

# “催化剂”认知困境与教学对策

吴晗清<sup>1,2</sup>, 李豆豆<sup>1</sup>

(1. 首都师范大学教师教育学院, 北京 100037; 2. 首都师范大学化学教育研究所, 北京 100048)

**摘要:** 催化剂是化学教学中非常重要的概念, 然而学生存在深度的认知困境。基于此, 指出在教学中要善于运用相关的理论解释催化剂如何参与化学反应, 如何加快反应速率但不改变化学平衡, 指出催化剂对加速化学反应具有高度的选择性。从不同的角度对催化剂的实际应用进行归类, 加强学生对催化剂的科学认识。

**关键词:** 催化剂; 化学教学; 实证研究

**文章编号:** 1005-6629(2018)3-0087-04

**中图分类号:** G633.8

**文献标识码:** B

## 1 催化剂教学及相关研究

### 1.1 课标与教材

催化剂是化学教学中非常重要的概念。新课标在《化学2》“化学反应与能量”主题中“催化剂”的内容标准是, 通过实验认识化学反应速率, 了解控制反应条件在生产和科学研究中的作用。在选修4《化学反应原理》“化学反应速率与化学平衡”主题中“催化剂”的内容标准是: 知道活化能的含义及其对化学反应速率的影响; 通过实验探究温度、浓度、压强、催化剂对化学反应速率的影响, 认识其一般规律; 通过催化剂实际应用的事例, 认识其在生产生活和科学研究领域中的重要作用; 通过实验探究温度、浓度、压强对化学反应速率的影响, 并能用相关理论进行解释。

现行的化学高中教材有人教版、鲁科版和苏教版, 三个版本的教材虽然在编写理念和呈现方式上各具特色, 但是其核心内容与新课标一脉相承。三个版本对催化剂的介绍突出化学反应研究的不同视角, 有助于学生建立合理的认知结构。人教版呈现了3个实验和4个科学探究实验得出催化剂对反应速率的影响, 简单运用碰撞理论解释催化剂的作用, 并未提及过渡态理论; 鲁科版则主要通过提供的5组表格数据和2个图示结合基元反应、反应速率常数、活化能等形成对化学反应速率的定量认识, 运用碰撞理论和过渡态理论对催化剂对反应速率的影响进行更加科学的解释; 苏教版主要通过3个定性的对比实验形成结论, 结合碰撞理论和过渡态理论进行简单解释<sup>[1]</sup>。

通过充分解读课程标准和教材, 笔者认为不

同阶段“催化剂”的意涵不同, 不同模块的深广度也不同。必修模块对催化剂的教学要求是, 从定性的角度认识化学反应速率有快慢之分, 知道催化剂对化学反应速率有影响, 能够举出生产生活中催化剂影响化学反应速率的实例。而选修模块则在必修的基础上研究化学反应速率的定量表达, 能够解释活化能的含义, 并定性了解活化能的高低与反应速率大小的关系, 在知道催化剂能改变化学反应速率的基础上解释催化剂及其影响反应速率的基本原理, 知道催化剂具有选择性。而且结合三本教材对催化剂内容的处理, 教师可以在学科基础的背景下, 凸显反应机理研究, 即要求学生能够较为全面地了解催化剂的原理、特征和应用。

### 1.2 相关研究

在知网上以“催化剂”为关键词检索文章, 匹配的大都是高效催化剂的选择与应用和新型催化剂的研究进展, 详细介绍简单催化剂的反应机理和相关内容的文章较少。其研究主要有以下三个方面: 一是从物相的角度将反应分类, 不同类型的反应选择不同的催化剂。物相有均相和多相两种, 均相催化作用机理是催化剂先和反应物作用形成中间化合物, 然后由中间化合物转化为产物。这里催化剂的作用是改变了原来反应的历程, 降低了反应的活化能。而多相催化的一般机理是反应物分子被吸附在固体催化剂表面而离解, 从而使反应活性大大提高, 活化能降低, 反应速率大大加快<sup>[2]</sup>。

二是均相和多相反应的基础上进一步细分反

应类型。这类研究没有一个统一的完整理论,很多都处在半经验状态,这些研究会集中阐释某一两种反应机理,并举例说明。比如均相催化中很普遍的酸碱催化被解释为经过离子型的中间物即经过正碳离子和负碳离子而进行,而另一种均相反应中的络合催化是通过金属原子或离子的活性中心同反应分子的不饱和基团形成所谓的 $\delta-\pi$ 配键,使不饱和基团 $\pi$ 电子云部分转移到金属上(形成 $\delta$ 键)然后再通过电子反馈使金属上的电子云转移到不饱和基团的反键 $\pi^*$ 轨道上,从而达到了激发活化的目的<sup>[3]</sup>。

三是从电子流动的角度解释催化剂在有机反应中的作用。分析和总结了催化剂催化有机化学反应的4种基本方式,包括建立电子流动通道、改变电子流动属性、加强电子流动能力和稳定电子流动结果。避开了轨道和键等方面的知识,用电子的流动形象地说明了催化剂作用的方式,较前一种解释更有利于学生的理解<sup>[4]</sup>。

### 1.3 教学误区与命题趋势

催化作用是中学化学教学的一个重难点,高中新课程中增加了催化效果比较的内容,这一内容也逐渐成为近年来高考试题热点。比如近些年出现的试题有通过实验比较催化效果;探究影响催化效果的因素,包括催化剂的性质、用量及外界环境;通过图像来判断催化效果等等。我们发现,高考有关催化剂的内容已经由简单的概念判断转变为实验设计、数据分析、图像分析与绘制等综合考察方式,这就要求学生全面认识催化作用,知道催化剂如何参与反应、改变反应历程从而改变化学反应速率。在实际教学中,教师对于催化剂的教学只是泛泛而谈,没有深入到机理层面,导致学生一知半解,在处理这种新型问题时难免棘手。因此在日常的教学中渗透催化原理方面的知识,不仅必要而且十分紧迫<sup>[5]</sup>。

## 2 学生对催化剂认知的实证研究

### 2.1 研究对象与研究工具

对北京市某示范高中的195名高二已学完《化学反应原理》的学生进行了测试,收回有效试卷174份,有效率为89.2%。研究采用自编问卷,问卷效度主要通过专家诊断和预测来保证,信度则依赖于回答问题的内部一致性来检验。

问卷由三个维度构成:一是原理部分:催化

剂是怎样影响化学反应速率的?什么是活化能?活化能对化学反应速率有何影响?请用碰撞理论和过渡态理论解释催化作用。二是特征部分:写出催化剂的特点,催化剂能否改变化学平衡?请解释原因。一种催化剂能应用于多种化学反应吗?请说明理由。三是应用部分:举出有哪些不同用途的催化剂?

### 2.2 研究结论

总体而言,催化剂对学生来说是一个熟悉的陌生概念。所有学生都能或多或少地写出“催化剂加快反应速率”、“反应前后质量和性质不会改变”、“催化剂降低反应活化能”等催化剂相关的性质和特点。但是绝大部分学生不知道催化剂怎样参与化学反应过程,仅能写出在反应中只会增加反应速率然后“功成身退”。学生能够回答催化剂具有专一性和不改变化学平衡,但是有一半以上的学生不能清楚地说明理由。在催化剂的应用方面,学生能举出的例子也比较贫乏,说明他们对催化剂的应用了解甚少,没有建立起对催化剂的简单认识。

2.2.1 催化反应的机理分析:仅有少数学生能够写出基本的催化原理

催化剂的反应机理涉及到催化剂在化学反应中的反应历程,内容比较复杂。笔者预设部分学生能写出催化剂“可以提供反应场所”和“参加反应生成中间物最后又能再生”等作用机理。但绝大多数学生都无从下手,只是把催化剂的特点(比如降低活化能,加快反应速率等)当作催化反应机理。不过,有12.1%的学生提到催化剂和反应物先“生成中间物质”,还有3.4%的学生提到反应物依附在催化剂表面,催化剂的作用就是提供一个反应场所。可以看出少数学生对催化剂有所了解,但是多数学生还是一知半解。

碰撞理论和过渡态理论是用于解释催化作用的两个理论,有80%的学生能大致描述碰撞理论的含义,并能与催化剂相联系,但只有12%的学生能写出过渡态理论。整体而言,学生对过渡态理论比较陌生,并没有过多的对催化原理的基本认识。

2.2.2 催化剂特点的认识:大多数学生对催化剂特点的描述还停留在初中阶段

关于催化剂的特点,学生答案各不相同,没有

体现出对催化剂认识的提升。大多数学生答案的要点都是教材上的概念,说明他们对于催化剂的认识基本上来源于课本概念。在解释催化剂能否改变化学平衡的问题上,多数学生都认为不能,可是并不能说明原因。大多数学生知道催化剂有选择性(专一性),但在解释催化剂的选择性时,基本没有涉及到活化能或者活性中心。有的认为催化剂能参与反应就表现出专一性,学生的答案是各种猜想,而且非常笼统和不准确,说明不清楚何为“选择性”及选择性的原因所在。

出现这样的结果,笔者认为除了学生自身的因素外,教材和教学对迷思概念的形成也有一定的影响。目前中学教材中催化剂的概念,在不同学段、不同模块中都有表述(见表1),可以发现表述大致相同。虽然选修四是反应原理的系统学习,但是这里的催化剂概念也只是引入了活化分子百分数,这种模糊的解释给学生带来了错误的认识,不利于学生正确概念的建构。

表1 教材中催化剂的相关表述

模块及教材	催化剂概念的相关陈述
人教版 九年级 上册	在化学反应里能改变其他物质的化学反应速率,而本身的质量和化学性质在化学反应前后都没有改变的物质叫做催化剂。
人教版 必修二	它能极大地加快反应速率(可使化学反应速率增大几个到十几个数量级),而它自身的组成、化学性质和质量在反应前后不发生变化。
人教版 选修四	由于催化剂能降低化学反应所需要的活化能,也就等于提高了活化分子的百分数,从而提高了有效碰撞的频率……理想的催化剂还具有大幅度提高主要产物在最终产物中比率的作用。

2.2.3 学生对催化反应实例的掌握:量少而且没有分类思想

问卷要求学生尽可能写出所知道的需要催化剂的化学反应。结果显示,几乎所有学生都写出过氧化氢分解成氧气和水的反应,还有部分有机反应。有40.0%的学生写出四个或四个以上的反应,有40.0%的学生写两个或三个,仅仅写出一个的占20.0%。可见学生对已经学过的反应并不熟悉,首先是量少,其次是复杂的方程式少。另外,即使写出十几个方程式的学生,也没有根据

分类的思想进行归类整理。

笔者根据教材模块,对中学教材中涉及催化剂的反应进行了整理,而且还对其应用领域进行了分类,发现常见的催化剂可用于无机化学品的合成、合成气和氢气的制备、炼油和基本化学品的制备、石油化学品的生产、高分子化合物的加工、能量生产与污染控制等方面。

### 3 教学建议

催化剂在化学方程式中虽然不是反应物也不是生成物,但它和反应物相互作用,在反应过程中,催化剂不断反应、再生,循环不已。催化剂的作用就在于“活化”反应分子,降低活化能,从而加快反应速率。根据近代表面分子催化理论,催化剂对反应物的“活化”,不管在多相中,还是在均相中,其作用原理都可以统一在“配位”这个概念中。催化剂的概念可以这样给出:催化剂是一种能够改变化学反应速率,却不改变化学反应热力学平衡位置,本身在化学反应中不被明显消耗的化学物质。

3.1 强调催化剂通过改变反应历程而改变反应速率,但不能改变化学平衡

举例来说, $N_2$ 和 $H_2$ 反应生成 $NH_3$ 的反应,非催化过程中 $N_2$ 和 $H_2$ 分子解离成 $N+3H$ 的活化态需要克服1129 kJ/mol的活化能垒,反应物分子难以具有足够的能量克服如此高的活化能垒而发生反应,因此在没有催化剂参与的情况下,反应难以进行。当加入催化剂铁时,吸附在催化剂表面的 $N_2$ 分子只需克服31 kJ/mol活化能垒,就可以解离为原子态 $N$ ,形成 $N+3H$ 活化吸附态只需276 kJ/mol。反应速率比非催化反应速率高 $10^{60}$ 倍,因此能实现合成氨的工业生产。

因此,催化剂的作用是提供新的从能量上来说更有利的反应途径。对于一个可逆化学反应,反应进行到什么程度,即它的化学平衡位置是由热力学所决定的。 $\Delta G^\ominus = -RT \ln K_p$ ,化学平衡常数 $K$ 的大小取决于产物与反应物的标准自由能之差 $\Delta G^\ominus$ 和反应温度 $T$ 。催化剂存在与否则不影响 $\Delta G^\ominus$ 的数值,即 $\Delta G_{\text{催}}$ 与 $\Delta G_{\text{非催}}$ 相等。因此,催化作用只能加速一个热力学上允许的化学反应达到化学平衡状态。所以在判定某个反应是否需要采用催化剂时,首先要了解这个反应在热力学上是否允许。只有热力学允许,平衡常数较大的反应加

入适当催化剂才是有意义的<sup>[5]</sup>。

### 3.2 要深度关注催化剂对加速化学反应的选择性

催化剂并不是对热力学上允许的所有化学反应都能起催化作用,而是特别有效地加速平行反应或串联反应中的某一个反应,这种特定催化剂只能催化加速特定反应的性能,称为催化剂的选择性(专一性)。不同催化剂之所以能促使某一反应向特定产物方向进行,其原因是这种催化剂在多个可能同时进行的反应中,使生成特定产物的反应活化能降低程度远远大于其他反应活化能的变化,使反应容易向生成特定产物的方向进行。因此,催化某一特定反应产物具有选择性的主要原因是由于催化剂可以显著降低主反应的活化能,而副反应活化能的降低则不明显。例如,以合成气( $\text{CO} + \text{H}_2$ )为原料在热力学上可以沿着几个途径进行反应,但由于使用不同的催化剂进行反应,就会得到表2中的不同产物。除此之外,有些反应由于催化剂孔隙结构和颗粒大小不同也会引起扩散控制,导致选择性的变化<sup>[6]</sup>。

表2 催化剂的选择性案例

反应物	催化剂	产物
CO + H <sub>2</sub>	Rh/Pt/SiO <sub>2</sub>	乙醇
	Cu—Zn—O, Zn—Cr—O	甲醇
	Rh 络合物	乙二醇
	Cu, Zn	二甲醚
	Ni	甲烷
	Co, Ni	合成汽油

### 3.3 宜初步对催化反应机理进行分类探析

均相催化,即反应物、生成物和催化剂都是同一相态,可以是气相的也可以是液相的。如NO可以催化 $\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ 的反应就是气态均相催化反应,酯类的水解必须加些酸作催化剂就是液态均相催化。催化剂之所以能加快反应速率是因为降低了活化能。对于均相催化,一般可用形成“中间活化络合物”来说明,其中最典型的是酸碱催化体系,均相酸碱催化一般以离子型机理进行,即酸碱催化剂与反应物作用生成碳正离子或碳负离子中间物(或中间体),这些中间物与另一反应物作用(或本身分解),生成产物并释放出催

化剂,构成酸碱催化循环。在酸碱催化反应中,必须包含两个步骤:第一步,反应物接受质子,生成活化的中间物;第二步,中间物释放出质子生成产物,同时催化剂再生出来。

非均相催化中催化的主体是固态的过渡金属、金属氧化物和金属含氧酸盐,反应物则是气体或液体,催化剂和反应物的物态不同,所以催化过程是非均相的,也可说是多相催化。这类催化剂之所以能降低活化能,一般是用“吸附作用”来说明的。如 $\text{N}_2\text{O}$ 气体分子分解为 $\text{N}_2$ 和 $1/2 \text{O}_2$ 的反应活化能是 $250 \text{ kJ/mol}$ ,当它被Au吸附后,由于 $\text{N}_2\text{O}$ 的氧原子与金表面的Au原子成键形成中间产物, $\text{N}_2\text{O}$ 在金粉表面催化分解时,活化能降为 $120 \text{ kJ/mol}$ ,分解反应就快得多。研究吸附性能是多相催化研究的重要课题之一。Au、Ag、Pt、Pd、Co、Ni等过渡元素具有优良的催化性能,但它们都相当珍贵,而催化反应却只在表面进行,因此常选用硅胶、氧化铝等多孔物质作为载体,将具有催化活性的过渡金属浸渍于上,就能大大提高催化效率。

碰撞理论和过渡态理论是科学家在不同时期提出的有关化学反应速率的理论。碰撞理论创建于20世纪初,主要适用于气体双分子反应。主要论点有:反应物分子必须相互碰撞才有可能发生反应,反应速率的快慢与单位时间内碰撞分子数成正比;只有能量足够、方位适宜的分子对碰撞才是有效碰撞。碰撞理论比较直观,但仅限于气体双分子反应,把分子当作刚性球体,而忽略了其内部结构。过渡态理论于20世纪30年代提出,认为反应物在相互接近时要经过一个中间过渡状态,即形成一种活化络合物,然后再转化为产物。过渡态和始态的位能差就是活化能,或者说活化络合物具有的最低能量与反应物分子最低能量之差为活化能。

催化剂的应用非常广泛,与人们的衣食住行息息相关。在今天这个化学世界里,由工业提供的化学产品有85%是借助催化剂生产的。没有催化剂,人们所需的生活材料便十分贫乏。它还在国防建设、农业发展、能源和资源合理开发与应用等方面都有巨大作用。因此作为教育工作者应该对催化剂予以重视,让学生更科学地认识这一神奇的化学领域。

# 分液时有机相层和水相层的区分

张金水

(宁波华茂外国语学校, 浙江宁波 315192)

**摘要:** 为解答如何简单区分分液时有机相层和水相层的一道实验设计题,在课堂向学生实验演示求证时发现液液界面存在弯曲的现象,引起教师的关注和研究。应用表面张力等原理并结合实际操作相结合,分析解答该疑难问题,并介绍了对理化学科知识趋于综合而又各有侧重的认识。

**关键词:** 高中化学;分液;分离有机相;表面张力;弯曲界面

**文章编号:** 1005-6629(2018)3-0091-02

**中图分类号:** G633.8

**文献标识码:** B

基于化学学科视角建构化学核心素养,可从化学研究方法等方面分析,而实验方法是最基础和最重要的研究方法。高中化学教育需要发展学生通过实验获取物质及其变化的证据、基于证据推理形成结论的思维能力和发展学生通过实验探究解决与化学相关的实际问题的能力<sup>[1]</sup>。

苏教版《化学1》专题一第二单元“研究物质的实验方法”第一节“物质的分离与提纯”内容中,一道关于如何简单区分分液后的有机相层和水相层的实验设计题,引起了教师的关注,产生了以下思考和探究供大家探讨。

## 1 提出问题,学生作答

配套高中化学教材使用的浙江省普通高中作业本化学必修《化学1》(双色版)，“物质的分离与提纯”内容中收录了一道经典的实验设计题,用来综合考查学生对于分液原理的理解和实验方法的应用。题目如下<sup>[2]</sup>：

“用分液漏斗和一种有机溶剂提取水溶液里的某物质,静置分层后,为了知道哪一层液体是“水层”,试设计一种简便的判断方法: \_\_\_\_\_。”

参考答案: 打开分液漏斗的活塞,从漏斗下

端慢慢放出少量液体于试管中,加入少量水静置,若不分层,则下层为水层,反之上层为水层。

**解析:** 该题要求设计简便的判断方法,可利用水和与水不相溶的有机溶剂在物理、化学性质上差异的多样性,因此理论上可得出不同的开放性答案。除参考答案外,学生一般还有以下几种可能的方案:

(1) 前面的操作同参考答案,往试管中加入少量乙酸乙酯、苯或  $\text{CCl}_4$  等,若试管中液体不分层,则上层为水层,反之下层为水层。

(2) 前面的操作同参考答案,往试管中加入少量硫酸铜粉末,若试管中液体变蓝,则下层为水层,反之上层为水层。

(3) 前面的操作同参考答案,往试管中加入少量氯化钠等易溶于水的无机物,若试管中固体溶解,则下层为水层,反之上层为水层。

(4) 前面的操作同参考答案,往试管中投入一小粒金属钠,若剧烈反应放出气体,则下层为水层,反之上层为水层。

……

## 2 实验求证,意外发现

作业批改后课堂反馈该实验题,除规范学生

## 参考文献:

[1] 中华人民共和国教育部制订. 普通高中化学课程标准(实验)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2003.

[2] 何艳. 催化剂作用下的催化反应机理[J]. 长春师范学院学报, 2005, (2): 39~40.

[3] 武克瑞. 催化剂与催化作用(下)[J]. 中学化学教学参考, 1979, (1): 1~22.

[4] 王文峰, 袁耀锋. 从电子流动观点看催化剂在有机反应中的作用[J]. 大学化学, 2016, (6): 62~66.

[5] 周建华. 高考化学有关催化效果比较类试题的思考[J]. 中学化学教学参考, 2010, (Z1): 57~59.

[6] 王桂茹著. 催化剂与催化作用(第3版)[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007.