

摩擦为何会产生热量？

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译，若未达意，请查阅[原文](#)

前言

我们都有这样的经验：双手互相摩擦会温暖。汽车通过刹车片与刹车盘之间的摩擦来减速，这一过程中会释放出大量热量。同样，当航天器重返地球大气层时，与空气分子产生剧烈摩擦，也会引发高温，因此必须配备隔热防护罩。那么，摩擦究竟是如何产生热量的呢？从宏观角度来看，通常的解释是：机械能，尤其是两个表面相对运动所携带的动能，被转化为热能。本文将深入探讨，在微观层面上，这一能量转化过程的本质机制。事实上，导致摩擦生热的微观机制，与热传导、理想气体定律所描述的行为，以及许多其他热力学现象背后的原理是一致的。

冲击跃迁

冲击跃迁(Impacttrans)是一种在微观层面上将动能转化为热能的机制。在微观尺度上，物体表面并不完全光滑。相对运动使得表面间的原子或分子发生碰撞。

实际上，这种撞击是原子外层电子之间的库仑力相互作用。在这过程中电子可能被激发加速，使其跃迁至更高能级，或直接逃逸轨道，从而增加系统的势能。高能级电子回落至较低能级时，所释放的势能以电磁辐射形式发出。有时，电子也可能在相互作用中跃迁至更低能级，同样释放辐射能。此外，电子在剧烈加速或减速过程中，也可直接辐射能量。

通过上述机制，机械动能被转化为辐射能，而我们在宏观上所感受到的**摩擦热**，正是这种辐射能的体现。实际上，冲击跃迁在系统能量转换平衡过程中发挥着核心作用，它将动能转化为势能与辐射能，从而驱动如热传导等一系列宏观热现象的发生。

冲击跃迁机制的其他实例

通过冲击跃迁机制将动能转化为势能与辐射能的现象，在日常生活中随处可见。其中一个常见例子，是锤子敲击物体表面后形成的凹痕。该变形源于材料内部键结构的改变：部分化学键被压缩，部分被拉伸，从而将锤子的动能转化为势能。同时，部分势能也会以辐射形式释放，表现为冲击热。这类现象，本质上是大量粒子参与的冲击跃迁过程的宏观体现。

类似地，**冲击火花**也是冲击跃迁的典型表现之一。它常见于高能碰撞场景，例如坚硬物体相互撞击，或金属工具划过表面时所产生的明亮火光。传统观点认为，这种火花来自于局部摩擦或冲击引发的高温，使微小颗粒达到燃点。但从微观角度看，这一现象实质上源于冲击跃迁作用：当两个表面发生接触、撞击或刮擦时，接触部位的原子和分子发生高速碰撞，触发冲击跃迁过程。

在此过程中，电子受到剧烈加速，并以电磁波形式释放能量。如果辐射波长位于可见光范围，就会表现为我们所见的火花。同时，冲击跃迁还可引发电子轨道跃迁，进一步释放电磁辐射。在能量足够的情况下，这些辐射甚至可以点燃飞溅出的微小颗粒，引发表面物质的燃烧。因此，**碰撞燃烧是冲击跃迁的结果，而非其原因。**

静电现象同样体现了**冲击跃迁**的作用。通常情况下，原子或分子整体上正负电荷平衡，在宏观上呈现为电中性。然而，在微观层面，电荷在分子内部的分布往往并不均匀，形成局部极性。例如，在水分子中，氧原子一侧倾向于表现为负极性，而氢原子一侧则为正极性。一些物体的表面也可能具有类似的极性特征。例如，毛皮表面通常呈负极性，而塑料棒表面则带有正极性。

当塑料棒与毛皮摩擦时，导致冲击跃迁过程，部分电子被激发从原子轨道中被撞出。这些逸出的自由电子更容易在塑料棒上积聚，使其带上负电荷；而失去电子的毛皮则相应带上正电荷。这个电荷分离的过程，正是冲击跃迁在宏观层面上的直接体现。

揭示理想气体定律的微观机制

空气分子之间同样会发生冲击跃迁事件，尤其在涉及压力和温度变化的系统中更为显著。从微观层面看，空气由大量高速运动的粒子组成，它们不断相互碰撞，并撞击容器壁。这些碰撞不仅仅是简单的弹性反弹，而是伴随着复杂的微观相互作用，在此过程中，动能通过冲击跃迁部分转化为势能和辐射能。

一个典型例子是气筒底部的温度升高。当气体被压缩时，粒子的密度增加，分子的碰撞频率和强度显著增加，从而加剧了冲击跃迁的发生。这些微观事件将机械动能转化为势能和电磁辐射，使系统温度升高。

这种通过冲击跃迁实现的动能向热能的转化机制，是气体在压缩与膨胀过程中表现出热力学行为的根本原因。理想气体定律正是这一机制的宏观体现：在体积和物质量保持不变的条件下，气体的压强与温度成正比，其关系可表示为：

$$T = \frac{V}{nR}P$$

在该公式中，T、P和V分别表示系统的温度、压强和体积，R为理想气体常数，n表示气体的物质量。现代加热与制冷设备——如冰箱、空调和热泵——正是基于这一原理运作。通过加压或减压，控制气体分子间的冲击跃迁过程，从而实现对温度的调控。分子运动、碰撞能量与热量释放之间的可预期关系，使这些技术得以稳定、高效地运行。

因此，冲击跃迁为气体的热力学行为提供了统一的物理机制，深化了我们对微观机械过程如何在宏观层面引发温度与压强变化的理解。

热传导的微观机制

热传导是一种常见的宏观能量转移过程，指热量在物体内部由高温区域向低温区域扩散。虽然傅里叶定律可准确描述其宏观行为，但其微观机制长期以来并不明确。

在微观层面，**冲击跃迁**是热传导的核心机制之一。在固体中，原子和分子以晶格排列，并在热能作用下持续振动。温度高的区域粒子的振动幅度和能量也大。相邻粒子之间由于振动强度不同而发生微观相互作用，产生冲击跃迁事件，即动能在碰撞作用中部分转化为势能与辐射能。

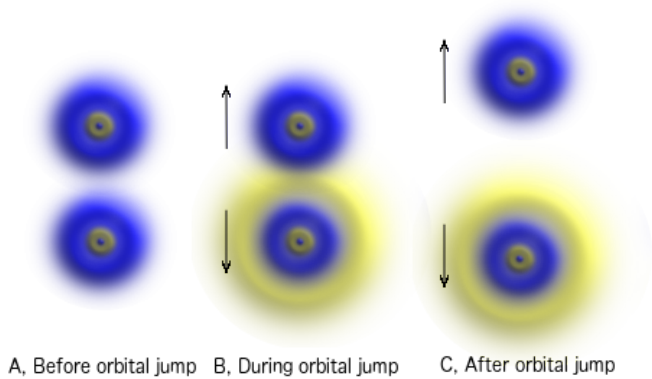
这些冲击跃迁通过辐射使能量得以在晶格中逐步传递，构成热传导的微观基础。因此，热传导不仅涉及分子、原子的局部位移，也包括电子激发与电磁相互作用，这些过程共同推动能量在材料内部扩散、传播。

此外，冲击跃迁常与其相反另一机制——**跃迁冲击(transimpact)**协同作用。跃迁冲击负责将冲击跃迁释放的势能与辐射能在空间中进一步传播。二者共同作用实现不同形式的能量转换，以及在微观层面上传递。它们共同成为连接经典热力学与量子尺度相互作用的桥梁。

跃迁冲击

库仑力通常吸引相邻的原子或分子；当它们靠得过近时，价电子之间的排斥力会迅速增强。在两者之间的某一特征距离处，吸引与排斥力达到平衡，形成稳定结构。然而，这种平衡可能在电子跃迁过程中被打破。

当原子中的电子吸收能量跃迁至更高能级时，电子云扩张，原子体积随之增大，与相邻原子之间的距离突然缩短。此时原有的平衡被破坏，排斥力急剧增强，把它们快速推开。这一由电子跃迁引发、伴随动量突发释放的过程称为**跃迁冲击**，如下图所示。



电子跃迁引发的跃迁冲击

跃迁冲击是一种瞬时、爆发性的微观事件，类似爆米花炸裂般的剧烈释放，能够将相邻粒子猛烈推开，赋予其显著动量，导致或使其运动加剧。这一机制由电子跃迁驱动，广泛存在于原子尺度的相互作用中，是许多物理过程，特别是热力学过程中的基本动力机制。从根本上说，微观粒子的动能源自辐射能，体现了势能变化所驱动的能量转化过程。

在逆向过程中，粒子的动能也能通过冲击跃迁转化为势能和辐射能。冲击跃迁与跃迁冲击协同作用，促进势能、动能与辐射能三者之间的相互转换，从而使系统内部及与环境之间实现能量平衡。

版本更新

- 08/24/2025: 本文在斯坦福初始发布
- [11/01/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, [PDF](#)
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, [PDF](#)

相关文献

- [热力学中的错误概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [布朗运动的原动力 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [温度是分子平均动能的标志吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [绝对零度的本质 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [能量转换三角 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [热膨胀是由于粒子振动引起的吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [超流体不是流体 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [为什么相变温度保持恒定 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [摩擦为何会产生热量? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [简明熵概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [熵可以减少 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [回归原理 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [金属中是否存在自由电子海? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [电子通道: 导体超导统一论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [低温和高温超导统一理论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [LK-99的局限和意义 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [地球磁场超导起源说 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [关于质量的本质问题 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [从万有引力定律到广义相对论的演化 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [爱因斯坦质能方程的最简单推导 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [如何理解相对论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [数学并非科学 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [潮汐能并非可再生能源 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)