

Comparison of Different Catalysts in Chemical Engineering Experiment of Applied University and Its Application Practice

Boyu Han Long Tang*

Daqing Normal University, Daqing, Heilongjiang, 163712, China

Abstract

Under the "Double First-Class" initiative and new engineering education framework, applied universities are transitioning chemical engineering talent cultivation from theory-centered instruction to a dual emphasis on engineering competencies and innovative literacy. As critical regulators of reaction rates, selectivity, and process energy consumption in chemical engineering, catalyst performance directly determines industrial process technical routes and economic feasibility. This study investigates the application of different catalysts in chemical engineering experiments at applied universities, examining their impacts on reaction conversion rates and product selectivity. Controlled experiments were conducted under the principle of "same reactant, same experimental setup, same evaluation criteria" to assess catalyst effects. Experimental accuracy was enhanced through increased trial repetitions and validation using existing campus teaching platforms. The study ensures controlled variables under safety protocols, strict adherence to experimental procedures for sampling and data processing, thereby establishing a foundation for improved experimental operability and stability.

Keywords

University Chemical Engineering Experiment; Catalyst; Effect Comparison; Application Analysis

应用型大学化工实验中不同催化剂效果比较与应用实践

韩博宇 唐龙*

大庆师范学院, 中国·黑龙江 大庆 163712

摘要

在“双一流”建设与新工科背景下,应用型大学化工人才培养正由以理论传授为中心向以工程能力与创新素养并重的方向转型。催化剂作为化工反应速率、选择性与过程能耗的关键调控要素,其性能差异直接决定了工业过程的技术路线与经济可行性。基于此,本文对应用型大学化工类实验中不同催化剂使用情况进行探索,考察不同类型催化剂对反应转化率及产物选择性的影响。遵循“同一反应物、同一实验装置、同一评价指标”开展对照试验,评价不同催化剂类型对结果的影响。同时增加试验次数提高试验结果的准确性,并联合校内现有的教学平台进行验证,旨在保证安全的前提下控制好变量,严格按照试验规程取样与数据处理,为提升实验操作性与稳定性奠定基础。

关键词

大学化工实验; 催化剂; 效果比较; 应用分析

1 引言

实验教学是高校应用型人才培养的重要环节,实验教

学水平的提高是新时期培养具有创新精神和国际视野的复合型、应用型人才的要求。下文围绕不同类型催化剂在典型化学反应中的活性、稳定性与适用场景开展对比性实验与应用化实践,不仅有助于学生建立以数据与机理为依据的工程判断能力,也能有效促进其将基础化学原理与实际工艺问题相衔接,从而更好契合应用型大学对复合型化工技术人才的培养目标。

【基金项目】应用型大学化工实验教学体系的构建与实践(项目编号: 231006655141348); 产教融合协同育人项目——教学内容与课程体系改革(项目编号: 2023WB00038)。

【作者简介】韩博宇(2004-),男,中国辽宁抚顺人,本科,从事应用化学研究。

【通讯作者】唐龙(1983-),男,中国黑龙江尚志人,博士,教授,从事化学工程与技术研究。

2 应用型大学化工实验中不同催化剂类型

将应用型大学化工实验的催化剂类型进行划分,是为了方便实验操作与实现教学目的,通常按催化剂所处的相态以及催化反应的作用方式为依据进行分类。

一类属均相催化剂,即催化剂与反应物处于同一相中,

常用的有浓硫酸（质子酸）、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ （路易斯酸）及可溶性碱类物质等，其在基本实验或综合实验中运用较为广泛。由于该体系较简单、反应快且易于启动，能够在短时间内完成反应、取样与滴定分析，因此常用来讲解反应速率的变化规律、影响因素等内容。值得注意的是，此部分虽然操作直观，但高腐蚀性、后处理繁琐等问题不容忽视，对废液治理、玻璃仪器提出更高要求^[1]。

另一种是非均相催化剂，指催化剂和反应物不在同一相上，以固态为主。在应用型大学实验过程中常见的有固体酸树脂、分子筛、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、负载金属催化剂等。该类催化剂采用过滤或者固定床的方法可实现催化剂的回收再利用，适用于教学活动中催化剂重复使用、活性变化及简单失活现象的实验演示，更接近工程实际。但在实验过程中，需要注意颗粒强度、装填均匀度和传质问题对实验结果的影响。

当涉及生物质转化或者精细化工实验模块时，还可以引入生物催化剂（固定化脂肪酶等），这类催化剂反应条件较为温和，相对而言对原料的选择性和耐受性十分友好，可以帮助学生掌握温度、湿度以及底物结构等因素对反应的影响，但它对操作条件非常敏感，同时保存及重复使用的要求也极为严苛，因而更适合作为扩展或是综合类实验开展。

3 应用型大学化工实验中不同催化剂效果比较与应用实践

3.1 酯化反应中均相酸催化剂的并行对照设计

设定浓硫酸以及 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 两种并行均相酸催化的乙酸乙酯合成路线，有利于在课堂上更直观地把“看不见的差异”用可实现且相对稳定的步骤予以表现，帮助学生和教师快速判断催化效率高低。首先，规范化的并行对照设计能够有效地培养学生意识到对于同一目的的实验需要考虑变量的可控性。其次，将蒸馏与后处理一同加入比较对象范围，可提升数据可信度。例如，统一蒸馏程序、分段收集馏分并记录蒸馏温度和质量，可以区分出蒸馏损耗以及催化效应；再在此基础上，采用同样的中和、干燥、再蒸馏的操作步骤，排除掉残留酸可能带来的副产物影响。此外，对水分及加料顺序等细节方面进行严格控制，加强实验的可重复性。具体而言，乙醇提前干燥测含水量、滴定用碱液当天现标、同一路径下需做平行实验等措施，这些都可以有效降低数据分散程度。除此之外，对所有的反应釜，均采取先升温回流后添加催化剂的共性措施，尽量避免局部过热情况的发生。针对 FeCl_3 体系，时刻观察记录 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 水解的现象，以比对两种不同催化方式的操作敏感性差异。综合考虑，并行对照试验设计的显著优势体现在不需要复杂的仪器设备，操作简单方便，不仅符合教学要求，还与应用型高校日常化工实验所用到的装置和仪器条件贴合。

3.2 固体酸树脂催化酯化的可回收工艺化实验组织

组织固体酸树脂催化酯化的可回收工艺化实验，在于让

学生在常见教学条件下，把“反应—分离—再用”按工程步骤跑通，且数据能对比、问题能定位。第一，用强酸性阳离子交换树脂替代浓硫酸开展酯化，价值在于把腐蚀、刺激性挥发与废酸处置压力降下来，同时让学生直观看到“催化剂留在床层、产物流出”的分离逻辑。树脂为颗粒固体，可装入玻璃柱或小型管式固定床，固定床用于树脂催化酯化在公开研究中较为常见，便于把实验现象与工程操作对应起来^[2]。第二，把流程组织成半连续循环更贴近应用型实验室条件：计量泵恒流进料，柱体外套恒温水浴控温，出口接冷凝器与简易闪蒸瓶回收乙醇并回流到进料瓶，这样既降低溶剂消耗，也把“回收率、循环稳定性”变成可测指标。通过调空速、床层温度、循环比三项变量，能够同步记录转化率、单位床体产量、床层压降、加热功率与回收乙醇体积分数，并把采样时间点固定下来，以便不同班组之间复现实验。第三，树脂能否反复利用依靠可溯源评价链路：运行前称量、跑后滴定酸容量，配以洗液电导率、再生液 pH 和冲洗体积记录，来判定是否存在“水垢”“酸损”。再生按：乙醇冲洗—稀酸活化—中性水洗固定顺序进行，并在记录表上标记终点判断，确保每个运行批次的起始条件都是一样的。装填时分层轻振、床顶加装惰性填料整流，运行过程中根据压降突变判断是否结块或者细粉移动，采用 U 形压差计或小型差压传感器测定压降，并对进口/出口温差进行测点，排除局部放热。产物端则采用外标法气相色谱定量测定酯、乙醇及酸含量，每跑完一程都要做物料衡算，若误差值超过所设定范围不仅要追溯冷凝效率和漏点，还要排查取样误差。

3.3 气固催化脱水实验的活性—选择性—失活三维比较

在应用型大学开展管式固定床乙醇脱水实验时，可将 ZSM-5 与 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 放于同一套流程中作“活性—选择性—失活”的三维比较，促使学生将催化剂的差异落到实处，通过可对比的数据来阐明催化剂的不同之处，并非像以往那样仅对比某一时刻的产气量。第一，评价更全面：两种催化剂统一焙烧活化，并且过筛到同一粒径等体积装填，固定乙醇蒸汽分压和载气流速，按照温度与空速分档取点，出口先冷凝除水再进 GC 测乙烯、乙醚与轻烃，得出转化率以及乙烯选择性数值后，可直观地观察到 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 大约是在 410 ~ 440℃ 范围内随温度上升而乙烯选择性逐步上升并趋于稳定的变化。第二，比较更具可比性：利用同一套冷凝系统、同一组冷凝瓶、取样袋、标样以及相同的方法校正气量，结合重复点和碳守恒检查项目，能够最大限度消除冷凝损失、流量漂移、装填不均造成的误差，便于不同班组之间的横向对比，也达到了固定床和气相色谱实验训练学生的规范操作要求^[3]。第三，失活比更落地：连续运行之后同步记录床层压降、轴向温度以及催化剂增重，用“保持相同转化率的温度补偿值”来表征衰减速率，并用稀氧原位再生再回到原条件点，通过重复测量形成数据循环，且采用图表方式

反映出来,以解释 ZSM-5 的积炭失活过程及再生活性恢复,同时增加 2 个粒径点和含水点的数据结果,分析扩散与水抑制是否影响乙酰副反应。

3.4 过氧化氢分解体系的催化剂效应量化比较

在应用型大学的动力学实验中,开展 H_2O_2 分解量的 MnO_2 、 KI 及 Fe^{3+} 三种不同催化体系的定量比较实验,其目的是强调可比、可查及可复用功能。一是保证可比:三组试验均采用同一套试验,保持 H_2O_2 初始浓度、总体积、恒温温度及取样间隔相同;开始时分别加入一定量的 MnO_2 粉体、定体积 KI 溶液、定浓度 Fe^{3+} 盐溶液;取样后立即加入定体积稀硫酸冷却,获得所测值后的滴定操作作为碘量法或酸性高锰酸钾法测得残余 H_2O_2 的值,做 $\ln(C_t/C_0)-t$ 或 $1/C_t-t$ 回归求表观 k 值,并重复 3 次以上操作取得标准偏差、95% 置信区间。二是通过“浓度法+量气法”互证:即在相同条件下用量气管记录析出氧气体积数值,按物料关系换算成消耗的 H_2O_2 数量,并与其对应的滴定结果中 C_t 相对照,同时将滴定空白、终止剂加入顺序、终点判断依据、量气管密封性能检验以及读数视差控制等记录到操作卡上,以消除终点过滴或终止不到位引起的数据偏离。第三,针对不同的系统控制误差源: MnO_2 固体体系要记好搅拌转速、粉体团聚、过滤分离时间,避免取样滞后、传质受限对 k 的影响,并做好水洗后低温烘干再称重工序,排除夹带溶液体造成的“假失活”; KI 体系要避免强光,取完样后马上滴定; Fe^{3+} 体系要定酸度测 pH 值,防止水解产生沉淀造成活性变化。第四,在三档温度下重复上述过程求 k ,做 $\ln k-1/T$ 直线得到表观活化能,分别对比三体系的温度敏感性,方便实验教学深入讨论差异原因和工程中不同的选择条件。

3.5 油脂转酯制生物柴油的催化体系分层比较与工况窗口确定

在生物质化工实验模块中,以原料酸值为分流依据,先用 KOH -乙醇标准溶液滴定测出酸值,并按教学可执行阈值将低酸油与高酸油分开,低酸油直接进入碱催化转酯,高酸油先进入酸催化预酯化降酸后再转入碱催化段,其中除了产率的记录以外,还应该记录皂化、乳化、分层时间及界面清晰度,确保每批物料都重复操作两次以上,通过批间差值和平均值来表明该项实验的操作稳定性^[4]。同时引导学生把“酸值高就难分层、易起皂”这一现象与原因关联起来,并说明预酯化后的酸值降低幅度将作为能否进入下一步的准

入条件。其次,碱催化试验需作 $NaOH/KOH$ 平行对照实验,除了碱种类、碱的用量不同外,其他条件要写入作业卡内,保持完全一样,即甲醇/油摩尔比、温度、搅拌转速、反应时间等都相同。另外,加入的甲醇要提前脱水密封,反应器、量器等反应装置也需在烘箱内烘干、冷却后再使用,这样有利于防止水分引入而导致的假性误差。待反应完毕后静置分层,测甘油相体积分数、上层甲酯相含水量和残碱量,水洗至洗液电导率稳定后停止,最后减压脱醇干燥,记录好相应的脱醇时间、能耗以及洗液电导率,以便评价后处理负担。为进一步增加可回收催化剂的工程对比对象,可在此基础上将固体碱(CaO)加入上述实验体系中,以相同物料比与反应温度运行,并在反应结束过滤回收催化剂计算其损失量,连续循环时同步记录甲酯含量衰减、过滤阻力以及分离困难程度,以便与均相碱体系的洗涤用水量、废液处理及操作时间等进行比较。在产品端用气相色谱外标法或 $GC-MS$ 计算脂肪酸甲酯含量,同时实测黏度和闪点,通过“甲酯含量达标且黏度、闪点在允许范围”,筛选出合适的温度、碱量及洗涤强度区间,作为可用于教学工况窗表。注意样品留样准备复测酸值和水分,为查证误差来源提供依据。

4 结语

根据应用型大学化工实验的教学目标及实际条件,在同一反应体系内比较不同催化剂的循环使用试验,并加以验证,可把抽象的催化差异转换成具有可操作性、可量化、可重现的实验结果。同时不同的催化体系间存在活性、选择性、分离与再用等方面的差异,不仅为学生分析工程取舍问题提供一种全新思路,还实现从实验教学到工程化思维转变的过程。

参考文献

- [1] 谢宇,殷祚炷,周丹. 化学工程与技术专业高水平创新应用型研究生人才培养模式的探索与实践[J]. 广东化工, 2024, 51(6):153-155.
- [2] 宋琪,李璟明,努尔古丽·拉提甫,等. 物理化学综合实验设计——双金属磷化物的制备及应用[J]. 化工管理, 2024(34):52-56.
- [3] 陈丽军,刘云花. 镍基气凝胶材料制备、表征及催化甲烷重整教学过程设计研究(通信作者)[J]. 科研成果与传播, 2024(7):174-179.
- [4] 赵星,李丞高,王丽娜. 新文科背景下天津民办本科高校交叉学科建设路径及治理机制研究[J]. 南方论刊, 2024(5):97-99.