

King of Dumbs

笨蛋之王

级别: ♠ 技术

能无中生有吗？轻松搞懂守恒定律

质量、能量和电荷既不会凭空产生，也不会凭空消失，只会改变形式。拉瓦锡、滑梯、气球和 $E = mc^2$ ，配两个互动小工具，分三个层次讲清楚。

中文 发布于 2026年10月15日



扫码打开可互动的课程

<https://kingofdumbs.com/zh/lessons/conservation-laws>

你将学到

- 质量守恒和原子守恒（拉瓦锡）
- 能量守恒
- 电荷守恒，以及质子和中子总数守恒
- $E = mc^2$ ：质量也是能量

学这一课之前

如果有什么看不懂，这些课会从零讲起：

1. [一堵墙是由什么构成的？轻松搞懂原子和元素](#)
2. [焦耳、瓦特还是卡路里？轻松搞懂能量和功率](#)

本课会出现的符号

Δ 变化量：变了多少 (♠) · E_a 下标：右下角的标签 (♠) · H° °表示标准状态，不是度 (♠) · Σ 求和：全部加起来 (♠) · x_i 下标 i ：第 i 个元素 (♠) · $\bar{x}$ 上横线：平均值 (♠) · $\cdot$ 点：乘（或点积） (♠) · $\rightarrow$ 箭头：变成 / 趋近于 (♠) · 10^{-3} 负指数：表示除 (♠) · $J/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 复合单位 (♠) · ν nu：系数或中微子 (♠) · τ tau：特征时间 (♠) · π pi：3.14159...（或 π 介子） (♠) · γ gamma：光子 (♠)

往壁炉里扔一根木头。一个小时后，只剩下一小把灰，比木头轻得多。其余的去哪儿了？变成“无”了吗？

这节课的傻问题是：**能无中生有吗？**或者反过来问：能让一样东西彻底消失吗？简短的回答是：不能。宇宙记着几本从不出错的账。东西会变形状、换地方、改样子，但账总是对得上。

这节课讲其中四本账：原子的账、能量的账、电荷的账，还有把质量和能量连在一起的那本，也就是著名的 $E = mc^2$ 。

选一张牌：零基础选 ♣，不怕简单公式选 ♦，想看符号推导选 ♠。随时可以换。

什么都没丢：质量

♦ → ♠ 从进阶到技术

♦ 里的说法	♠ 里的写法
每种物质前面的数	化学计量系数 ν_j (反应物取负)
$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	$\sum_j \nu_j X_j = 0, \nu = (-1, -2, 1, 2)^T$
两边每种元素的原子一样多	$A \cdot \nu = 0, A_{kj}$ 为物种 j 中元素 k 的原子数
配平反应	求 A 的零空间：维数 = 物种数 - $\text{rank}(A)$
1 摩尔的质量	摩尔质量 $M_j = \sum_k m_k A_{kj}$, m_k 为元素 k 一个原子的质量
封闭系统	与外界没有物质交换的系统

$$A = \begin{matrix} & \text{CH}_4 & \text{O}_2 & \text{CO}_2 & \text{H}_2\text{O} \\ \begin{matrix} \text{C} \\ \text{H} \\ \text{O} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot \nu = 0$$

$$\nu = (-1, -2, 1, 2)^T \quad (\text{反应物取负})$$

$$\sum_j \nu_j M_j = \sum_k m_k (A\nu)_k = 0$$

一个反应写成 $\sum_j \nu_j X_j = 0$, 反应物的 ν_j 为负, 生成物为正。每种元素 k 守恒, 就是对所有 k 有 $\sum_j A_{kj} \nu_j = 0$, 即 $A \cdot \nu = 0$ 。配平反应就是求 A 的零空间。

对甲烷来说, A 是 3×4 矩阵, 秩为 3, 所以零空间是一维的, 反应在相差一个倍数的意义下唯一: $\nu = (-1, -2, 1, 2)$ 。在拉瓦锡的发酵反应 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2 \text{CO}_2$ 中, 有三种元素、三个物种, 但秩是 2, 同样只有一个解。当零空间的维数大于 1 (物种数多于 $\text{rank}(A) + 1$) 时, 可能的反应不止一个, 由化学而不是代数决定实际发生哪一个。

质量守恒是一个推论。由 $M_j = \sum_k m_k A_{kj}$:

$$\sum_j \nu_j M_j = \sum_k m_k (A \cdot \nu)_k = 0$$

这里假设每个原子在分子内外质量相同。这并不精确: 化学键的能量也有质量 (第 4 部分), 但误差只有 10^{10} 分之一, 没有哪台天平看得出来。OpenStax 的说法是: 物质总量没有可检测到的变化 (*Chemistry 2e*, 1.2)。

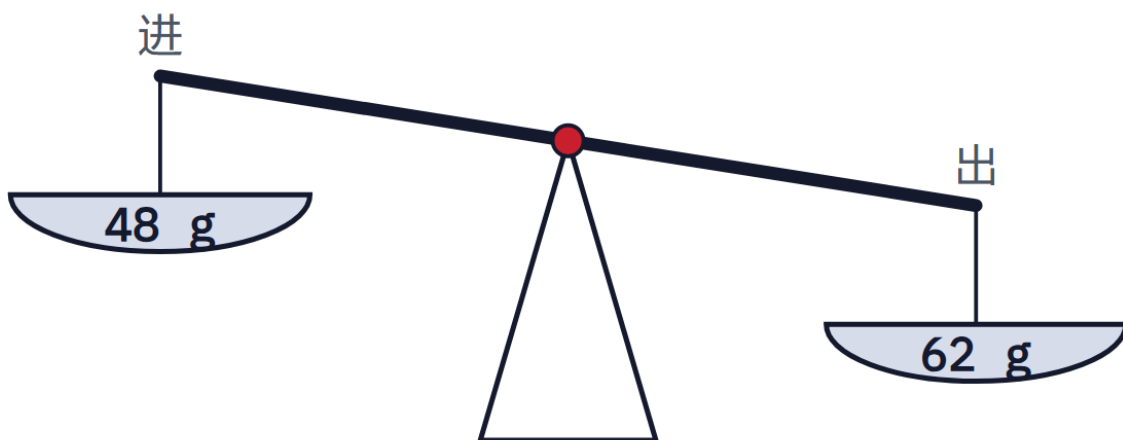
笨蛋之王说：

灰很轻，是因为其余的都从烟囱走了。什么都没消失，只是去了别的地方。



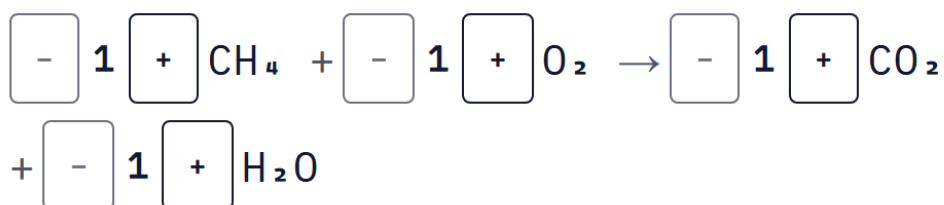
动手试试：把配方配平

在每种物质前面填一个数，直到两边每种元素的原子一样多。看天平：原子配平了，质量也就平了。先试厨房燃气，再试铁生锈。



配方

- ☒ 燃烧厨房燃气
- ☐ 用氢气造水
- ☐ 铁生锈
- ☐ 葡萄汁发酵 (拉瓦锡)



每种元素的原子数

	进	出	
C	1	1	✓
H	4	2	✗
O	2	3	✗

每个数代表 1 摩尔，质量单位是克。

没配平：H (4 → 2), O (2 → 3)。



互动小工具。在网站上试一试：<https://kingofdumbs.com/zh/lessons/conservation-laws>

能量会变形式，但不会被用掉

♦ → ♠ 从进阶到技术

♦ 里的说法	♠ 里的写法
内能	U （状态函数）
热	$Q > 0$ 表示热量进入系统
功	$W > 0$ 表示系统对外做功
总能量都保持不变	$\Delta U = Q - W$ （热力学第一定律）
运动的能量	动能 K （ $v \ll c$ 时为 $\frac{1}{2}mv^2$ ）
质量	质量 m ，静能 mc^2 （ c 为光速）
没有哪台机器能不从别处拿能量就给出能量	第一类永动机不存在
在任何过程中	在 $t \rightarrow t + \tau$ 下不变 $\Rightarrow dE/dt = 0$ （诺特定理）

$$\Delta U = Q - W$$

$$E = mc^2 + K$$

$$t \rightarrow t + \tau \Rightarrow dE/dt = 0$$

(Noether, 1918)

在热力学里，能量守恒写成第一定律 $\Delta U = Q - W$ ， Q 是进入系统的热， W 是系统对外做的功。OpenStax 称之为“以热力学中最有用的形式表述的能量守恒定律”（*College Physics 2e*, 15.1）。一台机器如果在每个循环中（ $\Delta U = 0$ ）不吸热（ $Q = 0$ ）却对外做功（ $W > 0$ ），就违反了它：这就是第一类永动机。

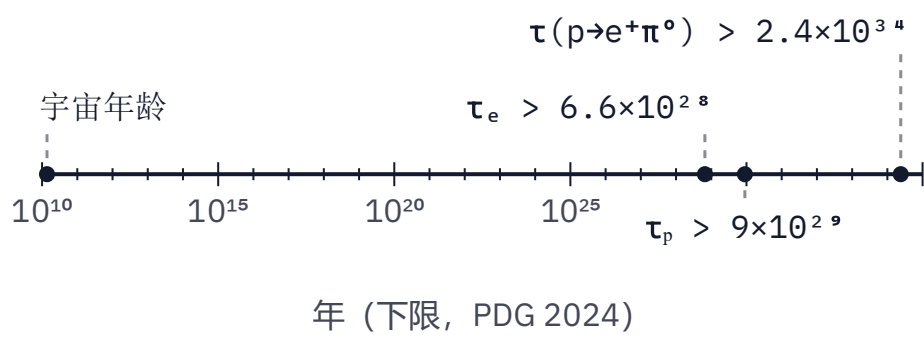
在相对论里，只要把账算对，能量依然守恒：质量为 m 的物体，除了动能 K ，还有静能 mc^2 （OpenStax, 28.6）。于是 $E = mc^2 + K$ 。第 4 部分会讲它的后果。

为什么能量守恒？因为一种对称性。埃米·诺特在 1918 年证明：物理规律的每一种连续对称性，都对应一个守恒量。如果规律从 t 到 $t + \tau$ 不变（同一个实验今天做和明天做结果一样），能量就守恒。费曼在《物理学讲义》（I, 52-3）里讲过这件事，还讲了另外两种经典对称性：空间的和转动的。

从不出错的账：电荷、质子和中子

♦→♠从进阶到技术

♦里的说法	♠里的写法
总电荷	Σq , 各电荷 q_i 之和, 守恒
质子 + 中子	重子数 B (重子 $+1$, 反重子 -1)
电子和反中微子	电子轻子数 L_e (e^- 和 ν_e 为 $+1$; e^+ 和 $\bar{\nu}_e$ 为 -1)
反中微子	$\bar{\nu}_e$
原子核里的一个中子变成了一个质子	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (β^- 衰变): Z 从 6 变为 7
平均也要等	平均寿命 τ
一个质子或电子就这么凭空消失	衰变道 $e \rightarrow \nu_e \gamma$ (中微子和光子) 和 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ (正电子和中性 π 介子)
从来没有见到过	90% 置信水平下 τ 的下限
人们找了几十年	电荷: QED 的规范对称性; B: 偶然对称性, 大统一理论 (GUT) 预言它会被破坏



在粒子物理中，要分别检查三个数 (OpenStax, *University Physics* 第 3 卷, 11.2)。以 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 为例：

	反应前	反应后
Σq	0	$+1 - 1 + 0 = 0$
B	1	$1 + 0 + 0 = 1$
L_e	0	$0 + 1 - 1 = 0$

反应 $n \rightarrow e^+ + e^-$ 守恒电荷和能量，但不守恒 B（1 对 0），所以不会发生。

实验下限（PDG 2024，Pich 和 Ramsey-Musolf 撰写的综述）：

- **电荷：** $\tau(e \rightarrow \nu_e \gamma) > 6.6 \times 10^{28}$ 年，来自 Borexino 实验（*PRL* 115, 231802, 2015）。大约是宇宙年龄的 4.8×10^{18} 倍。PDG 把电荷守恒和量子电动力学的规范对称性联系在一起。
- **重子数：**任意衰变道中 $\tau_p > 9 \times 10^{29}$ 年， $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 2.4 \times 10^{34}$ 年。大统一理论预言 B 会被破坏，但至今没有看到任何信号。

所以化学里的“元素守恒”只是一个特例：没有核反应时，每个原子核都保持自己的 Z。有核反应时，守恒的是电荷和 B。

$E = mc^2$: 质量也是能量

♦→♠ 从进阶到技术

♦里的说法	♠里的写法
$E = mc^2$	$E_0 = mc^2$; 一般情况下 $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$, p 为动量
烧掉 1 摩尔甲烷会放出 890 千焦	燃烧焓 $\Delta_c H^\circ = -890.7 \text{ kJ/mol}$
光速	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ (精确值)
消失的质量	质量亏损 $\Delta m = \Sigma m_{\text{前}} - \Sigma m_{\text{后}}$
释放的能量	$Q = \Delta m \cdot c^2$
一束能量足够高的光	光子 γ , $m = 0$, $E = pc$
在原子核附近经过时	$\gamma + N \rightarrow e^- + e^+ + N$: 原子核 N 带走多余的动量
电子-正电子对	$e^- + e^+$, 要求 $E_\gamma \geq 2m_e c^2$
MeV	$1 \text{ MeV} = 1.602\,176\,634 \times 10^{-13} \text{ J}$; $1 \text{ u} \cdot c^2 = 931.494 \text{ MeV}$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

$$\gamma + N \rightarrow e^- + e^+ + N, E_\gamma \geq 1.022 \text{ MeV}$$

$$Q = \Delta m \cdot c^2$$

$$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n, Q = 17.6 \text{ MeV}$$

$$Q / (m_D + m_T)c^2 \approx 0.38 \%$$

一般关系是 $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$; 静止时 ($p = 0$) 变为 $E_0 = mc^2$, 对光子 ($m = 0$) 则是 $E = pc$ (OpenStax, 28.6)。爱因斯坦在 1905 年提出它, 那篇论文只有三页, 标题问的是: 物体的惯性 (质量) 是否取决于它所含的能量 (*Ann. Phys.* 323, 639)。他用的是别的字母: 一个物体以辐射的形式放出能量 L , 质量就减少 L/V^2 , V 是光速。

用 $Q = \Delta m \cdot c^2$ 计算质量亏损:

- **甲烷燃烧: $\Delta_c H^\circ = -890.7 \pm 0.4 \text{ kJ/mol}$ (NIST WebBook; OpenStax 给出 -890.8)。 $\Delta m = 8.907 \times 10^5 \text{ J} / c^2 = \text{每摩尔 } 9.9 \times 10^{-12} \text{ kg}$, 相对于 80.04 克反应物: 1.24×10^{-10} 。

- ^{235}U 的诱发裂变: $Q \approx 200 \text{ MeV}$ (OpenStax UP3, 10.5) 。 $\Delta m/m = 200 / [(235.0439 + 1.0087) \times 931.494] = 9.1 \times 10^{-4}$ 。
- $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$: $Q = 17.6 \text{ MeV}$ (OpenStax UP3, 10.6) 。用 NIST 的质量, $\Delta m/m = 17.6 / (5.0302 \times 931.494) = 3.8 \times 10^{-3}$ 。

电子对产生守恒电荷 ($0 = -1 + 1$) 和 L_e ($0 = 1 - 1$) 。单个光子在真空中做不到: 在这一对粒子的参考系里, 总动量为零, 而光子在任何参考系里动量都不为零 ($E = pc \neq 0$) 。必须有第三个物体带走多余的动量, 通常是原子核: $\gamma + \text{N} \rightarrow e^- + e^+ + \text{N}$ 。NIST 的 XCOM 表格计算的正是“在原子核场中”和在电子场中的电子对产生。反过来也是同一个道理: 电子和正电子不能湮灭成单个光子 (OpenStax UP3, 11.2) 。原子核很重, 几乎不带走能量, 所以阈值仍是 $2m_e c^2 = 2 \times 0.510\,998\,950\,69 \text{ MeV} = 1.022 \text{ MeV}$ (CODATA 2022; HyperPhysics 给出相同的阈值) 。所以“无中生有”做不到: 能量要全额付清, 电荷、B 和 L 的账都保持为零。

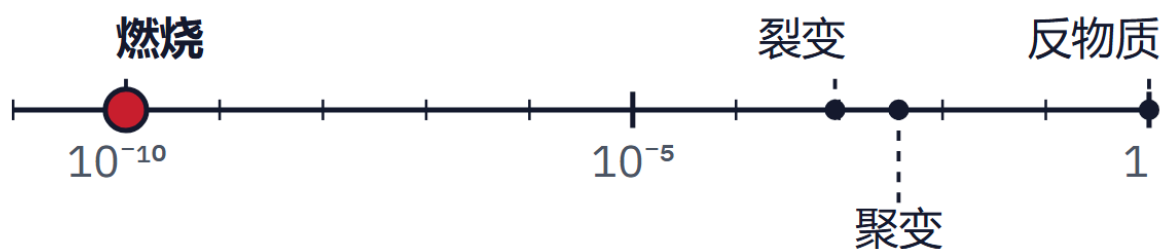
笨蛋之王说:

物质可以造。但要用能量全额付清, 而且它总是带着一个电荷相反的双胞胎出现。



动手试试: 质量里有多少能量?

选择怎么处理这些质量、用多少。看看有多少变成了能量, 这些能量能让电水壶烧多久、够一个人吃多久。试试 1 克物质遇上反物质。



变成能量的质量比例

怎么处理这些质量

- ☒ 烧掉，比如燃气加上它需要的氧气
- ☐ 把铀-235 劈开（裂变）
- ☐ 把氘和氚合在一起（聚变）
- ☐ 让它和反物质相遇

参加反应的质量



占质量的比例 8.1×10^9 分之一

变成能量的质量 120 ng

能量 1.1×10^7 J

2 千瓦电水壶连续烧 1.5 小时

够一个人吃 1.3 天

1 kg 里有 120 ng 变成了能量 (8.1×10^9 分之一)。



互动小工具。在网站上试一试: <https://kingofdumbs.com/zh/lessons/conservation-laws>



最后的挑战

1. 烧完一根木头，剩下 200 克灰。其余的去哪儿了？

- a. 被火烧没了
- b. 变成气体跑到空气里了，还带着它拿走的氧气
- c. 全部变成了能量

2. 一辆自行车刹车停下。它的运动能量去哪儿了？

- a. 消失了
- b. 在刹车和车轮里变成了热
- c. 回到了骑车人的腿里

3. 能造出一个电子吗？

- a. 能，在实验室里无中生有
- b. 能，只要能量足够，而且它总是和一个带正电的反粒子一起出现
- c. 不能：物质永远造不出来



三句话总结

- 1. 在化学反应中，原子只是重新排列：一个都没有多，一个都没有少，所以进去的和出来的一样重。
- 2. 能量也不会凭空产生或消失：它只改变形式（高度、运动、热……），“用掉”能量就是把它变成再也派不上用场的热。
- 3. 电荷以及质子和中子的总数也总是对得上，而质量是高度浓缩的能量（ $E = mc^2$ ）：物质可以造，但必须用能量全额付清。

参考资料

- Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, 第 1 卷 (巴黎, Cuchet, 1789) , 第 XIII 章: [古登堡计划](#)。对照: OpenStax, *Chemistry 2e*, [1.2](#)。配平方程式: [OpenStax, 4.1](#)。
- 能量守恒和热力学第一定律: OpenStax, *College Physics 2e*, [7.6](#) 和 [15.1](#)。对称性: [Feynman, Lectures on Physics I, 第 52 章](#); Noether (1918) , [arXiv 上的英译本](#)。
- 电荷: OpenStax, *College Physics 2e*, [18.1](#)。核反应: OpenStax, *Chemistry 2e*, [21.2](#) 和 [21.3](#)。重子数和轻子数: [OpenStax, University Physics 第 3 卷, 11.2](#)。
- 实验下限: [PDG 2024, Tests of conservation laws](#); Borexino, *PRL* 115, 231802 (2015), [doi:10.1103/PhysRevLett.115.231802](#)。
- $E = mc^2$: Einstein, *Ann. Phys.* 323, 639 (1905), [doi:10.1002/andp.19053231314](#); [OpenStax, College Physics 2e, 28.6](#)。光速和电子质量 (CODATA 2022) : [c](#) 和 [\$m_e c^2\$](#) 。电子对产生: [HyperPhysics](#) 和 [NIST XCOM](#)。
- 甲烷燃烧: [NIST WebBook](#) 和 [OpenStax, Chemistry 2e, 5.3, 表 5.2](#)。裂变和聚变: OpenStax, *University Physics* 第 3 卷, [10.5](#) 和 [10.6](#)。原子质量: NIST, [氢](#)和[铀](#)。

本课是怎样做的:在 Claude 的帮助下, 根据以上资料调研和撰写, 并于 2026 年 10 月 15 日用第二个来源核对。没有单独链接的数字是根据这些资料以及原子和能量两课计算的。插图均为原创。

答案

1. **b)** 变成气体跑到空气里了，还带着它拿走的氧气. 对。原子不会消失，它们从烟囱走了。
2. **b)** 在刹车和车轮里变成了热. 很好。能量改变了形式：这里变成了热。
3. **b)** 能，只要能量足够，而且它总是和一个带正电的反粒子一起出现. 完全正确。用能量付账，总电荷保持为零。

King of Dumbs 的课程，kingofdumbs.com。这是离线版；可以动手玩的原版在：

<https://kingofdumbs.com/zh/lessons/conservation-laws>

更新于 2026年10月15日.