

电子姐姐的奇幻“逆热力学”电催化之舞

王健纯*, 谢汝雨

南方科技大学化学系, 深圳格拉布斯研究院, 广东 深圳 518055

摘要: 通过拟人化的方式, 描绘了一个关于热力学定律的故事。主角“电子姐姐”在微观世界中翩翩起舞, 她的舞蹈象征着化学反应。她的老师们——克劳修斯和玻尔兹曼, 向她传授了熵和热力学定律的知识, 这些定律塑造了她的舞蹈规则。虽然“电子姐姐”遵循这些定律, 却在梦中体验到电催化过程的“逆热力学”之舞。最终, 她在现实中与“电池哥哥”相遇, 开启了对电催化领域的探寻, 象征着科学探索中传统与创新的冲突与调和, 以及追梦少年在成长中的机遇与挑战。本文通过曲折的情节, 生动地介绍了计算化学反应中吉布斯自由能变的方法, 探讨了电催化反应如何通过电功对系统进行能量输入, 从而实现系统的吉布斯自由能变为正的化学反应, 即最近文献中所谓的“逆热力学”反应。文章通过两个例子, 即电解水反应和电催化循环去消旋化反应, 阐述了逆热力学反应在化学研究中的重要作用。同时, 本文也描述了青少年在追求自我认同的过程中面临的困惑与挑战, 展现了勇于创新、大胆突破的重要性: 真正的创新并非抛弃定律, 而是在约束中创造新的可能性。

关键词: 电催化; 逆热力学反应; 熵; 电解水; 去消旋化

中图分类号: G64; O6

The Fantastical Dance of Miss Electron: Contra-Thermodynamic Electrocatalytic Reactions

Jianchun Wang*, Ruyu Xie

Shenzhen Grubbs Institute, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China.

Abstract: This article presents a story about the laws of thermodynamics through a personified narrative. The protagonist, “Miss Electron”, dances gracefully in the microscopic world, her movements symbolizing chemical reactions. Her mentors, Clausius and Boltzmann, impart knowledge of entropy and the laws of thermodynamics, which govern the rules of her dance. Although “Miss Electron” follows these laws, she dreams of performing a “contra-thermodynamic” dance, inspired by electrocatalytic reactions. In the real world, she encounters “Mr. Battery”, embarking on a journey into the realm of organic electrocatalysis. This encounter represents the tension and harmony between tradition and innovation in scientific discovery, as well as the challenges and opportunities faced by a young dreamer. Through a compelling narrative, the article introduces methods for calculating changes in Gibbs free energy during chemical reactions, and explores how electrocatalytic reactions use electrical work to input energy into a system, thereby enabling chemical reactions with positive Gibbs free energy changes—what recent literatures refer to as “contra-thermodynamic” reactions. The article illustrates the importance of these reactions in chemical research through two examples: water electrolysis and electrocatalytic cyclic deracemization (ECD). Furthermore, it discusses the challenges adolescents face in their quest for self-identity, highlighting the importance of embracing innovation and daring to break boundaries: true innovation lies not in discarding established principles, but in creating new possibilities within existing constraints.

Key Words: Electrocatalysis; Contra-thermodynamic reactions; Entropy; Water electrolysis; Deracemization

收稿: 2024-06-20; 录用: 2024-11-06; 网络发表: 2025-01-02

*通讯作者, Email: wangjc3@sustech.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金(22201124)

1 童年：热力学定律启蒙

诗曰：

电子云中舞翩翩，彩霞映照万象间。

热学定律冷似铁，轻舞飞扬梦难圆。

话说在那无边无际的微观世界里，藏有一个奇异城池，名曰“分子城”。在这个城市里，原子们像是繁忙的蚂蚁，不停地来回穿梭，进行着各种神秘的活动。城中有被称为“电子云”的不可思议的地方，这里犹如一片绚丽的彩霞，五彩斑斓、变幻莫测。相传，这片美丽的云海由一位名为埃尔温·薛定谔的伟大建筑师设计而成，他在云中赋予了某种神秘的秩序。每一朵云里都栖息着许多电子姐妹，她们欢快地飞舞着，跃迁着，玩耍着。而电子姐姐，就像是这片彩霞中最灵动的一朵。电子姐姐最喜欢做的事情就是跳舞。当她听到节拍，她的身体就会随着音乐起舞，像是一簇明亮的火焰，在空中翩翩起舞。她的身上则散发着一股神秘的能量，吸引着周围的原子核。她的舞姿轻盈而灵动，每一次的回眸转身都能让整个分子城都沸腾起来，是化学反应的根源。她的舞蹈为微观世界注入了无限的生机和活力。

她依稀记得小时候，在一间宽敞而明亮的教室里，墙上挂着巨大的黑板，上面用白色粉笔写满了公式。克劳修斯老师娓娓道来热力学定律的奥秘。他身材高大，一头灰白的头发整齐地梳理着，给人一种严谨而可靠的感觉。

“同学们，”克劳修斯老师的声音厚重而又深沉，他缓缓地说道，“宇宙中的熵是不断增加的^[1]。”

电子姐姐的眼神中闪过一丝茫然，她微微歪着头，开始思考这个观点背后的意义。老师继续解释道：“熵是封闭热力学系统中不可利用能量的度量。它被定义为，在一个可逆过程里，系统在恒温的情况下得到或失去热量除以温度。”电子姐姐飞快地在她小小的笔记本上记录下这些陌生而有趣的概念。

与克劳修斯老师的严肃相比，电子姐姐更喜欢风趣的玻尔兹曼老师。他那浓密的胡须就像一团蓬松的云朵，在他说话的时候轻轻摇曳。玻尔兹曼老师笑称，在数啤酒瓶的个数时，他的数学水平才会变得出色一些。玻尔兹曼老师常常用生动活泼的方式来解释复杂的概念，而当他提到熵时，他的热情更是溢于言表(图1)。他说：“熵其实就是系统的混乱度，就像你们收拾房间一样。”



图1 玻尔兹曼老师给电子姐姐讲授熵的概念

他的比喻逗笑了电子姐姐。她的眼睛里闪烁着一种调皮的光芒，她兴奋地计划将今天学到的知识告诉自己的妈妈。她决定要向妈妈自豪地宣布，为什么自己的房间经常乱得一塌糊涂，现在终于有了科学的解释。

玻尔兹曼继续说道：“熵的公式是 $S = k \ln W$ ，其中 S 代表熵， k 是玻尔兹曼常数，而 W 是系统可能的微观状态数。简单来说， W 越大，系统越混乱，熵也就越高。”他笑着补充，“这个公式连接了宏

观的物理量和微观的物理量，我可太喜欢了。也许以后干脆刻在我的墓碑上好了。”

两位老师的教导在电子姐姐心中留下了深刻的烙印，她从小就明白，热力学定律是宇宙中不可逾越的法则，它决定着宇宙前进的方向。一位带着乱蓬蓬银发且爱吐舌头的老师也曾说过：“热力学是唯一普遍通用的物理学理论。”因此，她深知绝对不能违抗老师们的教导。这份教导让她的内心充满坚定，也让她的舞蹈更加有规律。当有分子邀请她舞蹈时，电子姐姐会仔细计算着这支舞的吉布斯自由能变，这是一种与计算宇宙总熵变等效的方式。她知道，根据热力学定律，系统的吉布斯自由能变是趋向减少的，而她的舞蹈也必须符合这个规律。如果不符合，她只会微笑着婉言拒绝。

不知何时，分子城里开始流传着一些怪异的传闻，说某些电子似乎在跳禁忌的逆热力学之舞。可是，电子姐姐对此不以为然。她认为这不过是都市传说，毕竟，老师们的教导从未出错，热力学定律也永远不会出错。

此时的她从未考虑过，这样日复一日的的生活，是否就是她渴望的全部？

2 困惑：定律无形的枷锁

岁月如梭，懵懂的电子姐姐已经成长为亭亭玉立的少女。曾经稚嫩的面庞如今展现出了成熟的魅力，清澈的眼眸中透着一份深邃和智慧。曾经稚嫩的笑靥，今朝渐显沉静；清澈眸中，盈盈透出几许深邃。她的身姿婀娜，如烟波间的柔柳，随风轻拂，仿佛轻盈得无所依靠。长发如同银河飞瀑，光辉在发间流转，时而绚丽，时而幽静。

岁月的积淀也带来了内心的觉醒。她不再是曾经那个简单追随规则的小姑娘，内心的困惑与矛盾在不经意间浮现。每当夜深人静，万籁俱寂之时，她躺在床上，注视着天花板，那明亮的眼眸中流露出一丝纷乱。她开始怀疑，自己对这个微观世界的理解是否真的正确。热力学的法则如迷宫般将她困住，她在其中徘徊，找不到出口。

“为什么系统的吉布斯自由能变只能减少？为什么我不能去逆热力学的城市舞蹈？”电子姐姐的心中翻涌着层层疑问，那些她曾经深信不疑的定律，似乎也开始变得模糊。

事情的起因是在早晨。水分子兴致勃勃地来到了电子姐姐的房间，脸上带着掩饰不住的兴奋。他一进门，便迫不及待地邀请她前往他的城市舞蹈，共同建设他们梦想中的氢气氧气分子城。

“电子姐姐，你愿意和我一起去吗？”水分子满怀期待地问道。他的声音中充满了热情和希望，眼神中闪烁着梦想的光芒。

这座梦想中的城市充满了活力和生机，这里的每一个角落都充满了希望与可能，能够为世界提供源源不断的清洁能源，可以说是未来的能源之都。电子姐姐被深深打动了，她感受到了他对未来的美好愿景和无尽期待。她的心跳加速，眼神也变得愈发明亮。兴奋的感觉在她心中激荡，她迫不及待地想要投入到这场伟大的冒险中，与水分子一同创造美好的未来。

然而，电子姐姐却不能忘记热力学老师的教导。她深知每一个化学反应背后，都蕴藏着热力学原理和严格的计算。虽然心中充满了对梦想城市的向往和水分子的热情感染，但她知道，只有通过仔细计算和分析，才能确保他们的计划能够成功实现。

电子姐姐决定先静下心来，认真计算反应的吉布斯自由能变化。她坐在书桌前，翻开那本已经有些泛黄的化学教科书，脑海中回忆起老师的谆谆教诲：“任何化学反应的可行性，都要通过吉布斯自由能变化来判断。只有当 ΔG° 为负值时，反应才能自发进行^[2]。”

电子姐姐拿出她小小的笔记本，开始一项项仔细计算。她首先列出了反应的化学方程式，确定了反应物和产物的状态： $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 1/2\text{O}_2(\text{g})$ 。接着，她计算了标准状况下反应的焓变和熵变，通过公式 $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$ ，最终得出反应的标准吉布斯自由能变。

“ $\Delta G^\circ = +237.19 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。”她终于得出了结果，眉头微皱，“这意味着反应是非自发进行的。虽然反应生成气态分子，熵变为正，对反应有利。但是由于O—H键的键能要比H—H键和O—O键的键能要大很多，导致了 $\Delta H^\circ = +285.83 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。”听到这个结果，水分子的脸上露出了一丝担忧，

眼中闪烁着不安的光芒。“那电子姐姐还能去我的城市舞蹈吗？”他弱弱地问道，声音中透着一丝颤抖和渴望。

“虽然我非常感激你的邀请，但我必须遵循热力学定律。”电子姐姐温柔地说道，眼中流露出深深的无奈。她微微低下头，仿佛在传递一份难以割舍的情感。“我不想让你失望，但这是我的宿命。”她的声音柔和而坚定，内心充满了遗憾，仿佛被无形的规则束缚着，尽管她多么希望在水分子城市中翩翩起舞。然而，她深知，这份渴望终究敌不过热力学法则的约束。

水分子虽然感到遗憾，但他理解电子姐姐的坚持。临别之时，他的目光中依然流露出对未来的期待，仿佛相信终有一天，他们能够共同实现那个美丽的愿望。那临别时失望的眼神，如同一把利刃刺在电子姐姐的心头。

虽然电子姐姐拒绝了水分子的邀请，决定回到她熟悉的、被规律掌控的世界。但那个隐藏在心底的声音却越来越强烈，仿佛在提醒她：或许，真相并没有那么简单……

在纠结之中，她慢慢闭上眼睛，深深地呼吸着，随即进入了梦乡。

3 美梦：电解水之舞幻境

梦中，她仿佛进入了一个富丽堂皇的殿堂，四壁嵌满闪烁夺目的宝石，仿若天上星辰，每一颗都散发出璀璨光辉，映照得整个大殿如同白昼。殿顶悬挂着一盏硕大的水晶灯，灯光如瀑，铺满了整个殿堂的每一个角落，映得人仿佛置身仙境一般。

“这是水分子建设氢气氧气新城市的舞台！”电子小姐惊叹道，她的眼神中充满着不可思议，轻轻地捂住了自己的嘴。她从未见过如此瑰丽奇异的景象，仿佛置身于一个童话中。然而，最初的欣喜如潮水般退却，一丝愁容悄然爬上她的脸庞。她意识到自己注定无法参加这场华丽的舞会，因为该反应吉布斯自由能变是正的。这一事实让她感到十分沮丧，仿佛一股寒意悄然袭来，让电子小姐垂下了头，而她的心情也随之跌入了低谷。

“这位小姐姐，你为何不随音乐起舞？何事令你这般苦恼？”就在这时，一道清朗的声音宛如春风拂面般轻轻传入她的耳畔。电子小姐抬头，发现眼前站着一位衣着简洁的陌生男子，他眉宇间透着一股与生俱来的从容与自信，似乎能够洞悉世间万物。“你可以叫我电池哥哥。”陌生人微笑着补充道。

电子姐姐略带忧郁地说道：“你无法理解我的烦恼，这是我的宿命。我只能为系统吉布斯自由能变化是负的化学反应起舞。”

电池哥哥微微一笑，他轻声安慰道：“或许我们无法改变宿命，但我们两个在一起，可以尽情享受舞蹈的美妙，让音乐和舞步带走你的忧伤。”他的声音温柔又坚定，如同一缕柔风拂过电子小姐的心间。他接着说道，“虽然热力学定律无法逾越，但我能为系统输入能量，让那些看似不可能的反应发生。通过电催化，系统的吉布斯自由能变为正的反应，也能够舞动起来。”

“逆热力学？这怎么可能……”电子姐姐从未敢这么想过，此时听电池哥哥一说，心中既是好奇又有些害怕。

“这并不代表热力学规律被打破，因为系统接收了我的能量呀。”电池哥哥微笑着解释道，“当你从我的正极走到负极时，你会从丧丧的低能电子转变为元气满满的高能电子哟。所以虽然从系统来看，吉布斯自由能为正，但是加上我提供的能量，也就是 $\Delta G = -nFE$ ，仍然符合热力学定律。这就好比虽然房间会趋于混乱，花力气收拾后还是可以变整洁的。”

电子小姐笑了，笑声如银铃般清脆。这些天以来，她从来没有这么开心地笑过。但一种隐隐的不安却忽然出现。

“或许这只是一个梦境吧？”电子姐姐自我安慰地想着。想到这里，她终究决定放下心中的顾虑，选择相信电池哥哥的提议，心中说不出的畅快。她的嘴角微微上扬，一抹欢喜闪过眼底。“那我们开始吧？”

在音乐的节奏中，电子姐姐在电池哥哥的能量输入下开始跳起舞来。她的每一个动作都像是经过精心雕琢，翩若惊鸿，宛如游龙，眉目含情，笑靥如花。电池哥哥看得如痴如醉，忘却了呼吸。随着她的舞蹈，舞台上的水分子城市开始发生了奇妙的变化。原本静静连接在一起的牢不可破的O—H键，突然间分裂开来，化为两股流动的气流。一座氢气分子城冉冉升起，轻盈且充满活力，另一座氧气分子城则沉稳而又坚实(图2) [3]。



图2 电子姐姐的电解水之舞

“这支舞，我们就叫电解水之舞吧。”电子姐姐欢快地叫道。但转头一看，电池哥哥已悄然消失在那璀璨的灯光中，仿佛从未存在过。

就在那一瞬间，她从梦中惊醒。

4 重逢：不期而至的相遇

电子姐姐猛然睁开眼，梦中的情景却依然萦绕在她的脑海里。那座镶满宝石的宫殿，耀眼的水晶灯，还有电池哥哥的微笑，仿佛刚才的一切都那么真实，似乎只要她伸出手，就能再次触碰到那份奇妙的温暖。

她缓缓抬起手，指尖微微颤抖。然而，当她的目光落在自己手中时，一股寒意猛然袭来——一根细细的导线静静地躺在她的掌心，纤细柔软，正是梦中电池哥哥与她共舞时交给她的那根。

电子姐姐屏住呼吸，心跳加快。那根导线的触感冰冷而真实，仿佛从梦境中穿越而来，与她的现实交织在一起。她轻轻地翻动手中的导线，光滑的金属表面反射着微弱的光芒，像一条从梦中延伸出来的线索，将她紧紧牵引着。她低下头，紧紧握住那根导线，仿佛它是她唯一能够抓住的真实。她无法确定，电池哥哥是否只是她的梦。

须臾之后，电子姐姐走在熙熙攘攘的街道之中，心头仍然萦绕着梦中的温暖，无法摆脱电解水之舞的记忆。就在她陷入沉思时，一个熟悉的身影引起了她的注意——正是梦中的电池哥哥。

电子姐姐的心猛地一跳，带着惊讶和好奇，小心翼翼地向他走去。她的脸上泛起一抹红晕，双手微微颤抖，仿佛怕这美好的幻象会在触碰的瞬间消失。电池哥哥微笑着，散发出一种让人安心的气息，仿佛一束温暖的阳光照进了她的心田。他们的目光在空中交汇，那一刻，仿佛有一种超越言语的联系在他们之间悄然形成。

“嗨，你好啊。”他热情地打招呼，声音中带着一丝熟悉的感觉，仿佛他们早已相识。“我们似乎在哪里见过？”

电子姐姐的心跳得更快了，她忍不住对这意外的重逢微笑。仿佛命运再次将他们带到了一起，只不过这一次是在城市的街道上，而不是水分子华丽的舞台。“嗨，你好。”她回应道，声音中难掩兴奋，“我……我刚刚做了一个很奇怪的梦，梦见了你。”

电池哥哥的笑容更加灿烂，眼中闪烁着一丝调皮和温柔。“是吗？梦有时候真是有趣。”

他们并肩走着，周围的喧嚣仿佛都变得模糊，只有彼此的存在是那么真实。电子姐姐心中依然萦绕着一种似曾相识的感觉，仿佛她与电池哥哥有着超越时间和空间的联系，尽管他们只在梦中相遇。

“我们似乎还有很多话要说。”电池哥哥轻声说道。

“我也这么觉得。”电子姐姐微笑着，眼中闪烁着期待，好奇还有什么样的惊喜等待着她。

“电催化真是个令人着迷的领域，你觉得呢？”电池哥哥继续说道，“从马库斯电子转移的原理到电催化的应用，一切都是那么奇妙。”

电子姐姐微微皱眉，露出一丝困惑的表情。“电催化？我不太明白……”

电池哥哥温柔地笑了笑，耐心地解释道，“电催化是一种利用电能来促进化学反应的技术。比如，通过电解水可以产生氢气和氧气，这是未来清洁能源的重要来源。这一切其实多亏了你们电子一族的帮忙。”

听到电解水，电子姐姐恍然大悟，眼睛一亮，“哦，我明白了。电催化在现实中有广泛的应用前景。”

电池哥哥点点头，“是的，电催化技术的进步可以提高能源的利用效率，实现绿色化学的理念。我们正处在一个科技飞速发展的时代，每一次的创新和突破都可能带来巨大的改变。”

电子姐姐感叹道，语气中带着憧憬，“这些科学探索就像一场场美妙的旅程，虽然未知，且有崎岖，但充满期待。”

电池哥哥深有同感，目光柔和，“是的，每一个新突破，都像是解开了一片新的天地。这也是我一直热爱化学的原因。”

“我还要去人类的有机化学实验室参观，因为有机电催化正是方兴未艾的领域。”他突然开口，语气中带着一丝激动，“你要一起去吗^[4]？”

她惊讶地抬起头，心中涌起一股兴奋和好奇。这是一个难得的机会，能够一窥人类世界的奥秘，尤其是有机化学实验室，对她来说充满神秘和吸引力。在她的印象里，有机化学家就像是舞蹈编导，他们在机理图中画的箭头不是简单的符号，而是电子们的舞步方向。那些精妙的箭头，仿佛是在指导一场无形的芭蕾，每一个动作都精确而优雅。她似乎能看到电子姐妹们在原子核之间轻盈地旋转、跳跃，犹如星辰在夜空中编织出一幅幅美丽的图景。通过这些精巧的舞步，有机化学可以创造出各种各样的化合物，从简单的小分子到复杂的大分子，每一种都有着独特的结构和性质，为人类的生活和发展提供了无尽的可能性。

“当然！”她兴奋地回答道，“我愿意！”声音里带着一丝甜蜜的激动。

电池哥哥露出欣喜的笑容，眼中充满温暖，“太好了，我们一起去探索有机电催化这一未知的领域吧！这是我的梦想！”

5 科研：电催化去消旋化

转眼间，他们一同来到了有机化学实验室。电子姐姐和电池哥哥静静地站在实验室门口，观察着繁忙的场景。他们看到两位穿着白大褂的实验员正在热烈地讨论。

“当化学反应产生了两种互为镜像的分子，也就是所谓的对映异构体时，它们可能具有不同的生物活性或化学性质。这就好比是在一个舞台上，两位舞者同时跳着同样的舞步，但却是相反方向的。在某些情况下，这种不对称性可能会带来严重的后果，例如，一个手性药物可能只有一种对映异构体才具有治疗效果，而另一种则可能无效，甚至带来副作用。其中最著名的例子就是被称为‘反应停’（沙利度胺）的药物。”一个实验员解释道。

“那太糟糕了，我们如何才能得到单一的对映异构体呢？”另一个实验员急切地问道。

“我们实验室研究去消旋化反应就像是舞台上的指挥者，它可以改变分子的构型。这样，我们

就可以获得纯净的手性化合物，而不必担心它们的异构体会带来的问题。这种化学手段一旦实现，将在医药、农药等领域都有潜在的应用，能帮助我们生产出更安全有效的药物和其他化学品^[5]。”

“原来如此，那我们赶紧开始实验吧。”

“我还没说完呢！”实验员不满地说道，“因为去消旋化反应从一对对映异构体合成单一构型的产物，化学键没有变化，所以焓变为零。但微观状态数的比值 W_2/W_1 为1/2，这是因为从同时有R和S构型两种微观状态变为了只有S构型这一种状态，即熵变为负。根据玻尔兹曼熵的公式， $\Delta S^\circ = R \ln(W_2/W_1)$ ，注意这里计算一摩尔反应时，需要使用理想气体常数 $R = 8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）而不是玻尔兹曼常数 k 。因此， $\Delta G^\circ = -T\Delta S^\circ = RT \ln 2 = +1.76 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。这说明去消旋化反应是逆热力学过程。”

“那怎么办？逆热力学反应不是没法发生吗？”另一个实验员担忧地问道。

“不用担心！针对此难题，我们实验室开发了化学修饰电极作为催化剂，从而克服了氧化还原兼容性的问题。”实验员自信地回应，“简而言之，我们可以通过把催化剂固定在电极上，让原本难以还原的催化剂优先被还原，从而可以利用电能实现了逆热力学反应^[6]。”

“逆热力学？”这四个字如一记闪电般击中了电子姐姐的心房。她迅速回过神来，心里隐隐感觉到，这次的实验可能会揭开某些她一直渴望知道的答案，或许关于她自己，也或许是整个微观世界的秘密。她抬眸望向一旁的电池哥哥，只见他满脸通红，满怀期待，一副跃跃欲试的样子。但同时，一股突如其来的不安感也悄然袭上她的心头。

“我们可以帮忙。”电池哥哥鼓起勇气对实验员说道。电子姐姐感到一股决心涌上心头。她轻轻点头，脸上绽放出一抹支持而温暖的微笑。

实验员听到他们的意愿，露出欣慰的神色。“谢谢你们的支持，这对我们来说意义非凡。”实验员激动地说道。他们立刻开始向电子姐姐和电池哥哥介绍他们的研究，并展示了他们最新的实验数据。电子姐姐和电池哥哥仔细聆听，他们虽然不懂人类的有机化学，但他们努力理解每一个术语和概念。

“可以开始了。”

电池哥哥的音乐声响起，随着电子姐姐优美的舞步，舞台上的两个消旋体二级醇分子仿佛也跟着起舞。它们原本以镜像对称的方式存在，如今在舞台上相互呼应，仿佛是一对舞伴(图3)。



图3 电子姐姐的电催化循环去消旋化之舞

然而，随着电子姐姐的舞蹈越来越灵动，这两个分子似乎也被她的活力所感染。在催化剂的作用下，它们开始缓慢地转动，仿佛在舞蹈的节奏中律动。突然间，一种神奇的变化发生了——这两个消旋体分子竟然从镜像状态变成了单一构型！这一刻，舞台上分子的熵减少了！

“这莫非是传说中的，电催化循环去消旋化之舞！”电池哥哥欢呼道。

电子姐姐感受到一股前所未有的兴奋涌上心头，她的电子波动似乎与化学反应的节奏融为一体。

她的舞步越来越轻快，引导分子们朝着想要的方向前进。这一奇迹般的变化引起了实验员的惊叹和赞叹。实验员们的目光紧紧盯着反应器，屏住呼吸，仿佛怕错过这神奇的一刻。

实验员兴奋地宣布：“成功了！我们突破了反应的瓶颈，去消旋化反应完美完成！”

电池哥哥露出了欣慰的微笑，准备庆祝实验的成功。然而，电子姐姐却感到了一股异样的力量。一个神秘的声音在她心底低语：“所有命运馈赠的礼物，早已在暗中标好了价码。”

她低头看着自己手中的导线，发现它正散发出一种奇异的光芒。电子姐姐的心猛地一沉，恐惧与不安像潮水般涌上心头。

“不！”电子姐姐的声音中带着一丝颤抖，她轻声喃喃道，“我感受到了一种无法控制的力量。我的舞蹈……它正在推动某种不详的变化，减少熵所需的能量并非凭空而来，每一次舞蹈的动作，都在消耗着电池哥哥的能量……”

话音未落，一道冰冷的声音在她心底回荡，如同来自宇宙的警告：“热力学定律不可违背……一旦突破界限，必将付出代价。”

电子姐姐只觉得天旋地转，眼前一黑。

6 尾声：夕阳见证的别离

实验室里，夕阳的余晖透过窗户轻柔地洒在地面上，微弱的光线在寂静的空气中跳跃。醒来的电子姐姐站在实验室一角，眼前的景象让她心如刀割。电池哥哥双眼紧闭，脸色苍白，宛如一张未上色的画布，失去了原本的光彩。

她缓缓地走到电池哥哥的身边，蹲下身子，眼中溢满泪水。她伸出手来，抚摸他的额头，见他额头发烫，不知是焦耳热，心中更是忧急。她以袖子拭去他脸上的冷汗，低声道：“你……你怎么了？电池哥哥，你快些醒来啊！”

实验室里灯光突然明亮起来，原来是实验员打开了灯。“不好，电池没电了！”实验员们迅速行动起来，将充电设备接入电池哥哥的两极。电流从设备中缓缓流入电池哥哥的体内。电子姐姐的眼睛紧紧盯着电池哥哥，她的手心开始出汗。

电池哥哥的苍白脸色逐渐发生变化，他的面色从无生气的灰白转变为淡淡的红润。

“电流正在稳定地输入中，他的状态有所好转！”一个实验员高声报告道，声音中透露出一丝振奋。

当最后一缕电流注入结束时，电池哥哥的眼睫毛轻轻颤动，他的眼睛慢慢睁开了。电子姐姐的心脏猛烈跳动，颤抖着呼唤：“电池哥哥，你醒了？”她几乎不敢相信自己的眼睛，那些压抑的担忧瞬间化作满心的欢愉。她轻轻握住电池哥哥的手，脸上露出了久违的笑容，眼中的泪水如泉涌：“你终于醒了，我……等得好久了。”

电池哥哥看到她眼中的泪水与笑容，心中充满了感动。他声音沙哑地回复：“我……没事了，你放心吧。”

实验员们露出了微笑，纷纷松了一口气。“我们都很高兴看到你恢复了。”他们开心地说道，“而且反应也不用重新开了，实验成功了！”

电池哥哥点了点头，看向实验员们，眼中闪烁着感激的光芒。电池哥哥又望了望四周，他似乎被实验室里的一切所吸引。在这里，他看到了无穷的可能性和挑战，也感受到了科学探索的乐趣和意义。他愿意为了科学的进步和人类的好奇而辛勤工作，即使这意味着要付出无数的时间和精力。

电池哥哥深吸一口气，心中不舍，但他知道路已经注定，说道：“我想留在这里，继续探索化学的奥秘。”

电子姐姐背过身去，努力不让自己看向电池哥哥的目光，手指微微颤抖。理智在告诉她，电池哥哥做出了正确的选择——继续为科学贡献力量是他的使命和梦想所在。然而，情感却依旧无法释怀，那股无法抑制的失落感像潮水般席卷而来。

“我明白。”她终于轻声说道，试图掩饰内心的哀伤。

电池哥哥回以一个灿烂的笑容，他的笑容越温暖，电子姐姐的心却越痛。

“再见了哦，电池哥哥。”她的呢喃轻若微风。

“再见，电子姐姐。”

电池哥哥深深地凝视着她，他张了张嘴，似乎要说：“这世上或许有 10^{51} 个全同的电子，然而你是我心中独一无二的电子姐姐。”然而，这心里话终究只像一片落叶，轻轻停在记忆的湖面，没有泛起波澜。

电子姐姐终于转身，缓缓离开了实验室，每一步都像是拖着千斤重担。往日里读过的那些小说书中片言只语，此时纷至沓来，在她脑中回荡：“你瞧那电子云聚了又散，散了又聚；那化学键断了又生，生了又断；人生离合，亦复如斯。”但这番清醒，却未能带来半点慰藉，反倒更觉心中苦楚。

不知不觉，她已走远了实验室。夕阳渐沉，河畔的柳树随风摇曳，树上的乌鸦啊啊而鸣。电子姐姐再也无法抑制心中的情感，泪水悄然滑落脸颊。

正是：

晚日寒鸦一片愁，柳塘新绿却温柔。

若教眼底无离恨，不信人间有白头。

(注：调寄《鹧鸪天》，作者乃北宋词人辛弃疾，作于宋孝宗淳熙八年)

7 后记：走向崭新的开始

三年后。

电子姐姐再次漫步在拥挤喧嚣的街道上。她的思绪不禁回到三年前，街角熟悉的咖啡店、斑驳的墙壁，甚至那家总是播放老歌的小店，都承载着她与电池哥哥共同谈论奇妙电催化的美好记忆。

恍惚间，突然对面一个穿着普通的年轻人向她光速飞奔而来，她并不认识。

“我叫光子，也是电磁波的化身，或者说是我的两重身份。这大概取决于你如何观测我，如果你愿意的话。”年轻人略带紧张地自我介绍道，似乎是典型技术宅的开场白，却带有一股特有的真诚与执着。

这让人摸不着头脑的话却也不禁让电子姐姐噗嗤一笑，心中涌起一抹熟悉的感觉，仿佛命运的齿轮再次开始转动。她隐隐感觉到，一场新的光催化逆热力学之旅或许正悄然拉开帷幕^[7]。

致谢：本文中所有插图均由王子祎女士绘制提供。

参 考 文 献

- [1] Clausius, R. *The Mechanical Theory of Heat*; Macmillan, 1879.
- [2] Brown, T. L.; LeMay, H. E.; Bursten, B. E.; Brunauer, L. S. *Chemistry: The Central Science*, Vol. 13; Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1997.
- [3] Quan, L.; Jiang, H.; Mei, G.; Sun, Y.; You, B. *Chem. Rev.* 2024, 124, 3694.
- [4] Yan, M.; Kawamata, Y.; Baran, P. S. *Chem. Rev.* 2017, 117, 13230.
- [5] Huang, M.; Pan, T.; Jiang, X.; Luo, S. *J. Am. Chem. Soc.* 2023, 145, 10917.
- [6] Zhu, C. J.; Yang, X.; Wang, J. *Nat. Catal.* 2024, 7, 878.
- [7] Wang, P. Z.; Xiao, W. J.; Chen, J. R. *Nat. Rev. Chem.* 2022, 7, 35.