

# 促进高阶思维发展的深度学习课堂教学

## ——以“催化剂参与反应历程”为例

沈 剑

(杭州第二中学钱江学校, 浙江杭州 310000)

**摘要:** 化学反应是存在历程的, 催化剂调控反应速率也是通过改变了反应历程实现的。选用过氧化氢催化分解反应为例, 以深度学习的方式探究均相和非均相两类催化剂的催化过程。通过实验与文献分析, 结合宏观现象和微观分析, 将催化剂参与反应历程这一事实可视化呈现, 帮助学生理解这一抽象过程。同时通过模型构建和知识迁移, 促进学生的学科认知和高阶思维的层层进阶。

**关键词:** 反应历程; 过氧化氢; 均相催化; 非均相催化

**文章编号:** 1005-6629(2023)07-0057-05      **中图分类号:** G633.8      **文献标识码:** B

深度学习指的是在原有知识基础上, 学习者能批判地接受新知识, 并将前后进行有效整合, 构建新的知识体系。并在知识迁移中不断完善模型结构和内化认知思维<sup>[1]</sup>。将深度学习的思想渗透到课堂教学的过程有助于提高学生独立思考、动手探究、问题解决的能力, 促进他们的认知方式从浅层记忆转向概念核心本质的高阶发展。

### 1 主题分析

#### 1.1 教学内容分析

催化剂是影响反应速率的重要因素之一, 也是高中化学反应原理模块中的重要内容。《普通高中化学课程标准(2017年版)》中对“化学反应速率和化学反应的调控”的要求为: 知道化学反应是有历程的, 认识基元反应活化能对反应速率的影响。知道催化剂可以改变反应历程, 对调控反应速率具有重要的意义<sup>[2]</sup>。这也是新课标中首次将“化学反应历程”“基元反应”等概念纳入到高中化学教学中。高中教材上介绍催化剂改变反应速率是通过参与反应历程, 降低了反应的活化能, 使得反应过程变得更加容易。然而在化学动力学的教学中, 依旧更倾向于强调反应速率, 而忽视了反应历程的重要性。

#### 1.2 教学背景分析

反应历程属于微观和抽象概念, 如果没有具体的

反应例子, 学生很难理解化学反应并不都是直接一步转化为产物, 而是通过一定的路径分多步进行。更不要说催化剂能够改变反应历程。因此该例子还需要具备简单直观等特征。笔者查阅人教版、苏教版、鲁科版三本教材在该章节都选用了过氧化氢催化分解实验, 但目的皆为探究催化剂对反应速率的影响。通过文献调研发现, 该反应在教学中的功能并不仅局限于验证催化剂对反应速率的影响。

不少研究者发现该实验中微小的异常现象。向明礼等<sup>[3, 4]</sup>发现并探究碘化钾催化过氧化氢分解中的异常副反应, 从侧面证明了催化剂参与反应历程。朱伟长<sup>[5]</sup>通过氨基酸铁(Ⅲ)配合物催化分解过氧化氢实验中溶液由紫红色变为黄色的过程, 说明催化剂参与反应并提出可能的机理。夏添<sup>[6]</sup>发现重铬酸钾催化过氧化氢过程中, 溶液先变成棕褐色, 随着反应进行颜色逐渐变浅最终回到重铬酸钾的黄色。

本文通过学生实验探究、文献研究等手段让学生学习、理解、分析、评价过氧化氢均相催化和非均相催化两个过程, 从宏观现象和微观过程两个角度帮助学生理解催化剂参与反应历程这一事实。

#### 1.3 学情分析

该课程授课学段为浙江省高二年级, 学生在此之前已经掌握了外因对反应速率的影响规律, 也知道催



化剂参与反应是通过降低反应活化能这一结论。同时通过高一必修阶段的学习,学生也具备了一定的实验操作和实验探究能力。在认识化学反应上,一方面能够通过宏观和微观两个视角来分析物质变化和转化;另一方面也能从反应历程、反应速率视角分析反应原理。然而学生的学习仅仅只停留在浅层学习,缺乏对所学知识的深度理解、对开放性问题缺乏合理的思路和方法,无法将所学的知识迁移应用到新的情境中,难以构建完整的学科体系和学科思维。因此以高阶思维为主导的深度学习显得特别重要且更有意义。

## 2 教学目标确定

(1) 了解催化剂影响反应速率是通过改变反应历程,并调节反应的活化能。同时从定量的角度深度学习催化剂增大过氧化氢分解速率的程度。

(2) 通过了解过氧化氢被催化分解的均相催化和非均相催化过程,建立新旧知识的关联,为深度学习、深度探究、深度思考的思维建立生长点。

(3) 通过实验与文献研究分析,对均相催化和非均相催化过程中的宏观现象和微观反应历程进行探析,深入认识化学反应的本质,培养分析问题、解决问题的能力。

(4) 通过总结归纳,建立认识催化剂参与反应历程的认知模型,实现知识迁移。

## 3 深度学习教学任务及流程

基于教学主题分析,本文确定了以探究过氧化氢均相/非均相催化分解过程为情境的深度学习课堂教学,并设计了四个层层递进的深度学习任务。通过教师创设情境,提供实验现象、实验数据、实验文献资料,引导学生从定性、定量、宏观、微观、建模等角度进行一系列深度学习的活动探究。学生通过合作提出假设、证据推断、结论评价和总结归纳,进一步理解与迁移运用知识,也发展了“宏观辨识与微观探析”“证据推理与模型认知”“科学态度与社会责任”等化学学科核心素养。具体教学任务及流程如图1所示。

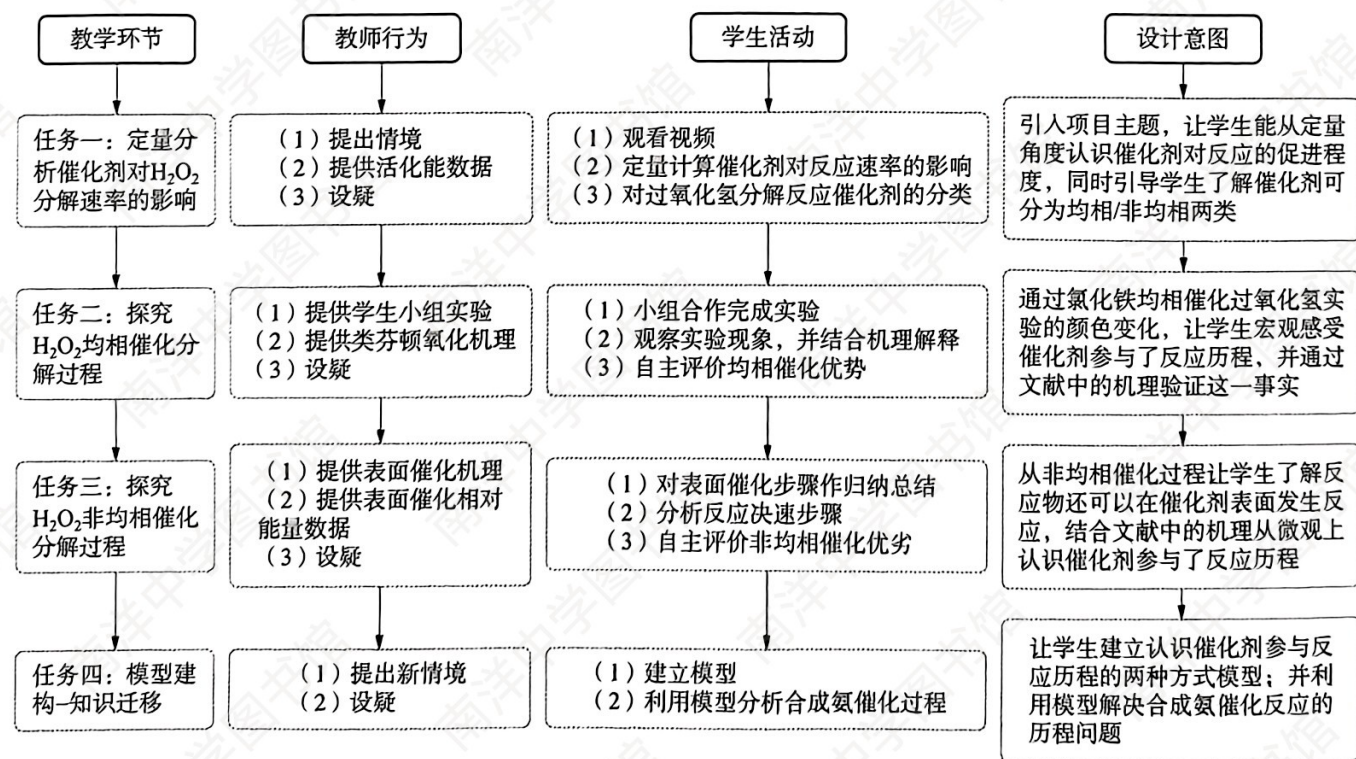


图1 教学任务流程图

## 4 深度学习教学任务实施过程

### 4.1 任务一: 定量分析催化剂对反应速率的影响

[情境导入] 教师实验展示“大象牙膏”实验。

[教师] 大象牙膏的原理是过氧化氢、催化剂、发泡剂(洗发水等)混合时, 短时间内产生大量氧气, 使泡沫喷涌而出。



[设疑] 催化剂影响反应速率的原理是什么? 并结合资料卡中的信息, 思考如何定量速率的增加?

[资料卡]

资料卡:

阿伦尼乌斯公式: 表示化学反应速率常数随温度变化关系的经验公式

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

其中  $k$  为速率常数,  $R$  为摩尔气体常量,  $T$  为热力学温度,  $E_a$  为表观活化能,  $A$  为指前因子 (也称频率因子)

图2 资料卡

[学生] 催化剂降低了反应的活化能, 改变了反应历程。根据图2资料卡的信息, 要定量速率的增加, 必须要知道活化能的数据。

[数据提供]  $20^\circ\text{C}$  时  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解活化能:  $E_{a_1} = 75 \text{ kJ/mol}$  (未加催化剂)、 $E_{a_2} = 58 \text{ kJ/mol}$  (以  $\text{MnO}_2$  催化为例)。

[学生作答展示] 见图3。

$$\begin{aligned} E_{a_1} &= 75 \text{ kJ/mol} & E_{a_2} &= 58 \text{ kJ/mol} \\ k &= Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \\ k(\text{未催化}) &= Ae^{-\frac{75000}{8.314 \times 293}} & k(\text{有催化}) &= Ae^{-\frac{58000}{8.314 \times 293}} \\ \frac{k(\text{有催化})}{k(\text{未催化})} &= e^{-\frac{17000}{8.314 \times 293}} = 10^3 \end{aligned}$$

图3 学生作答展示

[设疑] 大家所熟知的催化过氧化氢分解反应的催化剂种类有哪几类?

#### 4.2 任务二: 探究过氧化氢均相催化分解过程

[教师] 在大家列举的催化剂中按照与过氧化氢的互溶性可以分为两类。我们把与催化底物互溶的催化剂称为均相催化剂, 如  $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{KI}$ 、 $\text{CuSO}_4$  等。而与催化底物不相溶的催化剂称为非均相催化剂, 如  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CuO}$  等。

[设疑] 上述均相催化剂在催化过氧化氢分解过程中除了产生氧气速率增大还有什么其他的现象? 我们既然说催化剂调控反应速率是参与反应改变了历程。那么历程改变了是否会出现特殊的现象?

[学生] 催化剂确实能改变反应历程, 但如果组成该反应的多步基元反应路径都是快反应, 那也很难看到特殊现象。实验是检验化学真理的手段, 必须进行实验验证。

[实验操作及现象] 分别吸取  $15 \text{ mL}$   $15\%$  的过氧化氢溶液和  $15 \text{ mL}$  蒸馏水 (对照组) 加到两块表面皿中。然后分别往里面加入  $2 \text{ mL}$   $5\%$  的氯化铁溶液 (黄色)。实验现象见图4。

[设疑] 根据实验现象中颜色的改变能说明什么问题?

[学生1] 过氧化氢溶液中滴加氯化铁溶液的颜色变为深琥珀色, 但此时并无气泡产生, 说明形成了琥珀色中间体。随着反应进行, 溶液颜色加深并逐渐产生大量气泡。溶液颜色最深时, 气泡产生的速率也最快。

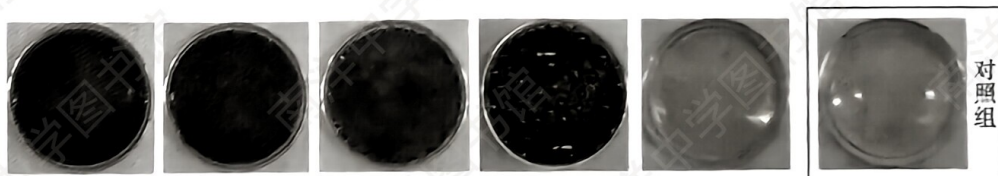


图4 氯化铁催化过氧化氢分解反应过程

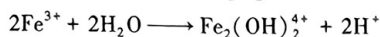
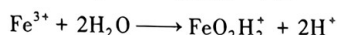
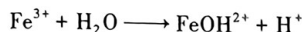
此时说明琥珀色中间体可能开始发生分解反应产生氧气, 同时产生颜色更深的物质。最终随着气泡产生的停止, 溶液的颜色重新回到三价铁离子颜色与对照组相同。整个实验过程证明了催化剂参与了反应, 并存在多步基元反应的历程。

[学生2] 颜色的改变不足以作为改变反应历程的证据, 因为无法检测到中间体的存在。

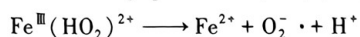
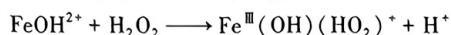
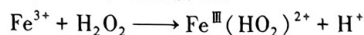
[教师] 通过查阅文献, 目前认为氯化铁催化过氧化氢分解机理可能是通过下述 (见图5) 类芬顿自由基的过程<sup>[7]</sup>。

[学生] 三价铁离子的水解阶段溶液中产生的微粒共同组成了我们所看到的三价铁水溶液的颜色。而从引发阶段产生的三价铁的过渡络合离子中间体来看, 可能的颜色变化来自  $[\text{Fe}^\text{III}(\text{HO}_2)]^{2+}$ 、 $[\text{Fe}^\text{III}(\text{OH})(\text{HO}_2)]^+$

水解阶段:



类芬顿(Fenton)引发阶段:



芬顿反应阶段:

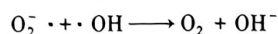
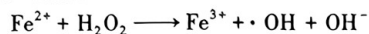


图5 氯化铁催化过氧化氢自由基过程机理

这些中间体的颜色。因此结合反应机理和反应现象能够说明催化剂确实参与了反应历程。至于催化剂直接降低了哪一步的活化能还需要查阅更多文献。

[学生归纳并评价]均相催化剂与反应物在同一相中接触并参与反应,改变反应历程将反应分为多步。降低了反应的活化能。虽然导致反应路径增加,但总

的结果是增大了反应速率。优点:催化剂与底物处于同一相能有效地增大接触面积,少量催化剂即可达到催化效果。缺点:反应后难以分离回收,不利于催化剂的重复利用。

### 4.3 任务三:探究过氧化氢非均相催化分解过程

[设疑]二氧化锰属于过氧化氢的非均相催化剂,回忆二氧化锰加到过氧化氢溶液中与上述均相催化过程是否一致?

[学生]非均相催化实验在宏观上可观察到气泡是在催化剂表面产生而非整个溶液体系。同时并无均相催化过程中那样丰富的颜色转变。

[学生]唯一能猜测的是催化过程可能在催化剂的表面进行,如果能够观测到催化剂表面的微观过程那么就能了解催化剂是否参与了反应。

[教师]通过查阅文献,科学家们研究发现,过氧化氢在Pd(钯)催化剂表面的微观过程见图6<sup>[8]</sup>。

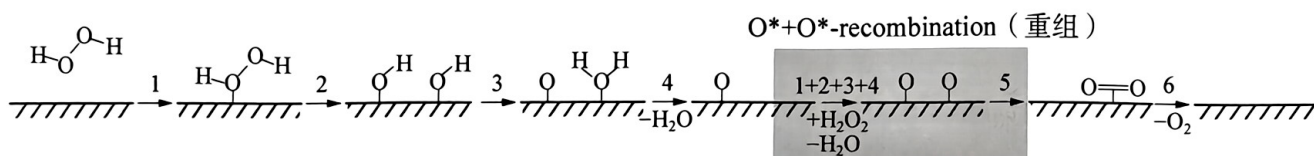


图6 Pd催化过氧化氢分解表面模拟反应历程图

[设疑]根据图6,分析梳理过氧化氢在Pd表面的催化过程。

[学生]首先步骤1游离的过氧化氢分子被催化剂的表面吸附,这种吸附作用刚开始可能是物理吸附,但随着过氧化氢的两个氧原子都被吸附后,氧原子之间的过氧键被削弱,而催化剂表面与氧原子开始形成以化学键为基础的化学吸附。紧接着步骤2~4过氧化氢分子在催化剂的表面发生反应最终产生O\*。重复步骤1~4产生另一个自由基O\*,随着两个自由基O\*相互成键形成O2\*,O\*与催化剂表面的化学吸附逐渐转化为物理吸附。最后经过步骤6脱附过程,扩散离开催化剂表面完成整个反应。

[追疑]根据反应过程的能量变化(见图7),找出该催化过程的决速步骤,并分析原因。

[学生]两个H2O2\*在催化剂表面形成2个OH\*的过程为反应的决速步。(1)从相对能量的角度:该过程反

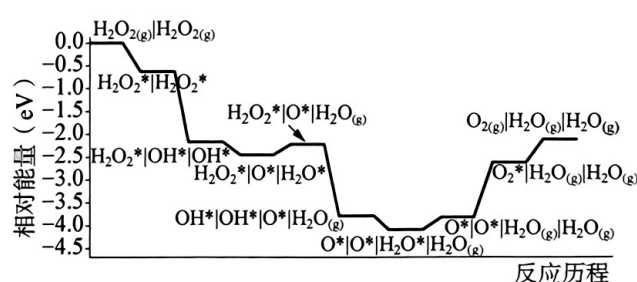


图7 Pd催化过氧化氢分解反应历程相对能量变化

应的相对能量最大。(2)从图6的反应历程来看,一个H2O2只能在催化剂表面形成一个O\*自由基,而形成的O\*自由基会占据催化剂表面的位点,同时生成的O2\*也占据着催化剂表面的位点。因此导致H2O2与催化剂的吸附过程变缓慢,进而解离生成OH\*的过程变得更慢。

[学生归纳并评价]非均相催化过程在催化剂表面发生反应。反应历程经历(1)底物扩散至催化剂表面;



(2) 催化剂与底物吸附; (3) 催化剂表面反应; (4) 产物与催化剂解离; (5) 产物的扩散等步骤。优点: 非均相催化剂与底物处于不同相, 容易实现催化剂的回收利用。缺点: 固相表面积有限、易产生副反应。

#### 4.4 任务四：模型构建—知识迁移

[引入新情境]参照过氧化氢催化分解过程对合成氨的催化过程作分析。

[学生模型建构]详见图8。

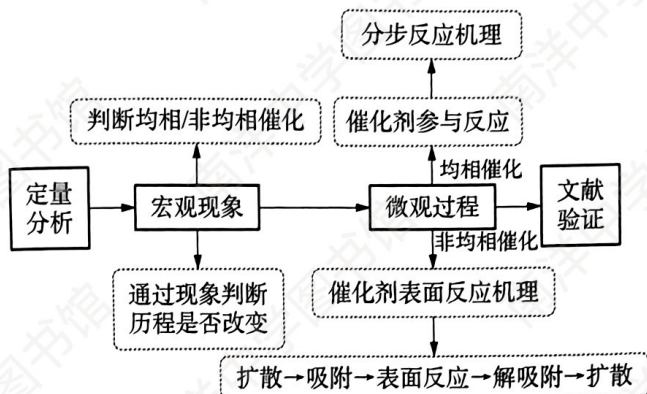


图 8 催化剂参与反应历程认识模型

[学生课后任务]收集资料并分析合成氨表面催化过程机理。

## 5 教学效果与反思

### 5.1 教学效果

本教学案例以发展学生的高阶思维为核心,指向知识迁移的深度学习。通过宏观微观角度重新探寻过氧化氢催化分解过程,深入认识催化剂参与反应历程的本质。首先通过引导学生观察过氧化氢催化分解中的颜色变化现象,提出催化剂参与反应历程形成中间体的猜想假设;然后根据文献报道中的机理验证猜想,发展学生严谨的科学探究思维;再通过非均相催化过程与均相催化过程的现象差异,引导学生探究非均相催化剂参与反应的微观历程;最后通过建立催化剂参与反应历程的认识模型,实现从特殊到一般的辩证认识的深度学习过程。学生在整个学习过程中学习像科学家那样思考问题、研究问题和解决问题。实现学生化学学科思维从观察宏观现象到思考微观本质再上升

到形成原理和理论的层层递进。

## 5.2 教学反思

要实现学生的深度学习,教师必须先要深度选材、深度备课才能有深度教学。本文选取过氧化氢催化分解实验作为知识的载体原因有两点:(1)过氧化氢分解实验学生比较熟悉,在看到伴随颜色变化的现象和自己认为的只有气泡产生加快的现象发生冲突时,引发了学生强烈的探究兴趣;(2)过氧化氢催化分解实验,教师要比学生更加熟悉,反应虽然简单,但对原理的研究一直在持续更新报道。因此教学设计的过程,也是授课者深度研究、深度挖掘、深度思考、深度反思、深度总结的过程。

### 参考文献:

- [1] 何玲, 黎加厚. 促进学生深度学习[J]. 计算机教与学, 2005, (5): 29~30.
- [2] 中华人民共和国教育部制定. 普通高中化学课程标准(2017年版 2020年修订)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2020: 31~33.
- [3] 向明礼, 高彦荷, 袁支润. 过氧化氢碘化钾催化分解反应中的新现象[J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 2002, 28(3): 294~296.
- [4] 向明礼, 高彦荷, 袁支润. 对“过氧化氢碘化钾催化分解”催化概念的质疑[J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 2003, 29(1): 41~44.
- [5] 朱伟长. 乙二胺四乙酸铁催化分解过氧化氢的反应机理[J]. 催化学报, 1997, 18(1): 83~86.
- [6] 夏添. 大概念统摄下高三二轮专题复习课教学探讨——以“从催化剂角度看化学反应的调控”为例[J]. 化学教与学, 2022, (1): 60~64.
- [7] 史宗翔, 陆海燕.  $\text{FeCl}_3$  催化分解  $\text{H}_2\text{O}_2$  实验的审慎参酌[J]. 化学教学, 2012, (10): 51~53.
- [8] Anthony Plauck, Eric E. Stangland, James A. Dumesic, et al.. Active sites and mechanisms for  $\text{H}_2\text{O}_2$  decomposition over Pd catalysts [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 114(14): 1973~1982.