

燃烧学—从蜡烛火焰到空天发动机

陈 正

北京大学 工学院

从蜡烛火焰说起

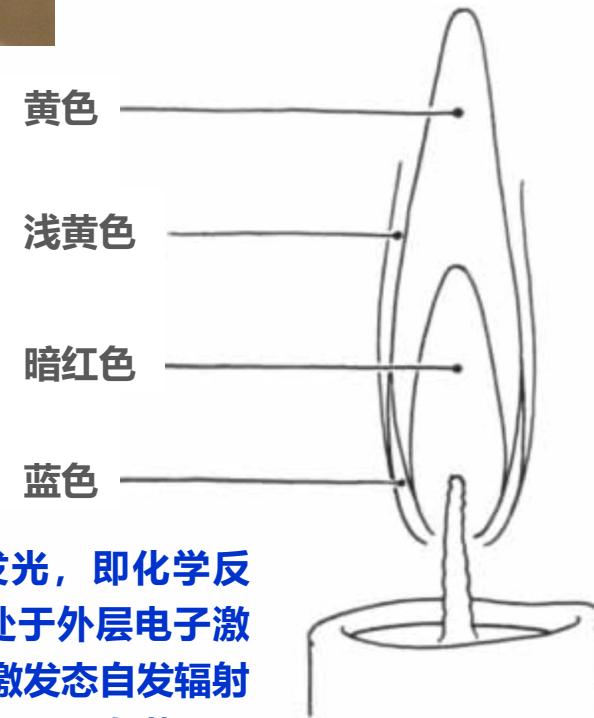


(图片来自网络)

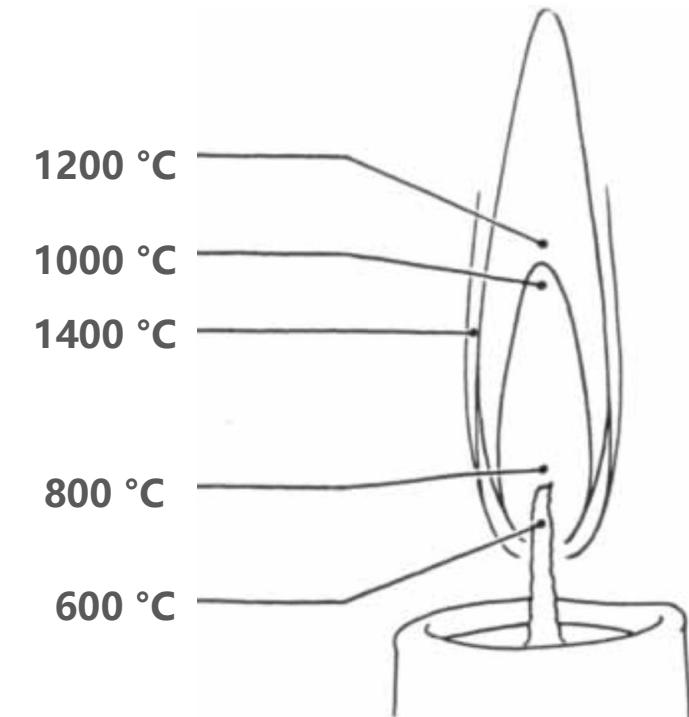
蜡烛火焰的颜色和温度



黄色来自碳黑的黑体辐射



蓝色来自于化学发光，即化学反应产生的CH直接处于外层电子激发态 CH^* ，从电子激发态自发辐射跃迁回电子基态，发出蓝色荧光



Jearl Walker, The Physics and Chemistry Underlying the Infinite Charm of a Candle Flame.
Scientific American, Vol. 238, No. 4 (April 1978), pp. 154-16

如何改变火焰颜色？

碳氢燃料

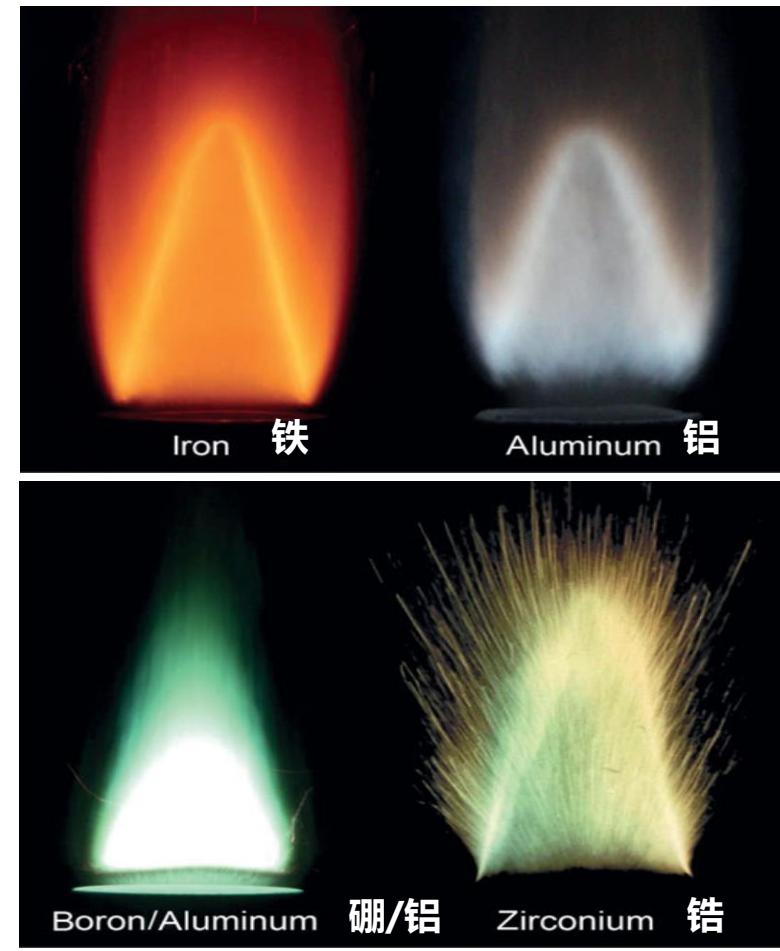


燃料
过剩

减少燃料，增加空气

氧气
过剩

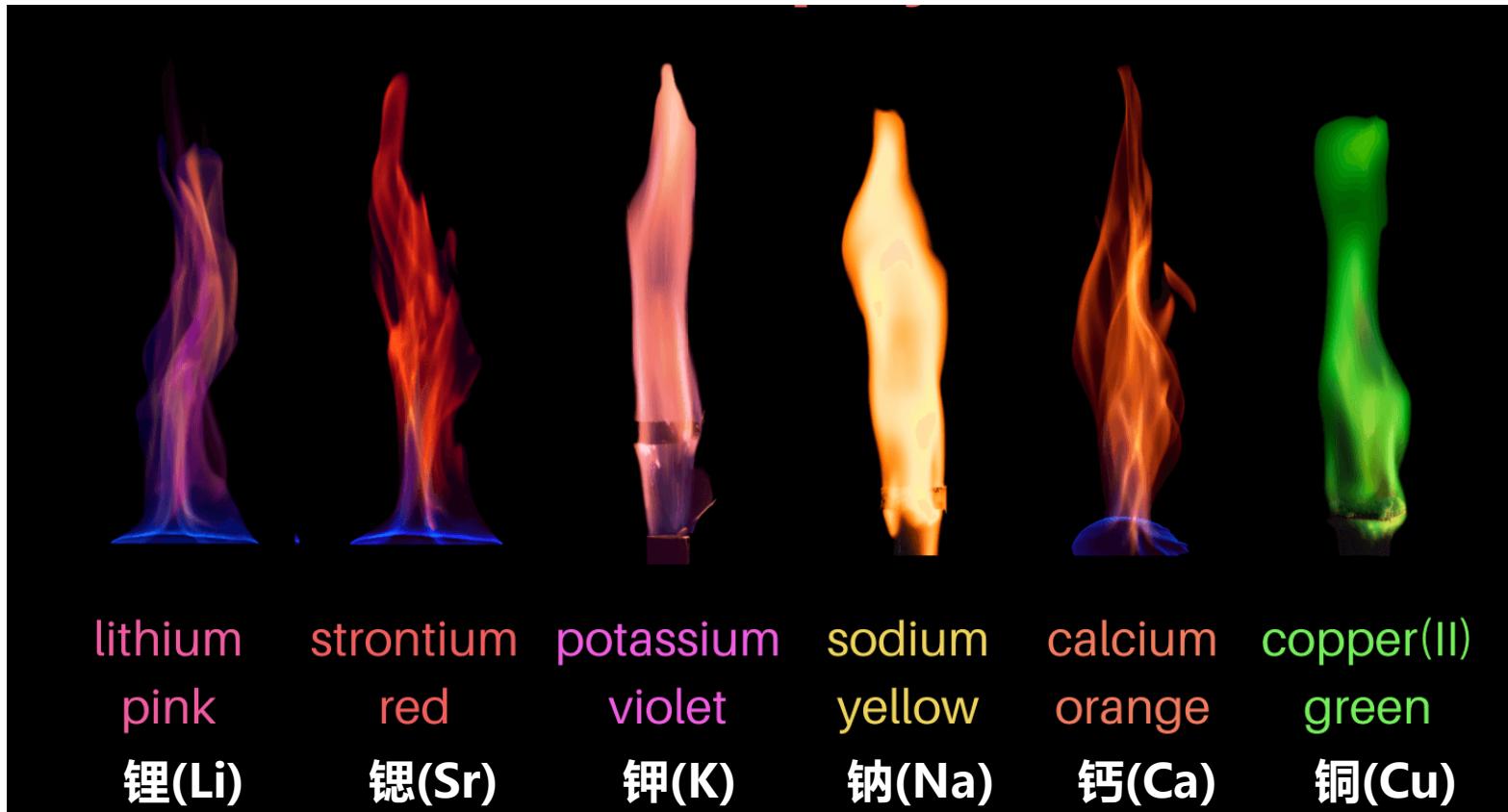
金属燃料



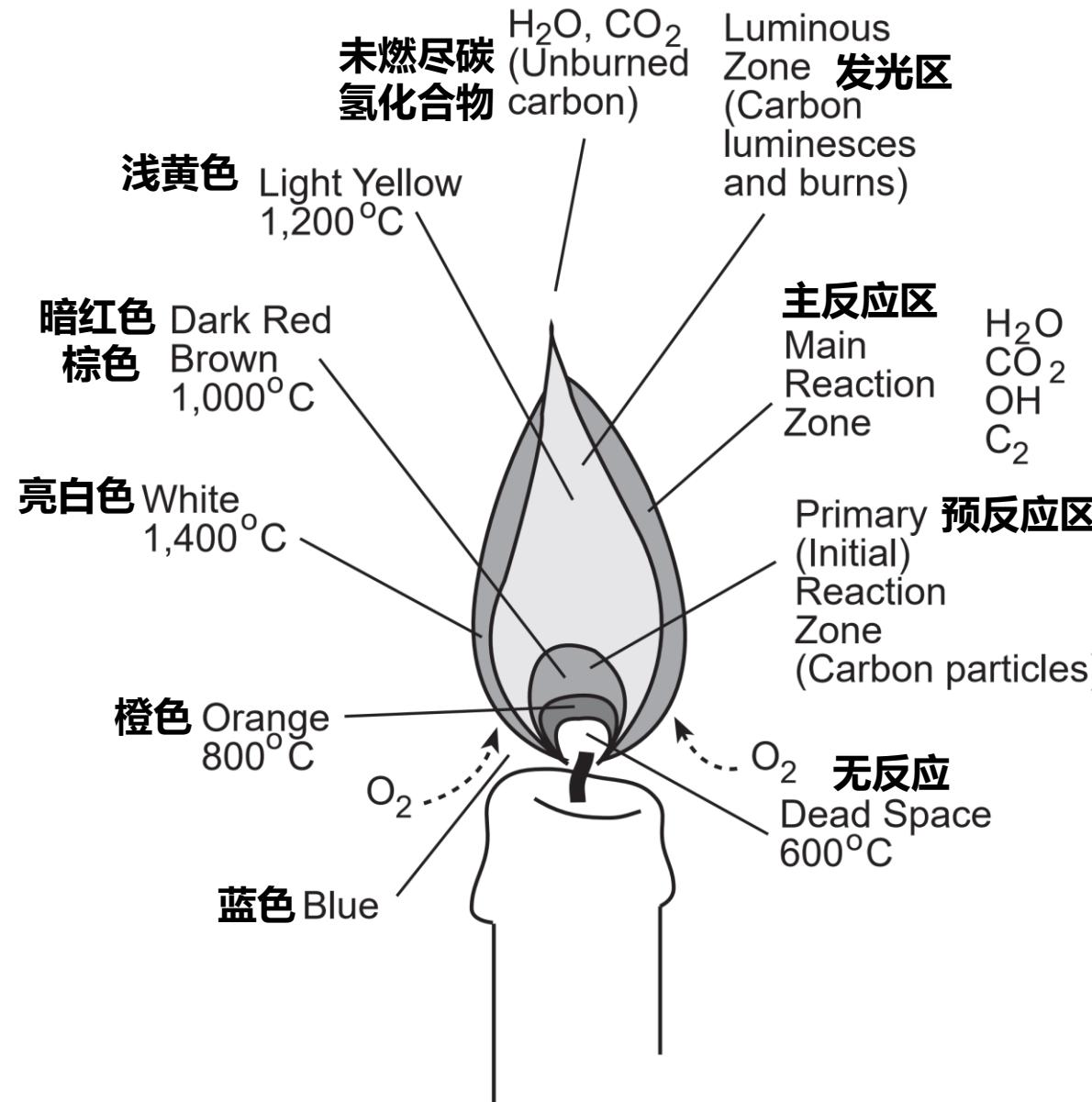
(图片来自网络)

焰色反应

通过添加不同种类的金属元素，获得五颜六色的烟花

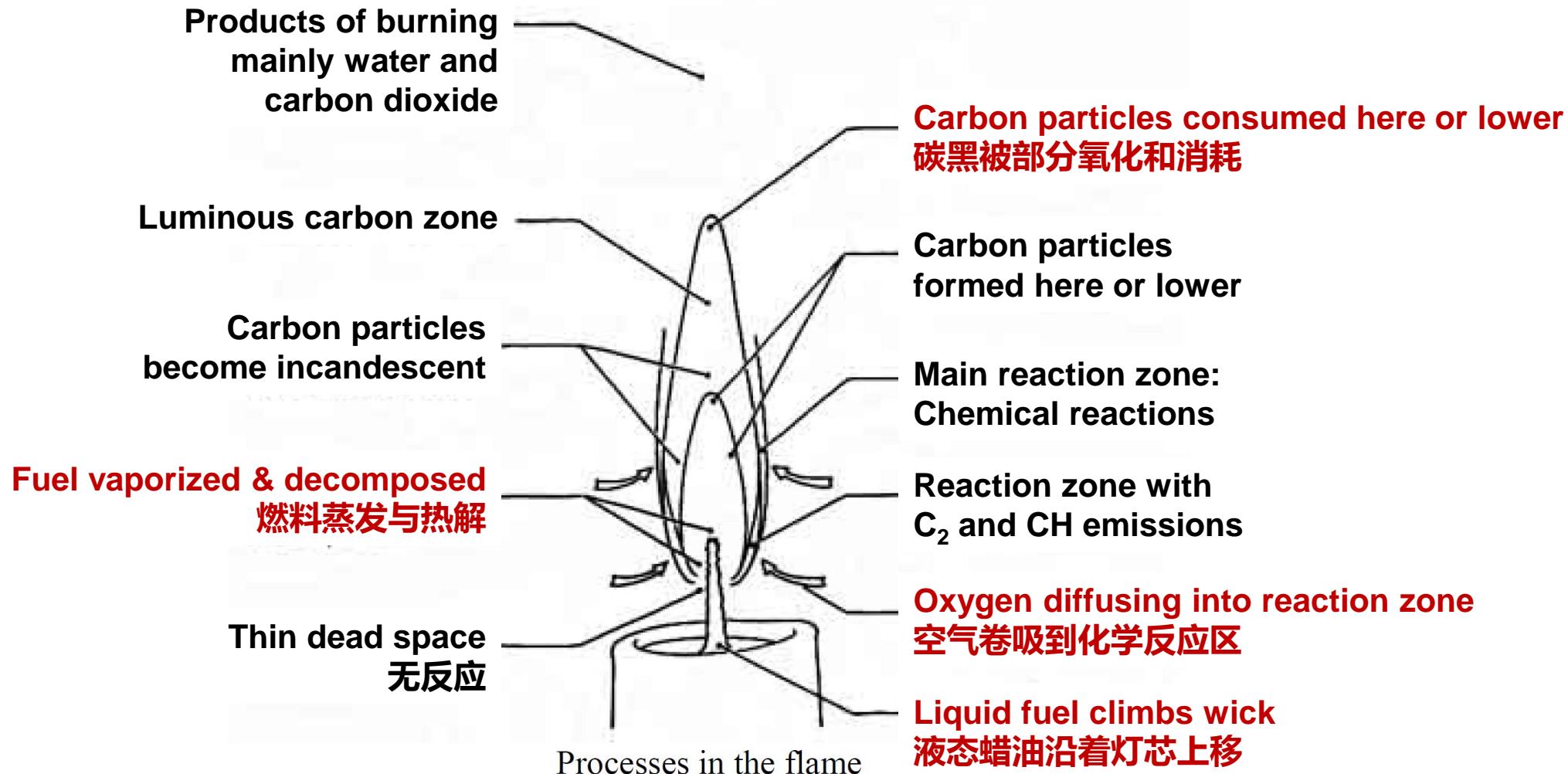


蜡烛火焰结构



(图片来自网络)

蜡烛火焰中的物理化学过程



蜡烛火焰中的物理化学过程



(视频来自网络)

- 灯芯的多孔性材料利用**毛细作用**将液态蜡油吸附并输送到火焰中

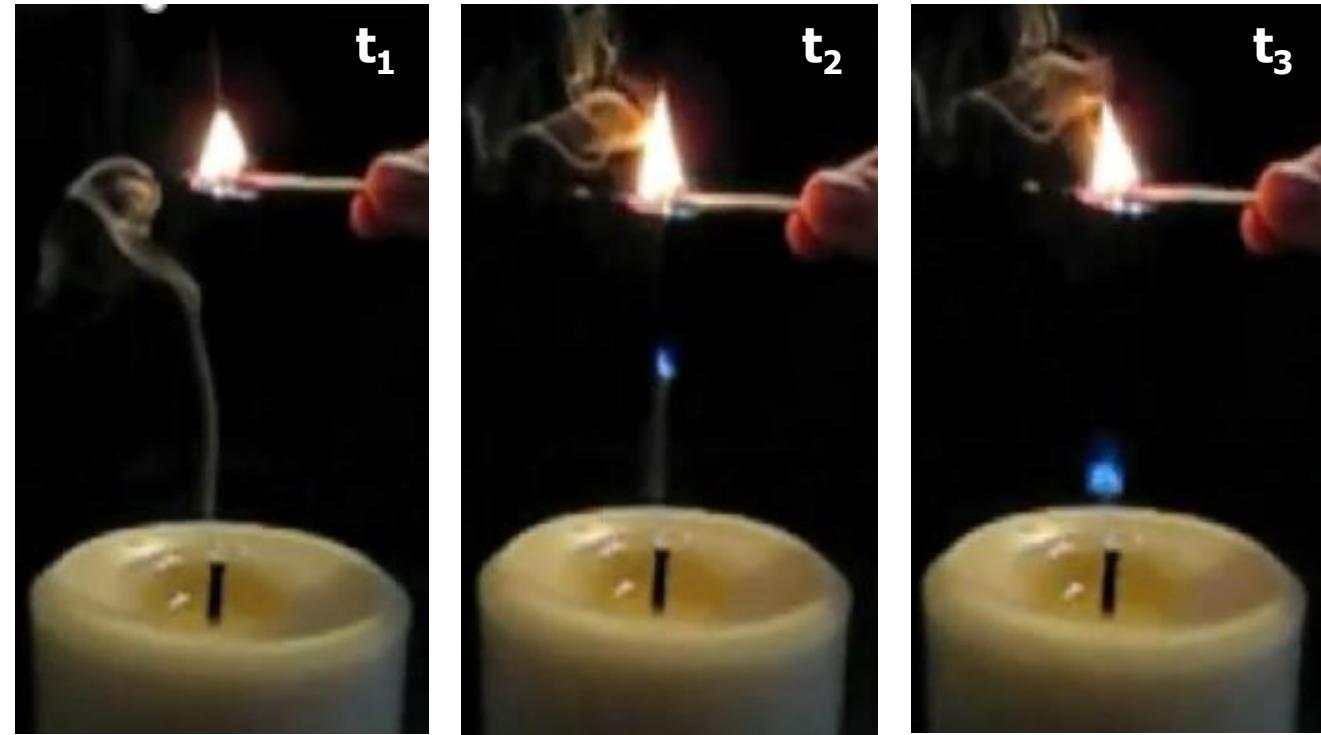
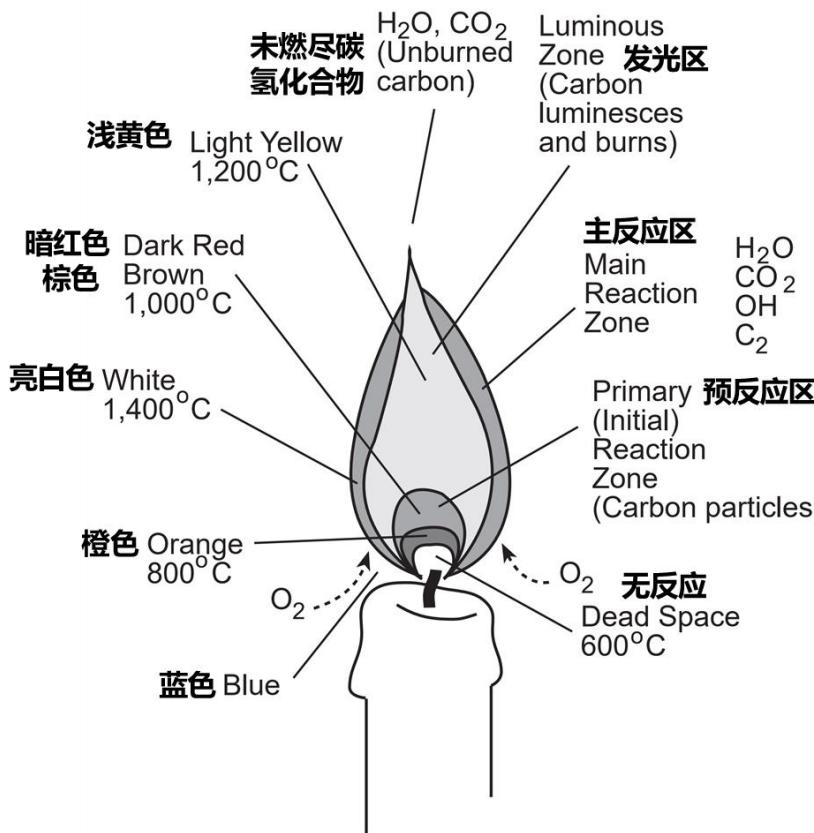
蜡烛火焰中的物理化学过程



(视频来自网络)

■ 蜡烛被吹熄后，迅速点火出现**火焰回传**

为什么“烟气”能被点燃?



■ “烟气” 中含有未燃尽气体燃料（蜡油热解产物）

剪烛西窗

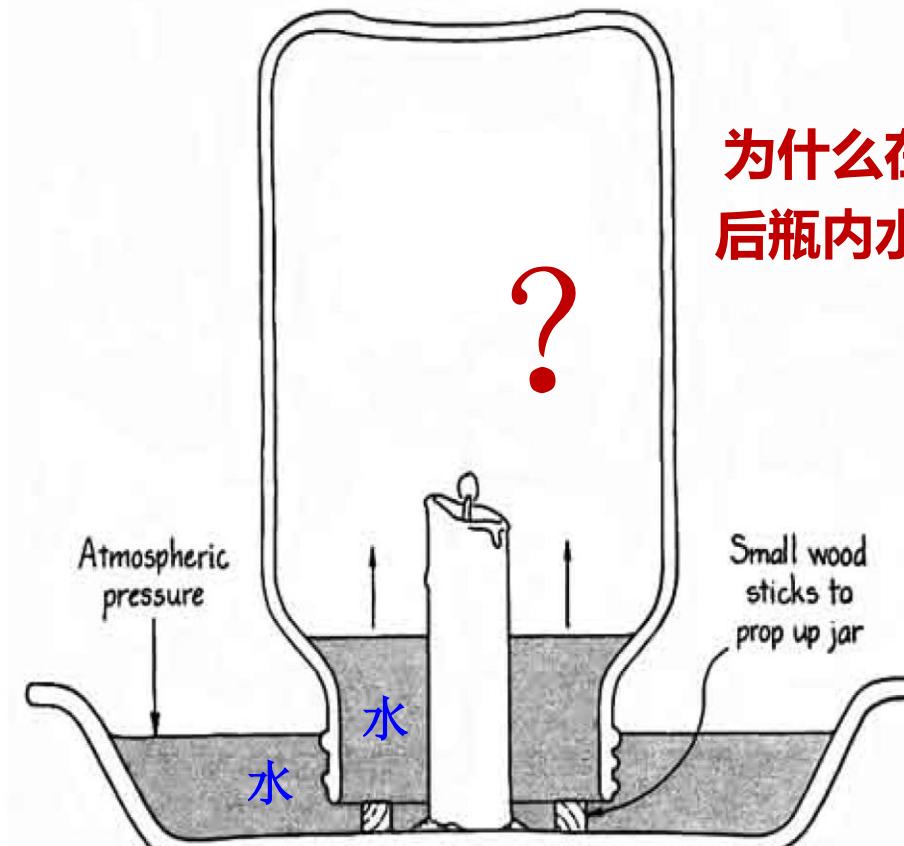


(图片来自网络)

古人为什么要剪烛？

蜡烛本身烧的快，而烛芯烧得慢，导致烛芯过长，造成火焰太大将蜡烛融化会形成浪费。古代文人常用剪烛表示夜晚长谈，或友情或爱情。

蜡烛火焰实验



为什么在蜡烛熄灭后瓶内水位会上升?



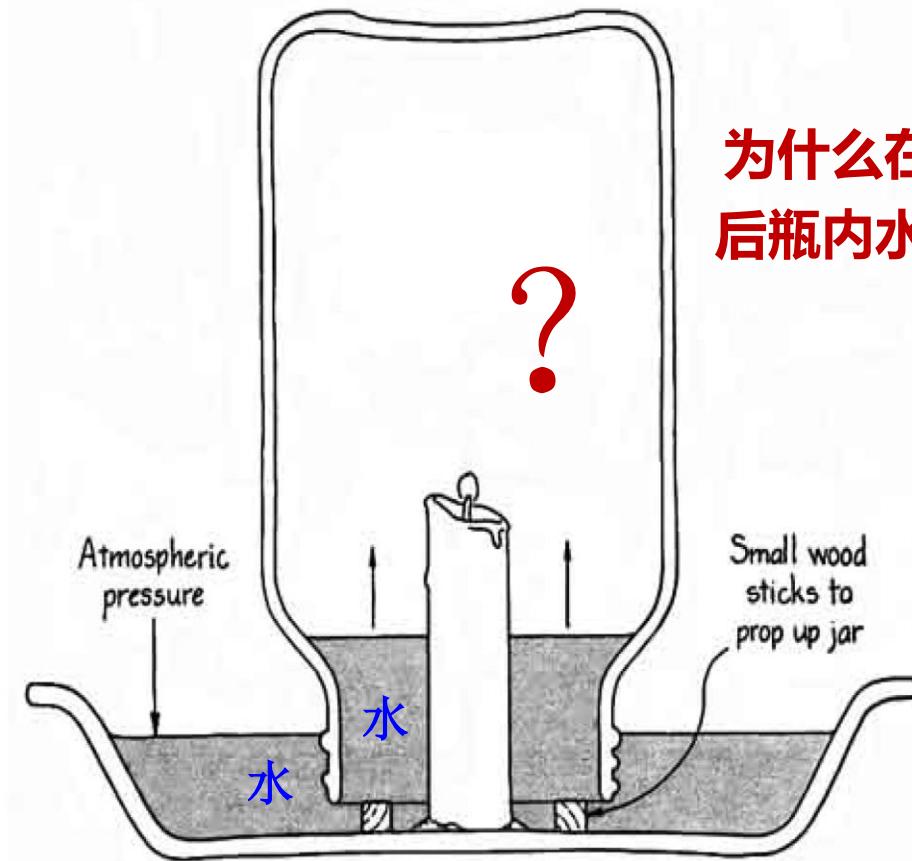
The inverted-jar experiment

Jearl Walker (1978) The Physics and Chemistry Underlying the Infinite Charm of a Candle Flame

蜡烛火焰实验



<https://www.bilibili.com/>



The inverted-jar experiment



为什么在蜡烛熄灭后瓶内水位会上升?

Jearl Walker (1978) The Physics and Chemistry Underlying the Infinite Charm of a Candle Flame

蜡烛火焰实验



(图片来自网络)



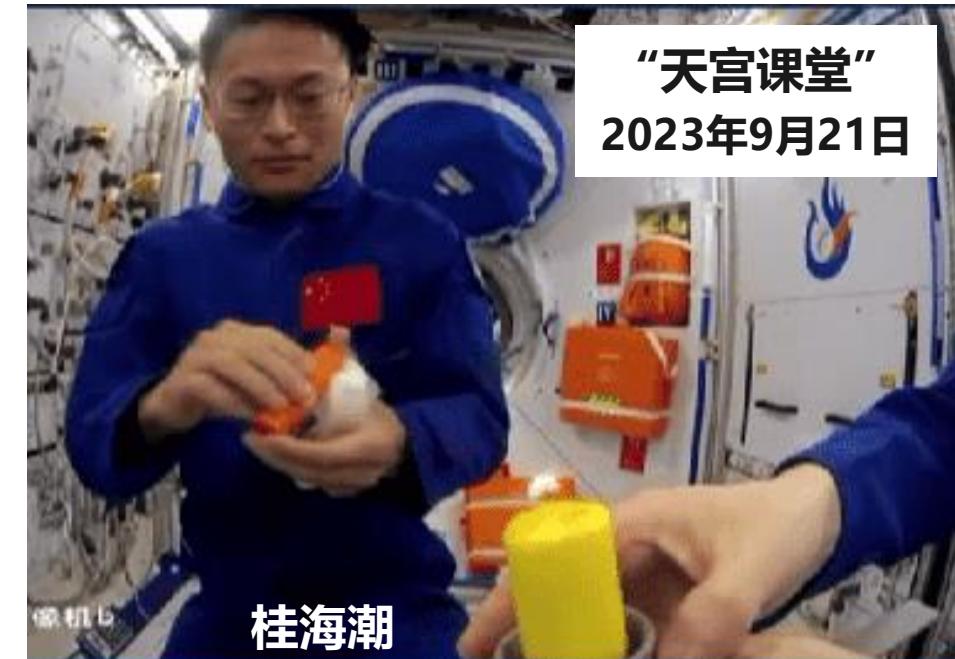
↑↑↑
高速来流

火焰形状和颜色
均显著变化



失重 (微重力)

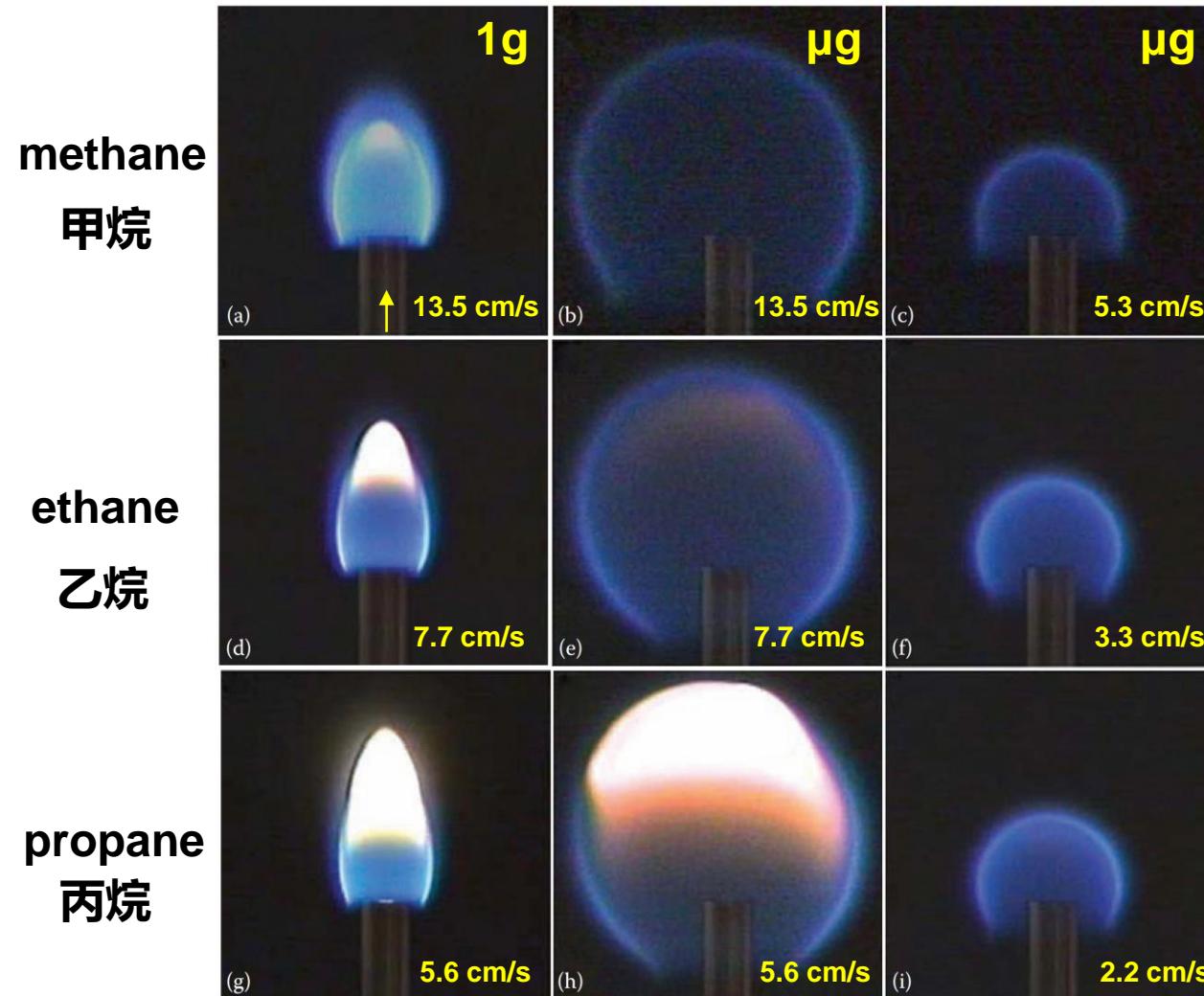
太空中的蜡烛火焰



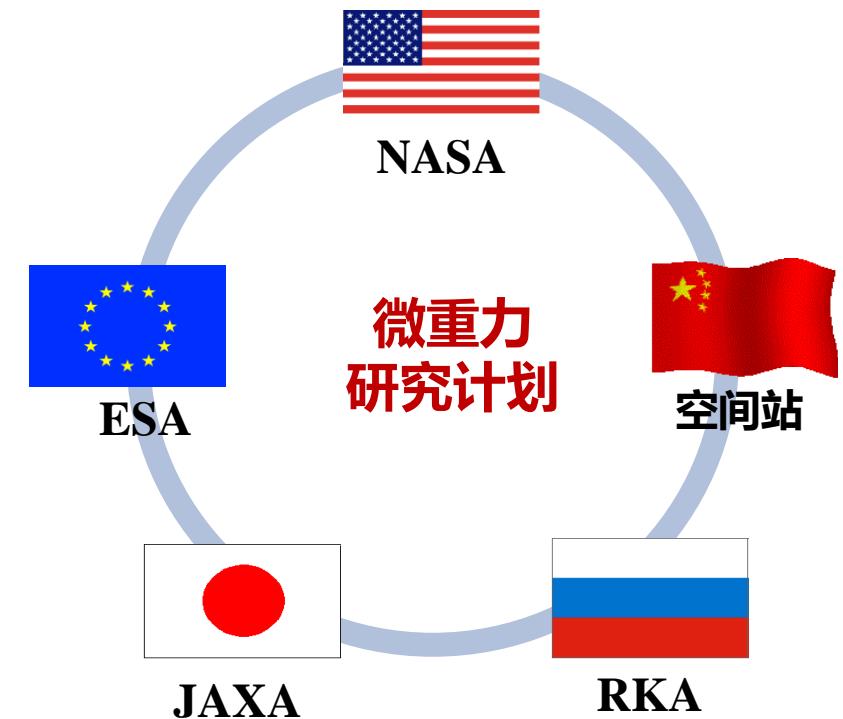
(图片自网络)

- 与地球上不同，太空微重力条件下的低密度热气体不会上升，即**没有浮力导致的热对流**，这导致气体从高温区向低温区**扩散**占据了支配地位。

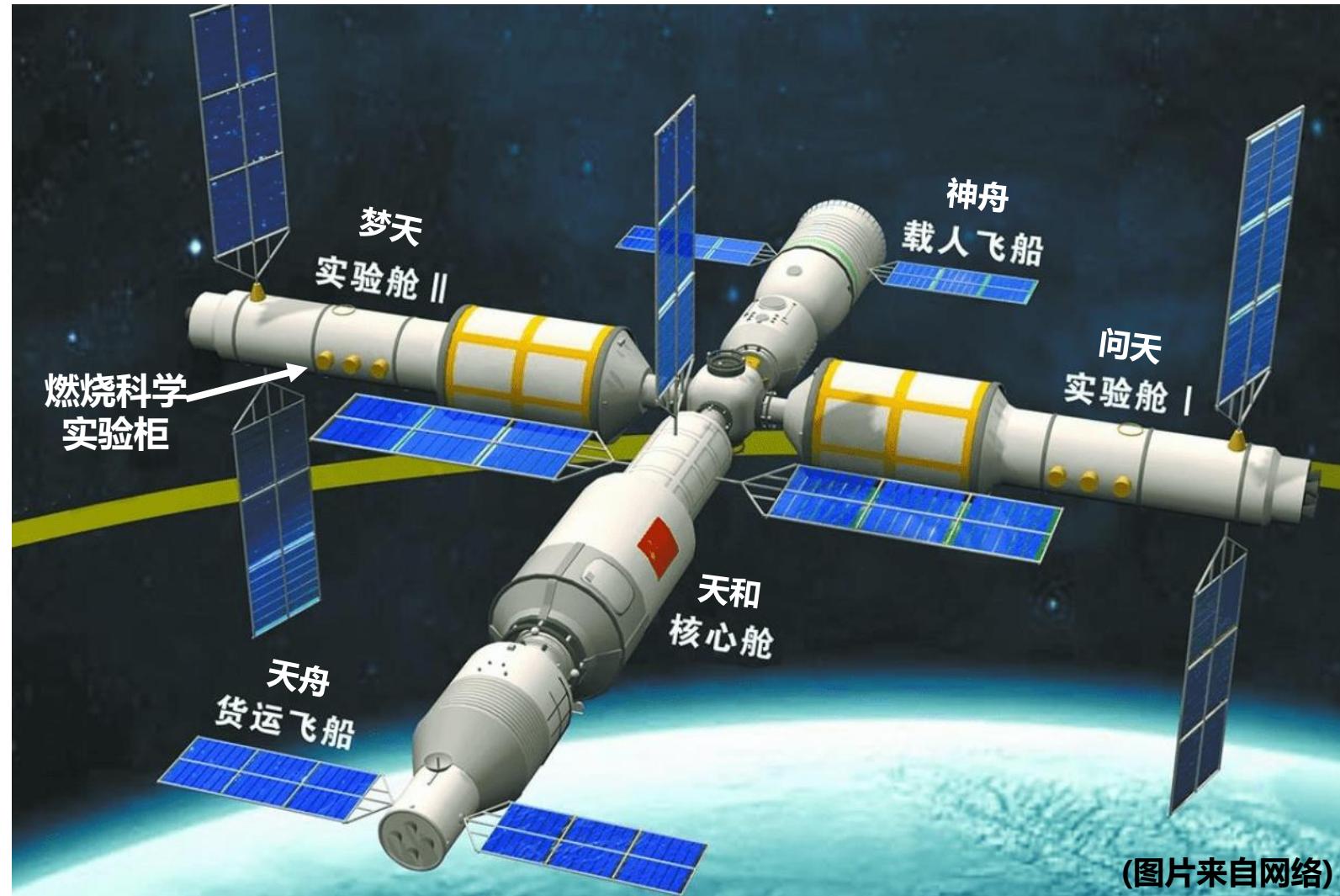
常规重力(1g) vs. 微重力(μ g)



微重力燃烧是航天大国
竞相争夺的“战略高地”



中国空间站



(图片来自网络)

■ 三室

- 天和核心舱
- 问天实验舱
- 梦天实验舱

■ 两厅：

- 神舟载人飞船
- 天舟货运飞船

中国空间站：燃烧实验

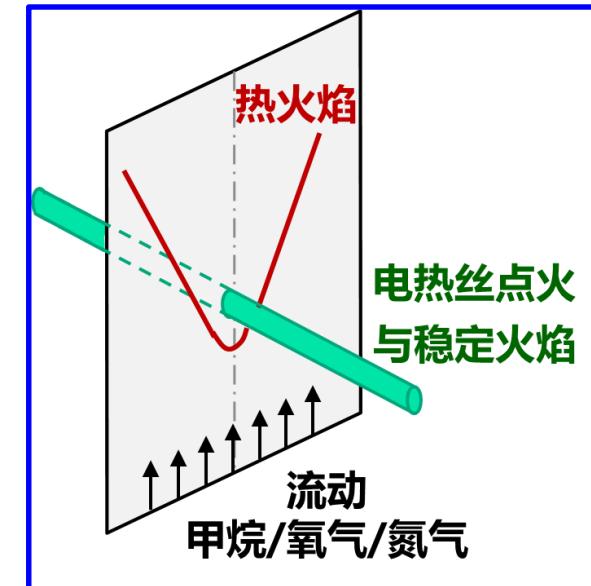
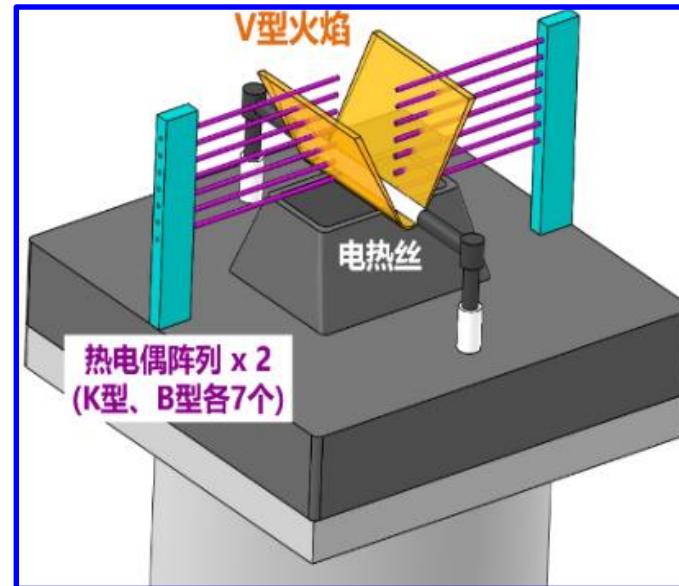
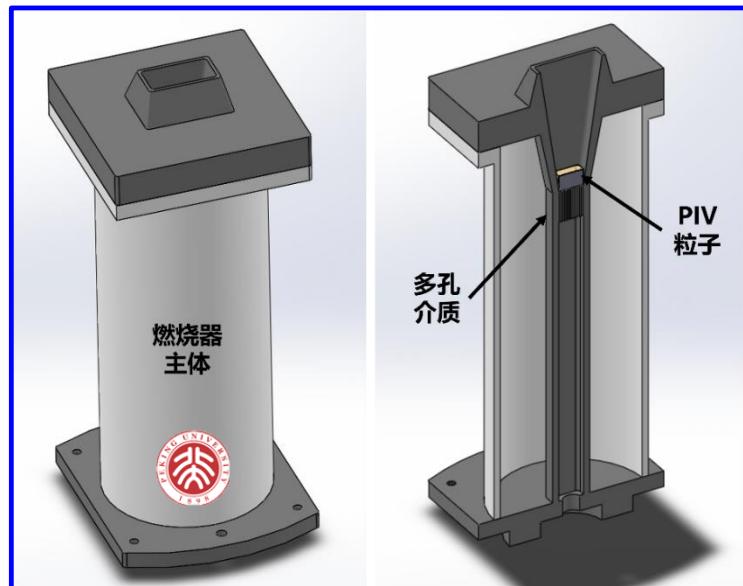


(图片来自网络)

■ 2023年2月16日，梦天实验舱燃烧科学实验柜成功实施首次在轨点火实验

中国空间站：燃烧实验

**主持空间科学与应用项目：微重力下近可燃极限预混燃气的点火机理研究
北大V型预混点火实验器，计划2025年搭载天舟9发射航次进入空间站**



- 揭示近可燃极限预混燃气**点火规律与机制**，发展基础燃烧理论
- 建立**定量预测模型**，发展近可燃极限点火调控方法和燃烧技术

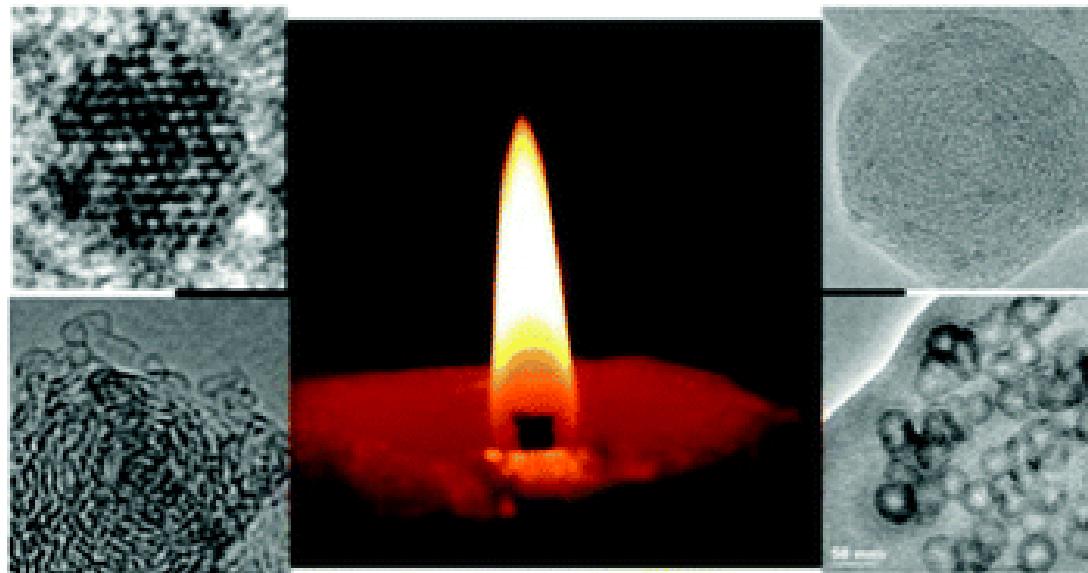
蜡烛火焰中发现纳米级钻石颗粒

Chemical Communications

New insight into the soot nanoparticles in a candle flame

Zixue Su,^a Wuzong Zhou^{*a} and Yang Zhang^b

Received 24th December 2010, Accepted 11th March 2011



对蜡烛火焰中碳烟纳米颗粒的新认识

- 蜡烛火焰中含有**碳的所有四种形态：**无定形碳、石墨、富勒烯和**钻石。**
- 在蜡烛火焰闪动的每一秒，都会产生**大约150万个纳米尺度的钻石颗粒。**
- 这些**钻石颗粒极为微小**，很快就在**火焰中燃烧了。**

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/cc/c0cc05785a#!>

<https://news.sciencenet.cn/htmlpaper/201182020563382118837.shtml?log=1>

烛光摇曳 Flickering candle flame



(视频来自网络)

scientific reports 2020

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

[nature](#) > [scientific reports](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Open Access](#) | Published: 04 December 2020

Flickering candle flames and their collective behavior

[Attila Gergely](#), [Bulcsú Sándor](#), [Csaba Paizs](#), [Robert Tötös](#) & [Zoltán Néda](#) [✉](#)

[Scientific Reports](#) **10**, Article number: 21305 (2020) | [Cite this article](#)

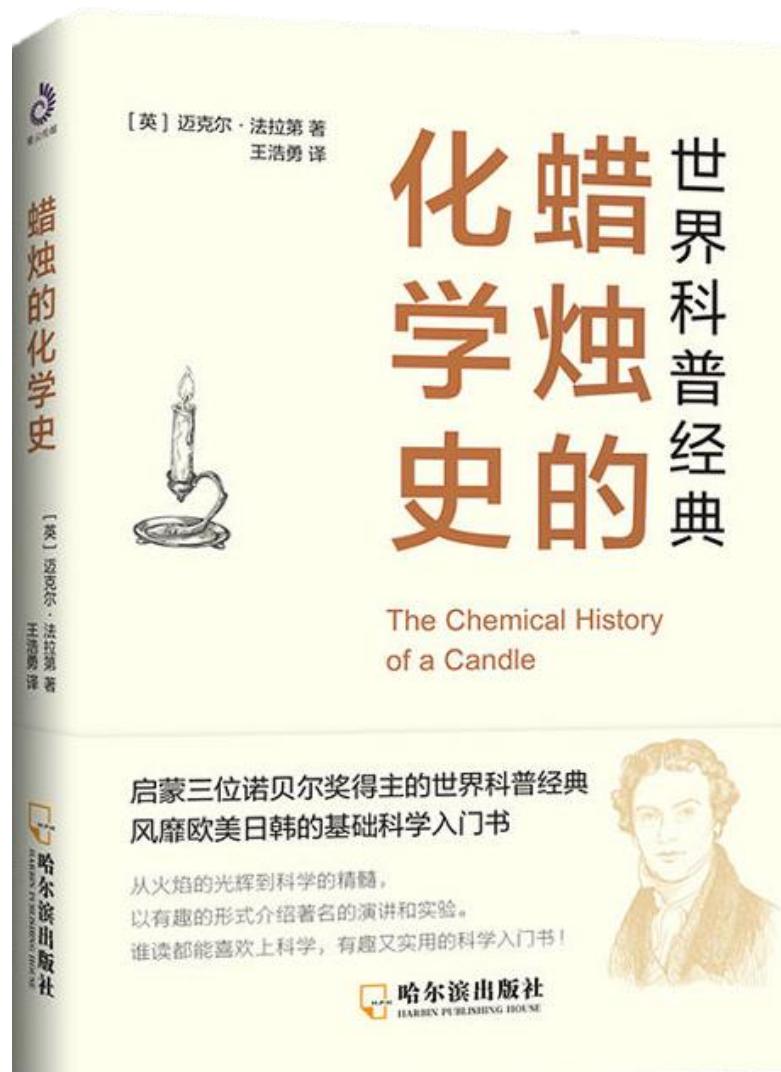
Arrangements of the candle bundles used in the experiments.

(a) (b) (c) (d) (e)

The diagram illustrates five different experimental arrangements of candle bundles, each consisting of a group of small circles representing individual candles. (a) shows a roughly circular cluster of circles. (b) shows a perfect circle of circles. (c) shows a single vertical column of circles. (d) shows three circles in a horizontal row. (e) shows four circles arranged in a stepped, non-linear pattern.

<https://www.nature.com/articles/s41598-020-78229-x#Sec9>

法拉第《蜡烛的化学史》



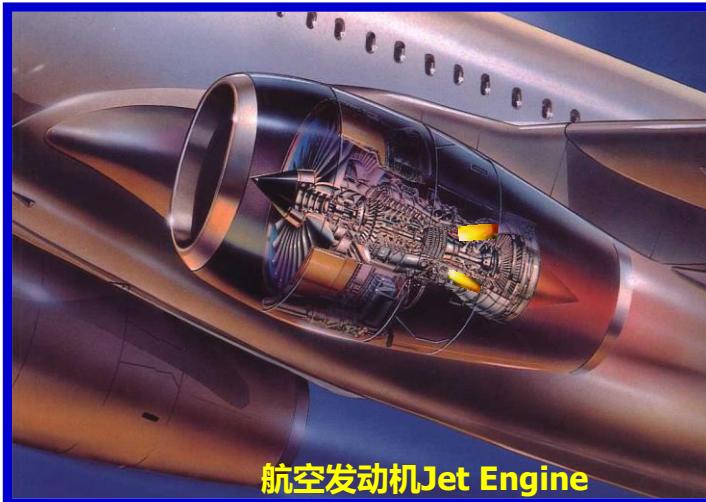
法拉第（1791-1867，英国物理学家、化学家）在皇家学院每年举办的一系列圣诞科普讲座，《蜡烛的化学史》是最著名的一篇，包含大量蜡烛火焰的实验和例证。

(图和文字来自网络)

什么是燃烧?



- 燃烧定义：产生**热**或同时产生**光和热**的**快速氧化反应**；
也包括只伴随少量热没有光的**慢速氧化反应**
- 燃烧过程：将**化学能**转化为**热能**
- 三传一反：**传热、传质、传动量、化学反应**



(图片来自网络)

燃烧学

■ 燃烧 = 涉及化学反应的流体力学 Chemically Reactive Flow

■ 多学科交叉

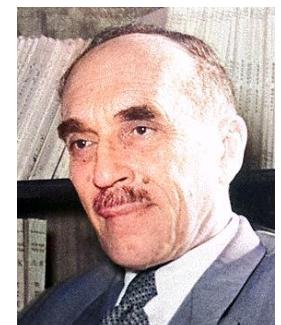
- 热力学
- 化学反应动力学
- 流体力学
- 传热传质
- 物理化学
- ...



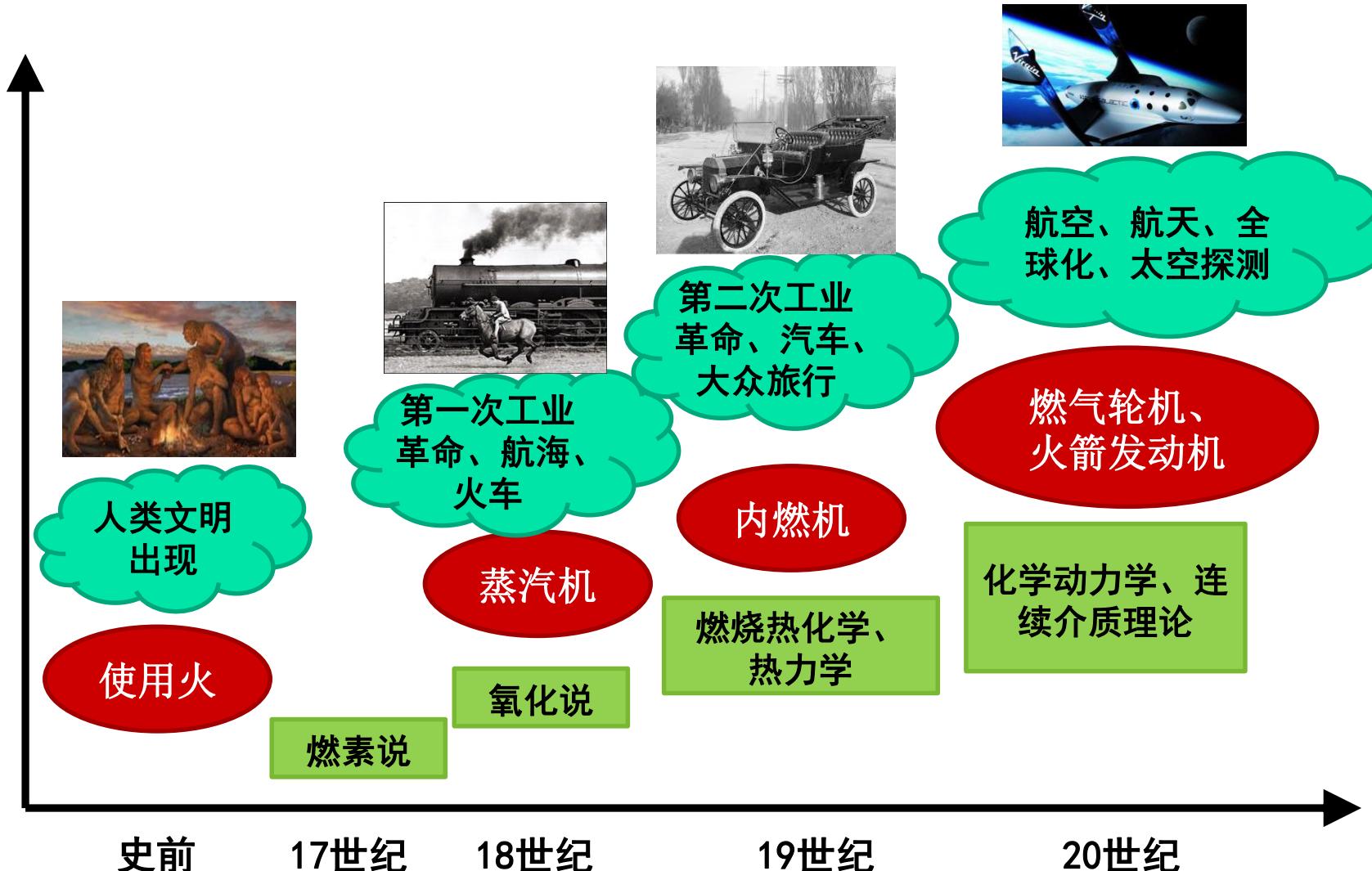
- 热质输运
- 流动、掺混
- 化学反应
- 声
- 光
- 电

火和电是推动人类技术前进的两个主要杠杆，但我们对于“年轻”的电的了解，较之对古老的火的了解要清楚得多

—— 谢苗诺夫 (诺贝尔化学奖)

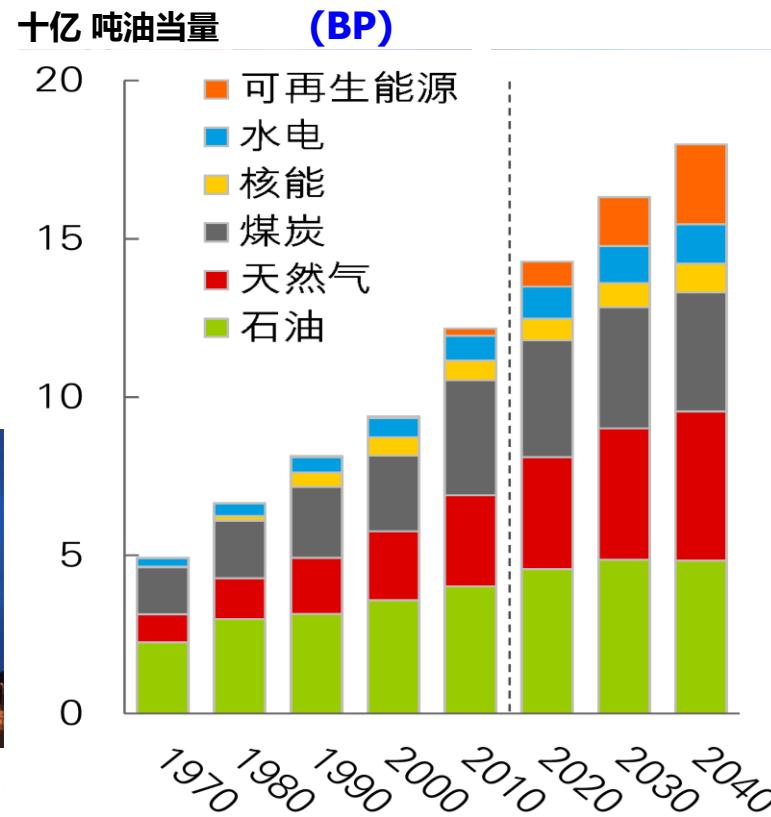


燃烧：社会发展与科技进步的推动力



(图片来自网络)

燃烧：社会发展与科技进步的推动力



(图片来自网络)

- 世界总能源的 80% 来自于燃烧矿物燃料 (煤、石油、天然气)
- 绝大部分大气污染物和二氧化碳排放源自于燃烧

燃烧的应用

■ 能源动力

煤炭发电、石油、天然气 ...



电力与工业

■ 工业生产

钢铁、玻璃、陶瓷、塑料、纳米粒子 ...



环境问题

■ 安全防范

森林火灾、建筑物火灾、煤矿爆炸 ...



交通运输



国防与空天

■ 环境与气候

二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物、碳黑 ...



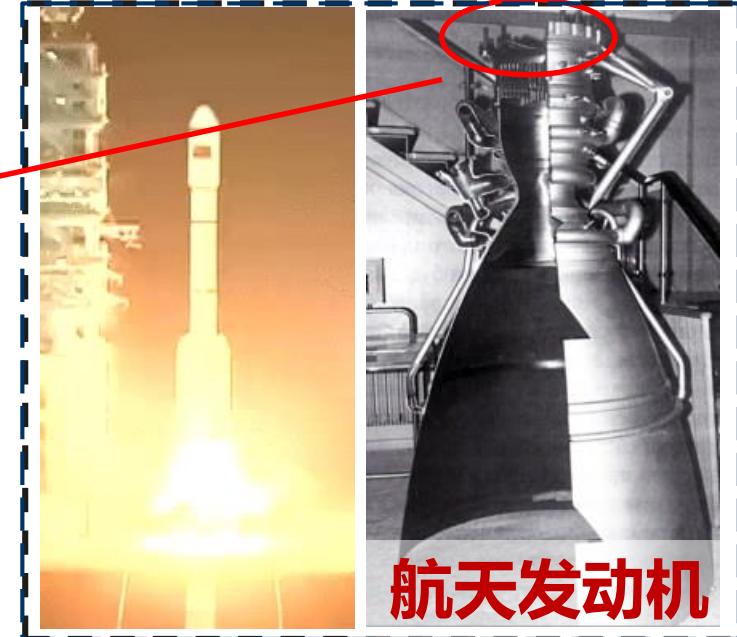
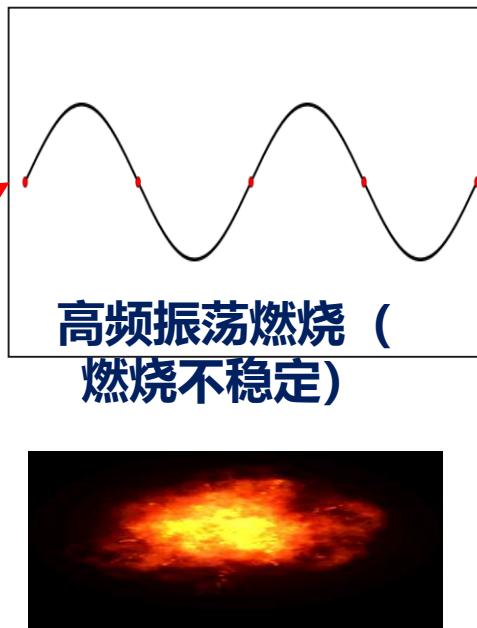
火灾与安全

■ 空天发动机

航空发动机、火箭、爆震、组合动力 ...

.....

空天发动机



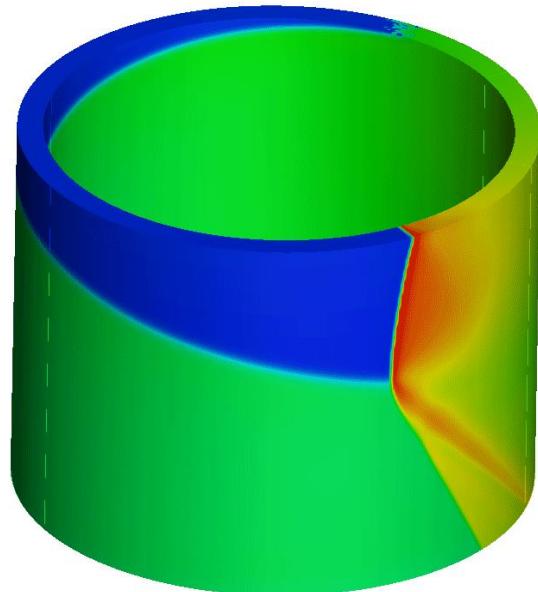
(图片和视频来自网络)

- 高频振荡燃烧会导致机毁人亡严重后果
- 燃烧不稳定控制是空、天发动机研制**共性重大技术关键之一**

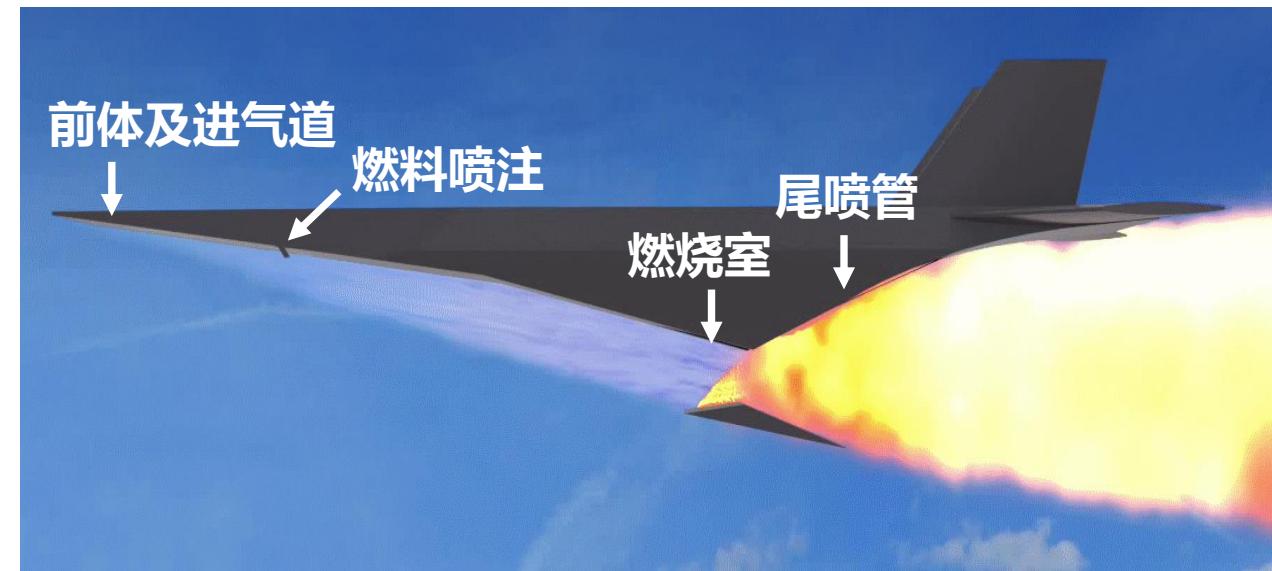
爆震发动机

- 燃烧速度差异: 传统燃烧 $\sim 10 \text{ m/s}$ vs. 爆震燃烧 $\sim 1000 \text{ m/s}$
- 爆震燃烧优点: 高热效率 (近等容燃烧) 、快速燃烧、简单结构 (自增压) 、高推重比

连续旋转爆震



斜爆震



(图片和视频来自网络)

- 挑战: 持续稳定传播/驻定的爆震波; 复杂流动下爆震波传播机制与调控方法

燃烧失控是国内外发动机面临的**共性问题**

■ 点火、熄火、转捩等瞬态燃烧过程失控**频繁出现在空天发动机中**



为什么这些工程问题**尚未彻底解决呢？**

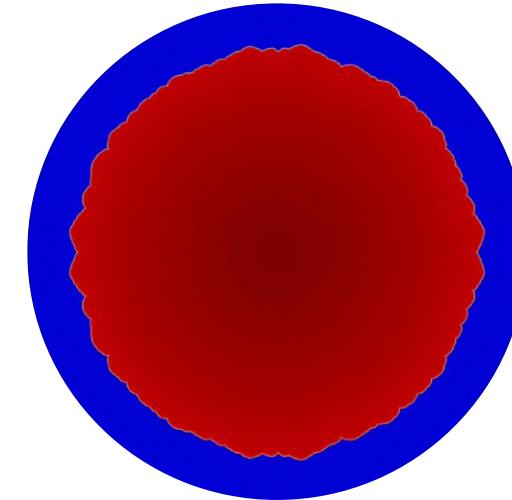
- 化学反应、传热传质、流动、压力波/激波等因素**非线性作用**
- 点火、火焰传播、转捩等瞬态燃烧过程**相互耦合、相互影响**

点火 \leftrightarrow 火焰传播



- 点火影响后续
火焰传播速度
- 火焰传播快慢
决定点火成败

火焰传播 \leftrightarrow 转捩



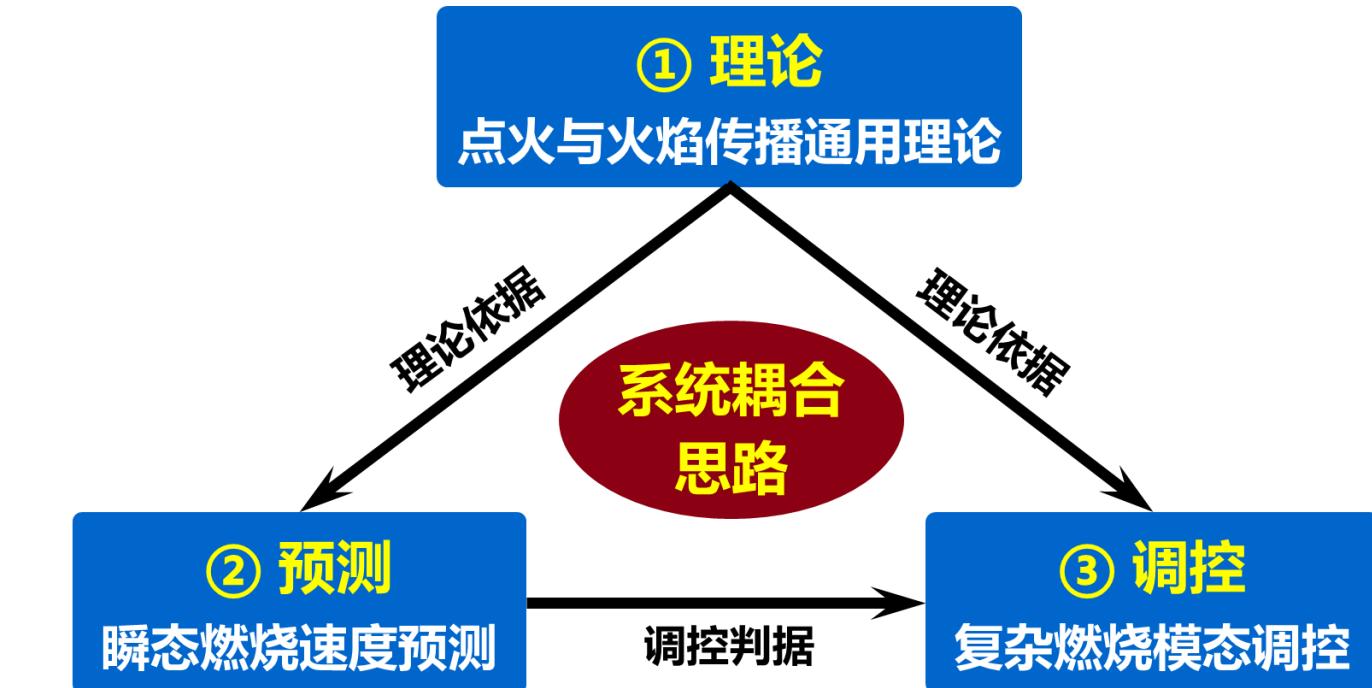
- 火焰加速传播
引发转捩/爆轰
- 转捩导致火焰
被爆轰取代

火焰动力学研究

创新思路：



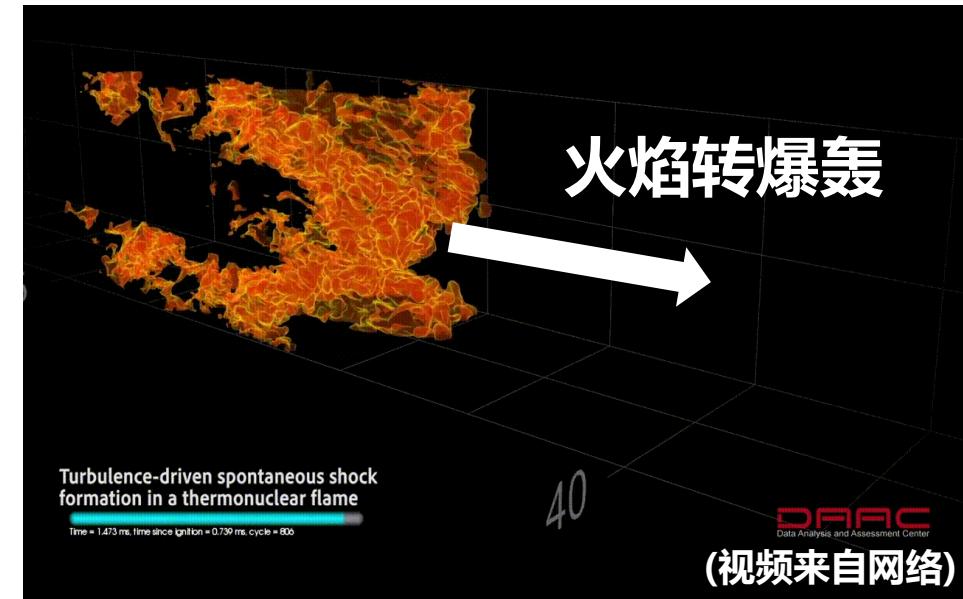
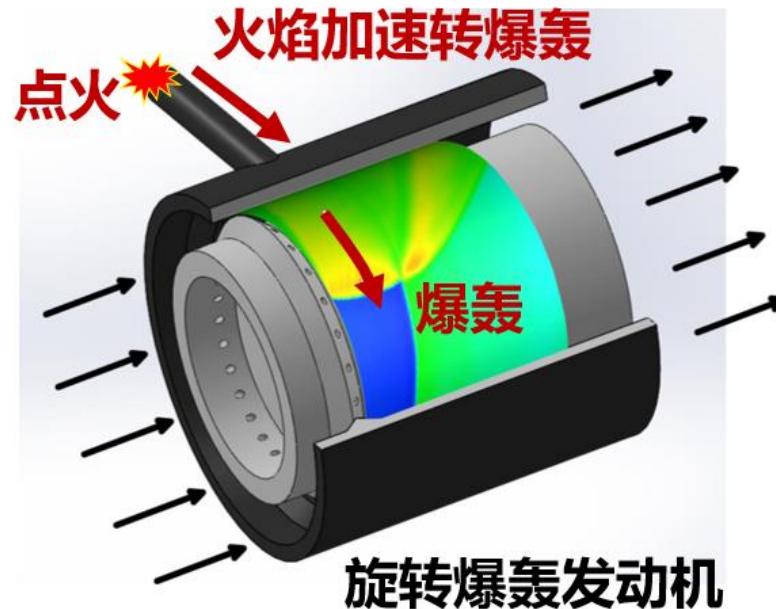
主要研究进展：



■ 采用系统耦合思路，统一考虑复杂因素强非线性作用，开展火焰动力学基础研究

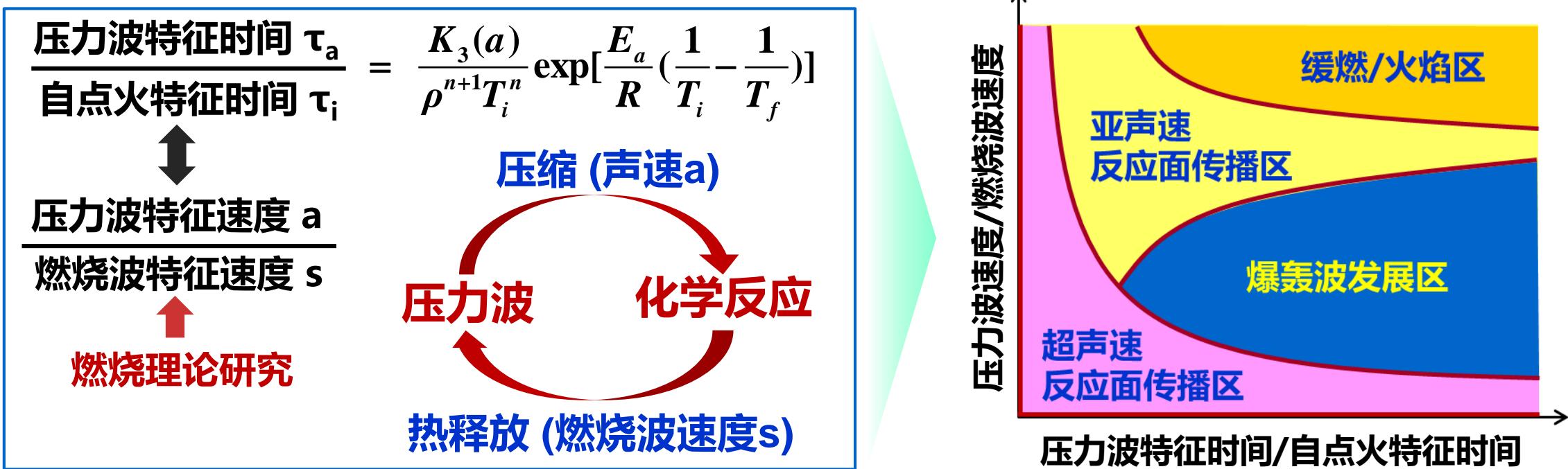
发展复杂燃烧模态调控方法

■ 工程需求：复杂燃烧模态转换机理与调控方法



美国工程院Oran院士：“火焰（缓燃）转爆轰是燃烧研究中尚未解决的主要问题 (major unsolved problem)” 2008 CNF

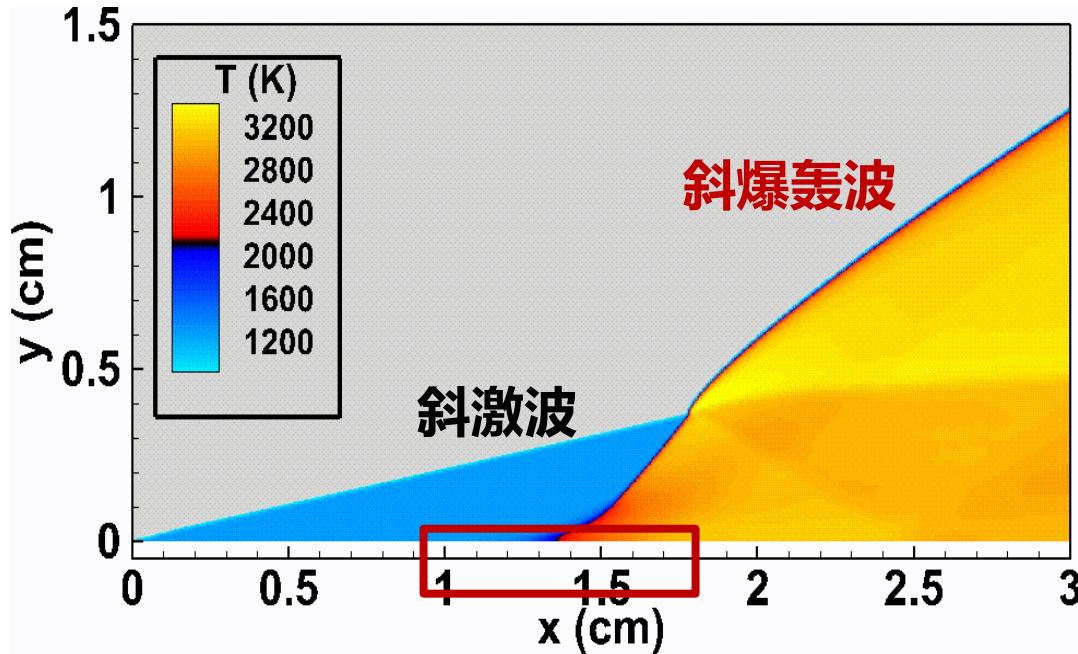
发展复杂燃烧模态调控方法



■ 给出了火焰转爆轰评价判据，实现了爆轰形成条件的定量预测

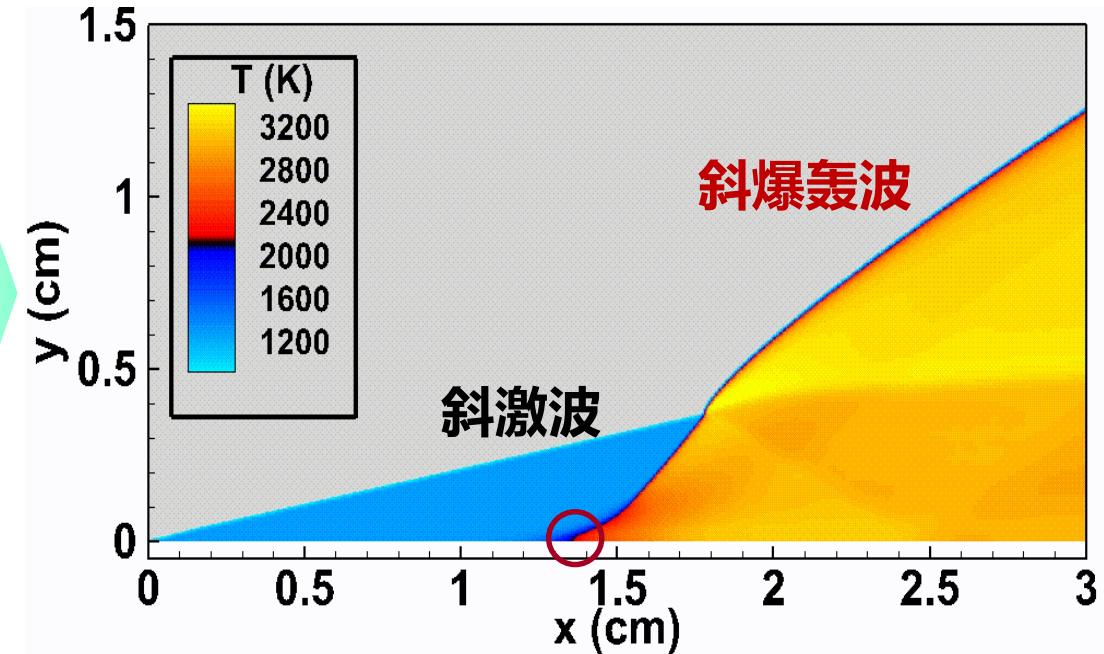
发展复杂燃烧模态调控方法

调控前，斜爆轰波面大幅振荡



自点火位置大幅振荡

调控后，斜爆轰波基本驻定



自点火位置基本固定

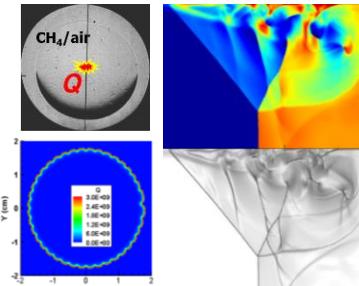
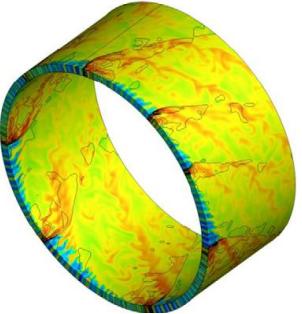
基于燃烧模态判据进行调控，实现了斜爆轰波在非正常来流情形下保持基本驻定

北京大学 工学院 燃烧研究团队



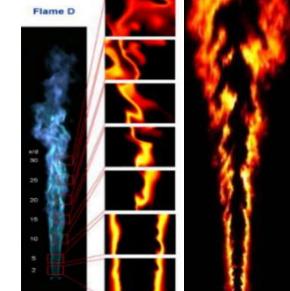
王健平

爆轰发动机



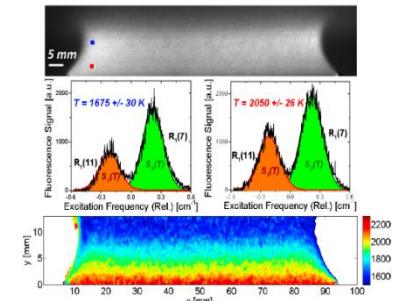
陈 正

火焰与爆轰



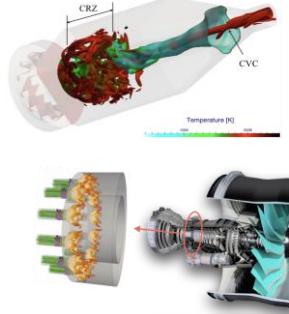
杨越

湍流燃烧



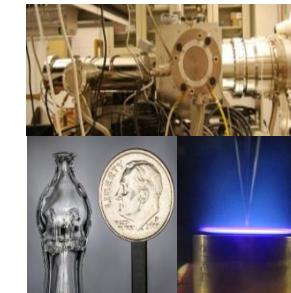
王圣凯

燃烧诊断



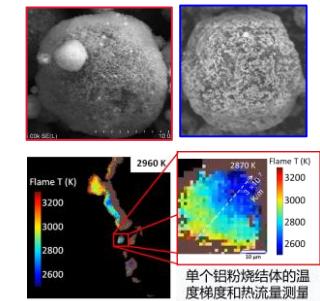
陈 帜

燃烧与AI



赵皓

燃烧化学



北京大学欢迎你

来北大 成为更好的自己