

以酒石酸催化分解实验为例明析催化剂的概念

宁光辉¹ 樊秋菊² 吴江涛¹ 宁张磊¹

(1. 四川师范大学化学与材料科学学院, 四川 成都 610068)

2. 四川省叙永县马岭中学校, 四川 泸州 646404)

摘要: 催化剂的概念是中学化学教学难点, 学生对于催化剂是否参与化学反应过程等催化剂的特征存在疑惑。实验是中学化学的有效教学手段之一。据此, 在催化剂的概念的基础上, 创新设计出三氧化二铁催化分解酒石酸的实验。结果表明, 参加反应后三氧化二铁磁性的增加, 清晰地展示了催化剂参与了化学反应过程等催化剂的特征。此实验在帮助学生正确理解催化剂的本质方面具有重要意义。

关键词: 催化剂; 三氧化二铁; 磁性

催化剂是现代化学的关键物质之一。催化剂被广泛应用于现代化工生产和科学实验中, 在资源利用、环境保护与能源开发等领域催化剂的身影也常有出现, 同时生物体的生命现象中也存在着大量的催化作用。催化剂最早由瑞典化学家贝采里乌斯发现, 1836 年贝采里乌斯在《物理学与化学年鉴》中首次提出催化剂的概念。到 2014 年国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 再次明确概念将“催化剂”定义为“催化剂是增加反应速率但不改变反应的总标准吉布斯 (Gibbs) 自由能的物质”。虽然现有的关于催化剂概念界定较为清晰, 但现有文献中研究催化剂本身性质的实验极少, 对催化剂概念及特征的研究大多停留在理论层面, 学生学习催化剂时存在很多困惑。

在长期关于催化剂实验研究过程中, 我们发现: 氧化铁可作为酒石酸分解的催化剂, 本身不存在磁性, 但在在此催化反应后氧化铁产生了氧缺陷, 氧缺陷导致其物理性质发生变化, 即产生磁性。据此, 本文利用此实验对催化剂的概念及其特征进行辨析, 帮助学生理清关于催化剂的困惑, 进一步理解催化剂的概念。

一、三氧化二铁催化分解酒石酸反应

(一) 反应机理

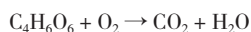
酒石酸 (tartaric acid), 即 2, 3- 二羟基丁二酸, 是一种羧酸, 也是一种有机酸, 主要存在于多种植物中, 如葡萄、罗望子等, 也是葡萄酒中的成分之一。在未加催化剂的情况下酒石酸在 465℃ 燃烧生成 CO_2 和 H_2O 。

氧化铁 (别名烧褐铁矿、铁丹等) 是铁锈和赤铁矿的主要成分, 易溶于盐酸等强酸, 外观为红棕色粉末。其红棕色粉末为一种低级颜料, 用于塑料、橡胶、建筑等的着色, 在涂料工业中常用作防锈颜料。还可作为催化剂, 玻璃、宝石、金属的抛光剂, 可用

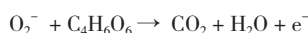
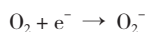
作炼铁原料。

在本实验中, 氧化铁可用作酒石酸分解的催化剂。 Fe_2O_3 催化酒石酸的分解反应是一个多相催化反应。根据研究发现, 酒石酸的氧化分解速率和其周围氧负离子的存在有关, 而氧负离子的存在受到金属氧化物中金属的价电子层中 d 轨道上单电子的影响。只有 d 轨道上有未填满电子的才可以催化反应, Fe_2O_3 中 Fe^{3+} 的价层电子排布式为 $3d^5$, $3d^5$ 的结构对氧极化能力强, 使得氧负离子的量增多, 从而能够催化酒石酸的分解反应。

在未加 Fe_2O_3 催化剂的反应中, 酒石酸与氧气反应生成了 CO_2 与 H_2O , 用化学反应方程式表示为:



在加入催化剂的反应中, Fe_2O_3 表面吸附微量氧气, 氧气获得 Fe_2O_3 里面的电子, 变成活性很强的 O_2^- , O_2^- 催化反应, 反应后电子又回到 Fe_2O_3 , 故催化剂的质量不变, 但参与了反应过程。用化学反应方程式表示为:



反应过程用图表示为图 1:

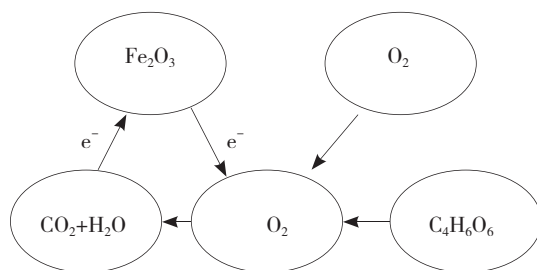


图 1 氧化铁催化酒石酸分解过程图

催化反应放出大量热, 氧化铁经过迅速加热和迅速冷却, 形成大量的热缺陷 (氧缺陷), 这个热缺陷 (氧缺陷) 破坏了 $\text{Fe}^{3+}-\text{O}_2^--\text{Fe}^{3+}$ 之间的超交换作用, 增强了宏观磁性。故反应后的氧化铁磁性增强。

(二) 实验结果

根据实验原理, 选取氧化铁、酒石酸等实验药品与仪器, 设置四组对照组, 控制相同质量的酒石酸, 不同温度, 不同催化剂的质量, 得到实验现象、质量变化表 (表 1)。

表 1 氧化铁与酒石酸反应质量变化、实验现象记录表

组号	第一组	第二组	第三组	第四组
M _{催化剂/g}	0	0.160	0	0.320

M _{酒石酸} /g	2.252	2.252	2.252	2.252
M _{剩余} /g	2.100	0.158	0	0.317
T/℃	255	255	465	255
反应现象	样品融化后不能燃烧，反应结束后重新凝固为黑色固体。	燃烧有火星冒出，反应残留物为红棕色粉末。反应后氧化铁磁性增强。	样品融化后燃烧，反应结束后无剩余。	同第二组

通过表 1 的实验现象及相关结果可以得出，单一酒石酸样品在 255℃不能燃烧，在 465℃时可以燃烧，加入氧化铁后，酒石酸样品在 255℃可以燃烧，表明氧化铁的加入降低了酒石酸燃烧所需温度。

将反应前后的氧化铁粉末用磁铁吸附可以发现，反应前的氧化铁较难被磁铁吸附，会发生氧化铁脱落的现象；反应后的氧化铁可以被磁铁较强吸附且脱落现象不明显（实验现象如图 2）。



图 2 氧化铁催化酒石酸分解实验前（左）后（右）磁性对比

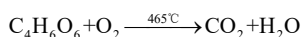
二、催化剂的特征

氧化铁催化酒石酸分解的实验，主要可以证明催化剂以下基本特征：

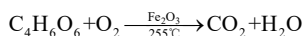
（一）催化剂能改变反应途径，降低反应活化能

结合实验，写出有无催化剂，酒石酸的燃烧方程：

①无催化剂的酒石酸燃烧方程：



②有催化剂的酒石酸燃烧方程：



从反应方程式可以看出，无催化剂的酒石酸需在 465℃时才能燃烧，有催化剂的情况下，酒石酸在 255℃时就能燃烧，可以有效证明催化剂能降低反应的活化能。

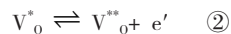
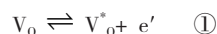
（二）催化剂参与了化学反应的过程

对于多相催化过程而言，反应增加了吸附、活化、脱附等过程，形成了催化剂-反应物、催化剂-过渡态、催化剂-产物等一系列中间状态；对于均相催化反应或酶催化反应则形成配合物或加合体等中间状态。从本实验来看，反应过程中 O_2 吸附了 Fe_2O_3 的电子，形成了 O_2^- 的中间体，反应结束时， O_2^- 与酒石酸反应生成 CO_2 和 H_2O ，电子重新回到 Fe_2O_3 中，即催化剂参与了反应过程，反应前后催化剂化学性质不发生变化。

（三）催化剂在化学反应前后常有物理性质的变化，但其化学性质和质量不发生变化

在本实验中物理性质的变化体现为磁性变化，这是因为实验

过程中产生了氧空位。氧空位的产生导致电荷的产生，这是由于相关的电离过程：



产生电荷后， O_2 与 e' 结合为活性 O_2^- 。酒石酸在相对较低的温度下与吸附在 Fe_2O_3 催化剂表面的活性氧分子发生强烈反应，反应在几秒钟内将样品中的局部温度升高到 Fe_2O_3 的熔点 1560℃以上，然后在反应结束后迅速下降。这种快速的加热和冷却过程在 Fe_2O_3 中引起大量的热缺陷，热缺陷的变化引起磁性的变化。同时该实验体现出催化剂反应前后质量不改变的特点，实验前 Fe_2O_3 测量质量为 1.600 g，实验后酒石酸分解为 CO_2 和水蒸气，测得质量为 Fe_2O_3 的质量，测得结果为 1.580 g，质量基本保持不变。

（四）催化剂与反应物之间不存在计量关系

菲利波夫特别强调了这点，催化剂的用量不是固定不变的，故催化剂的反应物、产物中间不存在计量关系，也不需要反应式的配平，与通常意义上的反应物与产物存在明显的不同。体现在本实验中，0.01 mol 酒石酸用 0.001 mol 的 Fe_2O_3 与 0.002 mol 等物质的量的 Fe_2O_3 都能催化分解反应，只是在一定范围内催化剂物质的量增加，反应速率有一定程度的增加。

三、结语

本文利用三氧化二铁催化酒石酸分解的实验，通过三氧化二铁磁性的增加等实验结果，简单有效的证明了催化剂参与了化学反应的过程，催化剂与反应物和生成物没有计量关系等催化剂的特征，在帮助中学化学教师对催化剂概念教学，学生有效的理解催化剂的作用机理及其特征方面有不可忽视的作用。

参考文献：

- [1] 张映明. 化学教材中与催化剂有关的问题[J]. 化学教育, 2013, 34(02): 10-13.
- [2] 董德沛. 瑞典化学家贝采里乌斯的生平及其贡献[J]. 化学教育, 1987(02): 61-63.
- [3] 叶佩佩, 占小红. 浅析有关催化作用的几个认识误区[J]. 化学教学, 2017(04): 94-97.
- [4] 凌晨, 张树永. 催化剂相关概念的辨析[J]. 大学化学, 2021, 36(02): 227-232.