚丙烯从供过于求转变为供不应求。利用我国在链行走催化剂方面的研发优势, 开发以单一丙烯为原料制备乙丙橡胶新技术也是减小丙烯资源供过于求的重要方向之一。

(7) 可持续发展方面: 聚烯烃的循环利用和生物基聚烯烃是两个主要发展方向。在循环经济、可持续发展的大环境下, 聚烯烃的总体发展趋势是产品高性能化和功能化, 原料低成本化和绿色化, 制品长寿命并且易回收。

4 结论

聚烯烃材料轻而强, 制造和加工温度低, 替代其他材料后, 为人类节能减排、食品安全、生活质量的提高做出了重要贡献, 也是助力减少二氧化碳排放的重要材料。随着聚烯烃材料循环使用比例的不断提高, 其消费量必将大幅度增加, 高性能聚烯烃材料必将成为全球竞争的焦点。我国作为后起的聚烯烃生产大国, 不仅需要进行跟踪创新, 以满足日益增长的国内市场需求, 更需要开展颠

覆性原始创新, 为全人类的可持续发展贡献力量。基础研究在高性能聚烯烃开发中必不可少, 我国高校与科研院所中有大量高分子物理、高分子化学及高分子加工领域的专业人才。若能在国家项目引导下, 推动这些科研人员与企业专家开展协同攻关, 必将显著加快我国在高性能聚烯烃领域赶超发达国家的进程。产学研用协同攻关模式是我国举国体制优势的重要体现, 已在“973”等国家重大科技项目中得到多次实践验证, 成效显著。高通量试验方法可以加快新产品开发速度, 是开发高性能聚烯烃材料的重要手段。我国的主要聚烯烃生产企业已装备有催化剂制备、聚合和产品开发的高通量设备, 如果与 AI 技术结合, 形成“聚烯烃+AI”高性能聚烯烃开发新范式, 会进一步加快我国聚烯烃新材料研发速度, 降低研发成本, 助力我国从聚烯烃生产大国转变为高性能聚烯烃生产强国, 为实现我国 2035 年跻身创新型国家前列的战略目标作出贡献。

参考文献

- 1 乔金樑, 宋文波, 郭梅芳. 高性能聚烯烃材料. 北京: 化学工业出版社, 2023.
- 2 Qiao, J. L.; Guo, M. F.; Wang, L. S.; Liu, D. B.; Zhang, X. F.; Yu, L. Q.; Song, W. B.; Liu, Y. Q. Recent advances in polyolefin technology. *Polym. Chem.*, **2011**, 2(8), 1611–1623.
- 3 乔金樑, 张师军. 聚丙烯和聚丁烯树脂及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- 4 宋文波. 非对称加外给电子体调控聚丙烯分子链结构. *中国科学(化学)*, **2014**, 44(11), 1749–1754.
- 5 张师军, 乔金樑. 聚乙烯树脂及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- 6 乔金樑. 原料替代助力我国石化产业高质量发展. *化工进展*, **2025**, 44(5), 2803–2805.
- 7 简忠保. 功能化聚烯烃合成: 从催化剂到极性单体设计. *高分子学报*, **2018**, (11), 1359–1371.
- 8 陈敏, 陈昶乐. 官能团化聚烯烃: 新催化剂、新聚合调控手段、新材料. *高分子学报*, **2018**, (11), 1372–1384.
- 9 Tan, C.; Chen, C. L. Emerging palladium and nickel catalysts for copolymerization of olefins with polar monomers. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, 58(22), 7192–7200.
- 10 Zhang, Y. P.; Mu, H. L.; Pan, L.; Wang, X. L.; Li, Y. S. Robust bulky [P, O] neutral nickel catalysts for copolymerization of ethylene with polar vinyl monomers. *ACS Catal.*, **2018**, 8(7), 5963–5976.
- 11 Tan, C.; Zou, C.; Chen, C. L. An ionic cluster strategy for performance improvements and product morphology

- control in metal-catalyzed olefin-polar monomer copolymerization. *J. Am. Chem. Soc.*, **2022**, 144(5), 2245–2254.
- 12 Wang, Y.; Wang, Q.; Tan, C.; Chen, C. L. Synthesis of polar-functionalized isotactic polypropylenes using commercial heterogeneous Ziegler-Natta catalyst. *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, 146(10), 6837–6845.
- 13 Dai, S. Y.; Li, S. K.; Xu, G. Y.; Chen, C. L. Direct synthesis of polar functionalized polyethylene thermoplastic elastomer. *Macromolecules*, **2020**, 53(7), 2539–2546.
- 14 郭照琰, 茹越, 胡晨曦, 张晓红, 乔金樑. 马来酸酐/马来酰亚胺共聚物及衍生物的光致发光研究进展. *高分子学报*, **2024**, 55(10), 1265–1279.
- 15 郭照琰, 高易, 茹越, 刘振杰, 张晓红, 乔金樑. 马来酰酐-醋酸乙烯酯交替共聚物的光致发光性能及荧光水凝胶的制备. *高分子学报*, **2024**, 55(9), 1155–1164.
- 16 Ru, Y.; Zhang, X. H.; Song, W. B.; Liu, Z. J.; Feng, H. S.; Wang, B.; Guo, M. M.; Wang, X.; Luo, C. X.; Yang, W. T.; Li, Y. F.; Qiao, J. L. A new family of thermoplastic photoluminescence polymers. *Polym. Chem.*, **2016**, 7(40), 6250–6256.
- 17 Wang, G. Y.; Qi, G. C.; Hu, C. X.; Zhang, X. H.; Liu, W. L.; Guo, Z. Y.; Ru, Y.; Zhang, L. D.; Wei, Z.; Wang, X.; Jiang, C.; Li, B. H.; Han, P.; Qiao, J. L. Superelastic polymer aerogel with superamphiphilicity. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(32), 42762–42771.
- 18 Hu, C. X.; Ru, Y.; Guo, Z. Y.; Liu, Z. J.; Song, J. H.; Song, W. B.; Zhang, X. H.; Qiao, J. L. New multicolored AIE photoluminescent polymers prepared by controlling the pH value. *J. Mater. Chem. C*, **2019**, 7(2), 387–393.
- 19 姚远, 张晓红, 茹越, 乔金樑. 超吸湿聚合物气凝胶的制备与性能. *高分子学报*, **2023**, 54(8), 1131–1138.
- 20 Yao, Y.; Zhang, X. H.; Guo, Z. Y.; Liu, W. L.; Hu, C. X.; Ru, Y.; Zhang, L. D.; Jiang, C.; Qiao, J. L. Preparation and application of recyclable polymer aerogels from styrene-maleic anhydride alternating copolymers. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 455, 140363.
- 21 杨柳, 舒泓艺, 陈冬, 赵长稳, 马育红, 杨万泰. 自稳定沉淀聚合制备功能性微球及其在环保领域中的应用研究. *高分子学报*, **2025**, 56(8), 1261–1278.
- 22 周江山, 刘恺元, 邵军强, 赵长稳, 陈冬, 杨万泰. 烯马树脂无醛胶黏剂: 新材料、新化学、高性能. *高分子学报*, **2025**, 56(5), 778–788.