

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

2



(图片来自网络)

蜡烛火焰的颜色和温度

3



黄色来自碳黑的黑体辐射

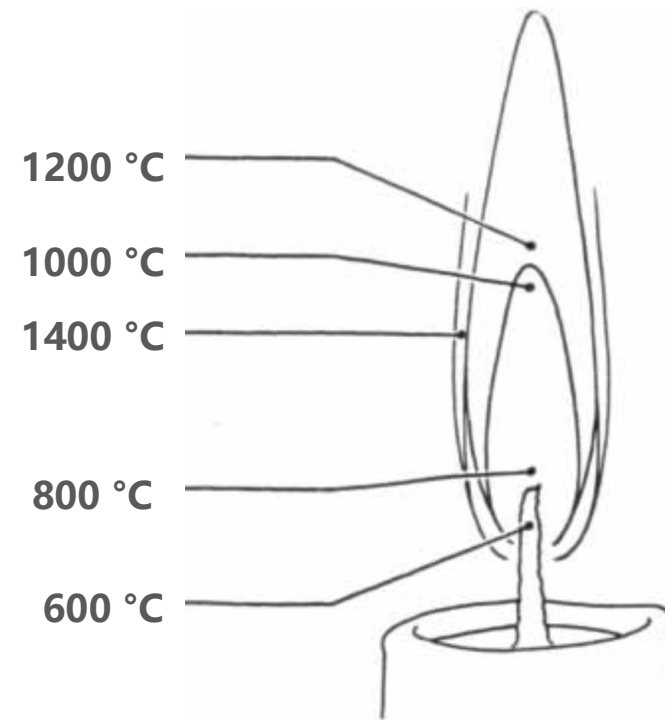
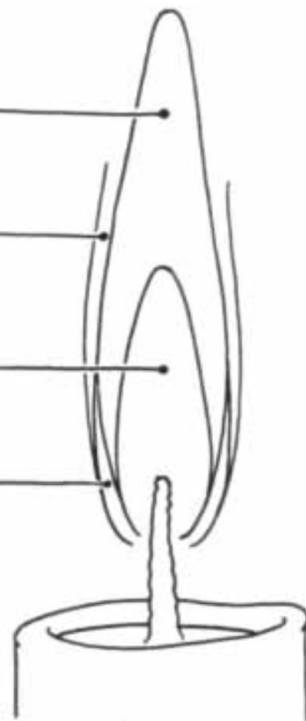
黄色

浅黄色

暗红色

蓝色

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

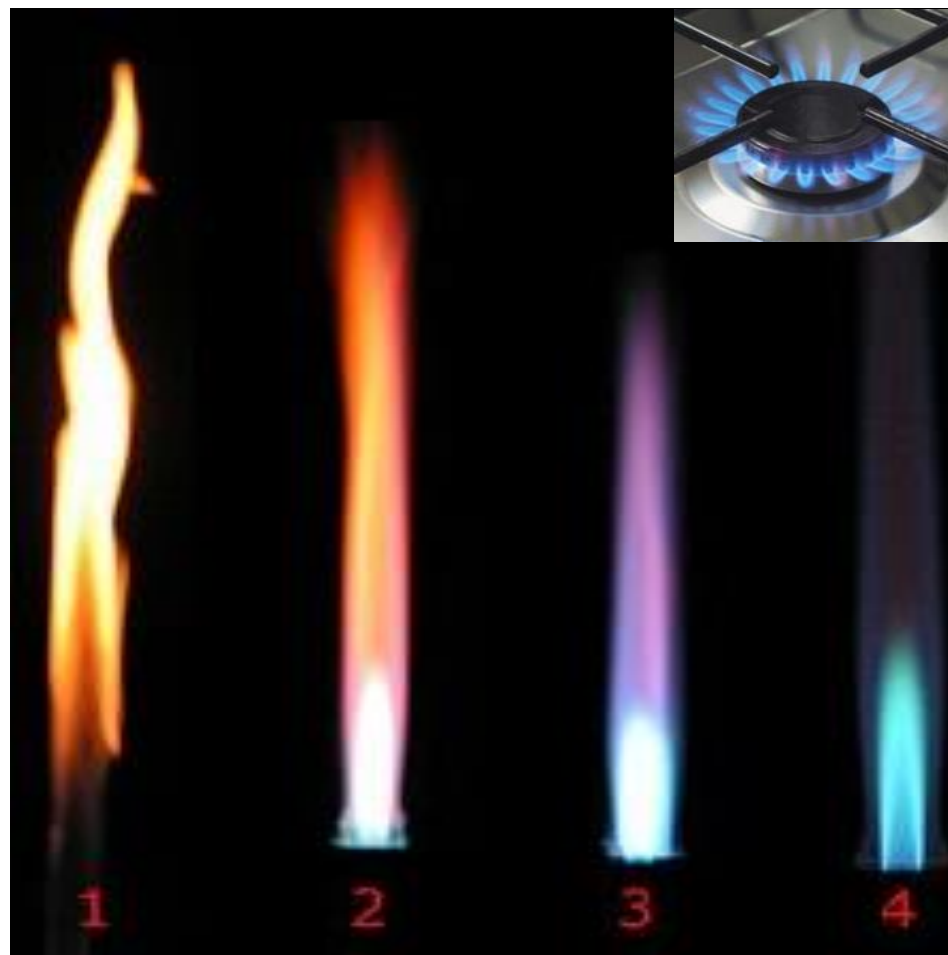


Jearl Walker, The Physics and Chemistry Underlying the Infinite Charm of a Candle Flame.
Scientific American, Vol. 238, No. 4 (April 1978), pp. 154-16

如何改变火焰颜色？

4

碳氢燃料

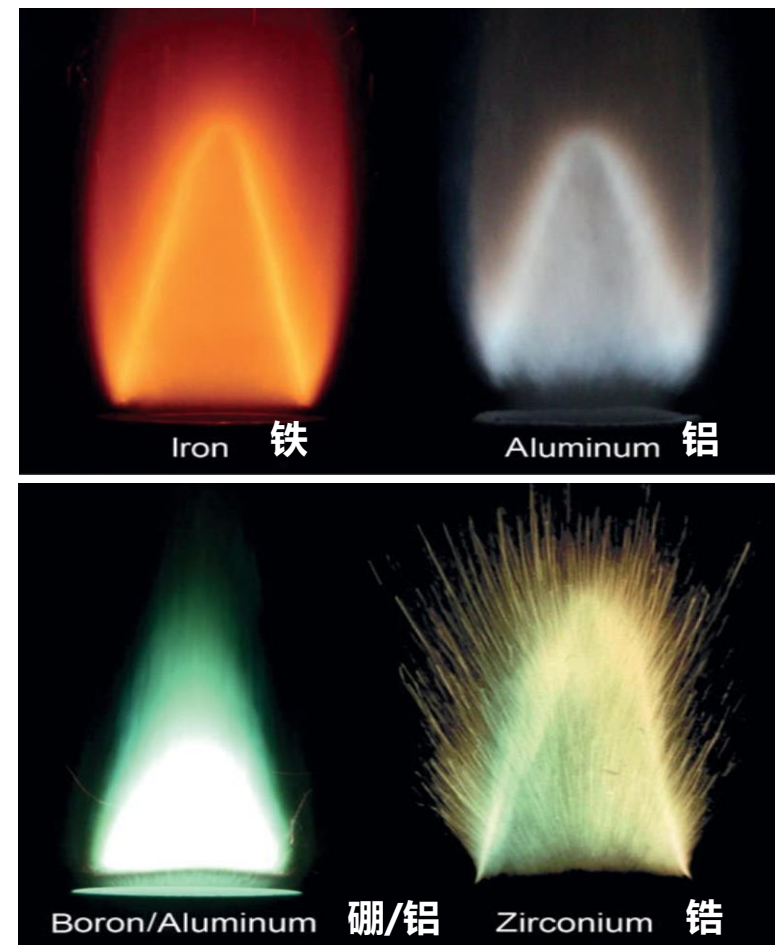


燃料
过剩

减少燃料，增加空气

氧气
过剩

金属燃料

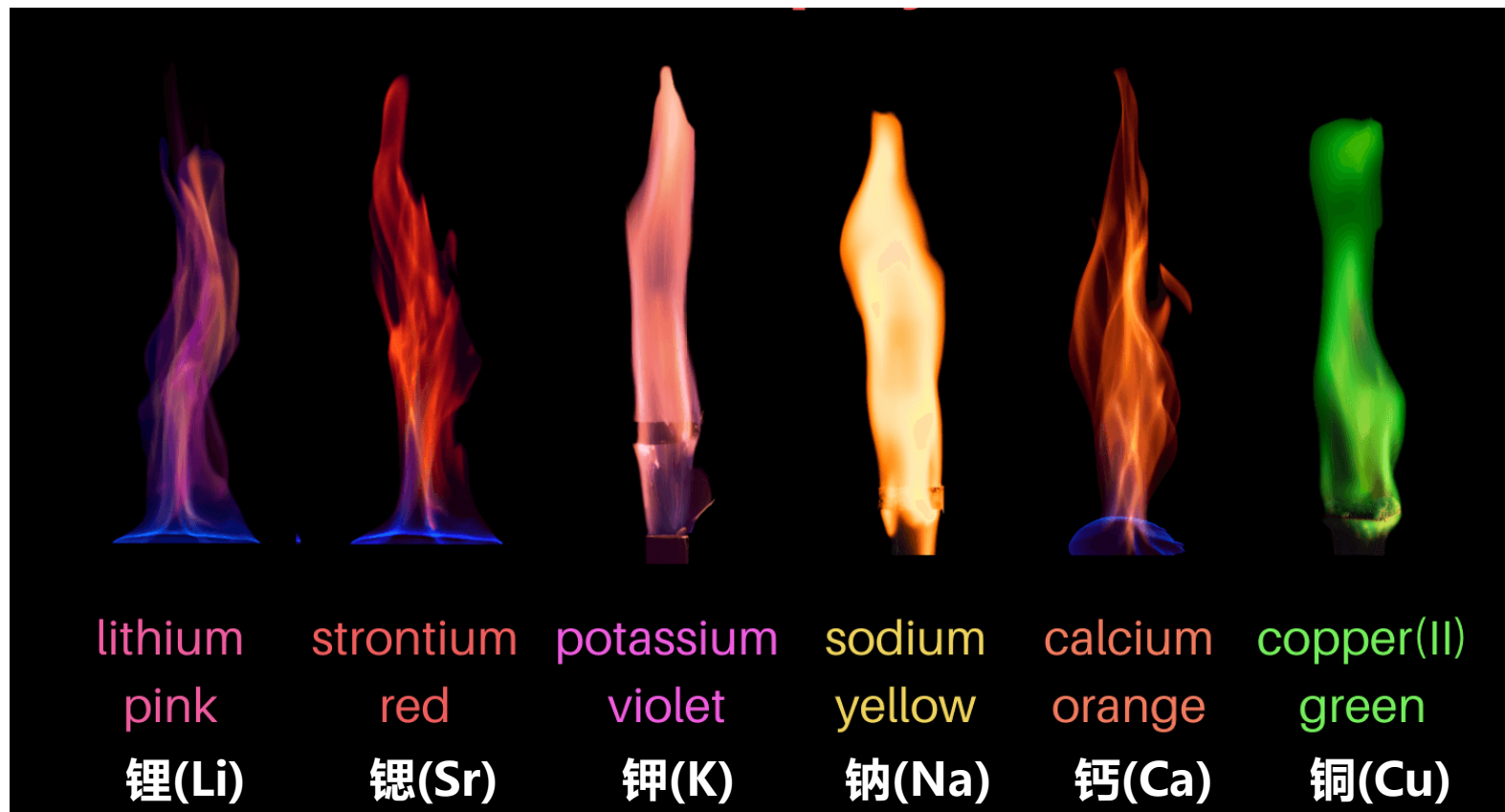


(图片来自网络)

焰色反应

5

通过添加不同种类的金属元素，获得五颜六色的烟花



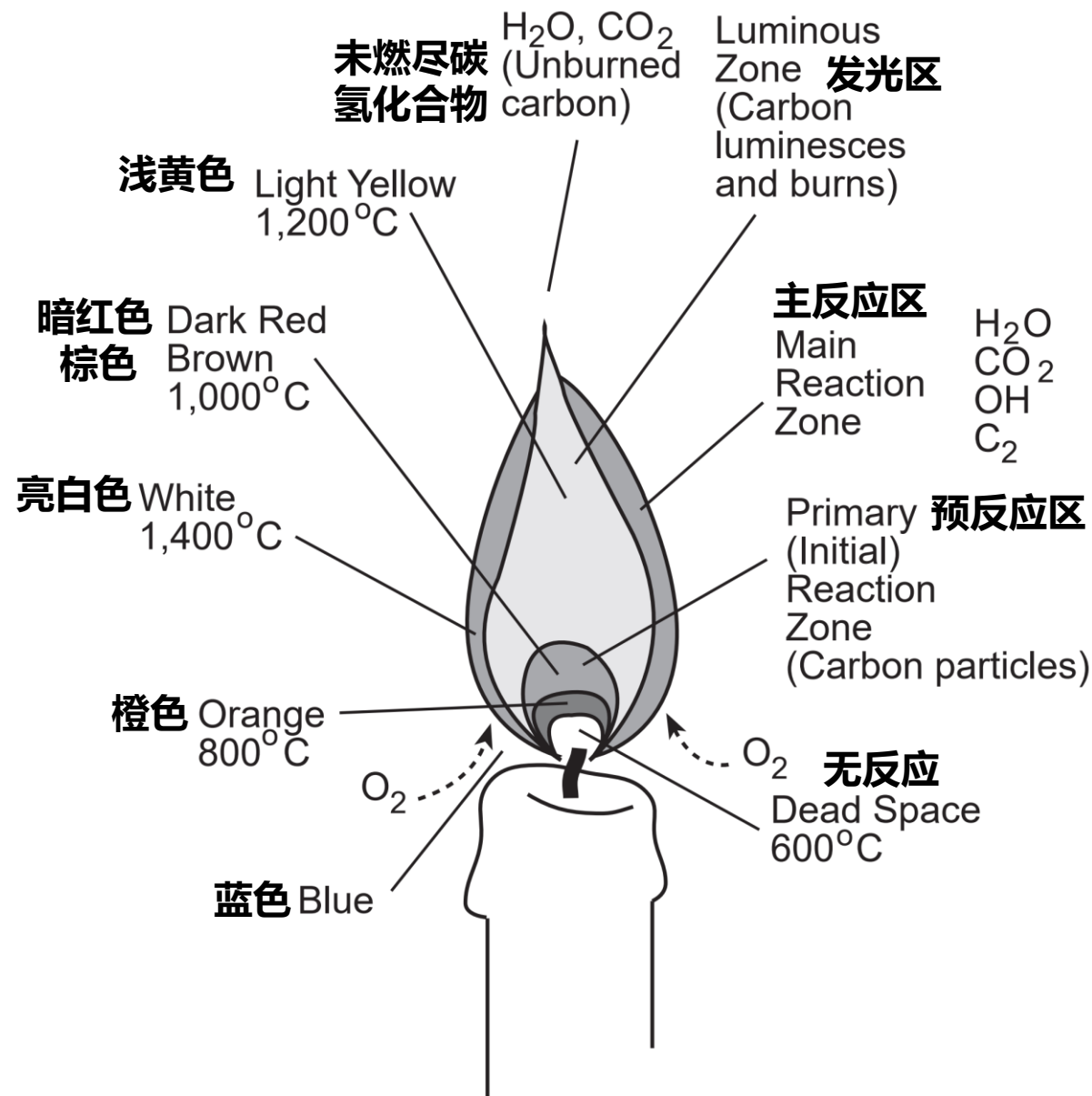
Sciencenotes.org



(图片来自网络)

蜡烛火焰结构

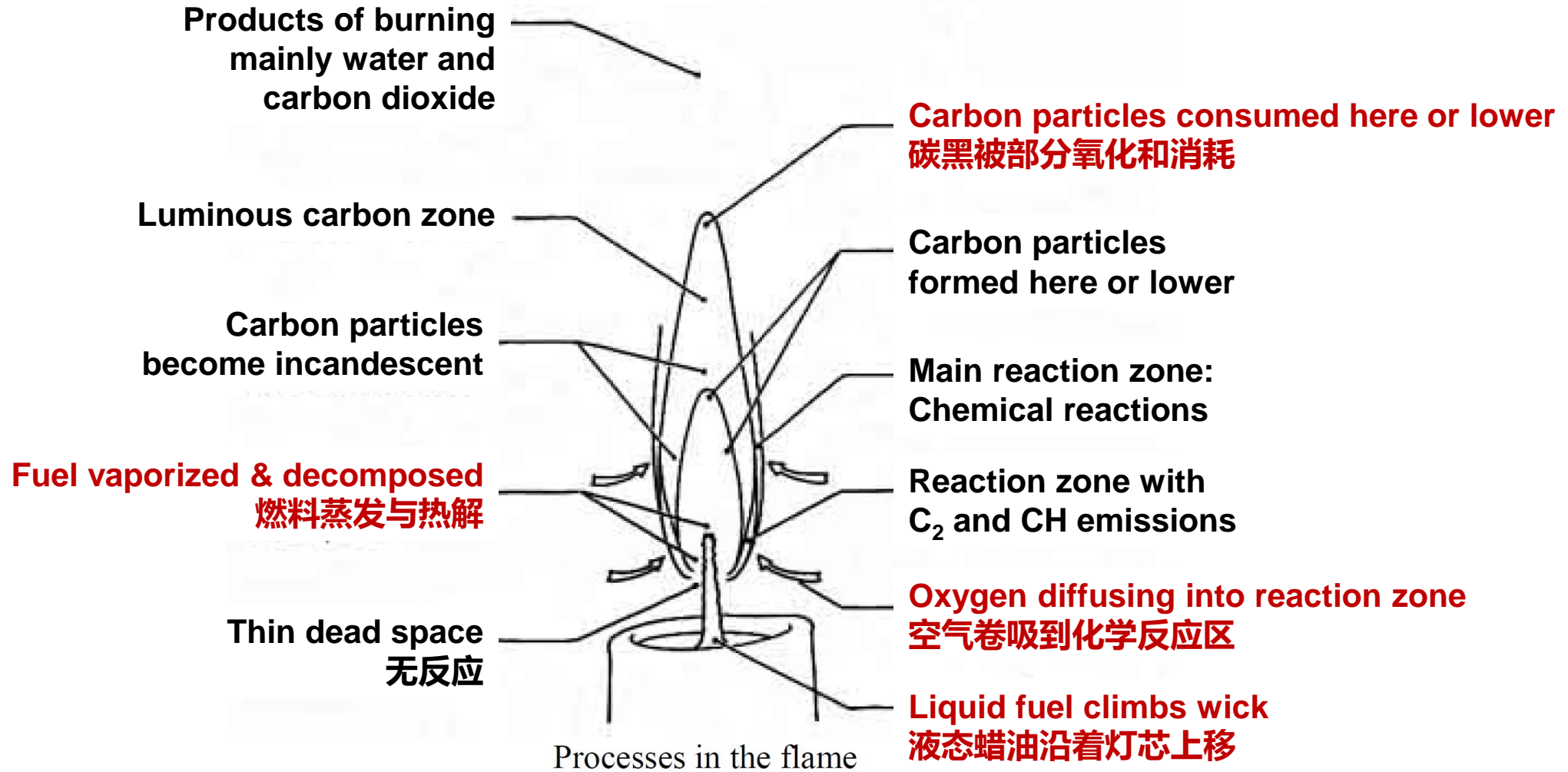
6



(图片来自网络)

蜡烛火焰中的物理化学过程

7



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



(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

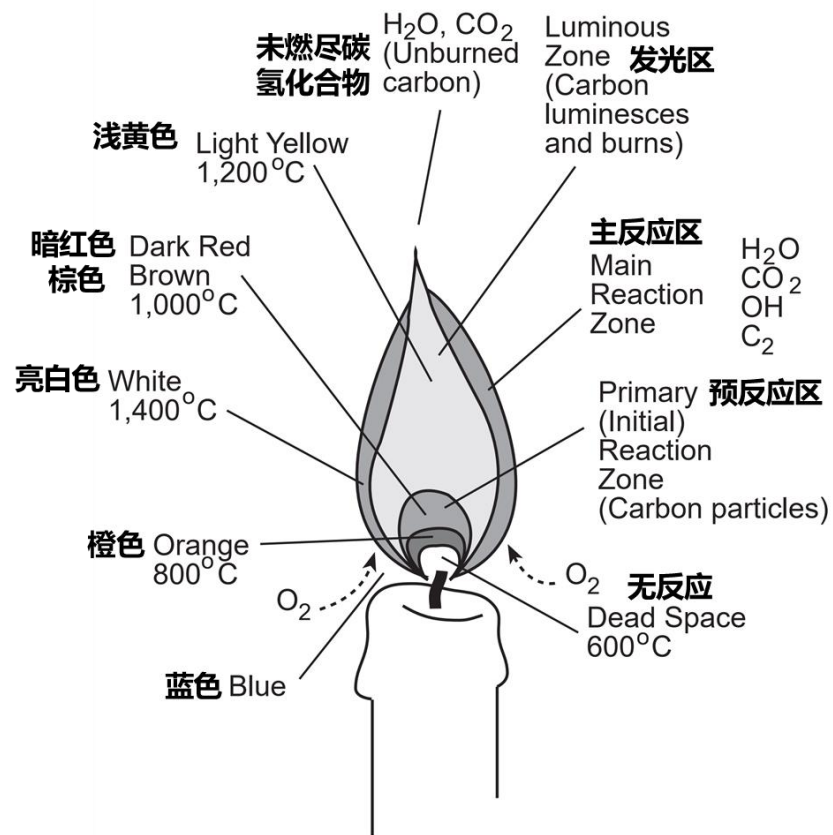


(视频来自网络)

- 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？

10



■ “烟气” 中含有未燃尽气体燃料（蜡油热解产物）

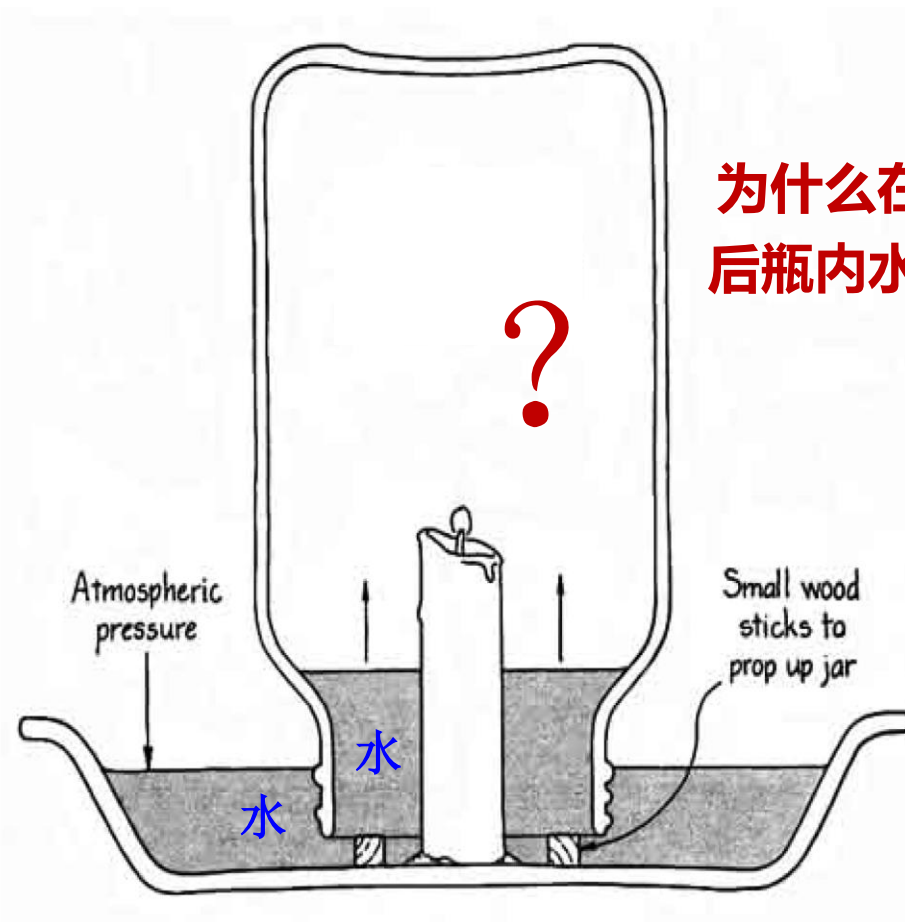


夜雨寄北
唐·李商隐
君问归期未有期
巴山夜雨涨秋池
何当共剪西窗烛
却话巴山夜雨时

(图片来自网络)

古人为什么要剪烛？

蜡烛本身烧得快，**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。



为什么在蜡烛熄灭
后瓶内水位会上升?

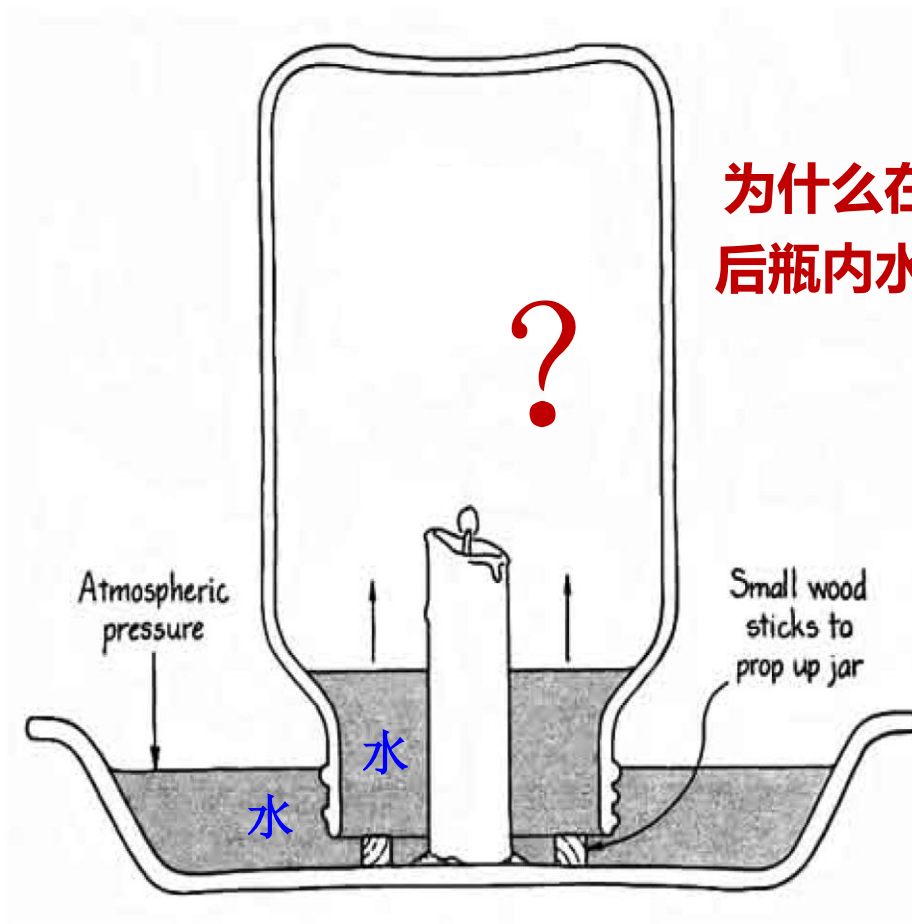


The inverted-jar experiment

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



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



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

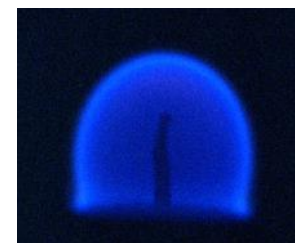


(图片来自网络)



↑↑↑
高速来流

火焰形状和颜色
均显著变化



失重 (微重力)

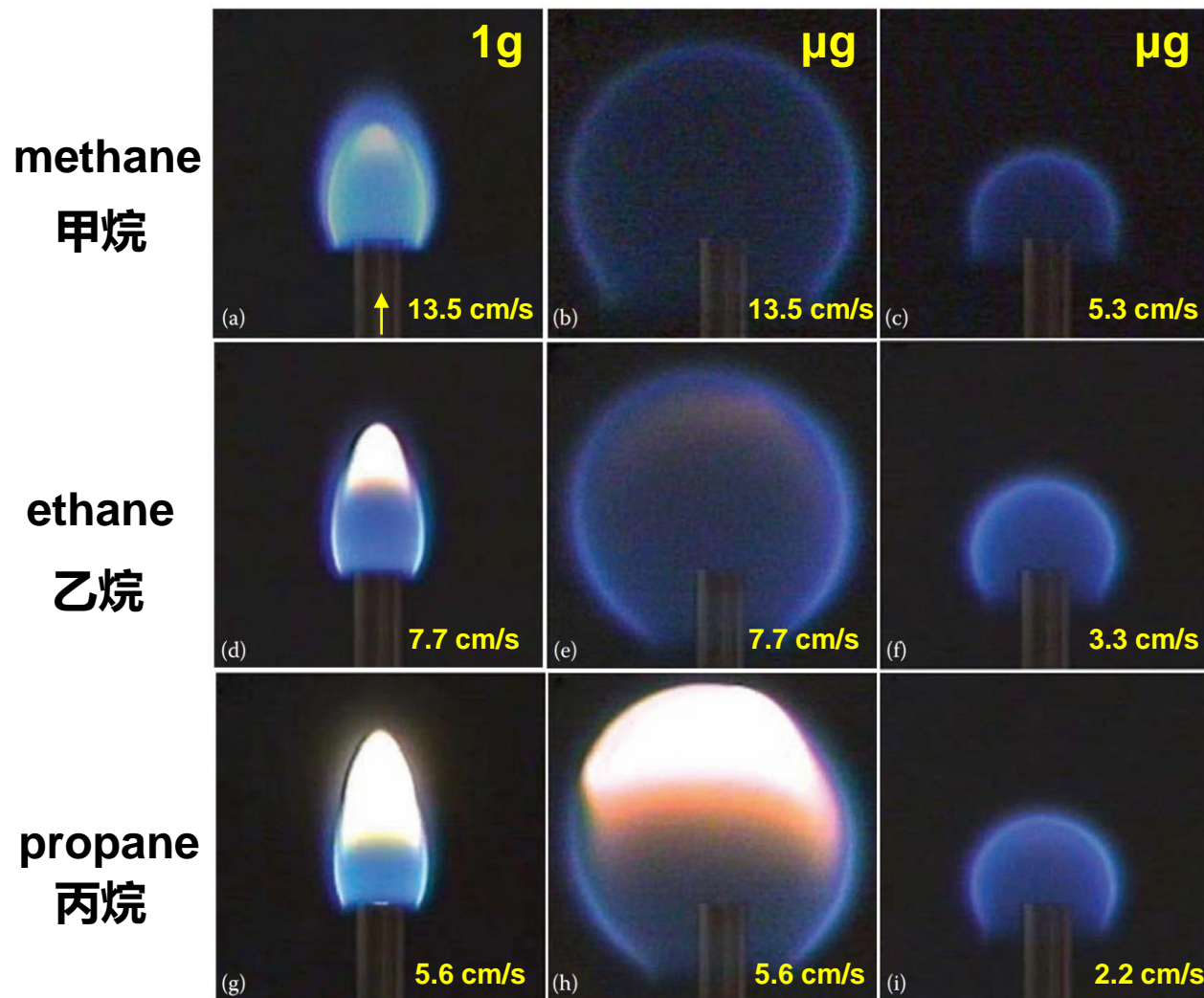


(图片自网络)

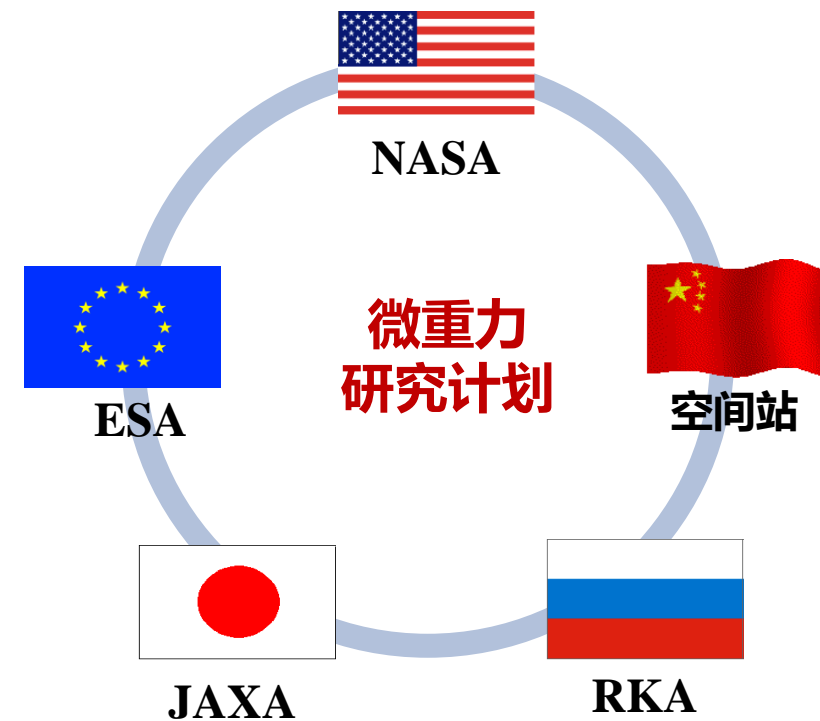
- 与在地球上不同，太空微重力条件下的低密度热气体不会上升，即**没有浮力导致的热对流**，这导致气体从高温区向低温区**扩散**占据了支配地位。

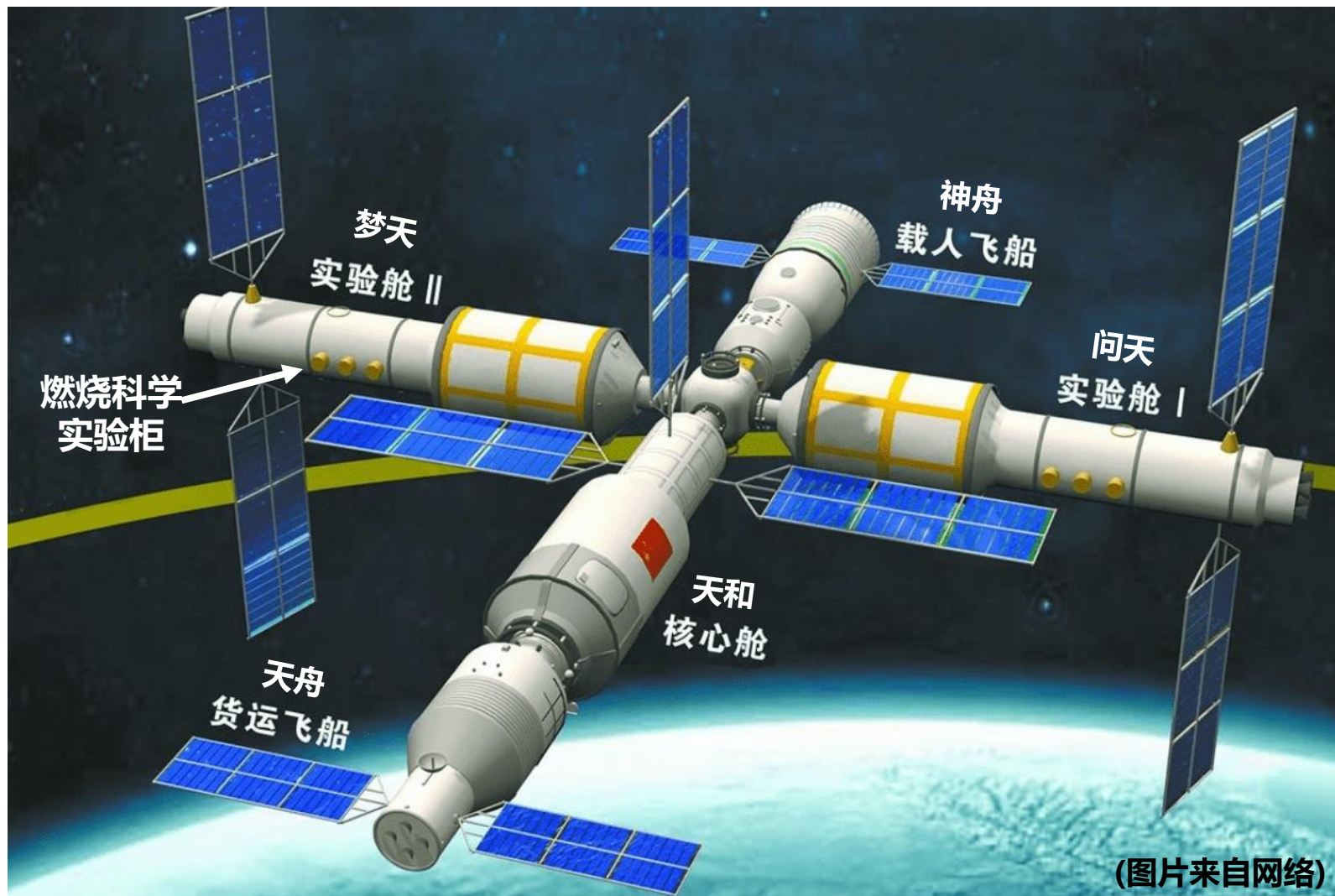
常规重力(1g) vs. 微重力(μg)

16



微重力燃烧是航天大国
竞相争夺的“战略高地”





■ 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



太空中没有浮力影响
外部的扩散火焰相比地面

更短
更圆

太空火焰

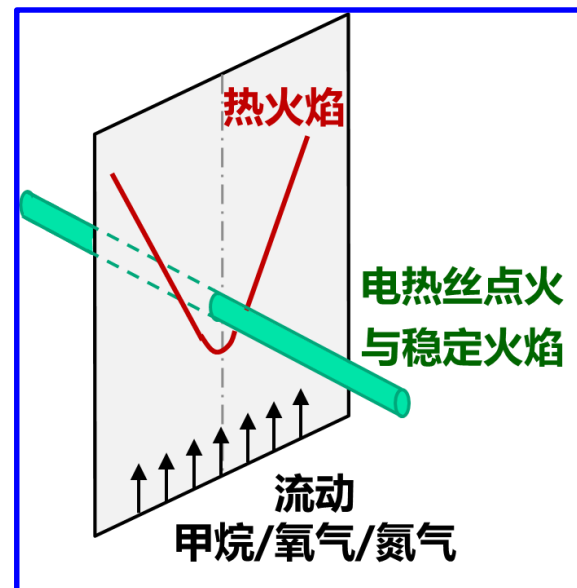
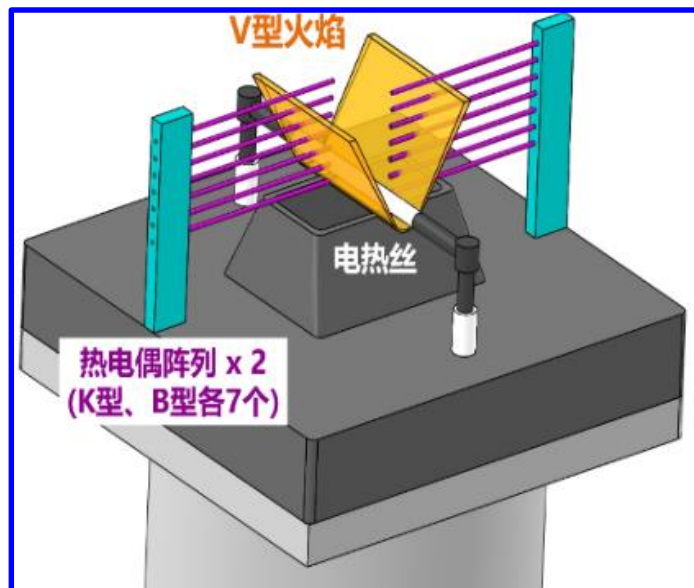
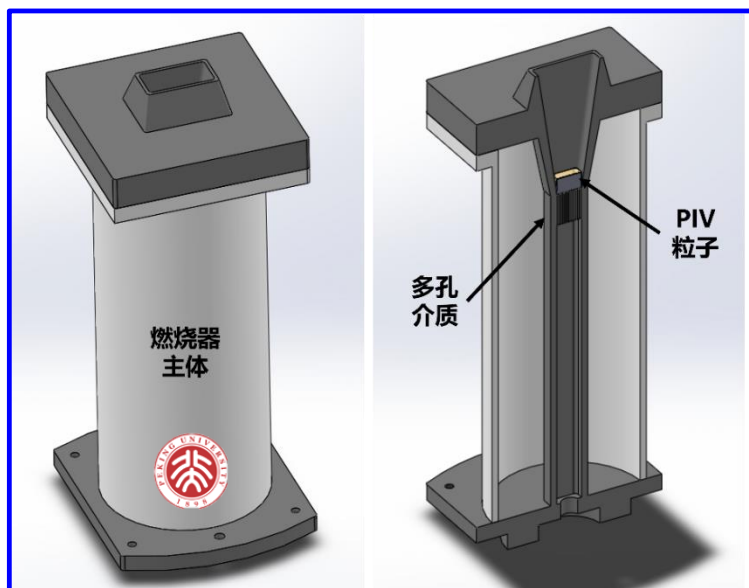
地面火焰

(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**

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**

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.shtm?log=1>



(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](#)

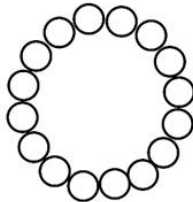
Flickering candle flames and their collective behavior


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


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

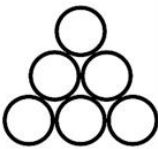
Arrangements of the candle bundles used in the experiments.

(a) 

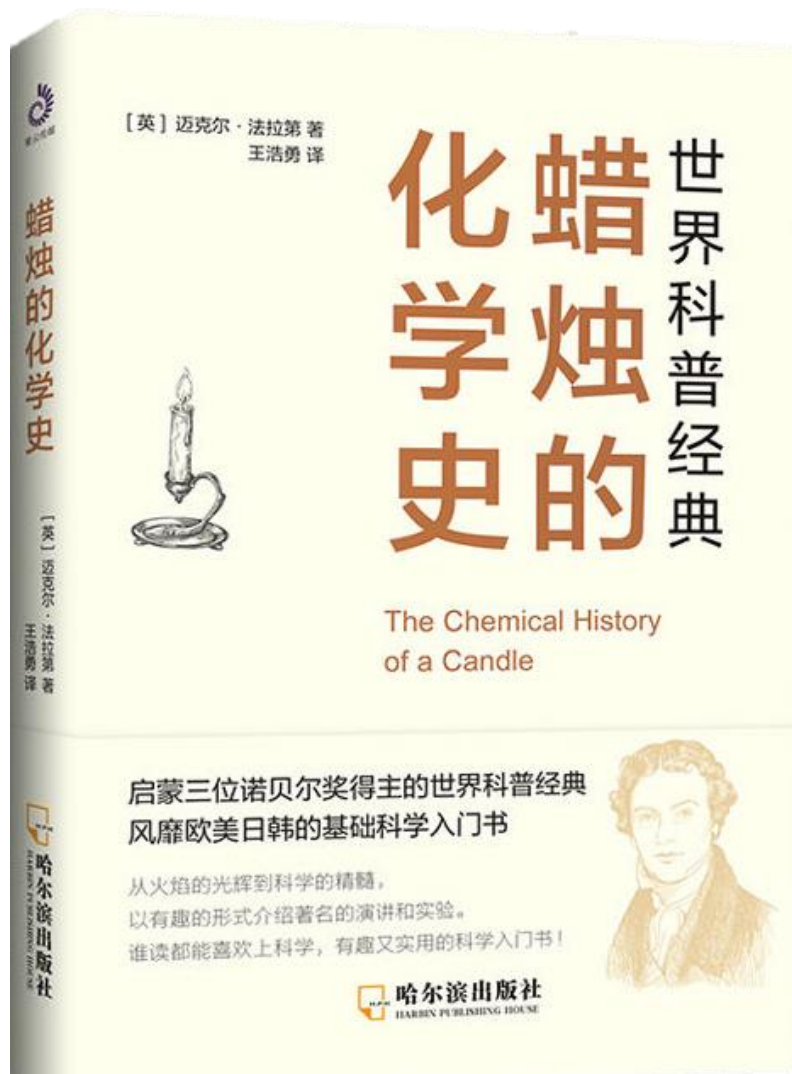
(b) 

(c) 

(d) 

(e) 

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



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)

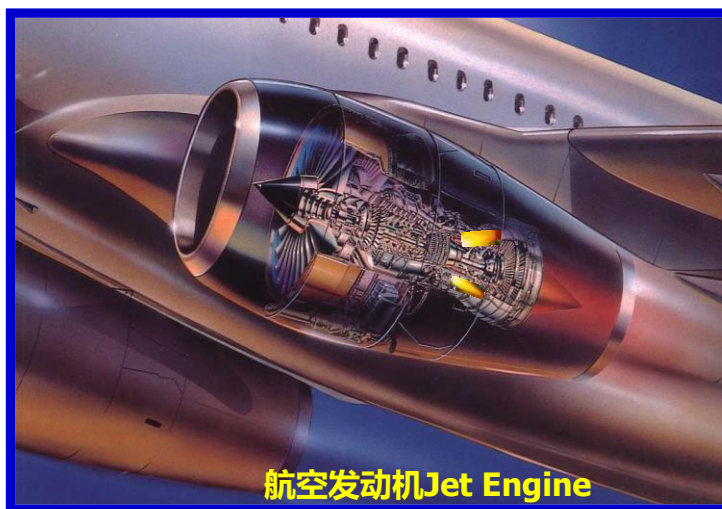
什么是燃烧?



- 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、传动力、化学反应**



航空发动机 Jet Engine



火箭发动机

SpaceX Starship

(图片来自网络)

■ 燃烧 = 涉及**化学反应**的**流体力学** Chemically Reactive Flow

■ 多学科**交叉**

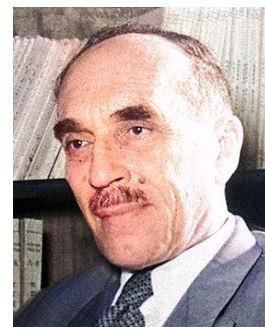
- 热力学
- 化学反应动力学
- 流体力学
- 传热传质
- 物理化学
- ...

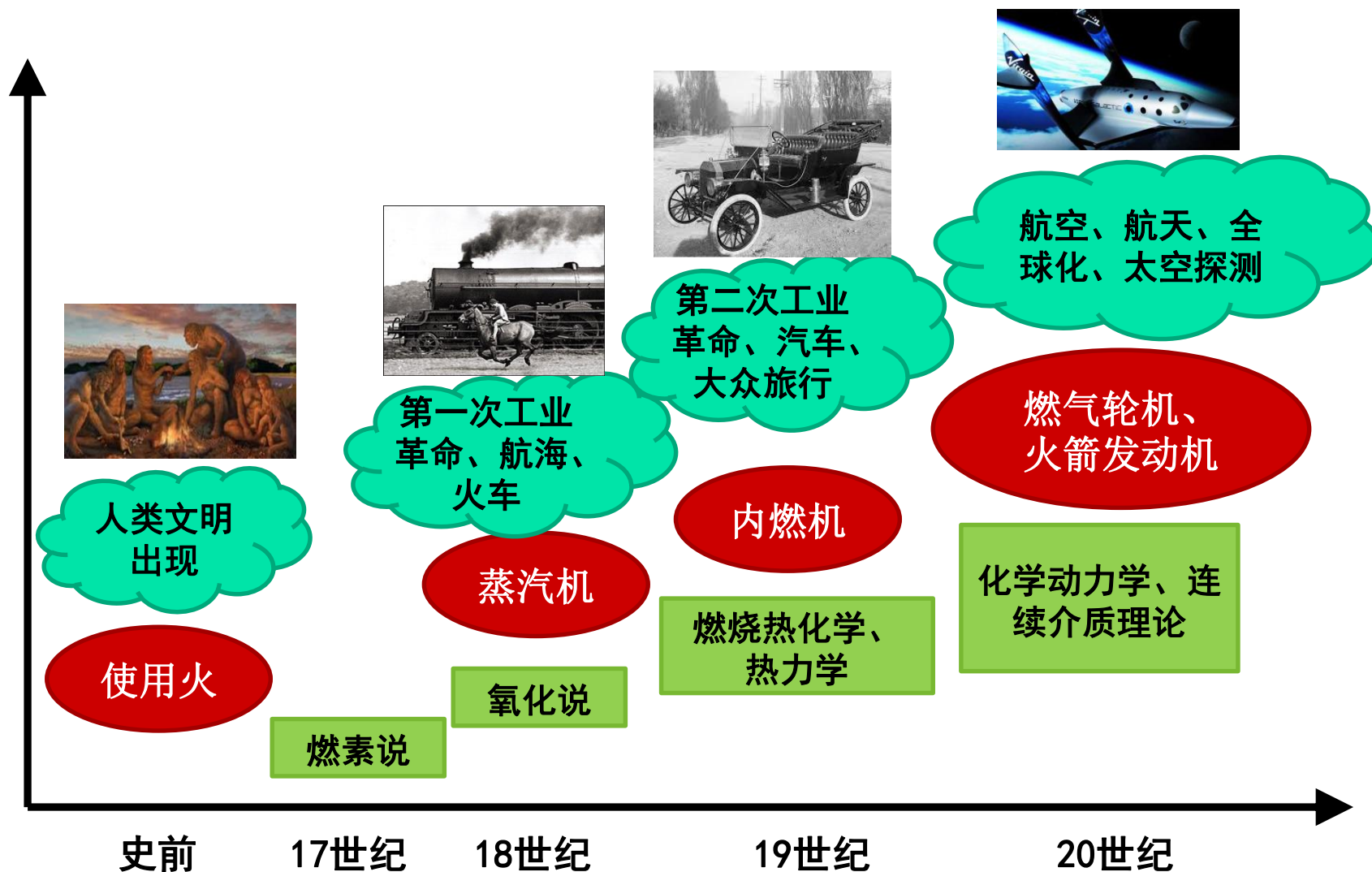


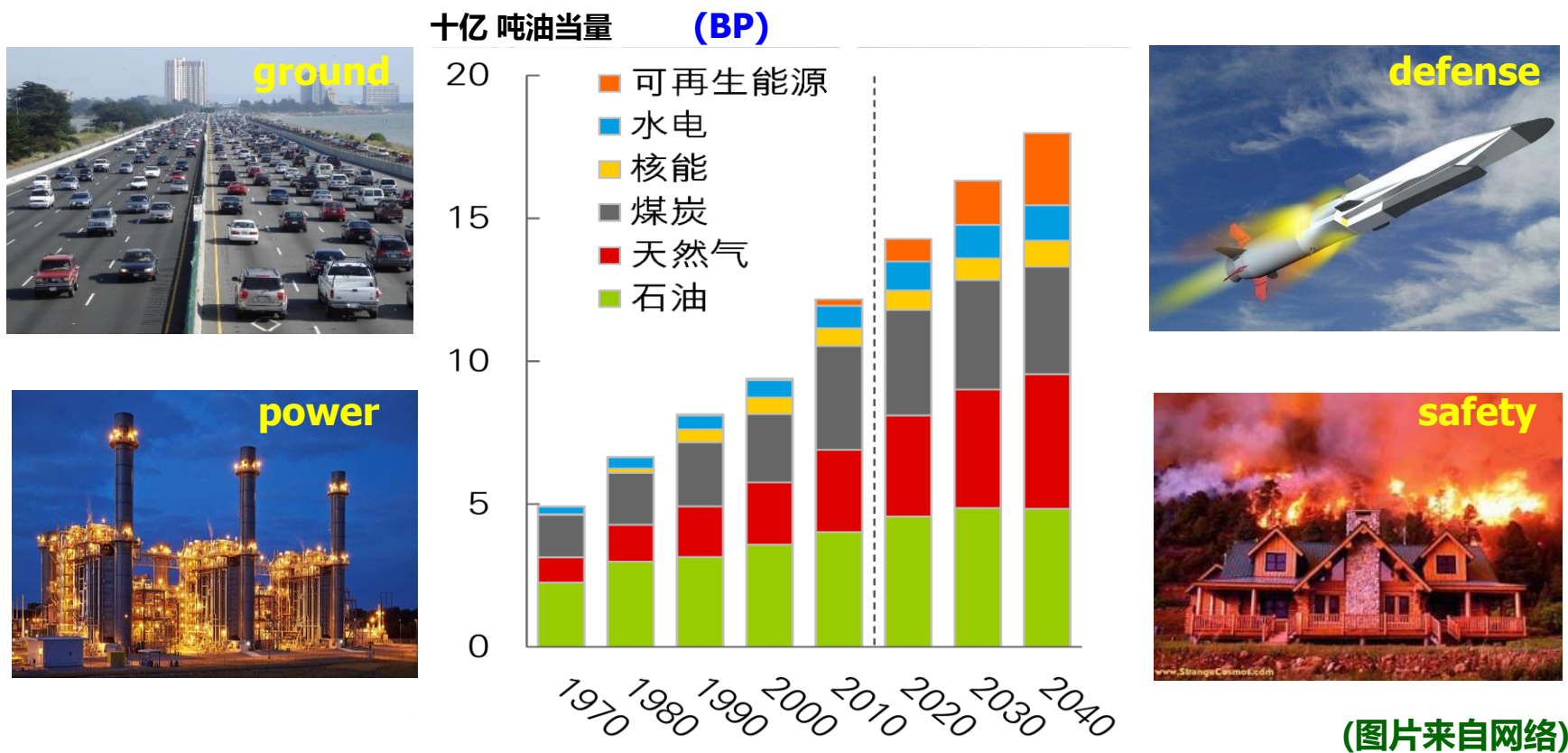
- **热质**运输
- **流动**、掺混
- **化学**反应
- 声
- 光
- 电

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)







- 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

■ 能源动力

煤炭发电、石油、天然气 ...

■ 工业生产

钢铁、玻璃、陶瓷、塑料、纳米粒子 ...

■ 安全防范

森林火灾、建筑物火灾、煤矿爆炸 ...

■ 环境与气候

二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物、碳黑 ...

■ 空天发动机

航空发动机、火箭、爆震、组合动力 ...

.....



电力与工业



交通运输



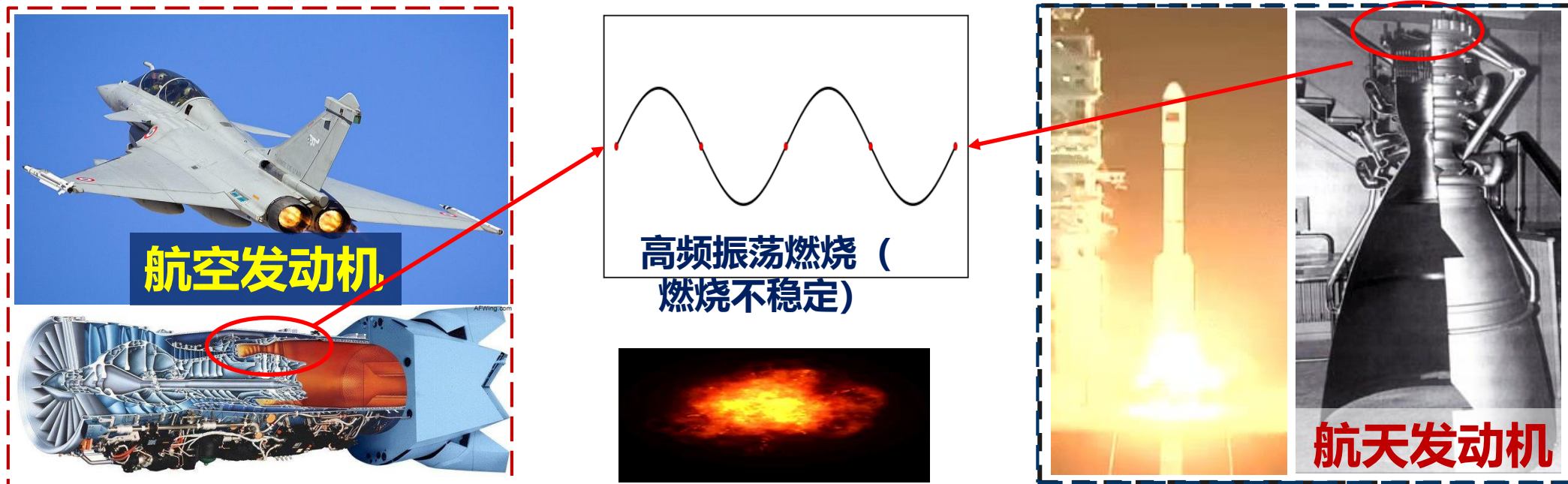
火灾与安全



环境问题



国防与空天

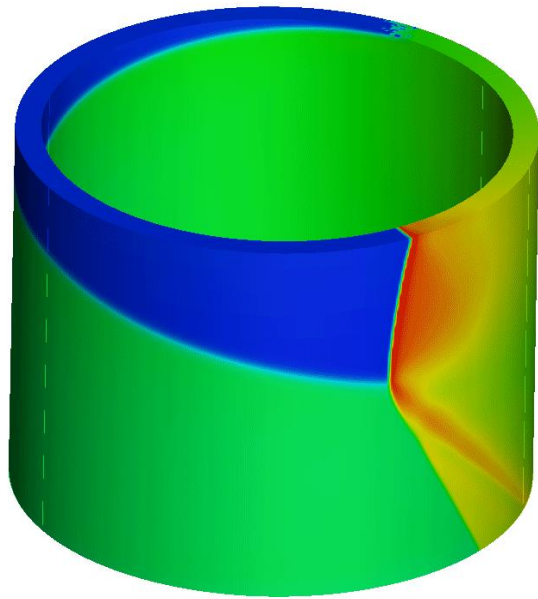


(图片和视频来自网络)

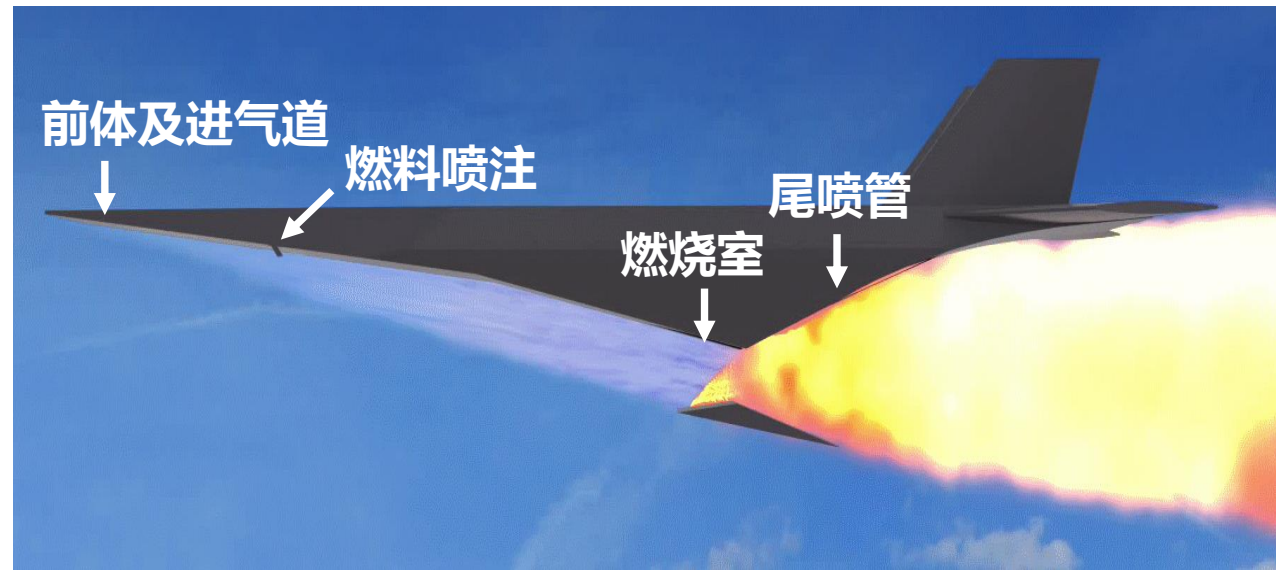
- **高频振荡燃烧会导致机毁人亡严重后果**
- **燃烧不稳定控制是空、天发动机研制共性重大技术关键之一**

- 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

■ 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

美国登月火箭首次**点火**失败，发动机报废



F-16战斗机**空中熄火**



为什么这些工程问题**尚未彻底解决**呢？

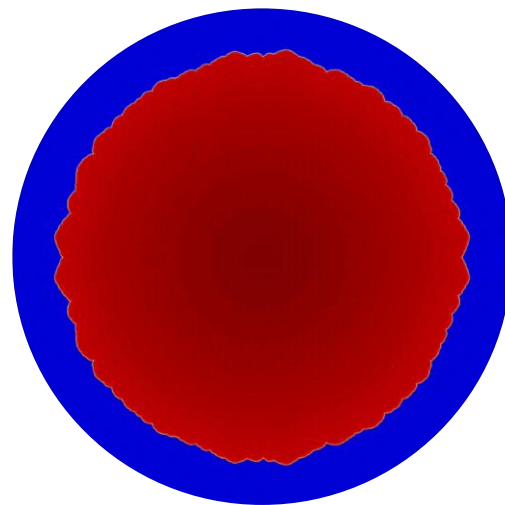
- 化学反应、传热传质、流动、压力波/激波等因素**非线性作用**
- 点火、火焰传播、转捩等瞬态燃烧过程**相互耦合、相互影响**

点火 ↔ 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 ↔ 转捩

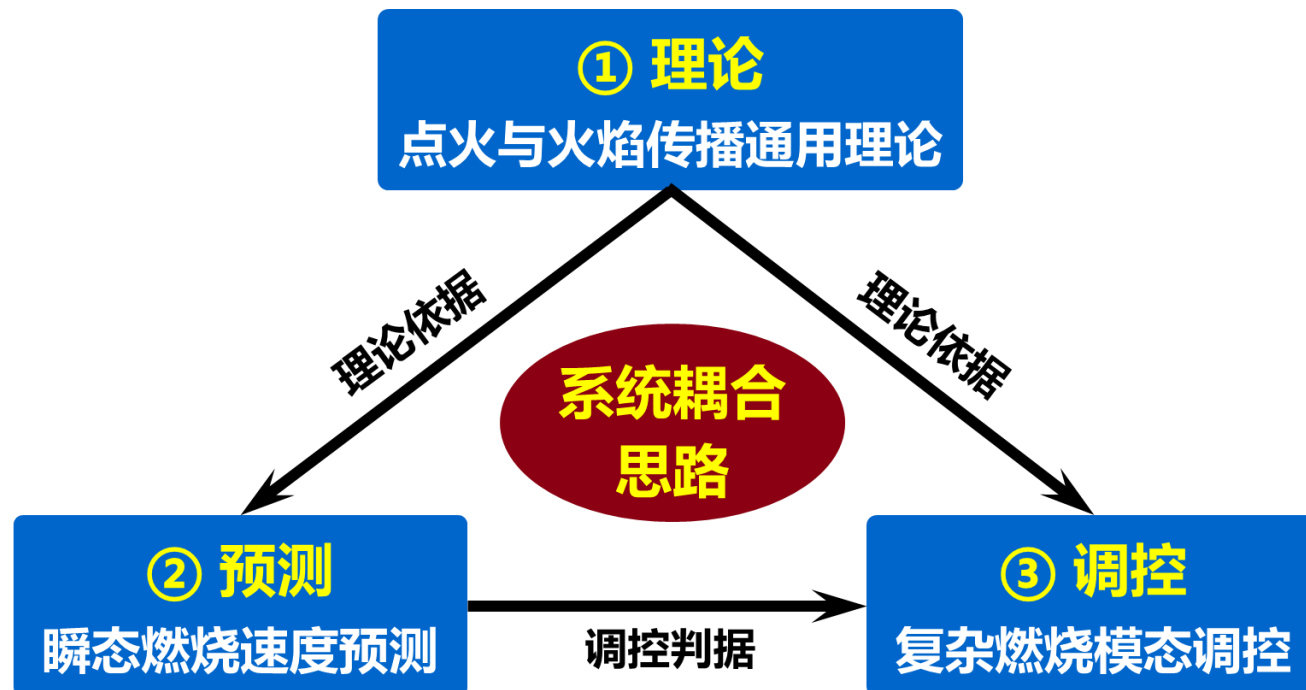


- 火焰加速传播引发转捩/爆轰
- 转捩导致火焰被爆轰取代

创新思路：



主要研究进展：

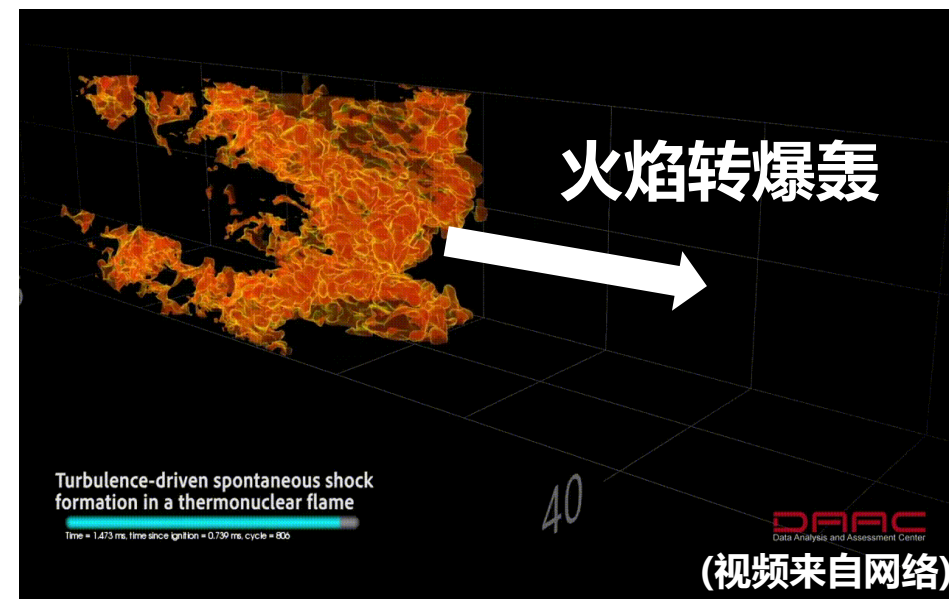
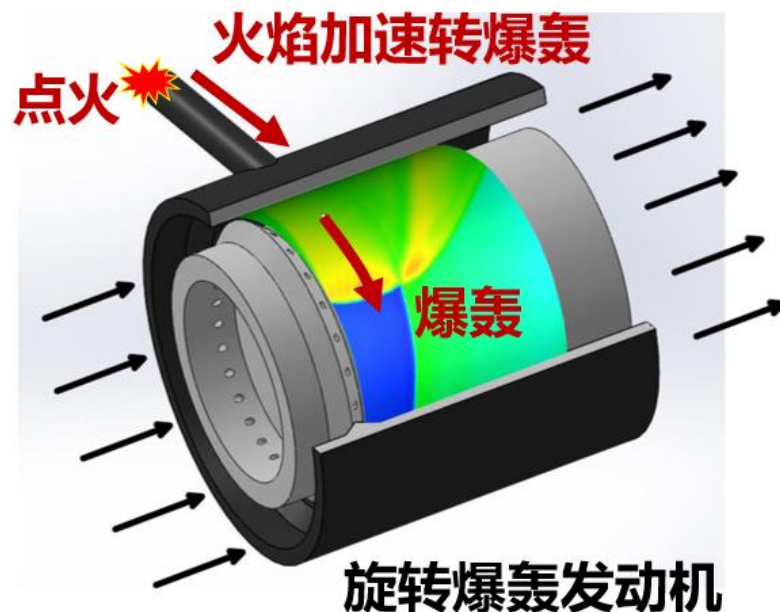


■ 采用系统耦合思路，统一考虑复杂因素强非线性作用，开展火焰动力学基础研究

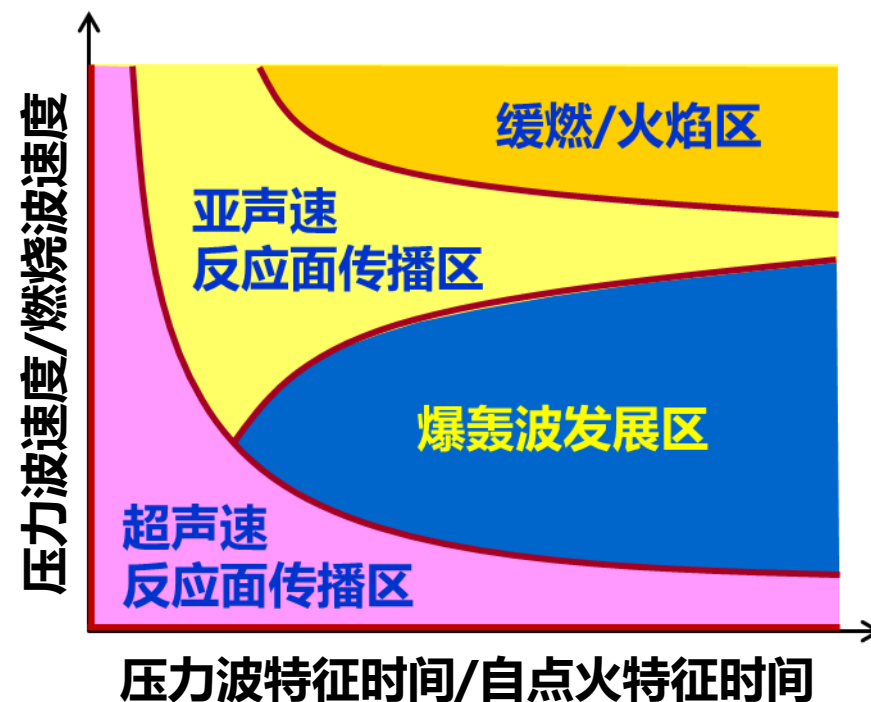
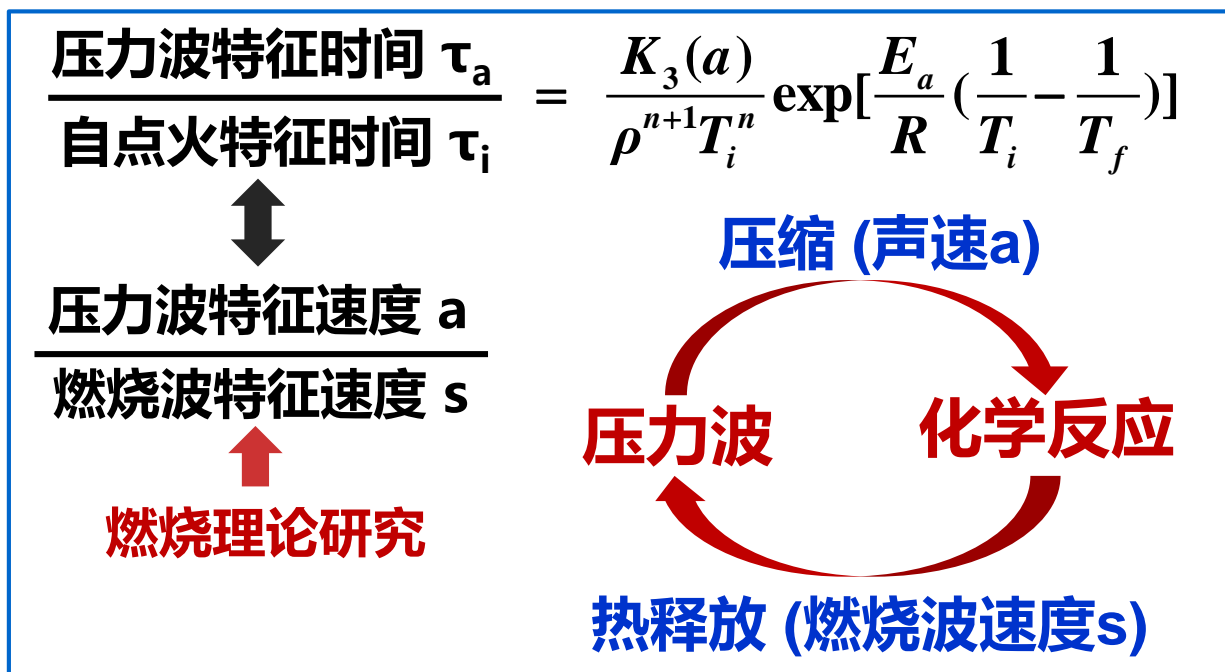
■ 工程需求：复杂燃烧模态**转换机理与调控方法**

复杂燃烧模态

- 点火
- 火焰传播
- 熄火
- 再燃/自燃
- 爆轰

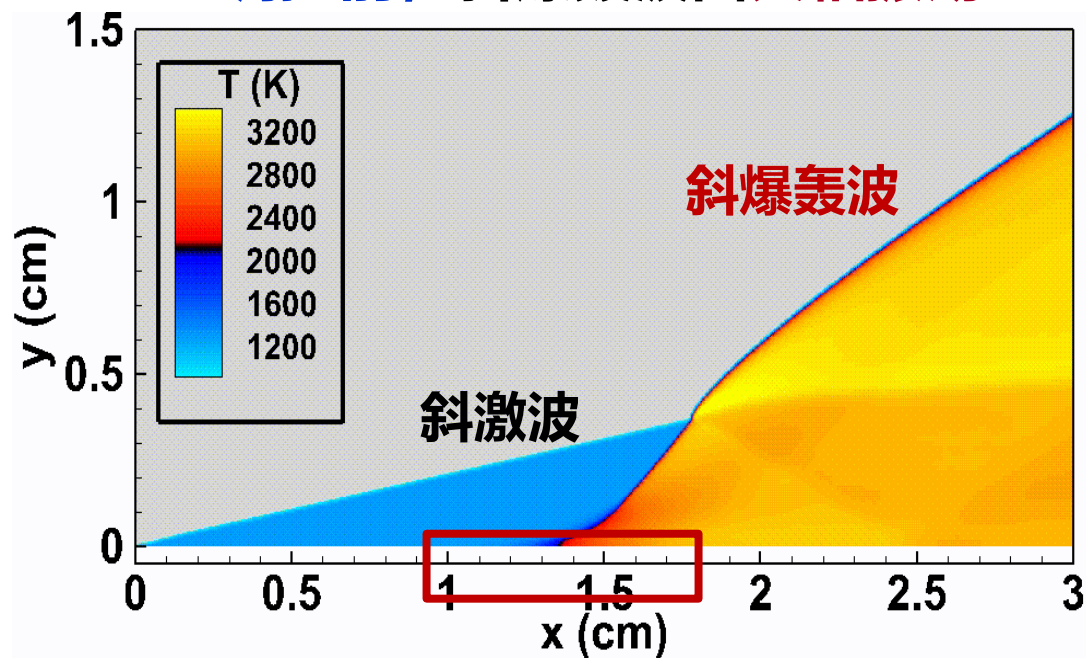


美国工程院Oran院士：“火焰（缓燃）转爆轰是燃烧研究中**尚未解决的主要问题** (major unsolved problem)” 2008 CNF



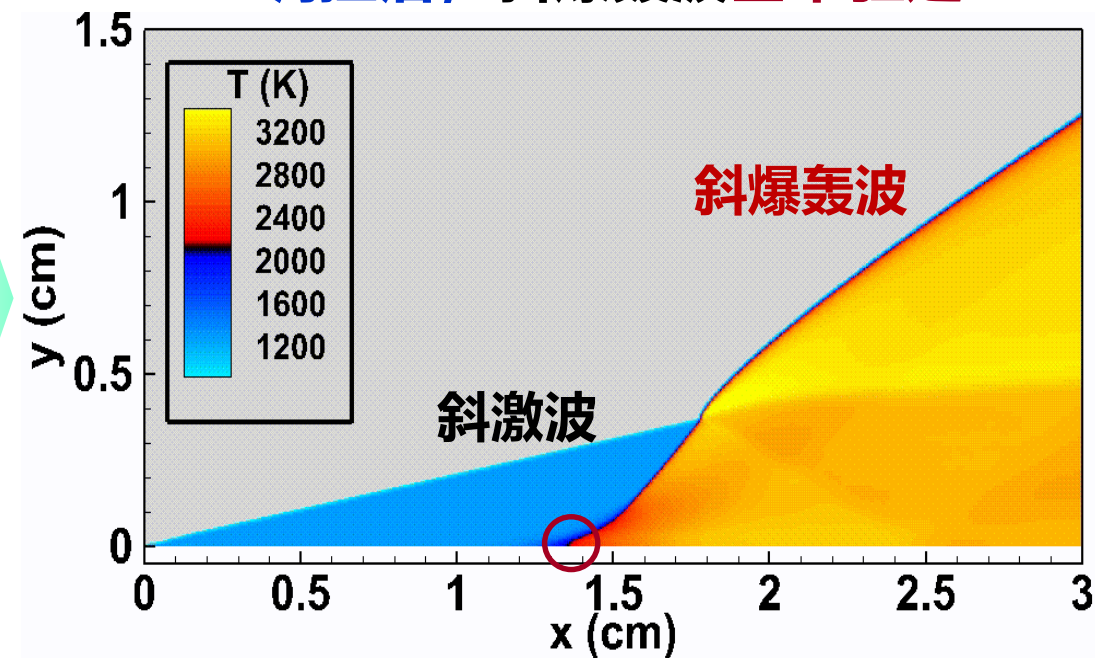
- 给出了火焰转爆轰**评价判据**，实现了爆轰形成条件的**定量预测**

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定常来流情形下保持基本驻定



王健平

爆轰发动机



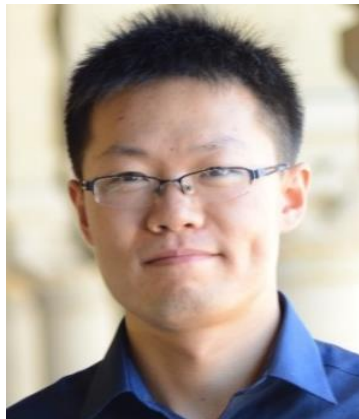
陈正

火焰与爆轰



杨越

湍流燃烧



王圣凯

燃烧诊断



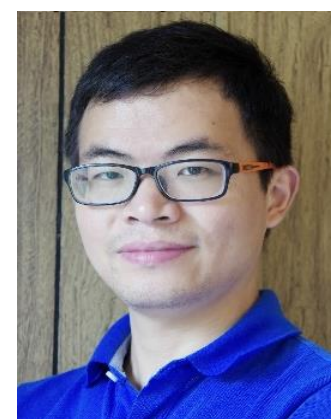
陈帜

燃烧与AI



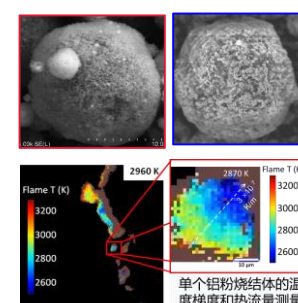
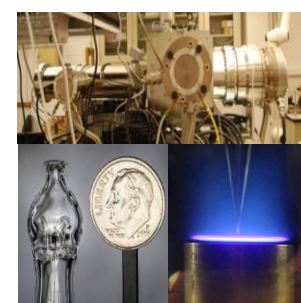
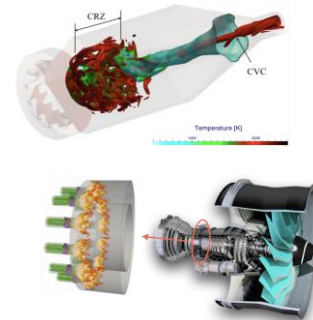
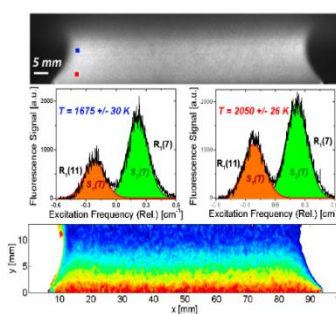
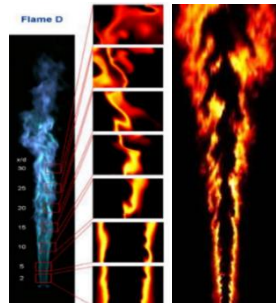
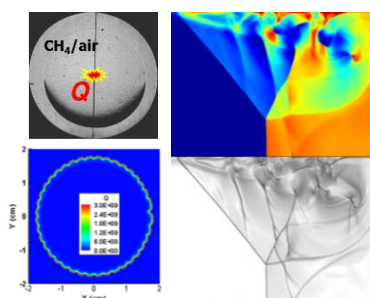
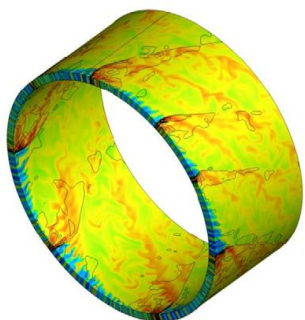
赵皓

燃烧化学



王海洋

含能材料



北京大学欢迎你

来北大 成为更好的自己