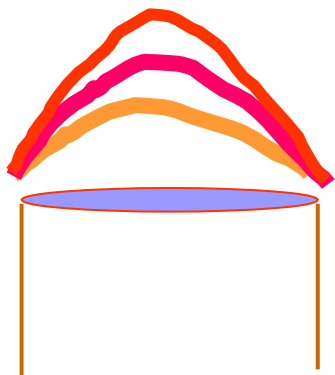


关于火焰传播和火焰稳定性

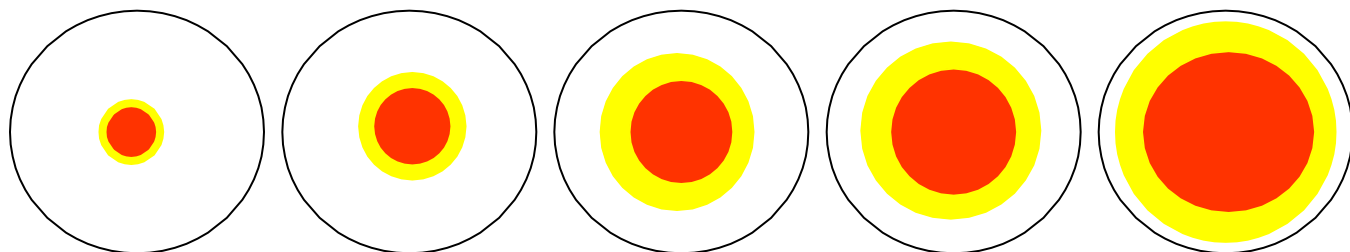
基本概念

火焰分类

按火焰面位置：移动火焰和驻定火焰



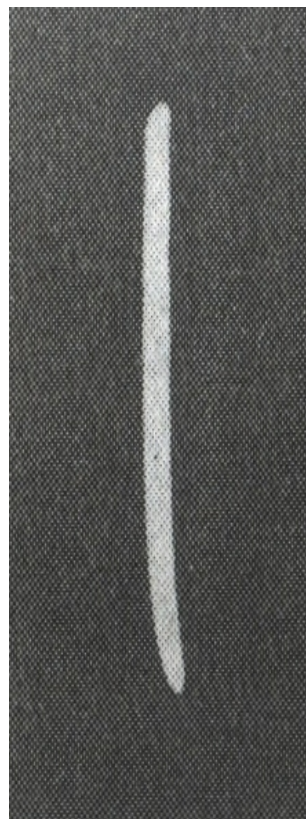
预混合火焰锥体



移动火焰

按预混气流动状态：层流火焰和湍流火焰

- 层流火焰——火焰面通过热传导和分子扩散把热量和活性中心提供给临近尚未燃烧的预混气体薄层，使火焰传播下去。
- 湍流火焰——火焰面的热量和活性中心向未燃混合气输运是依靠流体的涡团运动来激发和强化，受流体运动状态支配。

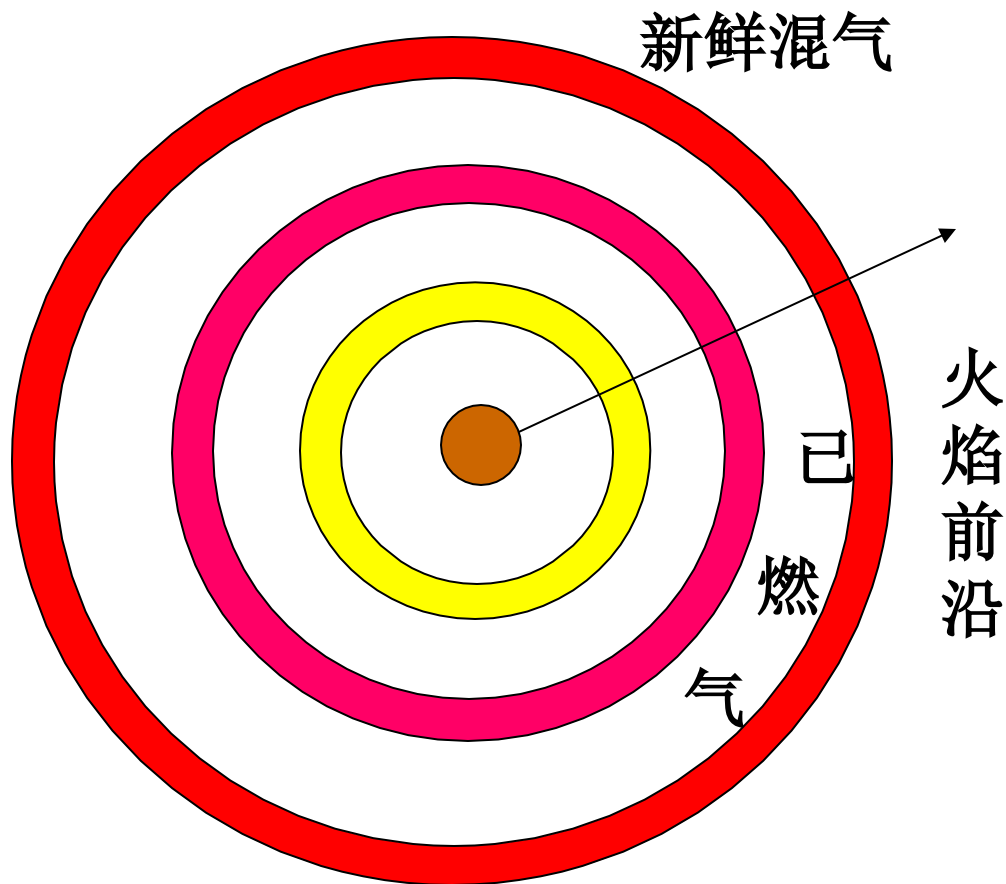


层流火焰



湍流火焰

火焰前沿（前锋、波前）



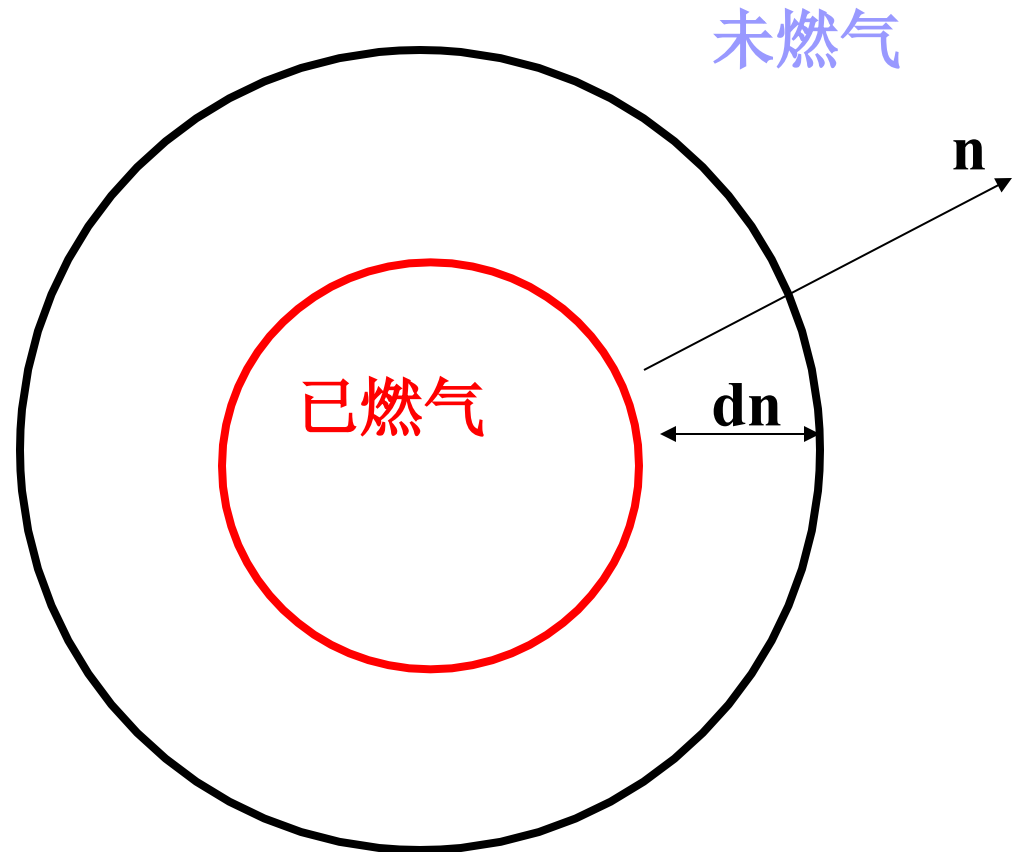
n发光的火焰层，
化学反应区

n已燃的区域和未燃
的区域之间形成的分
界线

n特征尺寸极薄，可看
成几何面

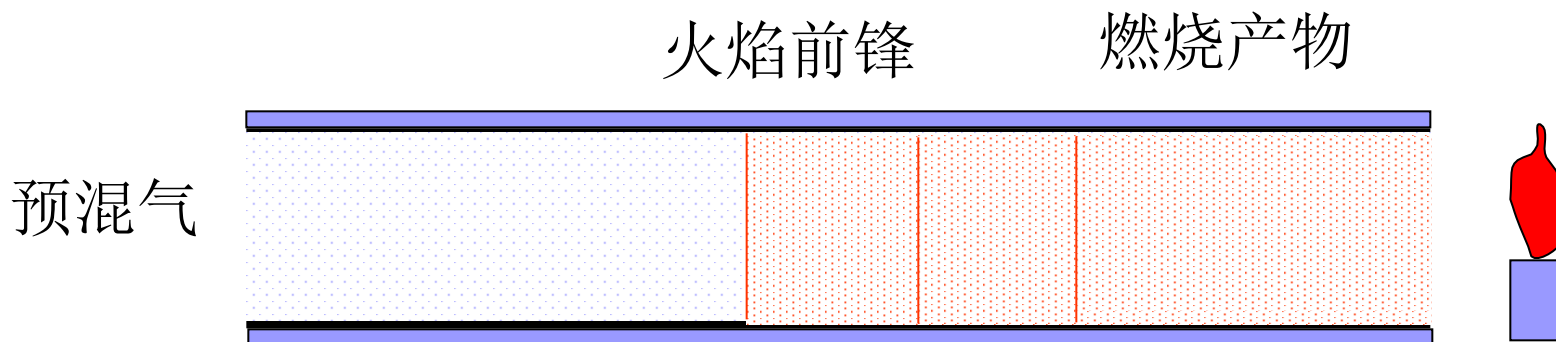
火焰的传播速度

火焰的传播速度：
火焰前锋沿其
法线方向相对于新
鲜混合气移动的速
度。

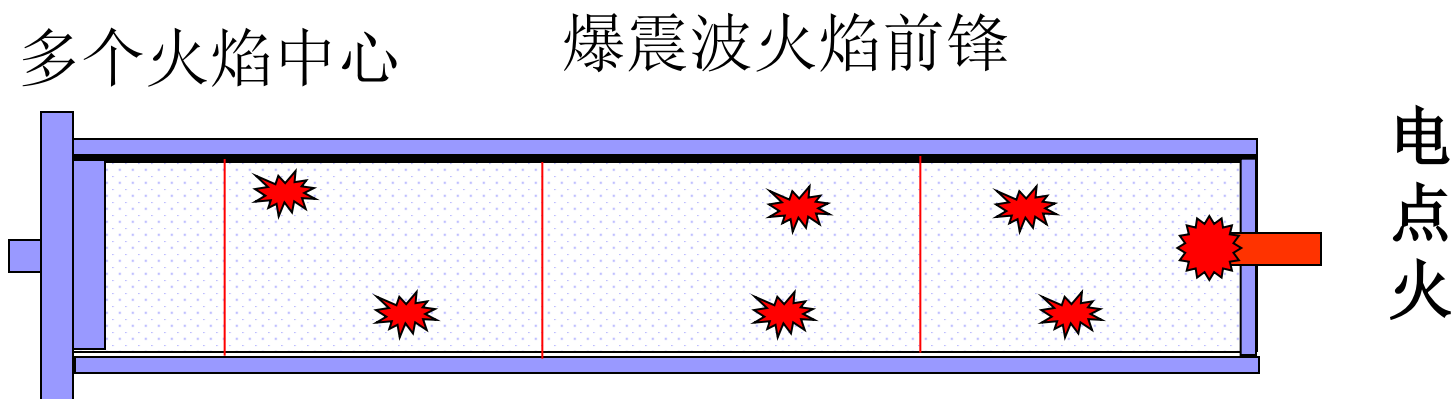


平面火焰的传播方式

■ 正常火焰传播速度（缓焰波）



■ 不正常火焰传播（爆震波）



层流火焰传播理论

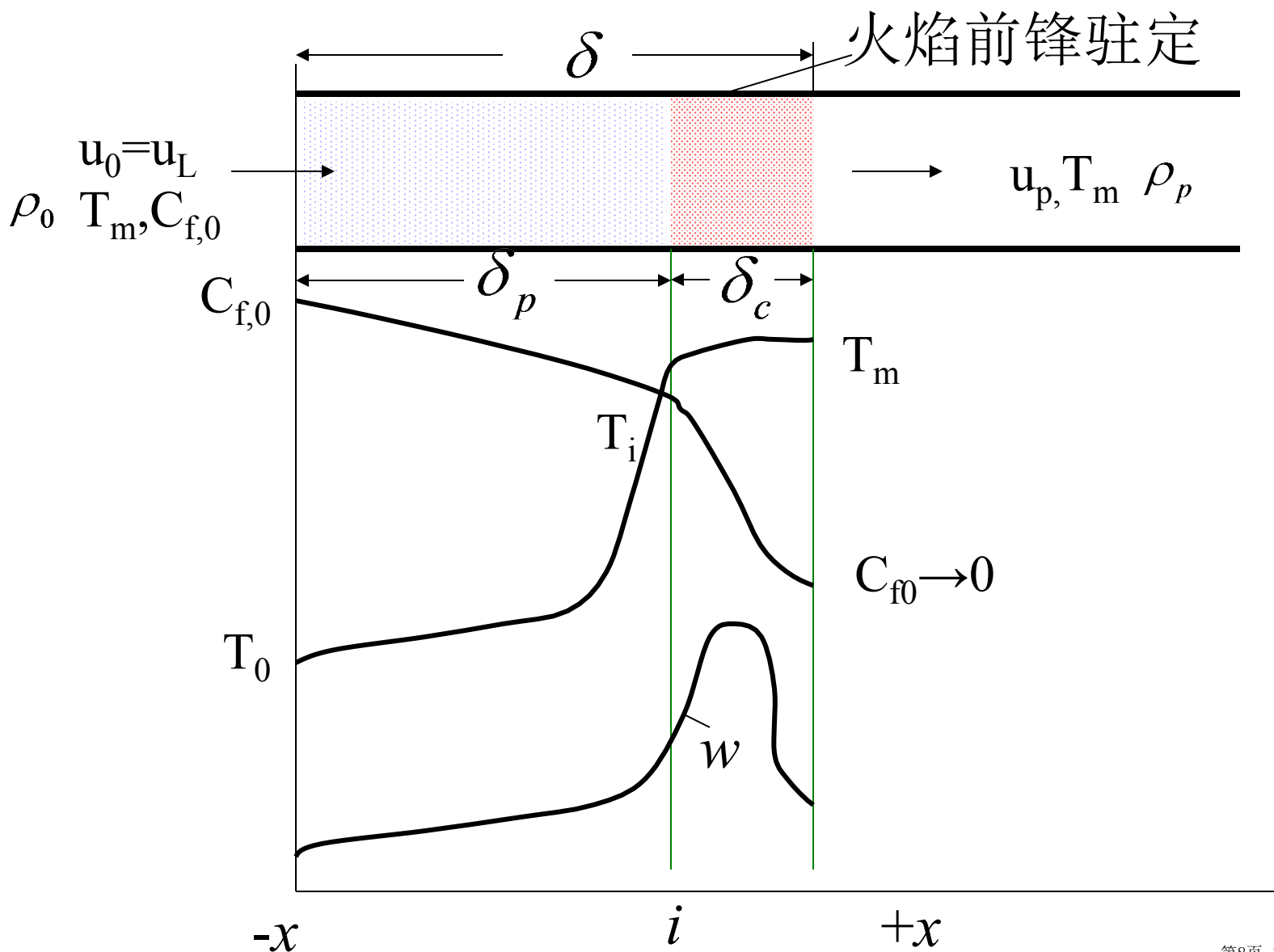
层流火焰传播理论分为：

热力理论：火焰传播过程主要是由于反应区向预热区的热量交换的传热过程。

扩散理论：火焰传播过程取决于活性中心浓度的扩散过程。

实际中两种机制同时起作用。

火焰结构及其特征



火焰结构及参数分布示意图

火焰结构及其特征

- 火焰前沿分两个区：物理预热区和化学反应区
- 前沿厚度很小，但温度梯度和浓度梯度很大，存在强烈的热传导和物质扩散
- 火焰前沿在预混气中移动，是由于反应区放出热量不断向新鲜混合气传递及新鲜混合气不断向反应区中扩散。

燃烧前沿的导热微分方程

能量微分方程为：

$$\rho_0 u_L C_p \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + WQ$$

对于绝热条件，火焰面的边界条件为

$$x = -\infty, T = T_0, \frac{dT}{dx} = 0$$

$$x = +\infty, T = T_m, \frac{dT}{dx} = 0$$

层流火焰传播速度 u_L 表达式 (1)

泽尔多维奇和弗朗克-卡门涅茨基的分区近似解

- 在预热区：反应速度 W 近似为零

$$\rho_0 u_L C_p \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right)$$

边界条件： $x = -\infty, T = T_0, \frac{dT}{dx} = 0$

$$x = \delta_p, T = T_i$$

积分后：

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_p = \frac{u_L}{\lambda} \rho_0 C_p (T_i - T_0)$$

层流火焰传播速度 u_L 表达式 (2)

n 在反应区：反应区温度升高所消耗的能量近似为零

$$\rho_0 u_L C_p \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + WQ \longrightarrow \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + WQ = 0$$

边界条件：

$$x = +\infty, T = T_m, \frac{dT}{dx} = 0; x = \delta_p, T = T_i$$

积分后：

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_c = \sqrt{\frac{2}{\lambda} \int_{T_i}^{T_m} WQ dT}$$

层流火焰传播速度 u_L 表达式 (2)

拐点处:
$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_P = \left(\frac{dT}{dx}\right)_C$$

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_C = \sqrt{\frac{2}{\lambda} \int_{T_i}^{T_m} WQdT} \quad \left(\frac{dT}{dx}\right)_P = \frac{u_L}{\lambda} \rho_0 C_p (T_i - T_0)$$

则求得传播速度为:

$$u_L = \sqrt{\frac{2\lambda \int_{T_i}^{T_m} WQdT}{\rho_0^2 C_p^2 (T_i - T_0)^2}}$$

层流火焰传播速度 u_L 表达式 (3)

因为预热区反应速度很小

$$\int_{T_0}^{T_i} WdT \approx 0 \quad \int_{T_i}^{T_m} WdT \approx \int_{T_0}^{T_m} WdT$$

因为反应区温度变化不大: $(T_i - T_0) \approx (T_m - T_0)$

$$\int_{T_i}^{T_m} \frac{WQdT}{(T_i - T_0)} = Q \int_{T_0}^{T_m} \frac{WdT}{(T_m - T_0)} = Q\bar{W}$$

火焰传播速度为:

$$u_L = \sqrt{\frac{2\lambda Q\bar{W}}{\rho_0^2 C_P^2 (T_m - T_0)}}$$

层流火焰传播速度是与预混气的物理化学性质有关

宏观角度分析:

$$\delta_L = u_L \tau$$

在固定火焰、稳定燃烧条件下:

导入热量 $Q_D = \frac{T_m - T_0}{\delta_L / \lambda A}$ $\left(Q = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} \right)$

获得热焓量 $Q_h = u_L A \rho_0 C_P (T_m - T_0)$ $Q = m C_P \Delta t$

火焰传播速度 $u_L = \sqrt{\frac{a}{\tau}} \propto \sqrt{W}$ $a = \frac{\lambda}{\rho_0 C_P}$

选定燃料的火焰速度计算公式

往复式内燃机和燃气轮机在典型温度和压力下的经验公式：

■ 参考温度下： $u_{L,ref} = B_M + B_2(\Phi - \Phi_M)^2$

■ $T \geq 350K$ 时： $u_L = u_{L,ref} \left(T / T_{ref} \right)^\gamma \left(P / P_{ref} \right)^\beta (1 - 2.1Y_{dil})$

式中：参考状态指： $T_{ref} = 298K$ 、 $P_{ref} = 1atm$

B_M 、 B_2 、 Φ_M ：由燃料类型确定的数；

Φ ：当量比；

Y_{dil} ：稀释剂的浓度

$$\gamma = 2.18 - 0.8(\Phi - 1)$$

$$\beta = -0.16 + 0.22(\Phi - 1)$$

燃料	Φ_M	B_M (cm/s)	B_2 (cm/s)
甲醇	1.1	36.92	-140.51
丙烷	1.08	34.22	-138.65
异辛烷	1.13	26.32	-84.72
RMFD-303	1.13	27.58	-78.34

例题：针对下述几种工况，对汽油—空气混合物在 $\Phi = 0.8$ 下的层流火焰速度进行比较：

(1) 参考状态： $T_{ref} = 298K$ 、 $P_{ref} = 1atm$

(2) 典型的电火花点火的条件，即： $T = 685K$ 、 $P = 18.38atm$

(3) 条件与 (2) 相当，但有**15%**的废气回流量。

影响火焰传播速度的因素

- 燃料、氧化剂性质及其混合比
- 压力
- 初始温度
- 添加剂

燃料、氧化剂性质及其混合比影响

- 燃料种类— 火焰传播速度不同是由于燃料的热物理性质和化学反应性质不同造成。

常用燃料层流时的火焰传播速度 ($\alpha=1$)

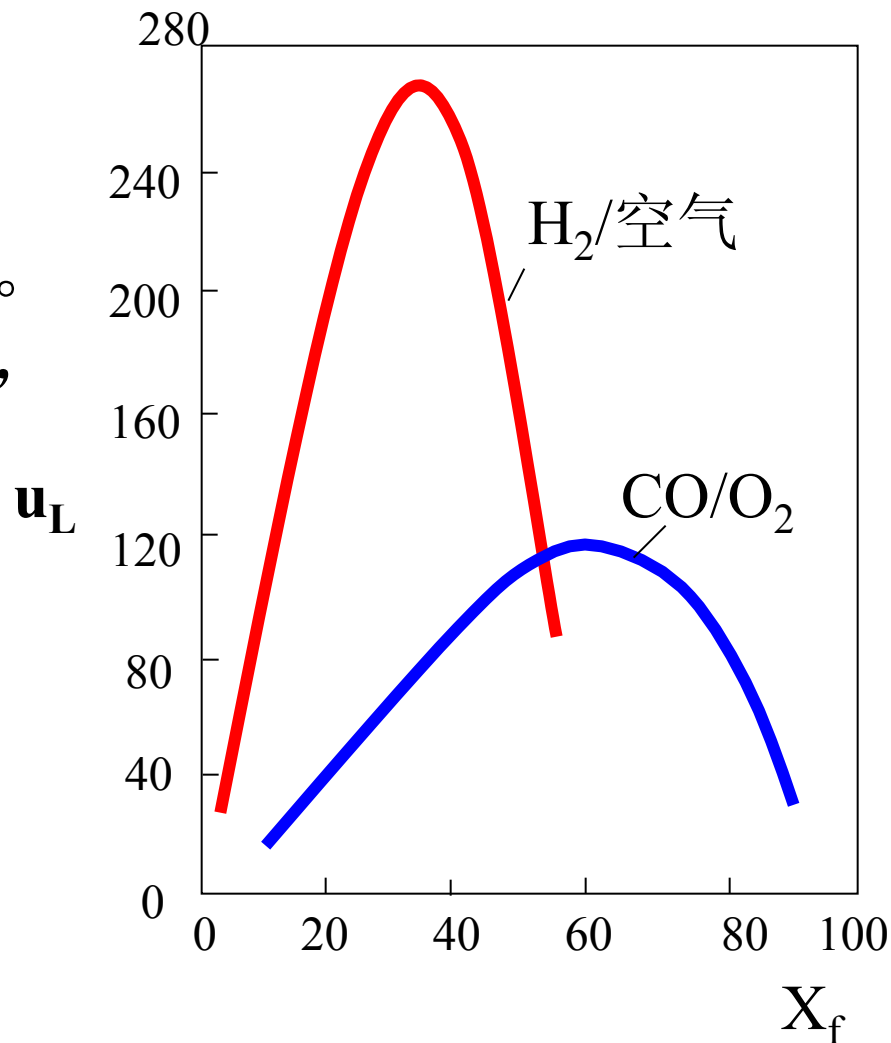
甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	乙烯	氢气	CO	人工煤气
0.43~ 0.45	0.487	0.472	0.453	0.79	3.45- 3.57	0.175 -0.19	1.0

燃料浓度的影响

n 火焰传播只发生在一定浓度界限内,燃料气过贫或过富,火焰都无法传播。在火焰传播浓度界限之外,传播速度等于零。

n 两者都在化学恰当比浓度 X_{FS} 附近达到最大火焰传播速度。

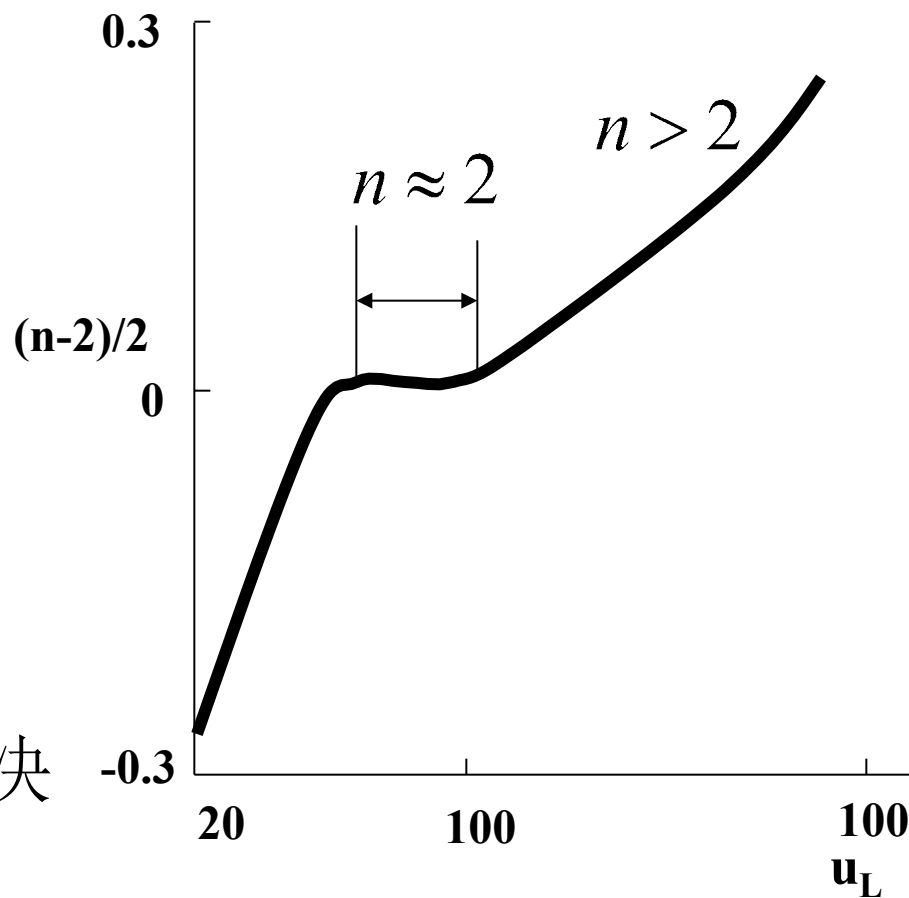
n 氢气预混气比一氧化碳预混气的火焰传播浓度界限要窄得多。



压力的影响

$$u_L \rho_0 \propto W^{1/2} \quad , \quad W \propto p^n \quad \rightarrow \quad u_L \rho_0 \propto p^{\frac{n}{2}}$$

$$u_L \rho_0 \propto p^{\frac{n}{2}} \quad , \quad p \propto \rho_0 \quad \rightarrow \quad u_L \propto p^{\frac{n-2}{2}}$$

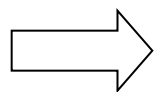


压力指数对 u_L 的影响

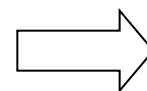
压力对火焰传播速度的影响取决于反应的
压力指数 $(n-2)/2$

初始温度的影响

初始
温度
提高



- n 预热到着火的时间缩短
- n 燃烧反应带温度提高
- n 反应速度加快
- n 气体导热系数增加
- n 气体密度减小。



火焰
传播
速度
增大

n 实验结果

$$u_L \propto T_0^m \quad m=1.5\sim 2$$

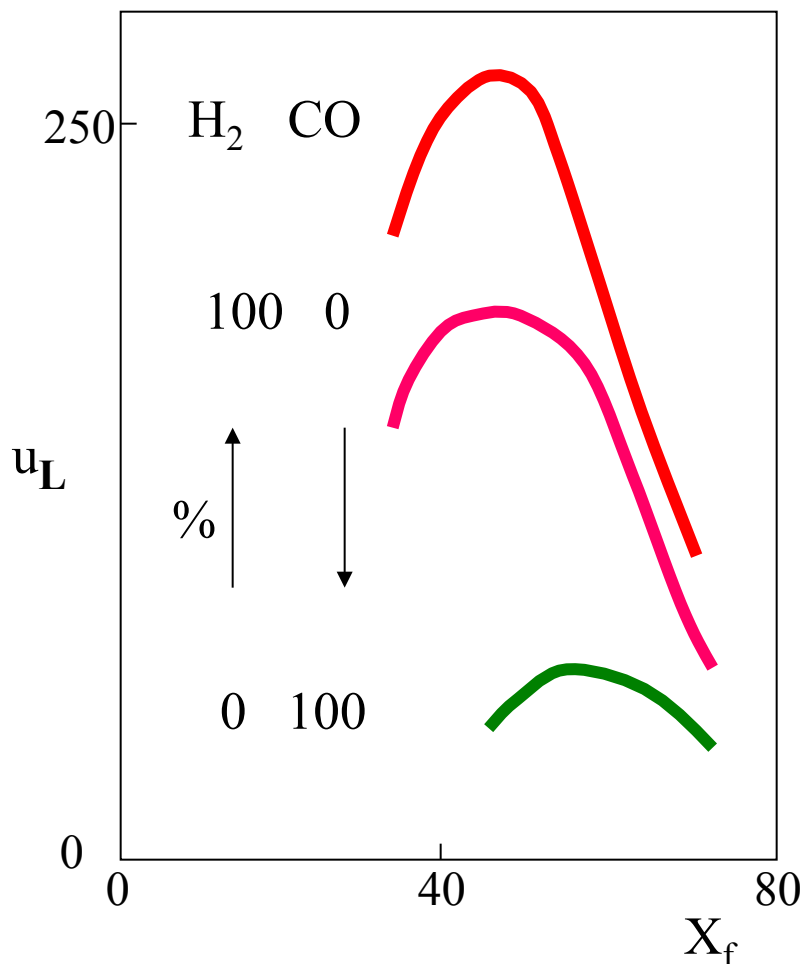
n 经验公式

$$u_{L1} = u_{L0} + 0.45 \times 10^{-3} (T_1^2 - T_0^2) \quad \text{cm/s}$$

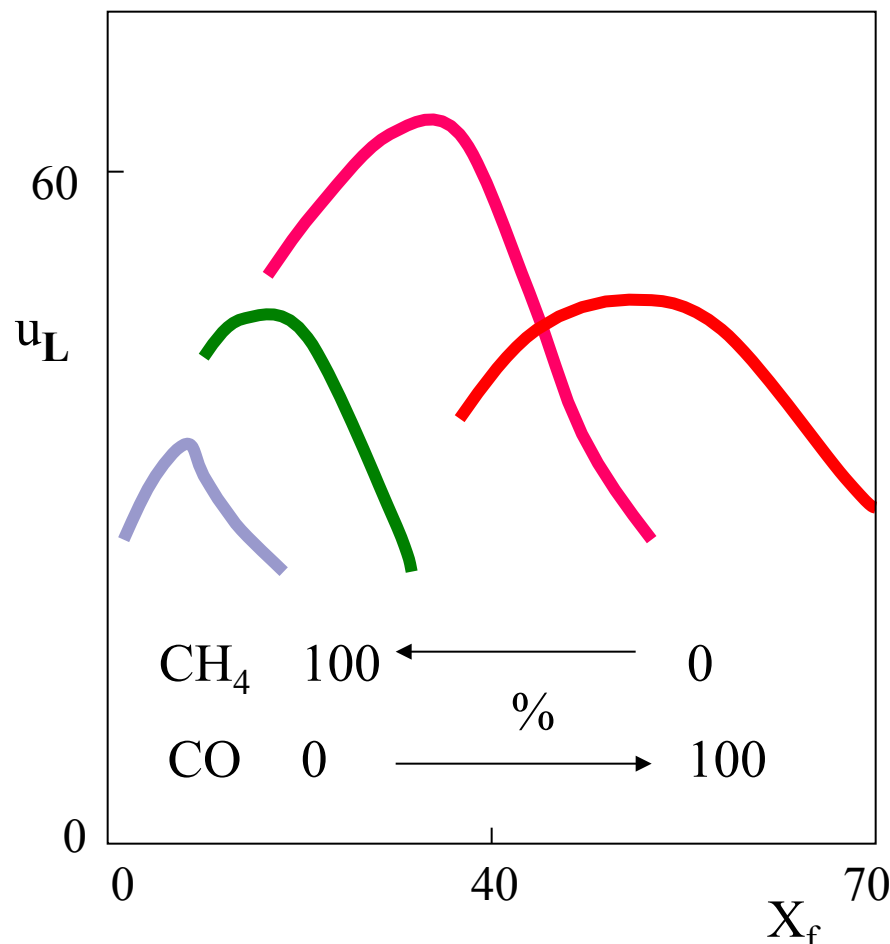
添加剂的影响

- 活性添加剂 (H_2)
 - 火焰传播界限和火焰传播速度随活性添加剂浓度改变而发生明显变化。
- 惰性添加剂 (CO_2 、 N_2 、 He)
 - 火焰传播速度减小，火焰传播界限缩小，火焰传播极限向燃料浓度减小方向偏移。
- 催化剂 (铂、钯、铯)
 - 加入混合气中对火焰传播速度有明显的影响。

活性添加剂

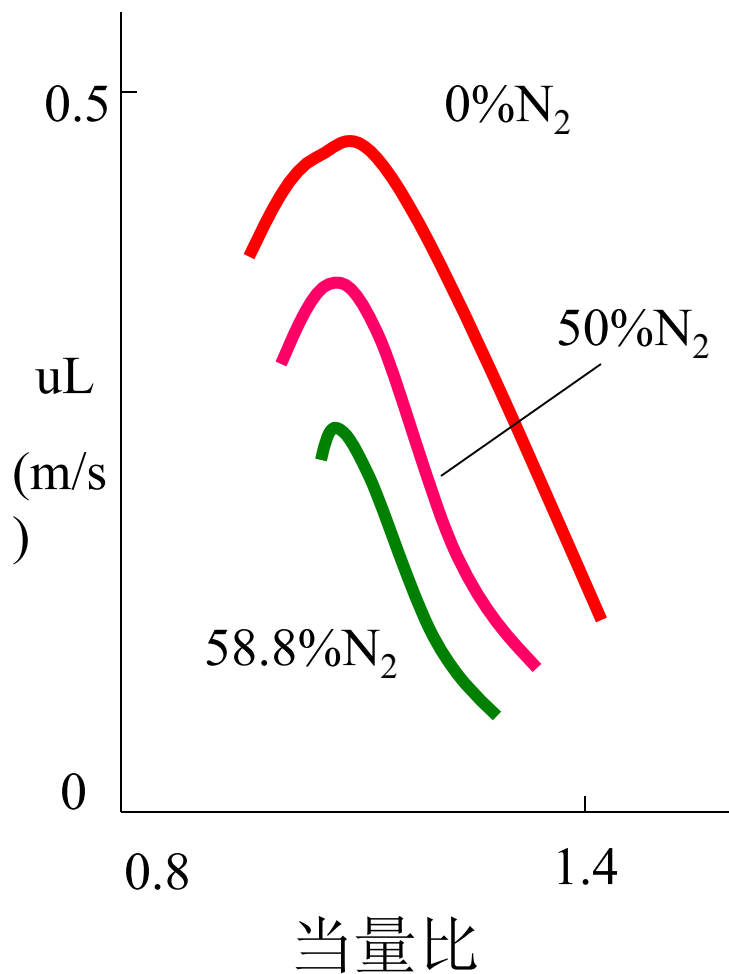


加入H₂对CO预混气 u_L 的影响

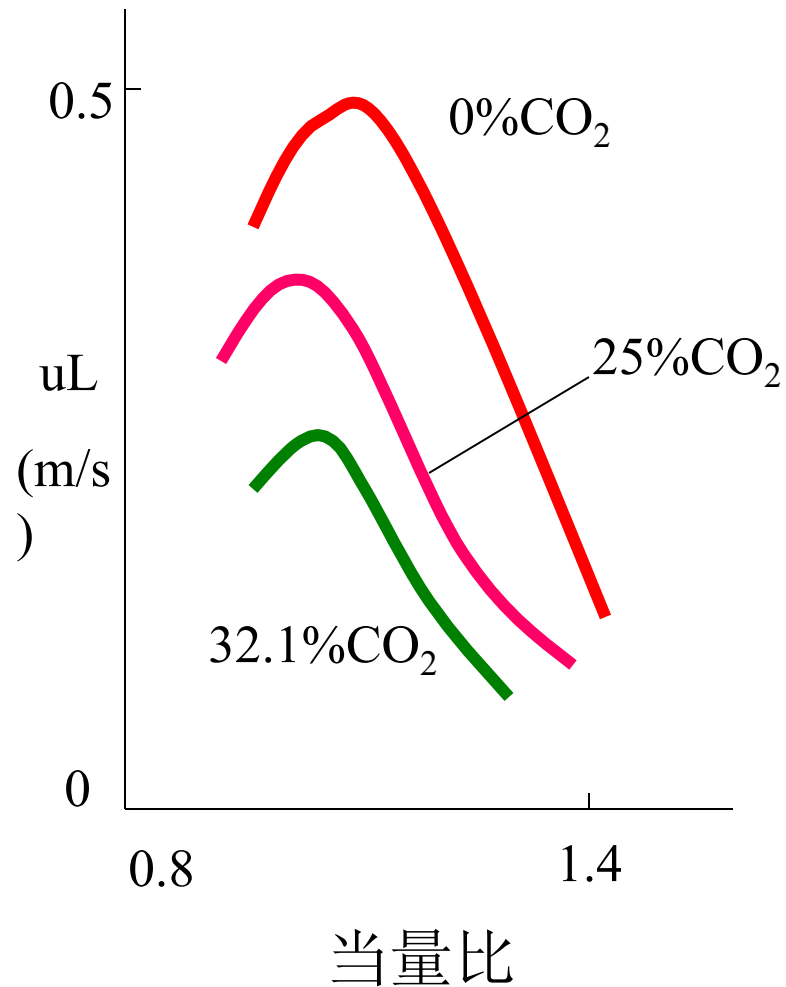


加入CH₄对CO预混气 u_L 的影响

惰性添加剂



加入N₂对甲烷u_L的影响



加入CO₂对甲烷u_L的影响

催化剂的影响

CO/空气反应中加入水蒸汽:

干CO/空气: $u_L = 20 \sim 40\text{m/s}$

潮湿CO/空气: $u_L = 106\text{m/s}$

活性中心(H, OH)浓度 , W , u_L

层流火焰传播速度的测量方法

测定方法分类

测定方法：

n 移动火焰测定法

肥皂泡法

球弹法

n 驻定火焰测定法

平面火焰法

本生灯法

肥皂泡法

实际火焰传播速度公式：

$$u_L = \frac{1}{a} \frac{dr}{d\tau}$$

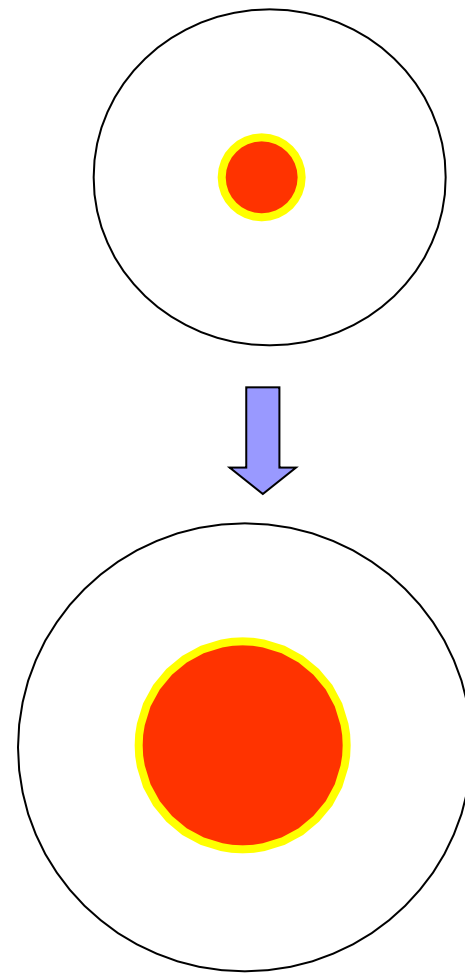
其中 $a = \left(\frac{D}{d}\right)^3 = \frac{\rho_0}{\rho_f}$

缺点：

n并非所有混气适用

n受水分影响

n实现困难



移动火焰测量法

球弹法

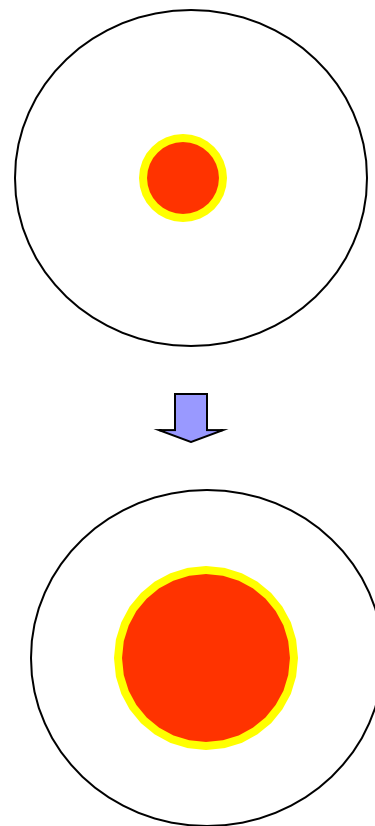
火焰传播速度

$$u_L = \frac{dr}{d\tau} - \frac{R^3 - r^3}{3pr^2k} \frac{dp}{d\tau}$$

优点

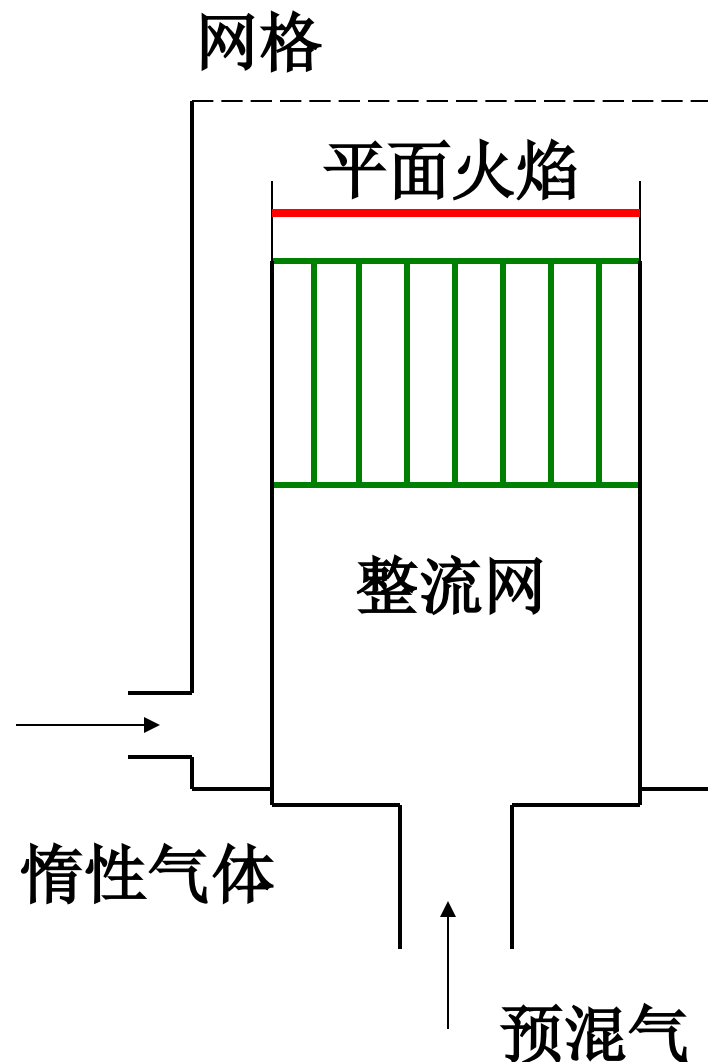
n 可测定不同压力下、温度下的以及高压情况下的火焰传播速度

n 只适用火焰传播速度快的混合气



平面火焰法

- 驻定火焰测量法
- 使用专门的火焰烧嘴
- 火焰传播速度等于气流速度
- 测量的结果准确
- 适用于火焰传播速度较低的预混气体。



本生灯法

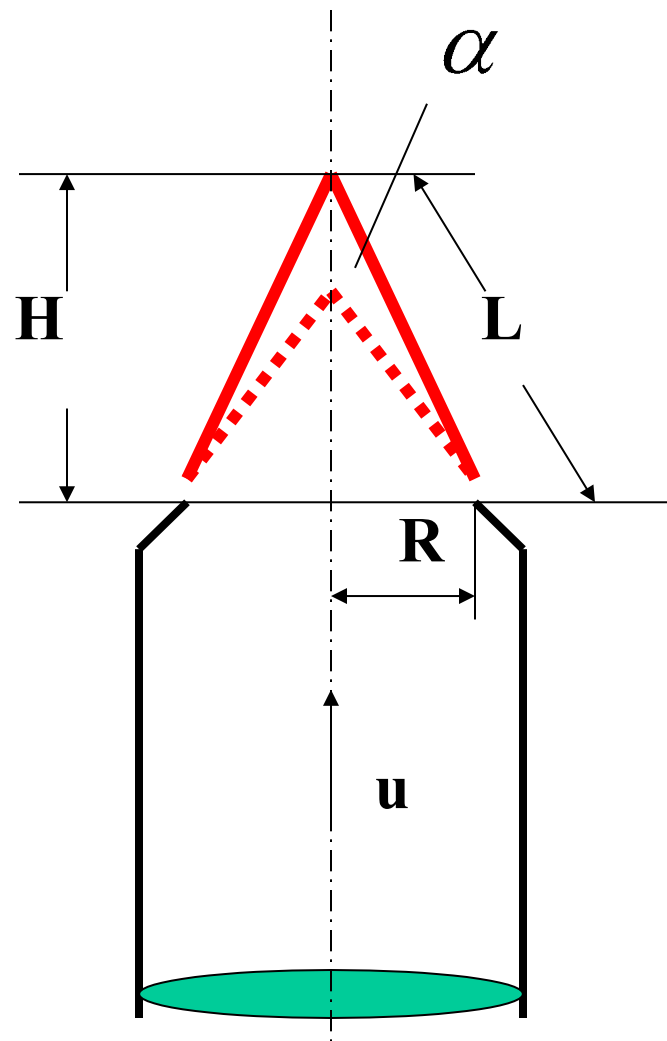
n 驻定火焰测定法

平均的层流火焰
传播速度：

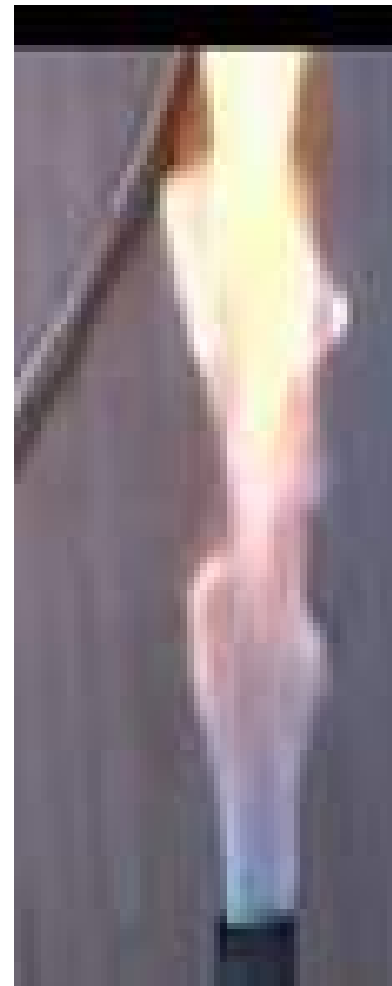
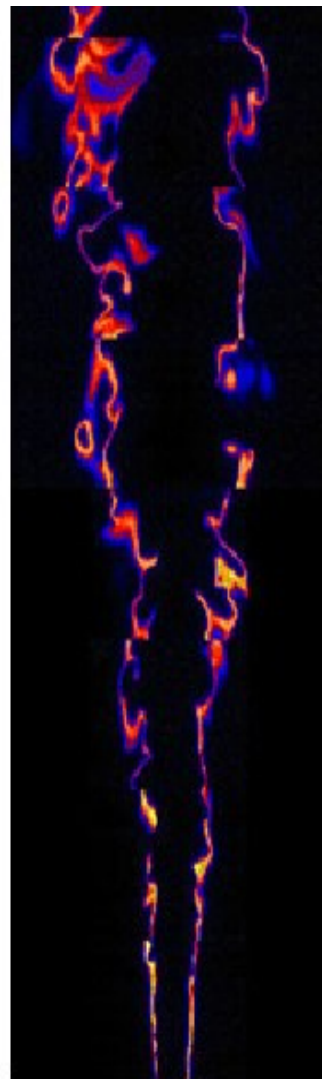
$$u_L = u \sin \alpha$$

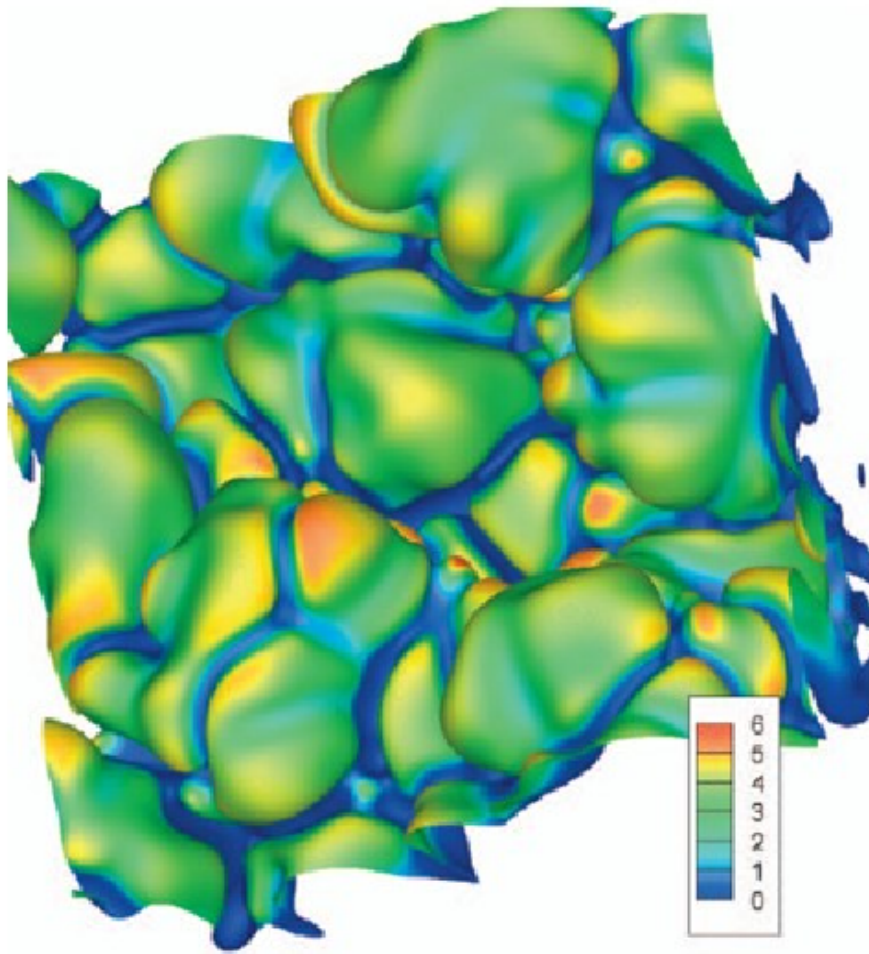
或者

$$u_L = \frac{V}{\pi R \sqrt{H^2 + R^2}}$$

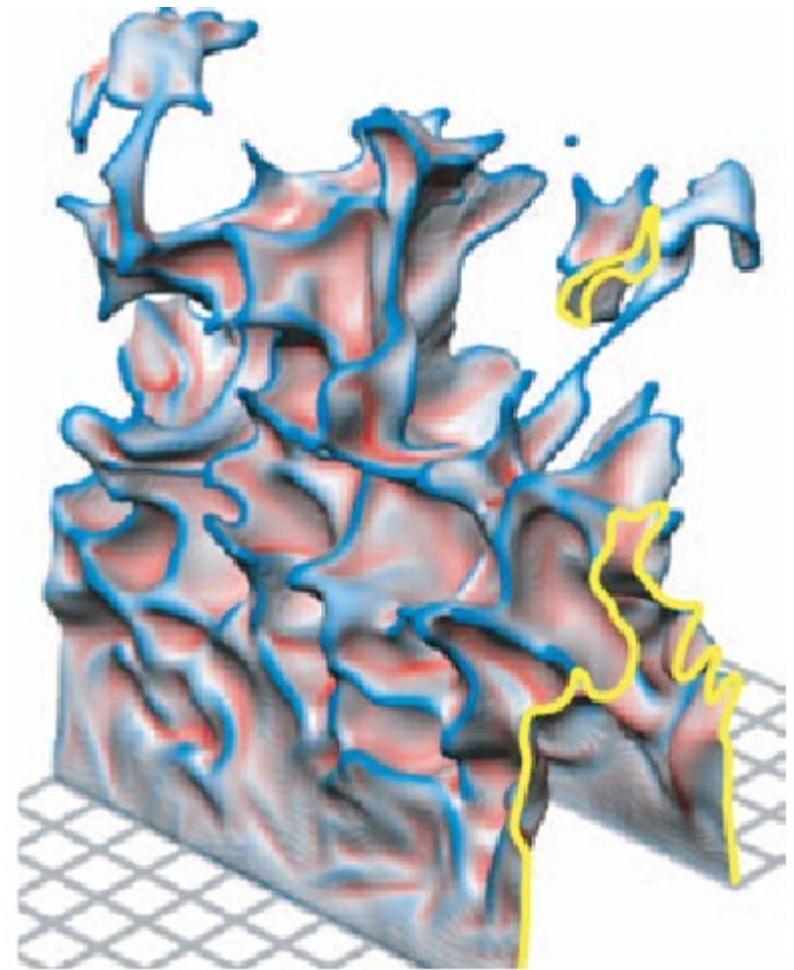


湍流火焰传播





不同燃烧速率时湍流火焰表面



窄缝燃烧湍流火焰表面

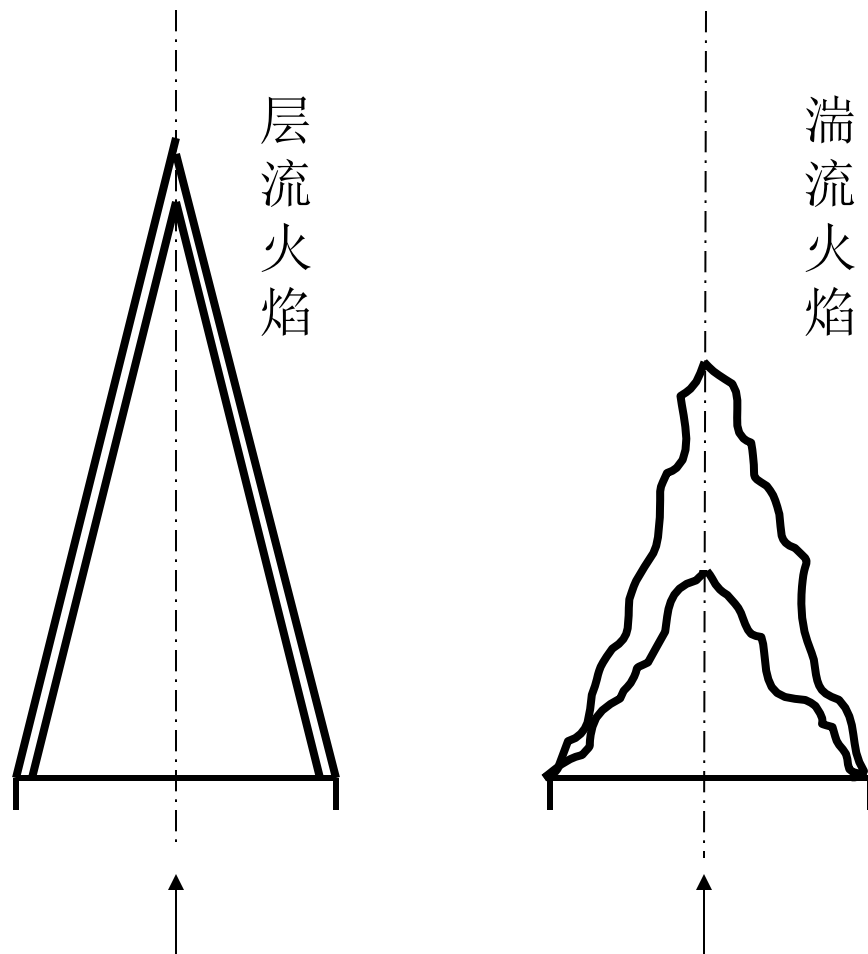
层流火焰和湍流火焰的不同

层流火焰	湍流火焰
外观清晰，火焰层薄	外观模糊，火焰层厚
长度较长	长度较短
火焰稳定，表面光滑	火焰抖动，呈毛刷状
燃烧时较安静	燃烧时有噪声
流动面积小，粘度系数大	流动面积大，粘度系数小

湍流火焰传播

特点：

- n 湍流使火焰面变弯曲，**增大反应面积**
- n 湍流加剧了**热和活性中心**的运输速率，增大燃烧速率
- n 湍流**缩短混合时间**，提高燃烧速率
- n 湍流燃烧，燃烧加强，反应率增大



预混气火焰传播速度的实验结果

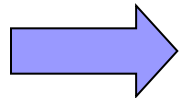
实验图形

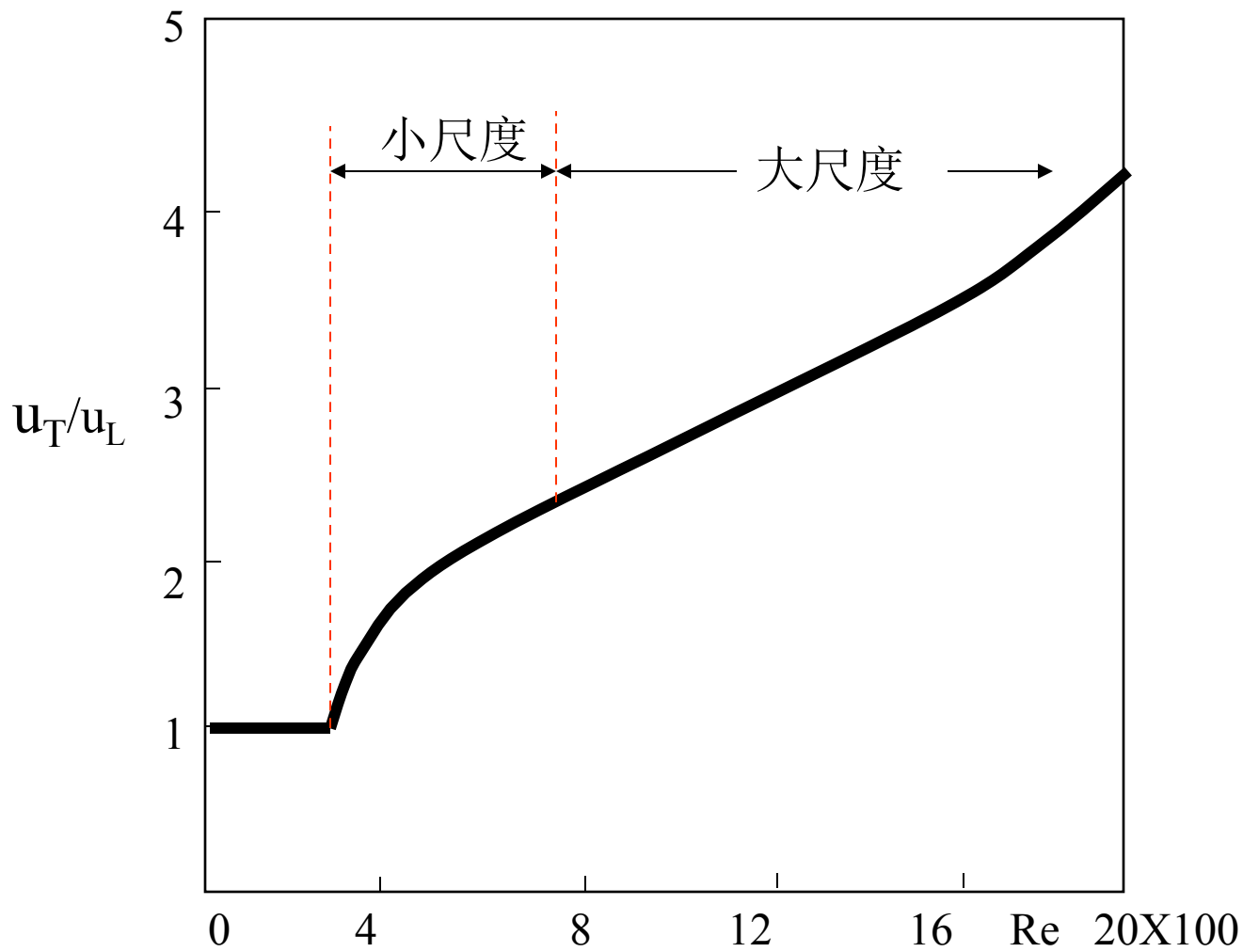
1) 邓克尔实验

• $\text{Re} < 2300$, $\frac{u_T}{u_L} = 1$, 层流状态

n $2300 < \text{Re} < 6000$, $\frac{u_T}{u_L} \propto \text{Re}^{\frac{1}{2}}$, 小尺度湍流火焰

n $6000 < \text{Re} < 18000$, $\frac{u_T}{u_L} = A \text{Re}_0 + B$, 大尺度湍流火焰





Re对火焰传播速度的影响

返回

预混气火焰传播速度的实验结果

2) 博林杰—威廉姆斯经验公式

$$\frac{u_T}{u_L} = 0.18 d^{0.26} \text{Re}_0^{0.24}$$

3) 达郎托夫经验公式

$$u_T = u_L + 5.3(u')^{0.6\sim 0.7} (u_L)^{0.4\sim 0.3}$$


$$u' > u_L \text{ 时, } u_T = 5.3(u')^{0.6\sim 0.7} (u_L)^{0.4\sim 0.3}$$

预混气火焰传播速度的实验结果

湍流火焰传播经验公式总结：

$$u_T = f(u_L, \text{Re}_0)$$

$$u_T = f(u_L, u')$$

湍流火焰传播速度：

湍流火焰传播速度影响因素：

混合气性质、浓度、初温、初压，流动状态

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/005243002231011142>