

乙醇下游产品研究进展

刘汉英*, 刘慧敏

(北京石油化工工程有限公司, 北京 100107)

摘要:论述了乙醇通过不同类型的化学反应转化为醛、烃、醚、胺、芳烃、高碳醇等高附加值产物的研究进展和工业化情况, 包括催化剂研发、工艺改进、产业化进展等, 为乙醇下游产品新工艺技术的研究和开发提供一些思路。

关键词:乙醇; 催化; 氧化; 脱水; 胺化; 烷基化; 高碳醇; 精制

中图分类号: TQ223

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0087-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.017

Research progress on downstream products of ethanol

LIU Han-ying*, LIU Hui-min

(Beijing Petrochemical Engineering Co., Ltd., Beijing 100107, China)

Abstract: This paper reviews the research progress and industrialization status of converting ethanol into high-value-added products including aldehydes, hydrocarbons, ethers, amines, aromatic hydrocarbons and higher alcohols via various chemical reactions. Relevant aspects covered involve catalyst development, process optimization and industrialization advances. This work offers references for the research and exploitation of novel processes for ethanol downstream derivatives.

Key words: ethanol; catalysis; oxidation; dehydration; amination; alkylation; higher alcohol; purification

目前世界上工业乙醇的生产主要以生物质发酵为主, 十分依赖粮食, 生产成本低, 产量受限。

2017年1月, 全球首套煤制乙醇工业示范装置落地陕西榆林, 该装置由中科院大连物理化学研究所和陕西延长石油集团共同开发, 打通煤制乙醇全流程, 并产出纯度99.71%的乙醇产品。该项目采用DMTE(二甲醚羰基化)法生产乙醇, 充分利用丰富的煤炭资源, 使得乙醇生产成本大大降低。利用煤基乙醇作为化工原料进行深加工, 开发乙醇下游包括含氧化合物在内的各类高附加值化学品, 或将煤基乙醇与化工产业链中的其他化工产品进行工艺耦合, 开辟新的工艺路线具有重要意义。

本文中重点介绍了乙醇发生氧化、脱水、醚化、胺化、烷基化等化学反应所生成一系列产品, 并介绍了这些产品技术近年来的研究进展和工业化情况, 为研究者提供了新的思路 and 方向。

1 氧化脱氢反应

乙醇可通过氧化反应生产乙醛, 乙醛下游又可以生产丁二烯、1,3-丁二醇、丁醇等。

传统的乙醇氧化法是乙醇和空气中的氧反应, 存在设备腐蚀、分离能耗高以及催化剂寿命等问题, 因此目前的研究多集中于开发更高选择性、更稳定且无需复杂预处理的催化剂, 以及探索电催化等更

温和的转化路径^[1-3]。Piriya等^[4]采用湿浸渍法制备了一种Cu/Mg-Al水滑石催化剂, 研究了该催化剂用于乙醇氧化脱氢生成乙醛的反应, 结果表明, Cu的加入增强了反应的催化活性, 乙醇的转化率随着温度的升高增加, 乙醛选择性降低, 原因是乙醛分解为CO₂, 在温度350℃时, 乙醛产率最高为41.8%。还原过程影响催化剂活性, 实验表明Cu/Mg-Al催化剂在没有任何还原步骤的情况下可实现连续10 h相对稳定运行时间测试, 是一种良好的乙醇氧化制乙醛催化剂。

除热催化反应外, 近几年乙醇电催化氧化反应被更多研究者关注。华东交通大学王超等^[5]合成了一种PdCoNi/C-X合金催化剂, 在电催化乙醇氧化反应中进行活性测试, 结果表明, PdCoNi/C催化剂的质量活性为2.86 A/mg, 是传统Pd/C催化剂的8.9倍, 且经4 000 s电流法测试, 催化性能保持在85%, 表明该催化剂对于乙醇电催化氧化反应具有高效稳定的催化性能。然而乙醇电催化氧化相比于热催化氧化, 大型规模化装置较少, 如果能实现乙醇电催化氧化规模化, 将使乙醇氧化的生产成本进一步降低^[6-7]。

在装置工业化方面, 乙醛的生产主要采用乙醇空气氧化法, 国内有多套装置在运行, 单套装置能力通常在3万t/a以下。乙醇氧化脱氢制乙醛技术已

收稿日期: 2025-11-13; 修回日期: 2026-07-06

作者简介: 刘汉英(1973-), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为石油化工和煤化工设计, 通讯联系人, liuhanying@bpdi.com.cn。

完成中试,工业化装置尚未落地。

2 脱水反应

2.1 乙醇脱水制乙烯

乙醇可通过脱水反应生成乙烯。在乙醇成本较低时,乙醇脱水制乙烯具有竞争力,可实现大规模工业化生产^[6-9]。

蒸气裂解的核心设备——裂解炉,其热量来源于燃料气,该过程产生大量的 CO_2 , 装置能耗较高。新的生产技术往往能从源头减少乙烯生产过程中 CO_2 的排放^[8]。

乙醇经脱水反应即可生成乙烯,随着煤制乙醇产业的发展,在煤价低廉地区,乙醇脱水制乙烯经济上存在可行性。同时,乙醇脱水制乙烯过程中产生的 CO_2 少,环境友好。且装置规模可以从几百吨到几十万吨范围内变化,投资灵活。利用乙醇脱水制乙烯正成为乙烯生产的新方向^[8]。

BP 公司第一代乙醇脱水技术采用改性 Al_2O_3 催化剂,是一种传统且成熟的固体酸催化剂,具有成本低、易获得、活性高等特点。反应温度在 $350 \sim 450^\circ\text{C}$,但高温下副反应加剧容易使催化剂积碳(结焦)失活,需要频繁再生催化剂,影响装置连续运行。

2013 年 BP 推出第二代乙醇脱水技术,该技术采用杂多酸催化剂,在 $160 \sim 270^\circ\text{C}$ 下催化乙醇脱水反应直接生成乙烯,反应全程乙烯选择性可达到 99%。该技术的推出,实现了每生产 1 kg 乙烯减少 3.7 kg CO_2 产出^[8]。

在催化剂研究方面,研究者们探索了多种 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 改性方法,如利用非金属元素对 Al_2O_3 进行改性。王诗瑶等^[9]采用水热法合成了多级孔 β 分子筛。表征结果显示该催化剂孔道结构类蠕虫状,比表面积 $622.0 \text{ m}^2/\text{g}$,介孔平均孔径为 9.551 nm,介孔孔体积占比可达 0.853,乙醇转化率可达到 96%,乙烯选择性可达到 89%。研究表明该催化剂是一种优良的乙醇脱水制乙烯催化剂。

在工业化发展方面,2025 年,1 000 t/a 乙醇低温法脱水制乙烯工业中试装置建成开车,完成 72 h 标定考核,并通过中国石油与化学工业联合会科技成果鉴定。该技术催化剂由中科院大连化学物理研究所开发,工艺包由北京石油化工工程有限公司合作开发。现已完成 10 万 t/a 工业化装置工艺包开发,为后续乙醇脱水制乙烯工业化奠定了基础。

2024 年,新疆天业汇祥新材料有限公司 10 万 t/a

乙醇脱水制乙烯装置设计完成。2025 年 6 月实现一次投料开车成功,稳定产出纯度 99.96% 的乙烯产品,是目前国内建成的单套规模最大的乙醇脱水制乙烯装置。该装置由北京石油化工工程有限公司设计。

2.2 乙醇醚化

2.2.1 乙醇制备乙醚

目前工业上乙醚来源于乙烯水合制乙醇的副产物,该方法生产的乙醚选择性低,不是优良的乙醚生产方法^[10]。

乙醇脱水法也可用于生产乙醚。乙醇脱水法常用的催化剂为均相催化剂 H_2SO_4 溶液,乙醚具有较高收率,然而成本较高,且 H_2SO_4 溶液有腐蚀性,生成的产物和催化剂难以分离。目前采用固体酸催化剂作为乙醇脱水制乙醚催化剂,可以有效弥补均相催化剂 H_2SO_4 溶液的不足^[10-13]。李鸿雄等^[10]研究了使用固体酸催化剂催化乙醇脱水制备乙醚的反应,乙醇在强酸性位点上分子内脱水生成乙烯,在弱酸性位点上分子间脱水生成乙醚。Wahyuningsih 等^[11]采用超声化学法合成了多孔 Al_2O_3 柱撑膨润土,将天然膨润土与柱化剂 Keggin-ion Al13 进行插层,分别采用常规搅拌法和超声法得到 Al 插层膨润土,并在 400°C 下焙烧 4 h,得到 Al_2O_3 柱撑膨润土 (Al-PILC),在 200 、 225 、 250°C 下进行反应,结果表明反应温度为 225°C 时,采用超声法合成的 Al-PILC 具有最佳的乙醇转化率 (46.05%) 和乙醚收率 (41.11%),表征结果表明,超声法合成的 Al-PILC 具有更高的总酸度值和比表面积,有利于提高催化活性。

2.2.2 乙醇制备 ETBE

利用甲醇制备得到的 MTBE(甲基叔丁基醚)可添加到汽油中作为汽油调和组分,然而甲醇毒性较大,不利于工业生产,且对环境不利。利用乙醇制备得到的 ETBE(乙基叔丁基醚)替代 MTBE(甲基叔丁基醚),能有效减少有毒性致癌物的释放和对地下水的污染^[6-7,14]。

ETBE 合成工艺中用到异丁烯作为原料,异丁烯成本较高、来源有限,以乙醇为原料制备 ETBE 反应过程中可先由乙醇制备异丁烯。首先,乙醇脱水制得乙烯;第二步乙烯二聚制备正丁烯;第三步正丁烯异构化制备异丁烯;第四步将生成的异丁烯再与乙醇进行耦合即可生成 ETBE。ETBE 仅使用乙醇作为原料经 4 步串联反应即可获得^[6,15]。上述 4 个反应均已发展为成熟的工业过程,如能研发出一种

高效催化剂将乙醇转化为 ETBE,可大大缩短反应进程,降低设备及操作投资,提高乙醇利用率,对于推进 ETBE 作为汽油调和组分在市场的广泛使用具有重要作用。

此外,由乙醇和叔丁醇也可制备乙基叔丁基醚(ETBE)。吴丁等^[15]采用酸化后的膨润土作为乙醇和叔丁醇反应的催化剂,合成了乙基叔丁基醚,相对于经典的大孔阳离子树脂催化剂,该催化剂制备简单,热稳定性好,无污染,反应后易分离,但反应转化率和产物的产率较低,作者分析原因可能是由于与 H^+ 交换的膨润土层间阳离子有限,B 酸活性低;加之,催化剂层间距较小也抑制了反应。但该研究也为其他研究者提供了一条新的催化剂研究和改性思路。

3 胺化反应

3.1 乙醇制乙腈

乙醇氨化法由于工艺简单、投资较少、条件温和成为生产乙腈的主要工艺^[16]。乙醇氨化法是将乙醇脱氢,再进行氨化,过程副产氢气的同时无极毒物质生成,且乙腈收率较高,该工艺的关键在于催化剂的研发。

蒋志国等^[16]采用共沉淀法分别合成了 $Cu-ZnO-La_2O_3$ (CZLA) 和 $Cu-ZnO-TiO_2-Al_2O_3$ (CZTA) 催化剂,分别用于乙醇氨化制乙腈反应,考察催化剂的活性、稳定性和选择性。表征结果显示, CZLA 与 CZTA 相比,一方面前者粒径较小,颗粒分散较均匀,后者分散不均匀,且粒径更大;另一方面, CZLA 比表面积为 $86.1\text{ m}^2/\text{g}$,是 CZTA 比表面积的 2.4 倍,平均孔径为 8.25 nm ,仅为 CZTA 的 $2/5$,由此推测 CZLA 活性更好。进行反应性能测试发现,在反应温度为 $270\sim 300^\circ\text{C}$ 时,2 种催化剂均可有效催化乙醇脱氢氨化合成乙腈,且 CZLA 活性高于 CZTA,然而当温度高于 310°C 后,催化剂活性下降,且 CZTA 催化活性下降更明显,这与表征分析结果一致。因此 CZLA 对于乙醇氨化制乙腈反应具有更好的活性和稳定性。

3.2 乙醇制乙基胺

近年来,乙基胺市场需求和生产规模发展迅猛,乙醇和氨气反应可以生产乙基胺,反应生成水,对环境友好,无污染,易实现清洁化生产。乙基胺包括一乙基胺、二乙基胺、三乙基胺。乙基胺产品市场容量较小,是医药中间体和农药中间体^[17-19]。 N -乙基乙二胺是一种重要的有机合成原料和医药中间体,

主要用于合成抗菌素、表面活性剂和农药等。研究表明,乙醇可在以 Al_2O_3 为载体的 $Cu-Mg$ 催化剂作用下,和乙二胺高选择性地合成 N -乙基乙二胺,且该催化剂具有良好的稳定性^[6]。

王玉忠等^[18]制备了一种 Co/AlY 催化剂,充分利用 NaY 分子筛中的超笼将钴锚定,利用氟化铵的刻蚀作用,使得钴于载体上分布得更均匀,在反应过程中不易团聚,有利于反应物和产物在催化剂中的扩散和催化剂的反应活性的提高;在用于乙醇胺化制乙基胺时,与 $Co/AlSi$ 催化剂相比,乙醇转化率和乙基胺选择性可以得到明显提高。

2025 年 6 月,安徽碳鑫科技有限公司 3 万 t/a 乙基胺装置投产,采用中科院大连化学物理研究所的技术,通过一乙基胺和二乙基胺循环可以灵活调整产品中三乙基胺的占比,最高可以超过 80%,产品质量分数均超过 99.9%,污水排放达标,COD 小于 $1\ 200\times 10^{-6}$,装置运行稳定。

4 烷基化反应

4.1 乙醇制乙苯

乙醇和苯发生烷基化反应可生产乙苯,该技术成熟且成本相比于苯和乙烯烷基化反应生产乙苯来说,前者工艺更加简单,成本也较低,具有良好的工业化应用前景^[20-22]。

许多研究者采用引入非金属元素等方法对 ZSM-5 分子筛进行改性处理,以抑制催化剂催化乙醇生成甲苯、二甲苯^[20-22]。

张亮等^[20]以磷酸二氢铵为磷源,采用低温水热晶化法合成了环状中空 ZSM-5 分子筛。研究表明,引入非金属元素后催化剂酸强度明显降低,生成的副产物减少,大大提高了乙苯选择性。反应 300 h 后,乙醇转化率 $>99.9\%$,乙苯选择性达到 98.4% 。王涵姿等^[21]采用等体积浸渍法制备了 Mg 、 Zn 、 B 改性分子筛,采用固定床反应器进行催化反应,考察催化剂的催化性能。结果表明,掺杂非金属元素后的催化剂对于乙苯的选择性有明显提升。当 B 负载量为 1% 时,苯的转化率达到 46.7% ,乙苯选择性达到 98.6% ,该研究为由乙醇烷基化生产乙苯提供了重要的研究基础和方向。

4.2 乙醇制二乙苯

乙醇与乙苯在 β 沸石分子筛催化下可发生烷基化反应生成二乙苯。该反应温度在 $350\sim 390^\circ\text{C}$,温度较高生成的副产物较多,因此影响产品纯度;且存在反应过程乙醇利用率和转化率低、催化剂寿命短

等缺点。

郑鑫源等^[23]以 β 沸石分子筛为催化剂,催化乙醇和乙苯生成二乙苯。研究表明烷基化反应与乙苯自身歧化反应同时发生,互相竞争,这将导致二乙苯收率降低,因此应尽可能抑制乙苯自身的歧化反应。研究结果显示,乙苯转化率随着反应温度升高而升高,但温度升高导致二乙苯选择性下降,同时研究发现,乙苯自身歧化反应在温度 $< 250^{\circ}\text{C}$ 条件下几乎不生成副产物苯,因此应在保证转化率的同时尽可能降低反应温度。在温度为 $200 \sim 220^{\circ}\text{C}$ 时,乙苯:乙醇 = 4~6 (摩尔比),乙苯空速为 $2 \sim 4 \text{ h}^{-1}$ 的工艺条件下,乙醇利用率 $> 85\%$,烷基化选择性 $> 70\%$,是乙醇烷基化制备二乙苯的最佳条件。

5 乙醇偶联制高碳醇

乙醇通过偶联反应可以生产 $\text{C}_4 \sim \text{C}_{12}$ 的高碳醇,开辟了乙醇深加工利用的新方向。高碳醇可用于生产多种精细化学品,例如洗涤剂、增塑剂、表面活性剂等。我国高碳醇消费处于较高水平,但高碳醇生产原料及生产技术限制了其生产,因此高碳醇大部分依赖进口^[24-26]。

乙醇偶联制备高碳醇反应过程涉及多个活性位点。首先由原料乙醇发生 Guerbet 反应生成丁醇,丁醇再发生偶联反应生成 C_6 、 C_8 、 C_{10} 、 C_{12} 等高碳醇,该过程为阶梯生长过程^[24,26]。碳原子间的偶联是该反应的关键步骤,主要的活性位点为 Lewis 酸或 Lewis 碱性位点。

东南大学褚佳昕等^[27]采用浸渍法制备了一种 Ni-HAP 催化剂,并与其他金属氧化物如 MgO 和 CaO 进行了对比。HAP (羟基磷灰石) 指的是一种酸碱性位点丰富的磷酸钙化合物。Tsuchida 等^[28]研究发现羟基磷灰石在乙醇生成丁醇的反应中,对于丁醇的选择性明显高于其他金属氧化物催化剂,且催化活性随 Ca/P 比值增大逐渐增强。根据褚佳昕等的研究,Ni 添加量为 10%, 450°C 焙烧 4 h 得到的催化剂对于乙醇偶联制高碳醇反应的活性最佳。在 250°C 下反应 6 h,乙醇转化率可达到 70%, $\text{C}_4 \sim \text{C}_8$ 的高碳醇产率达到 18.5%。实验证明反应过程中催化剂金属中心和酸碱中心协同催化,从而实现高碳脂肪醇合成。

广东工业大学王铁军老师团队^[29]公开了一种用于催化乙醇低温合成 C_8 +高碳醇的催化剂与制备方法、以及合成 C_8 +高碳醇的方法。该发明采用浸渍法和两步退火法,合成了 Ni/MOFC 催化剂,该催

化剂通过 Ni 和 N 形成配位,优化了金属表面电子结构,具有高度分散的活性位点和独特的电子效应,在 $70 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 低温条件下能够有效催化乙醇水溶液发生偶联反应,生成 C_8 +高碳醇,避免了高温条件下导致 CO_2 、 CO 、 CH_4 等副产物生成,显著提高了反应选择性和催化剂稳定性;同时,低温操作显著降低了能耗,为乙醇偶联制高碳醇工业化提供了新的技术路径。浙江工业大学江大好老师团队^[26]开发了一种大孔径氧化铝负载的铜基催化剂。该催化剂包含大孔径氧化铝载体以及负载在其表面的氧化铜和氧化镧,呈颗粒状,比表面积可达到 $500 \text{ m}^2/\text{g}$,孔容在 $1.0 \sim 2.0 \text{ cm}^3/\text{g}$ 之间,平均孔径可达到 30 nm,兼具大孔径和高比表面积,将其应用于乙醇制高碳醇反应,显著提高了原料、反应中间体在催化剂孔道中的扩散速度,有利于相对分子质量较大的高碳醇生成,有效提高了 $\text{C}_6 \sim \text{C}_{10}$ 脂肪醇的选择性,为实现工业化应用带来巨大优势。

据介绍,目前国内乙醇偶联制高碳醇 1 000 t/a 中试工作已完成,高碳醇收率高,丁醇收率可以灵活调节,经济效益好。2026 年将有乙醇偶联制高碳醇工业化项目落地。

6 乙醇精制

粗乙醇可用于生产无水乙醇,而无水乙醇可进一步脱除包括金属离子、水等在内的杂质得到精乙醇,又称电子级乙醇,其纯度可达到 99.99%~99.999% (质量分数,下同)。电子级乙醇可经酯交换法生产碳酸酯类,电子级碳酸酯类作为锂电池电解液溶剂,随着锂电池的广泛应用,市场需求也越来越大,具有良好的应用前景^[30]。

随着电子级乙醇生产工艺的进步,使得高纯度电子级乙醇的生产成本相比于之前大幅降低,给电子级乙醇和电子级碳酸酯类产品企业提供了新的发展机遇。不仅可以为企业拓宽市场、提升效益,还可以解决在该领域依赖进口的难题^[30]。

中国专利公开了一种粗乙醇的精制工艺和精制系统^[30]。该工艺首先进行干燥脱水,脱除绝大部分水后送入阴阳离子吸附床,脱除阴阳离子,然后送入第一精馏塔脱除甲醇等轻组分杂质和丁醇等重组分杂质,一次精馏即可实现脱轻和部分脱重;提纯后的乙醇采出后再送至第二精馏塔完全脱除重组分,最后经过滤得到电子级乙醇产品。最终的电子级乙醇收率可达到 96.8%,纯度 99.99%。该工艺技术路线大大缩短,仅涉及 2 个塔,设备投资小,且采用先

干燥后精馏的方式,大幅度降低分离难度和能耗,得到的电子级乙醇产品更加稳定,整体能耗明显降低。

7 其他

煤基乙醇生产过程中的中间产物乙酸甲酯,生产成本低。以乙酸甲酯为原料,下游可生产 MMA(甲基丙烯酸甲酯)、三乙基胺、乙酸乙酯等产品。

8 结语与展望

煤基乙醇合成技术的突破和工业化装置的陆续投产,促进了乙醇下游产业链的发展和工艺技术的革新。由乙醇可通过氧化脱氢、脱水、胺化、烷基化、偶联、精制等途径生产高附加值产品。这些高附加值产品市场好、价格昂贵,具有重要的生产价值,受到国内外研究者的广泛关注。目前的研究主要集中在催化剂研发和改进以及工艺技术的优化等方面,随着研究的深入,相信未来将研发出更多有价值的乙醇转化途径和新的工艺路线,开发出更多高端化学品,对于保障我国能源安全具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 张清德,宋法恩,武应全,等.一种用于乙醇氧化制乙醛的钼基催化剂及其制备方法:CN 118162155A[P].2024-06-11.
- [2] Kong L X, Guo C X, Song W K, *et al.* Unveiling the nitrogen-doping mechanism in carbon catalysts for oxidative dehydrogenation of ethanol to acetaldehyde[J]. *Materials*, 2025, 18(10): 2345.
- [3] Sabre V, Casuscelli G, Analía L, *et al.* Vanadium-containing modified clays as catalysts for acetaldehyde production by ethanol selective oxidation[J]. *Catalysis Today*, 2024, 442: 114911.
- [4] Piriya P, Piyasan P, Bunjerd J. Oxidative dehydrogenation of ethanol over Cu/Mg-Al catalyst derived from hydrotalcite: effect of ethanol concentration and reduction conditions[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2020, 21: 218-228.
- [5] 王超,章宣华,廖梦垠. PdCoNi/C 催化剂的制备及其对乙醇催化氧化的性能研究[J]. *现代化工*, 2025, 45(7): 167-173.
- [6] 王辉,裴仁彦,邵志军,等.乙醇下游及衍生产品的研究进展[J]. *工业催化*, 2019, 27(10): 7-14.
- [7] 张玉娟,李丛妮,陈国珍,等.工业乙醇下游产品技术研究进展[J]. *应用化工*, 2020, 49(7): 1845-1850.
- [8] 何盛宝,侯雨璇,王红秋.双碳目标下乙烯生产技术的发展趋势[J]. *现代化工*, 2022, 42(8): 60-64.
- [9] 王诗瑶,段慧娟,陈益胜.无钠多级孔 Beta 分子筛的制备及其在乙醇脱水制乙烯反应中的催化性能研究[J]. *天然气化工: C1 化学与化工*, 2022, 47(6): 77-82.
- [10] 李鸿雄,景旭亮,陈景.乙醇脱水制乙醚固体酸催化剂的研究进展[J]. *工业催化*, 2024, 32(12): 10-16.
- [11] Wahyuningsih P, Saviola J, Wijaya K, *et al.* Porous Al₂O₃-pillared bentonite synthesized by sonochemistry and its performance as a catalyst in diethyl ether production via ethanol dehydration[J]. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2024, 137: 2231-2252.
- [12] Pratika A, Wijaya K, Utami M, *et al.* The potency of hydrothermally prepared sulfated silica (SO₄/SiO₂) as a heterogeneous acid catalyst for ethanol dehydration into diethyl ether[J]. *Chemosphere*, 2023, 341: 139822.
- [13] Sarve T, Singh K, Ekhe D. Ethanol dehydration to diethyl ether over ZSM-5 and β -Zeolite supported Ni[sbnd]W catalyst[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2022, 139: 109397.
- [14] 王建国.甲基叔丁基醚装置改造为乙基叔丁基醚装置的技术分析[J]. *石油化工*, 2009, 38(12): 1302-1306.
- [15] 吴丁,陈超,邓圣军,等.酸化膨润土催化合成乙基叔丁基醚的研究[J]. *分子催化*, 2013, 27(5): 413-419.
- [16] 蒋志国,单玉华,周永生,等.铜基复合氧化物催化乙醇脱氢氯化合成乙腈[J]. *常州大学学报: 自然科学版*, 2010, 22(4): 19-23.
- [17] 孙超,任明月.乙醇催化胺化合成乙基胺反应的研究[J]. *杭州化工*, 2012, 42(4): 29-32.
- [18] 王玉忠,张伟,刘盛林,等.一种用于乙醇胺化制乙基胺的催化剂及其制备方法与应用:CN 112517051B[P].2022-11-01.
- [19] 唐国旗,田保亮,向良玉.一种用于生产乙基胺的催化剂及其制备方法和应用:CN 112691668B[P].2023-12-08.
- [20] 张亮,夏飞,李啸贤,等.环状 ZSM-5 分子筛在苯和乙醇烷基化反应中的应用[J]. *石油化工*, 2024, 53(1): 9-17.
- [21] 王涵姿,朱鹏,姚迪,等.纳米片型 ZSM-5 分子筛催化苯-乙醇烷基化制乙苯[J]. *现代化工*, 2025, 45(9): 167-172.
- [22] 李建军,甘玉花,王伟明,等.碱处理法改性 ZSM-5 分子筛催化苯与乙醇烷基化制乙苯[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2012, 51(5): 882-887.
- [23] 郑鑫源,李巧云,傅吉全.乙苯与乙醇在 β 沸石催化剂上的烷基化反应[J]. *北京服装学院学报*, 2006, (1): 59-64.
- [24] 王嘉,孙丹卉,乔一凡,等.乙醇催化转化制高值化学品研究进展[J]. *化工进展*, 2025, 44(5): 2587-2597.
- [25] 田园,姜舒洁,孟闪茹,等.合成气制高碳醇钴基催化剂研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(4): 1869-1876.
- [26] 江大好,刘欢,王清涛,等.一种大孔径氧化铝负载的铜基催化剂及其制备和应用:CN 119857488A[P].2025-04-22.
- [27] 褚佳昕,张兴华,房振全,等.Ni-HAP 催化剂的制备及其催化乙醇 Guerbet 缩合制备高碳醇[J]. *林产化学与工业*, 2025, 45(3): 27-36.
- [28] Tsuchida T, Kubo J, Yoshioka T, *et al.* Reaction of ethanol over hydroxyapatite affected by Ca/P ratio of catalyst[J]. *Journal of Catalysis*, 2008, 259(2): 183-189.
- [29] 王铁军,朱天宇,张浅.用于催化乙醇低温合成 C₈+高碳醇的催化剂与制备方法、以及合成 C₈+高碳醇的方法:CN 119819371A[P].2025-07-08.
- [30] 邓硕,刘汉英,王泽尧,等.一种粗乙醇的精制工艺和精制系统:CN 118702545A[P].2024-09-27. ■