

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 97 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2020 年 1 月 17 日

“聚焦精准催化的烃科学与技术前沿”论坛综述

一、国内外研究现状

烃是汽油、柴油等液体燃料、基本有机原料及“三大合成材料”单体的主要组成部分，支撑了人类社会的发展与变革，保障了人类的衣、食、住、行等日常生活所需。烃的转化是石油炼制、石油化工、煤化工等行业的基础，其主要涉及烃加工、烃合成、烃衍生、烃聚合等过程。当前资源短缺与环境恶化的双重挑战、社会经济日益旺盛的烃需求以及“原料多元化、过程绿色化、产品高端化”的行业发展目标要求我们，必须开发原子经济的高选择性烃转化技术。研究烃转化过程中化学键重构的关键科学问题与技术方法，即为“烃科学与技术”。

催化还原、催化氧化、酸催化等催化反应与工程技术是实现烃类高效转化的重要手段，但还未达到精准催化，仍有许多反应过程未实现原子经济。如在甲烷/合成气的催化转化、烃的催化选择氧化、高分子材料的可控聚合等反应中提高目标产物的选择性、抑制副反应一直是科学家矢志追求的目标以及研究热点与科学前沿。为此，需要建立以“精准催化”为目标的理论体系与技术方法，通过化学键的定向活

转化，实现目标产物原子经济性的精准合成。其主要包括基于反应预测的计算化学模拟、基于化学键定向活化的催化材料创制，基于目标产物高选择性合成的反应路径选择等。近年来，“精准催化”已取得诸多突破性的进展，相继发展了“描述符”催化结构理性设计方法，纳米催化、限域催化、单原子催化、形貌择向等新结构催化剂。OX-ZEO反应耦合、变径反应器等反应路径控制策略的催化新理念与新技术，推动了“烃科学与技术”的发展，但还需进一步深化并加速演进，为烃转化过程的原子经济提供技术支撑。

二、论坛概况

2019年9月11~12日，“聚焦精准催化的烃科学与技术前沿”论坛在上海张江举行。论坛由中国石油化工集团有限公司科技部谢在库院士、中国科学技术大学包信和院士、上海交通大学丁奎岭院士、中国石化石油化工科学研究院何鸣元院士共同担任执行主席，赵东元院士、周其林院士、韩布兴院士、唐勇院士、张锁江院士、杨万泰院士出席论坛。来自复旦大学、厦门大学、大连理工大学、华东师范大学、清华大学、浙江大学、南开大学、中国科学院、中国石化等单位的25位报告专家和38位圆桌研讨专家，共计220余名师生代表参加论坛。

本次论坛由中国科学院学部主办，中国科学院化学部、学部学术与出版工作委员会承办，中国石化上海石油化工研究院、中国科学院上海高等研究院、《中国科学》杂志社共同协办。

在中国石化上海石油化工研究院杨为民院长、中国科学院上海高等研究院邵仁忠副院长开幕致辞后，何鸣元院士介绍了此次论坛的由来和必要性。何鸣元院士指出，中国科学院学部八年前主办的首场科学与技术前沿论坛“促进可持续发展的催化科学与技术”，以及四年前的香山科学会议“由烃加工到烃合成——催化科学技术前沿”为此次论坛的召开打下了良好的基础。众所周知，近年来我国的烃科学与技术快速发展，部分开创性工作取得了国际同行的高度认可，因此，有

必要总结经验、凝聚共识、筹划未来。这次论坛将传统的“选择催化”深化为“精准催化”，涉及烯烃、芳烃、大宗化学品、精细化学品、三大合成材料等内容，并研讨我国在精细化学品、高端聚合物材料方面的短板与解决方案。相信本次论坛必将启发新思路新理念，促进我国烃科学与技术的创新发展。

三、重点关注的问题

本次论坛以“聚焦精准催化的烃科学与技术前沿”为主题，邀请多学科跨领域的专家学者，面向烃转化技术的发展目标与需求，围绕4个中心议题：（1）烃加工：资源高效利用与高值化；（2）烃合成：能源转型的基础；（3）烃衍生：高端化学品的绿色合成；（4）烃聚合：高性能材料关键技术的突破，结合国内外“精准催化”的研究现状、发展趋势和面临的挑战，进行多学科交叉、高层次深度的学术研讨，规划我国“烃科学与技术”发展战略，进一步完善“精准催化”的理论体系与技术方法。

与会专家共同凝练烃类资源高效利用与原料多元化制备烃类化合物过程的关键催化技术、科学问题及发展方向，形成具有共性和引导性的科研思路和指导方案，启发开展开创性工作，推动颠覆性技术的突破。同时，充分认识我国在高附加值聚合物单体等高端化学品绿色合成及其下游高性能材料聚合等领域的短板，从当前需求与未来预期两个层面共同梳理“卡脖子”技术，寻找突破方向，力争在部分领域达到世界先进水平。

四、报告内容

（一）议题一：烃加工

1. 包信和院士：天然气选择活化的催化科学基础

以储量相对丰富和价格低廉的天然气替代石油生产液体燃料和基础化学品成为了学术界和产业界研究与发展的重点。报告介绍了大连

化物所研究团队近年来基于“限域催化”的新概念，构建了高温稳定的晶格限域单中心铁催化剂；利用自由基表面引发和气相偶联生成产物的反应机制，实现了甲烷无氧直接制烯烃和芳烃。与天然气转化的传统路线相比，该研究彻底摒弃了高耗能的合成气制备过程，大大缩短了工艺路线，反应过程本身实现了二氧化碳的零排放。

2. 施章杰教授：惰性化学键活化及催化转化新路径

脂肪族碳氢键活化是合成化学最具挑战的研究领域之一。报告介绍了若干脂肪族碳氢键不同类型的化学转化催化体系。例如，利用配体调控过渡金属催化的手段，首次实现了分子内苯环碳氢键和甲基碳氢键之间的氧化偶联并实现了苯并二氢呋喃的直接构建；利用均多相催化融合的方式，初步实现了乙烷和苯之间的脱氢偶联及重排，选择性实现了乙苯和邻二甲苯的合成；利用光催化氧化的手段，实现了甲苯及其衍生物到苯甲醛或者苯甲酸的高效高选择性氧化。

3. 孙予罕研究员：甲烷-CO₂重整技术的挑战与展望

甲烷-CO₂重整可望在转化利用甲烷的同时大量利用 CO₂，但该过程的热力学特性决定了反应需要高温，而且其副反应易于产生积碳。因此，该过程工业应用的主要挑战在于解决 Ni 基催化剂的烧结和积碳失活问题。报告分析了 Ni 基催化剂的设计制备需要综合考虑的多种因素，介绍了 Ni-CaO-ZrO₂ 催化剂及其万方级工业示范装置运行情况，指出载体对 Ni 团簇表面的有效限域使得催化剂获得很强的抗积碳能力。

4. 黄正研究员：聚乙烯废塑料降解研究

烃类物质是化石能源的重要组成体，也是重要的基础化工原料。为应对可持续发展和绿色经济的挑战，一方面需要从自然界丰富的烃类物质出发，高效合成高价值的化学品，实现“分子价值的增量”；另一方面也需要发展温和有效的催化降解技术，将高分子量、稳定的烃类化学化工产品转化成可再次利用的小分子物质，实现“污染物质的

减量”。报告介绍了以小分子烷烃转化为基础、发展了各类聚乙烯高效温和降解的方法，并分析其前景和挑战。

5. 李明丰教授：烃类氧化、重整制氢催化技术发展方向

氢能是 21 世纪最具发展潜力的清洁能源，其中制氢是目前相对较为成熟的一环，也是发展“氢经济”的基石。报告指出，制氢技术呈现多元化格局、但天然气制氢仍将占据重要地位。其中，天然气催化部分氧化制氢具有“碳效率”更高、投资费用更低等优点，代表着甲烷氧化制氢技术的发展方向。从安全性和经济性考虑，需要发展本质安全的站内制氢技术，特别是微通道蒸汽重整制氢技术。

6. 方向晨教授：渣油加氢催化反应工程技术创新——从固定床到沸腾床

渣油是石油中馏分最重、杂质含量最高的组分，能否加工好渣油体现了炼化企业资源化利用的技术水平。目前，固定床渣油加氢技术是应用最广泛的渣油加氢过程，但随着原油的劣质化趋势越来越严重，固定床渣油加氢在催化反应工程上出现了越来越多的不适应问题。报告分析了影响固定床渣油加氢装置运行的各种因素及其工程成因，从解决这些工程问题的角度提出了应用沸腾床技术的总体解决思路。

7. 许友好教授：烃加工的催化反应工程技术创新——变径流化床反应器理论与实践

实现资源高效利用是化学工程和工业催化技术创新的重大方向，其中催化材料创新是基础、反应器结构创新是核心。单器流化床最显著特征是床内各处的温度和催化剂密度处于均匀状态，从而难以分区优化复杂气固催化反应的转化率与选择性。通过烃类串/并联反应中的反应与扩散、热力学和动力学差异规律的认识，提出了流化床分区调控复杂催化反应路径的设计理念，形成了重质烃高效利用、清洁油品生产等多项新工艺。

（二）议题二：烃合成

1. 韩布兴院士：以水为氢源实现催化加氢反应

催化加氢反应指在催化剂的作用下氢与其它化合物反应生成新分子的反应。水是丰富、无毒无害的资源，每个水分子含有两个氢，可作为氢源进行加氢反应，热化学催化、光催化、电催化均可用于这类反应。报告分析了两类加氢过程，一类是有机化合物、CO、CO₂的直接加氢，另一类是氢与有机化合物反应的同时，伴随着化学键的断裂，也称氢解反应。报告探讨了利用水中的氢作为氢源进行加氢的多个案例。

2. 潘秀莲研究员（由包信和院士代为报告）：合成气直接制烯烃的精准催化

合成气是包括煤、天然气、生物质等在内的碳资源转化为化学品和燃料的重要平台化合物。合成气转化制烃类产物的关键是控制中间体 C-C 键的偶联及加氢程度。报告指出，采用部分还原的金属氧化物与分子筛形成双功能复合催化剂，使 CO 的活化解离与 C-C 偶联有效地分离于两种不同活性中心上进行，从而在分子筛孔道的限域环境中进行择形偶联反应，定向生成低碳烯烃。

3. 王野教授：基于接力催化的合成气和 CO₂ 选择转化合成烃类化合物

费托合成是由合成气合成烃类产物的经典反应，但其产物的选择性受限。近期国内外几个研究团队在合成气转化和 CO₂ 加氢产物选择性调控方面取得重大突破。报告人团队利用反应耦合思想，构建金属氧化物纳米粒子与沸石分子筛组成的双功能或多功能催化剂，实施经由甲醇/二甲醚为主要中间体的接力催化，发展出合成气高选择性直接制低碳烯烃、芳烃和 C₂ 含氧化物（乙酸甲酯、乙醇）的新过程。

4. 杨维慎研究员：低碳烷烃催化转化

随着天然气和页岩气的全面开发，以廉价丰富的低碳烷烃为原料

生产高附加值化工产品是烃类利用发展的必然趋势。由于烷烃特有的低反应活性，开发具有高活性、高选择性和高稳定性新型催化剂和新型反应工艺是低碳烷烃催化转化研究的关键。报告介绍了乙烷催化氧化脱氢制乙烯、丙烷催化脱氢制丙烯、丙烷催化选择氧化制丙烯酸等低碳烷烃催化转化的最新进展。

5. 陆安慧教授：非金属硼化物催化低碳烷烃脱氢制烯烃

烷烃氧化脱氢不受热力学平衡限制，可在较低温度下进行，并且无积炭生成，有利于提高反应效率，降低能耗。报告指出，目前的催化剂能够有效活化烷烃 C—H 键，但同时易深度氧化生成 CO 和 CO₂，造成在高转化率下目标产物选择性差、深度氧化加重等问题。报告人团队制备了富含羟基的六方氮化硼并用于丙烷氧化脱氢制丙烯的反应中，获得了 20.6% 的丙烷转化率和 80.2% 的丙烯选择性。

（三）议题三：烃衍生

1. 周其林院士：镍催化烯烃偶联反应

烯烃是一类重要的有机化合物，如何直接利用烯烃作为原料构建 C—C 键是重要的科学问题。钯催化的 C—C 键交叉偶联的原子经济性较差，有必要发展使用廉价催化剂的原子经济性烯烃偶联反应。报告介绍了利用零价镍络合物催化分子间的烯烃与醛的氢酰化、烯烃与亚胺的氢烯基化等反应，着重反应机理的研究、结合理论计算实现了对全新反应路径的详细阐述。

2. 张锁江院士：离子液体与烃合成及其衍生技术

离子液体作为一种新型绿色材料，其特有的 Z 键、离子特性和微环境为烃类化合物催化转化及绿色转化过程的开发提供了新机遇。报告揭示了离子液体中静电力-氢键的特殊耦合作用，发现 Z 键是离子液体中除静电力之外最重要的作用力。结合国内外实际工业应用，报告论述了离子液体在以乙烯为原料经环氧乙烷合成碳酸酯/聚碳酸酯绿色技术，重点揭示了离子对协同催化到离子簇催化效应的新作用。

3. 杨为民教授：高端聚合物单体合成的催化新路线——2,6-萘二甲酸的高效催化合成

我国高端聚合材料对外依存度较高,很多关键核心材料受制于人,其根本原因是缺乏相应的聚合单体。报告指出,2,6-萘二甲酸(2,6-NDA)是一种高端的聚合单体,具有广阔应用前景。报告人团队通过催化剂创新,开辟了一条新的低成本的2,6-NDA生产工艺路线,以便宜易得的萘和丙烯为原料,通过烷基化反应合成2,6-二异丙基萘(2,6-DIPN),再通过液相催化氧化合成2,6-NDA。

4. 宗保宁教授：过氧化氢及其烃氧化和烃氮化

化学品的主要生产过程涉及烃氧化和烃氮化反应过程,如塑料、聚酯、尼龙、醇醚等。报告分析了目前我国烃氧化和烃氮化生产过程,指出过氧化氢法烃氧化和烃氮化反应过程的C和N原子利用率接近100%,是未来烃氧化和烃氮化制备化学品的发展方向。报告人团队成功开发了浆态床过氧化氢生产技术,进而发展了己内酰胺、环氧丙烷、环氧氯丙烷和环己酮等多项过氧化氢法绿色生产技术。

5. 吴鹏教授：更趋精准的催化选择性氧化——新型杂原子分子筛/双氧水催化体系的构筑与工业化应用

钛硅分子筛/双氧水选择性氧化催化体系实现了温和条件下烃类的选择性氧化,为大宗含氧(氮)化学品的绿色化生产带来了新的机遇,也为如何更精准实现这些氧化过程提出了更大的挑战。报告从大孔径钛硅分子筛的基础研究出发,介绍其在丁酮和环己酮氨氧化生产相应酮肟工业化过程中的应用特色,以及研发惰性溶剂体系丙烯双氧水直接环氧化制备环氧丙烷反应(HPPO)过程。

(四) 议题四：烃聚合

1. 唐勇院士：乙烯的可控性聚合与应用

新一代物质创制需要经济、高效、安全和环境友好的合成化学,核心之一是发展新型高效催化剂。报告人团队探索了在催化中心区域

引入配位性基团（边臂）调控催化剂的行为，发现边臂基团是通过它调节催化中心的空间形状和电子特性实现对催化物种性质的控制与调节，从而调控烯烃聚合活性和聚烯烃结构与性能。报告指出，未来将利用边臂效应开发烯烃与极性单体共聚、烯烃与 CO 的交替共聚、烯烃与 CO₂ 共聚制碳酸酯等技术。

2. 杨万泰院士：光催化表面 C—H 键转化新反应——对聚烯烃的表面改性

表面改性曾被列为 21 世纪重要新方向，但至今进展不大；因为其一，目前工业使用的仍是电晕、火焰等传统方法；其二，仍不能像无机、金属材料那样对表面进行任意化学裁剪。报告从三个方面介绍受限光催化引发的机理和应用，一是光表面改性，将聚合物表面 H 原子高效、快速转变成单层羟基、胺基等“广谱官能团”，赋予聚合物新性能；二是表面光接枝技术，用于聚合物在线处理，可制备表面超金属、表面接枝纳米粒子等特殊结构产品；三是可见光下活性聚合，以大幅提高工业生物过程的效率。

3. 乔金樑教授：高性能聚烯烃的开发

世界范围内聚烯烃是消费量最大的高分子材料，占据通用塑料产量的 65% 左右，产量近 2 亿吨。报告指出，聚烯烃是最难精准控制的聚合物。目前需要分子量分级与高通量技术相结合，通过开发精准聚合控制共聚单体分布和窄分子量分布的聚烯烃技术，才能开发高性能聚烯烃产品。为此，对催化剂开发提出更高要求，需要单活性中心、不使用贵金属、具有较高高温活性的溶液聚合性能、低成本的活性聚合催化剂。

4. 李伯耿教授：基于聚合动力学建模的聚合物精准合成技术

聚合物等化学产品的性能或功能与他们的结构紧密关联，产品结构高度定向的聚合反应对于聚合物的高性能化与功能化至关重要。报告人基于活性自由基共聚动力学、活性配位共聚动力学和非均相配位

聚合动力学及它们的模型化研究，制备了一些全新的高性能或特殊性能的聚合物或聚合物原位合金，使反应动力学研究成为聚合物产品结构精准定制的重要工具。

5. 阳永荣教授：超高分子量聚乙烯分子链解缠绕研究与聚烯烃材料的在线高性能化

高分子链缠结是高分子科学中的一个有趣的基本问题，迄今尚无明确定论，目前超高分子量聚乙烯（UHMWPE）的链缠结问题已成为研究热点。报告介绍了一种将传统钛系催化剂与多面体低聚倍半硅氧烷（POSS）的结合，可在较高温度下精准聚合，制备出分子链解缠结 UHMWPE。报告认为，POSS 改性的 Z-N 催化剂与工业应用的催化剂体系相似，可与气液法聚乙烯工艺结合，实现普通聚乙烯的高性能化。

6. 王静岱教授：乙烯聚合流化床反应器结构调控和产品高性能化

流化床聚乙烯工艺是中国最主要的聚乙烯生产工艺，由于工艺流程短，调节手段少，95%以上产品为通用料，工艺竞争力弱。报告人提出了气液固三相/气固两相流型复合共存的乙烯云聚合流化床工艺，通过构建单一反应器内差异化聚合环境、以催化剂穿梭聚合以调变产品结构，解决了在单一的流化床反应器中生产高性能聚乙烯产品的问题，提升了装置竞争力。

7. 王献红研究员：从二氧化碳制备生物降解塑料——机会与挑战

二氧化碳共聚物是目前可降解塑料领域的研发热点，其发展的宏观问题是与传统可降解高分子相比是否具有竞争力，而微观上的问题则是其催化效率能否满足工业化的要求。报告人介绍了环氧丙烷-二氧化碳共聚物以及环氧乙烷-二氧化碳共聚物的研究成果，探讨了最新的环境友好型铝卟啉催化剂开发情况，提出了二氧化碳基生物可降解材料在生物可降解地膜、快递包装薄膜、购物袋等领域的应用前景。

8. 陈学思研究员：聚乳酸生物可降解材料的合成应用开发

聚乳酸（PLA）是一种环境友好生物可降解材料，其性能与聚丙烯相近，改性后可替代聚乙烯薄膜，因而在包装制品、餐具、生物医药等领域应用广泛。报告人团队采用酸性多孔分子筛作为催化剂一步法制备丙交酯，相较于传统技术可降低 10% 以上的成本，解决了制约 PLA 应用推广的瓶颈问题。此外，选择合适的立体选择性催化剂，可以实现成本较低的外消旋丙交酯立体选择性开环聚合直接得到高熔点嵌段的 PLA 立体复合物。

五、专家圆桌研讨概述

围绕议题内容，论坛共召开四场专家圆桌研讨，分别由丁奎岭院士主持烃加工议题、包信和院士主持烃合成议题、何鸣元院士主持烃衍生议题、谢在库院士主持烃聚合议题的专家圆桌研讨。主要有如下观点。

1. 精准催化的催化剂设计及精准分析

赵东元院士表示，精准催化概念的提出将会很好地促进催化的发展，尤其是催化剂的设计将不再是炒菜式的。只有精准设计催化剂，才能有精准的催化。

丁奎岭院士提到，分析方法的发展对理论、机制的认知起到非常重要的作用。如果检测方法达到飞秒的时间分辨率，是否有可能检测到过渡态？

包信和院士表示，催化一直被认为是一个黑箱，因多数情况要求高温、高压催化剂；但现在的表征方法多是在低温、真空下，检测原子层很少、且反应速度很慢的过程。迄今，检测仪器的响应速度问题、原位动态问题一直未解决，但正在逐步逼近这个目标。

王野教授表示，从基础研究看，催化剂设计主要关注反应过程、活性中心、催化材料这三方面。

杨为民教授提到，催化剂从实验室走向工业应用可以分为实验室

研究-中试-工业示范三步骤。在工业试验中，要组建一个催化剂-反应工艺-工艺包矩阵式攻关的大团队，共同完成。

肖丰收教授表示，以分子筛合成为例，其结构的精准控制可能会导致其催化过程的精准控制；最近，除了控制孔道结构和硅铝比，已可以实现酸性中心位置精准分布在交叉孔道上或者非交叉孔道上。

杨维慎教授在回答王艳芹教授提问时表示，工业催化剂成型后，其孔的结构将显著影响扩散，特别是如丙烷脱氢等负压条件下的反应。

2. 限域催化

丁奎岭院士提到，均相催化中 C—H 键的活化，可以将一个金属插到 C—H 键中间去，然后可能发生一些过程，而且可以在很低温度下反应。这就让人想到限域效应，即怎样能够创造一种环境，让烷烃的 C—H 键，能够跟活性的金属物种有碰撞或相互作用的机会？

包信和院士表示，狭义的限域是把它限制在空间当中；而最近，我们慢慢拓展到广义的限域，就是内在的、本质的一种力，即催化体系的配位不饱和。这有些类似鱼鹰捕鱼的过程。

3. 均相催化与多相催化的融合

周其林院士表示，均相催化与非均相催化各有优势，那么两者的协同耦合是否可行？非均相催化需要高温是因为低温下转化率太低，如果利用均相体系与其耦合，即便是很低的浓度也可以转化，化学平衡会进一步向后移动，这种情况下就未必需要高温。同样道理，细胞能够将 CO₂ 和水合成长链的大分子，一个重要原因在于它是一个程序化的多酶联合催化过程，所以多步的均相和非均相耦合可能是精准催化的重要方向。

孙予罕研究员、施章杰教授、李明丰教授在讨论时表示，均相催化的反应条件相对比较温和，其选择性、或底物反应的限域条件是比较好的，这比较契合精准催化的主题，更适合于精细化学品生产。但相对而言，非均相催化非常适合于大宗化学品的转化，而这对于均相

催化是非常困难的。值得思考是否有望实现高温下的拟均相反应？

4. 催化的效率问题

包信和院士提到，精准催化需要关注的一个重要问题是如何实现高效转化。为什么植物吸一点光，就能合成大分子？其原因在于细胞膜是一个很大的限域体系，在单位面积或者体积下产生很高的表观浓度。目前光、电等非常规热催化的缺点是体系太开放了，所以需要有一定限域的、有大的表观浓度体系才可能有应用前景。就电催化而言，最大的问题是电流密度太低，只有约 20 mA/cm^2 ，这仅相当于热催化中 1% 以下的转化率，而工业级燃料电池最起码需要 1 A/cm^2 的电流密度，因此今后要向更高的电流密度做才有意义。

韩布兴院士在回答申文杰教授提问时表示，最近几年人工模拟光合作用有很多报道，但是大多数情况下产生 C_1 和 C_2 分子，而很难产生 C_3 以上的长链大分子。主要问题是目前光、电催化是在常温或者接近常温下进行，但是 $\text{C}-\text{C}$ 键耦合一般是在较高温度才可以实现。因此人工光合作用的关键是解决 $\text{C}-\text{C}$ 键的耦合效率问题。

5. 生物质制燃料与制化学品

何鸣元院士提到，现在比较普遍的观点是，生物质加工不宜做燃料、而要做化学品；而做化学品，最好尽量保留氧原子。那么，生物质制化学品，将来到底会形成多少份额？到底可以形成什么有特色的加工路线？

张锁江院士表示，从世界范围的趋势看，生物质是大方向，现阶段生物质直接做油品不现实，但作为医药品、高端聚合物单体的来源还是有可能的。

周其林院士提到，化石资源总有枯竭的一天，而光能、风能、核能等新能源可以解决能源问题，但生物质解决的是合成材料的原料问题。如果石油和煤都消耗完，用什么生产材料？只有生物质和二氧化碳。现在是做生物质方向的储备，要超前布局，但现阶段不宜直接与

煤化工、石油化工比经济性。

谢在库院士表示，生物质转化具有一定的绿色意义，但经济性的差距仍是巨大的。未来发展重点应该是系统考虑化学键的保留与活化，形成燃料、化学品、材料的产品集成布局。

6. 烃精准氧化

丁维平教授表示，现在烃转化的发展趋势是反应从双分子向三分子过渡，设计反应过程绕开分子氧的氧化过程，催化剂研究需要反应器过程、动力学模拟的配合。例如，变径反应器对催化过程的改变是非常大的；过去都是工艺配合催化剂，未来可能工艺或反应器对催化剂开发的影响会越来越大。

吴鹏教授提到，对于精准氧化，特别是经济价值高的丙烯环氧化过程，未来值得探索氧气直接氧化，或者退一步的“氢气+氧气+丙烯”双功能耦合过程。

7. 塑料循环利用

唐勇院士提到，从应用的角度，希望合成材料又便宜又好，聚乙烯是性价比最好的材料。但未来，发展可降解材料、以及材料的循环利用是新的发展思路，例如，从聚烯烃回到乙烯、丙烯的循环生产。

谢在库院士表示，目前提到限塑，大家一般首先想到的是回收制品、限制使用等手段，是否可以开辟一条精准催化的思路应对这个问题？我们还没有塑料降解产品的系统方案，如果通过精准催化的方式将聚烯烃产品降级使用、或将聚合物中的烯烃单体进行回收，会对我国白色污染问题的解决产生重大影响。

乔金樑教授提到，现在首先要回收，最终将回收的聚烯烃降解为乙烯、丙烯。基于此，精准聚合有两个方向，第一，把聚烯烃降解成乙烯、丙烯，这是最高挑战；第二，催化降解对聚合物的种类要求严格，但是实际应用的产品是各种聚合物的复合材料，这就要求我们从源头上进行精准聚合，使用单一组分的聚合物满足各种功能需求。

8. 聚烯烃发展方向

唐勇院士表示，有机化学多数关注官能团的转化、化学键的控制，但实现精准转化还比较难。如果从炼油开始、到最终产品的生产，都实现精准的高附加值转化，那么生产模式将从“产品+产品”变成“产品+精品”，这为有机化学提出了问题和挑战。

杨万泰院士提到，希望有机合成、催化和高分子领域的科学家要结合起来，共同解决我国烃聚合工业中仍存在的 key 问题。第一，目前工业中聚烯烃材料合成过程均属于自由基聚合和配位聚合，而基于配位聚合聚烯烃的极性共聚物研究中仍存在一些问题。第二，在石油化工产品中 C₄、C₈ 和 C₉ 等组分中有大量烯烃，在不分离的情况下加以利用将对烯烃聚合工业产生革命性影响。

王静岱教授表示，聚烯烃的后加工对聚烯烃性能影响很大，需从凝聚态层次，调控其结构，从而调控性能。

六、论坛总结与初步共识

论坛最后，谢在库院士作总结时指出，围绕能源安全新战略、能源发展新态势、生态文明新要求，从能源化工的基础和技术前沿看，需要聚焦精准催化的烃科学与技术。精准催化的概念初步凝练为三方面内容，即活性位精准设计与催化材料合成、反应路径的精准控制、反应工程的精准控制。从工业过程看精准催化的关键科学问题，需要着重关注“宏观与微观”“系统与基元”“表观与本征”等重要因素的协同。当前全球都在开展精准催化的研究工作，但还没有形成系统概念。面向未来，精准催化的理论体系与技术方法需要从事催化的科技工作者一起努力实现。

七、论坛的特色和创新之处

论坛特色是多学科交叉和高层次研讨。首先，论坛通过“精准催化”这一科学技术前沿将烃加工、烃合成、烃衍生、烃聚合这四个大

跨度的议题联系起来，在全链条的交叉研讨中碰撞出创新的火花。其次，不同于传统的“报告+提问”会议模式，本次论坛让具有相同议题的报告人在一个专题内作报告，每个议题最后留一小时时间邀请约10人左右的报告人和研讨专家进行圆桌讨论。四个议题共计38位圆桌研讨专家，其中包括10位院士。会上，主持人给出聚焦“精准催化”的议题相关主题陈述，并先请未进行报告的研讨专家简要评述该议题报告，然后开展头脑风暴式的学术交流和研讨，台上台下积极互动，精彩纷呈，让与会人员认识到了烃科学与技术中亟待解决的多个关键科学问题，启发开展开创性的工作，推动颠覆性技术的突破。

（作者：谢在库，中国科学院院士，中国石油化工集团有限公司科技部；包信和，中国科学院院士，中国科学技术大学；丁奎岭，中国科学院院士，上海交通大学；何鸣元，中国科学院院士，中国石化石油化工科学研究院；王仰东教授、金中豪高工、刘志成教授、周健高工、张静工程师，中国石化上海石油化工研究院；郑仁垟高工、管炳伟高工，中国石油化工集团有限公司科技部）