



第五章 气体燃料燃烧

第一节 扩散火焰和预混火焰

第二节 火焰稳定原理和方法

第三节 湍流燃烧火焰特点



第一节 扩散火焰与预混火焰

一、火焰形式

扩散火焰：燃料和氧化剂边混合边燃烧，这时由于扩散作用对燃烧起控制作用，又称扩散燃烧。

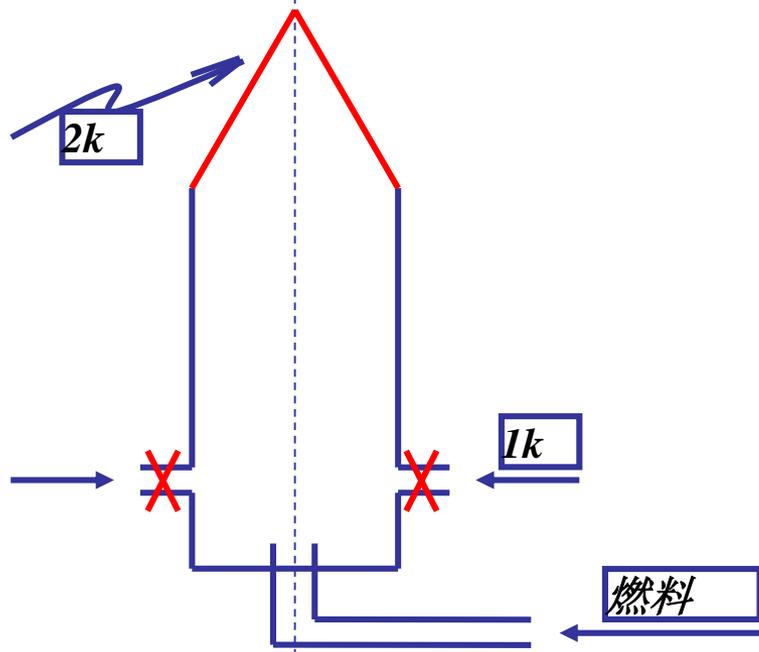
预混火焰：燃料和氧化剂预先混合好，这时化学动力学因素对燃烧起控制作用，亦称动力燃烧。



典型的稳定层流火焰前锋：层流本生灯火焰

本生灯：燃料气流进入本生灯后由一喷口流出，引射部分空气（一级空气）预先混合。

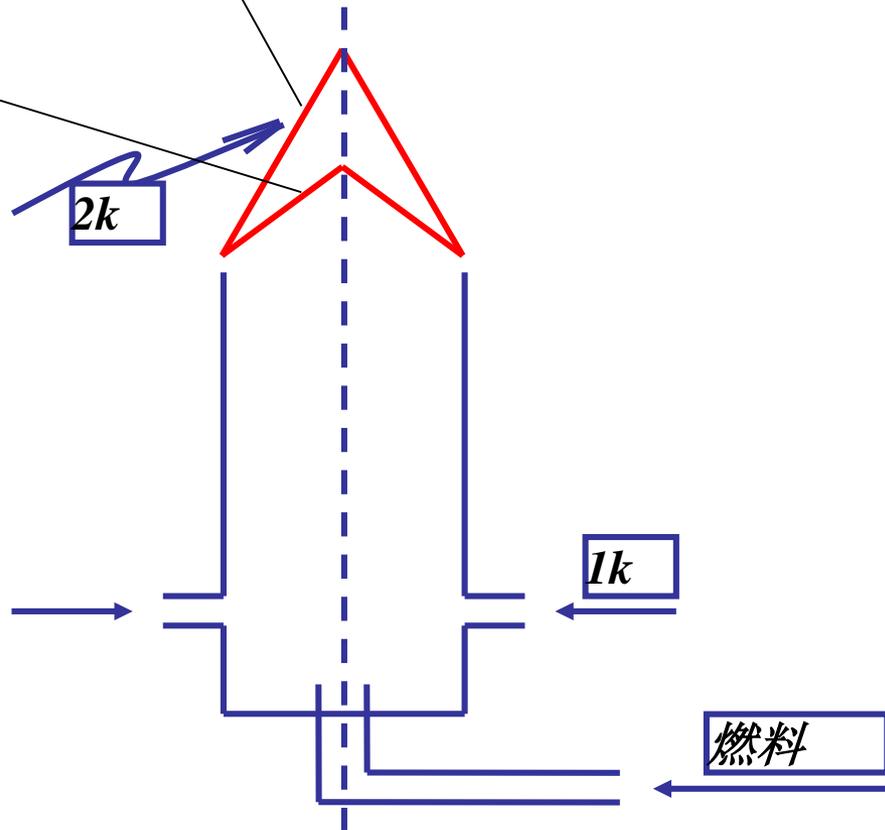
- *如1级空气阀门关死， $\alpha_{1k} = 0$ ，点燃，此时为扩散火焰





■ *逐渐增加（煤气+1K）流动火焰锋面即形成燃烧

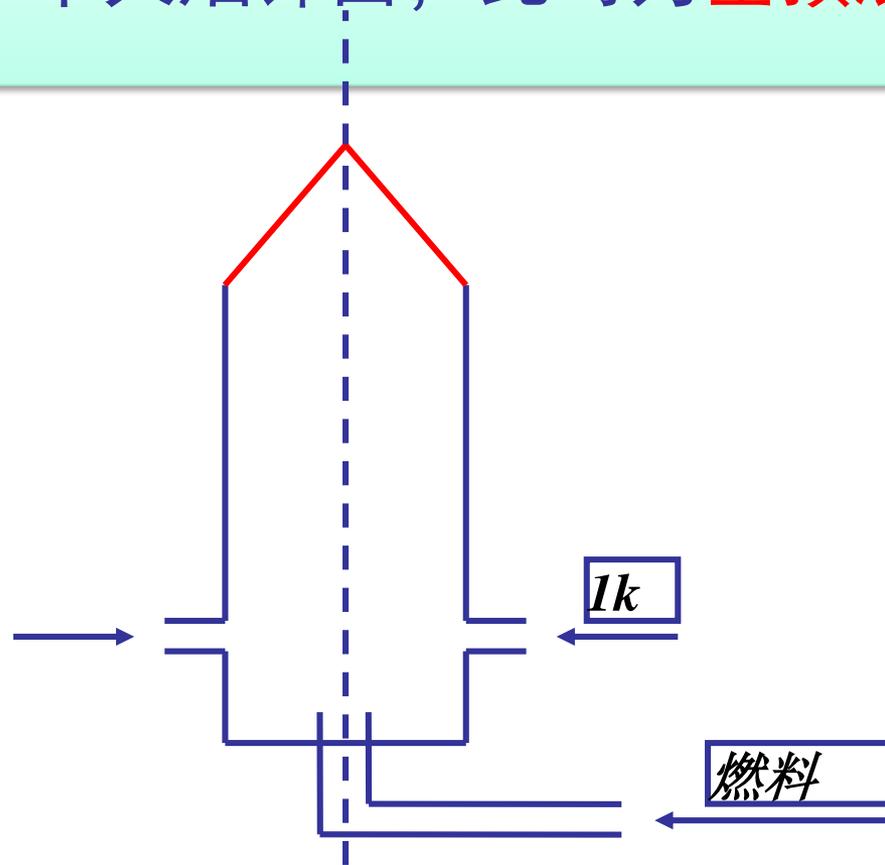
一级空气氧烧完，再靠二级空气来燃烧，此时有两个火焰锋面，
内焰（一级空气）外焰（二级空气）——预混火焰, $0 < \alpha_{1k} < 1$





■ 如 $\alpha_{1k} \geq 1$ ，一级空气氧已足够

此时也只有一个火焰锋面，此时为全预混火焰。





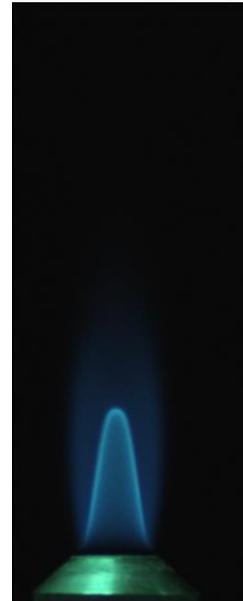
	扩散	部分预混	全预混
α_{1k}	0	0~1	≥ 1
特征	①只有外火焰面； ②缺氧，析出碳黑（冒黑烟） a.燃烧不强烈，火焰无力， $T \downarrow$ b.火焰长度长 c.火焰呈黄色，发光火焰	①有内、外火焰面； ②燃烧强化，温度 \uparrow 火焰长度短，半发光火焰，淡蓝色。	只有内火焰面 $T \uparrow$ ，火焰更短， 不发光火焰。



层流扩散火焰



湍流扩散火焰



层流预混火焰

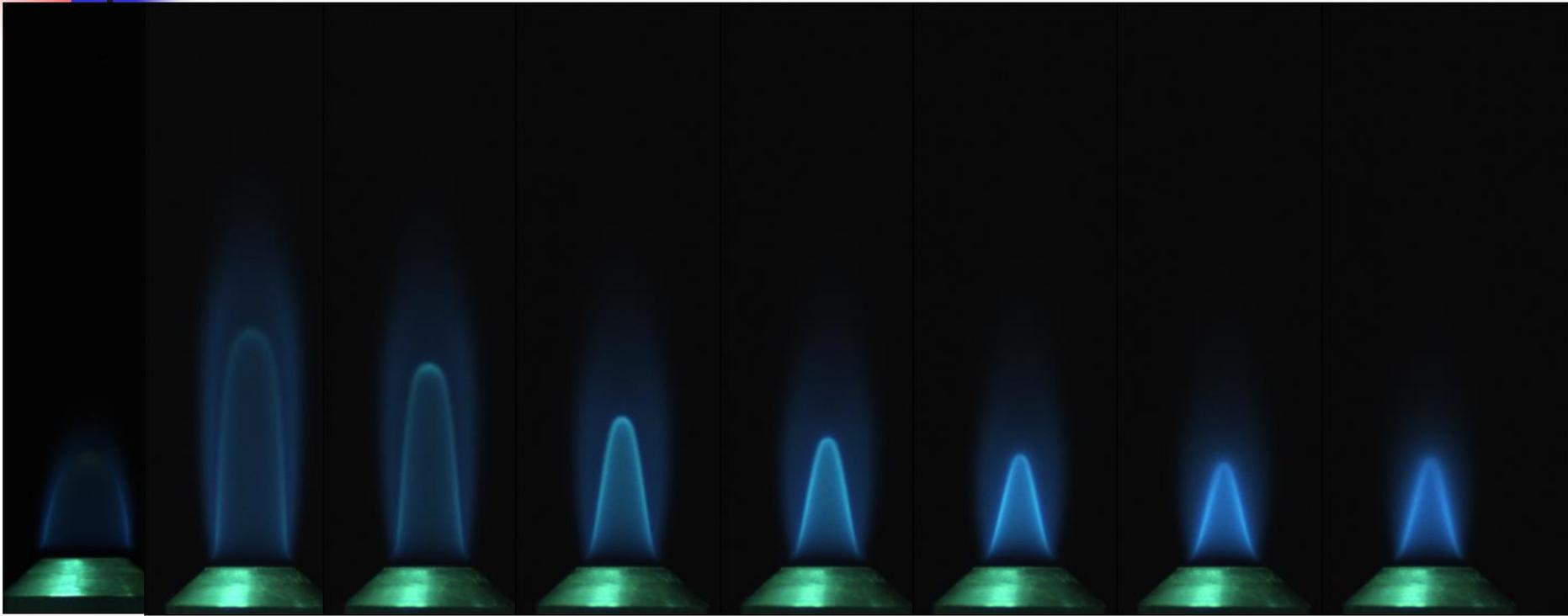


湍流全预混火焰



典型的火焰形状——5mm喷嘴

$H_2:CO:NG=1:1:3$

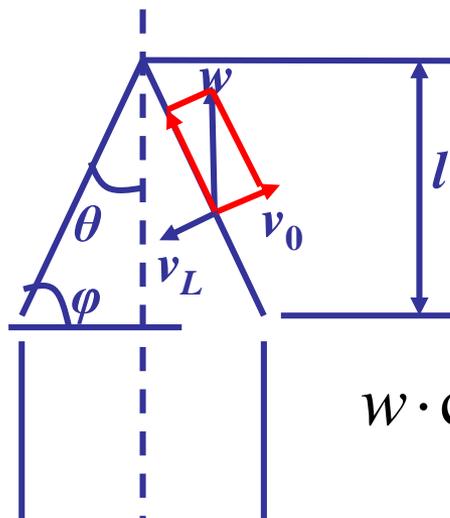
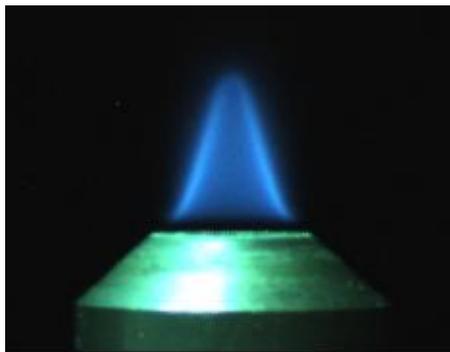


$\alpha_{1k}=0$ $\alpha_{1k}=0.5$ $\alpha_{1k}=0.6$ $\alpha_{1k}=0.7$ $\alpha_{1k}=0.8$ $\alpha_{1k}=0.9$ $\alpha_{1k}=1.0$ $\alpha_{1k}=1.1$



二、本生灯的火焰锥体的高度(火焰长度) l

本生灯出口Re较小一般属层流，火焰锋面以 v_L 传播，可燃混合气以 w 速度前进，合成速度的结果就是形成了圆锥面。这也称为余弦定律。



$$w \cdot \cos \phi = w \cdot \sin \theta = v_0 = v_L$$

$\therefore w$ 越大， ϕ 越大， $\theta = 90 - \phi$ 就越小，火焰瘦长



假定：正锥体火焰，底面半径等于喷口半径 r_0 ；

v_L 为常量，与 r 无关；

气流速度 w 取为喷口断面的平均流速 \bar{w}

$$l = r_0 \sqrt{\left(\frac{\bar{w}}{v_L}\right)^2 - 1} \quad l = r_0 \sqrt{\left(\frac{q_V}{\pi r_0^2 v_L}\right)^2 - 1}$$

- 1) 层流预混火焰长度随着可燃混合气喷出速度或喷口管径的增大而增大，却随着火焰传播速度的增大而减小
- 2) 当燃烧器喷口尺寸和可燃混合气成分一定时，若增大流量 q_V ，则将使火焰长度 l 增大；
- 3) 在喷口尺寸和流量相同的情况下，火焰传播速度较大的可燃混合气(例如 H_2)的燃烧火焰，要比火焰传播速度较小的(例如 CO)要短。



三、层流扩散燃烧和火焰结构

1、层流扩散燃烧特点：

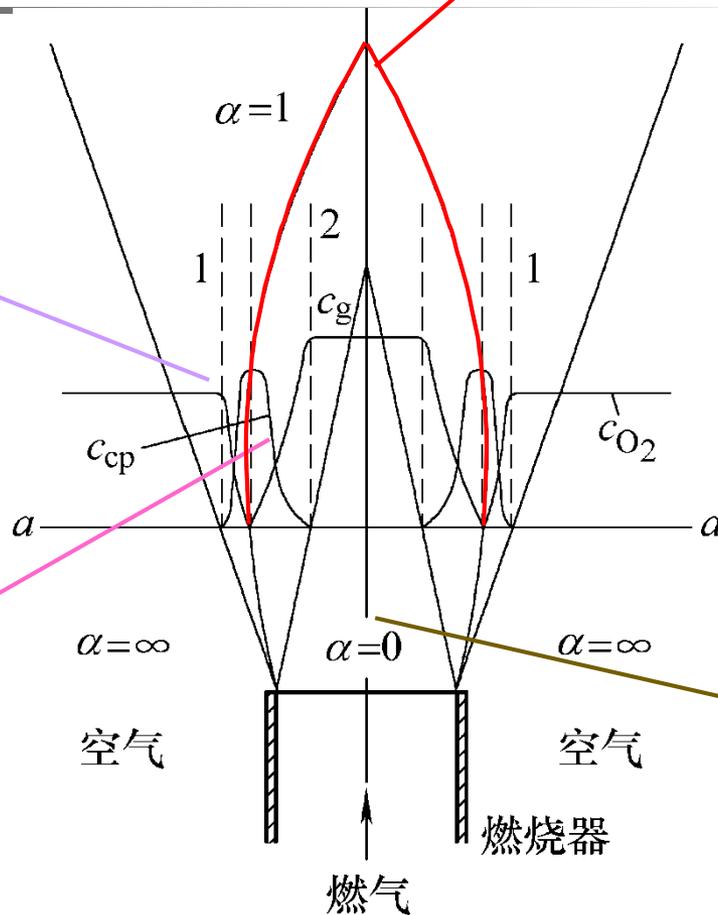
- 燃气喷出速度低，气流处于层流状态，燃气和空气的混合依靠分子的扩散作用进行
- 燃烧速度取决于气体扩散速度
- 扩散火焰厚度很薄，可视作焰面
- 焰面各处的燃气与空气按化学当量比进行反应，焰面保持稳定



火焰面，燃料与空气完全反应， $c_g=0, c_{O_2}=0$

火焰面外侧的燃烧产物和空气的混合区

外围的纯空气区



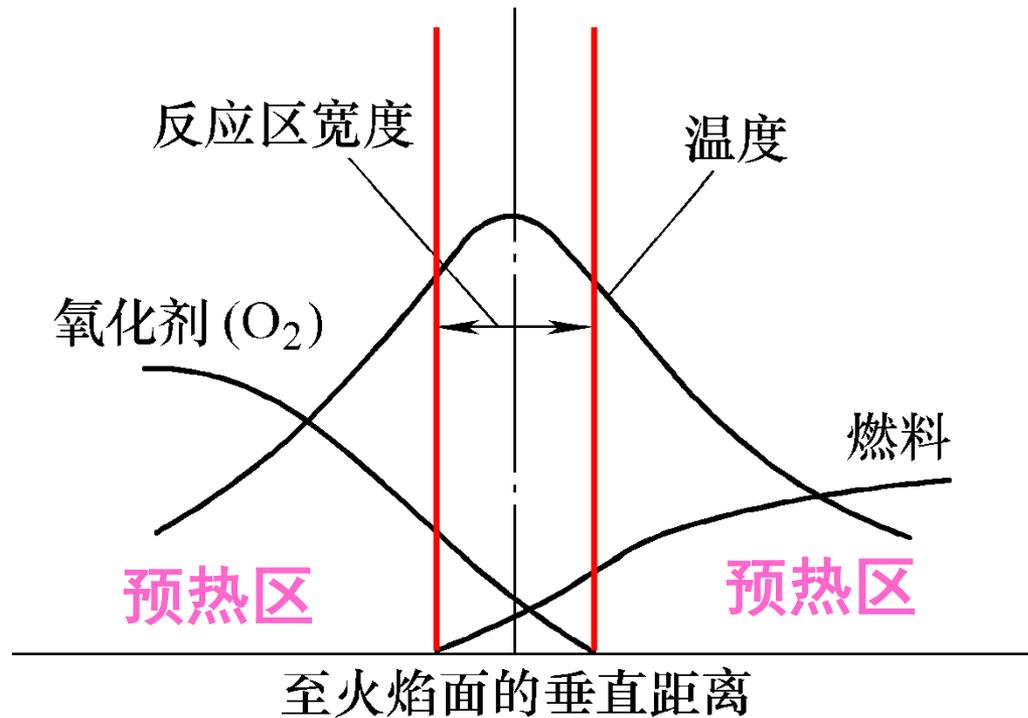
火焰面内侧的燃烧产物和燃料的混合区

中心的纯燃料区

层流扩散火焰的结构



2、实际扩散火焰的特点



实际扩散火焰中的温度和浓度分布



3、层流扩散燃烧火焰长度与雷诺数 Re 的关系

$$l_1 \propto \frac{w_f r_1^2}{D} \propto \frac{q_{Vf}}{D}$$

- 当 q_{Vf} 一定时，不论喷口尺寸的大小，火焰长度均相同

对于层流扩散燃烧，可假定扩散系数 $D \approx$ 运动粘度 ν ，
则有

$$\frac{l_1}{r_1} \propto \frac{w_f r_1}{D} \quad \longrightarrow \quad \frac{l_1}{r_1} \propto Re$$

- 扩散燃烧火焰长度随雷诺数 Re 的增大近似成比例地增大



4、 湍流扩散燃烧火焰长度

特点：在湍流扩散火焰中，燃气与氧化剂的混合是靠湍流交换效应来实现的；

混合速度较快，火焰长度必然有所缩短。

湍流扩散燃烧的火焰长度 l_t ：
$$l_t \propto \frac{wr^2}{D_t}$$

w —— 燃气流速

r —— 燃烧器喷口半径

D_t —— 平均湍流扩散率



由于湍流扩散率 D_t 与湍流强度 ε 和湍流尺度 l 的乘积成正比，即

$$D_t \propto \varepsilon l, \text{ 且 } \varepsilon \propto w, \quad l \propto r$$

$$l_t \propto \frac{wr^2}{D_t} \quad \Rightarrow \quad l_t \propto \frac{wr^2}{D_t} \propto \frac{wr^2}{\varepsilon l} \propto \frac{wr^2}{wr} \propto r$$

可见，湍流扩散燃烧的火焰长度与燃气的流速无关，仅与燃烧器喷口的尺寸成正比

因此，对于湍流扩散燃烧过程，可采用多个小管径的燃烧器，达到缩短燃烧火焰长度、提高燃烧热强度的目的

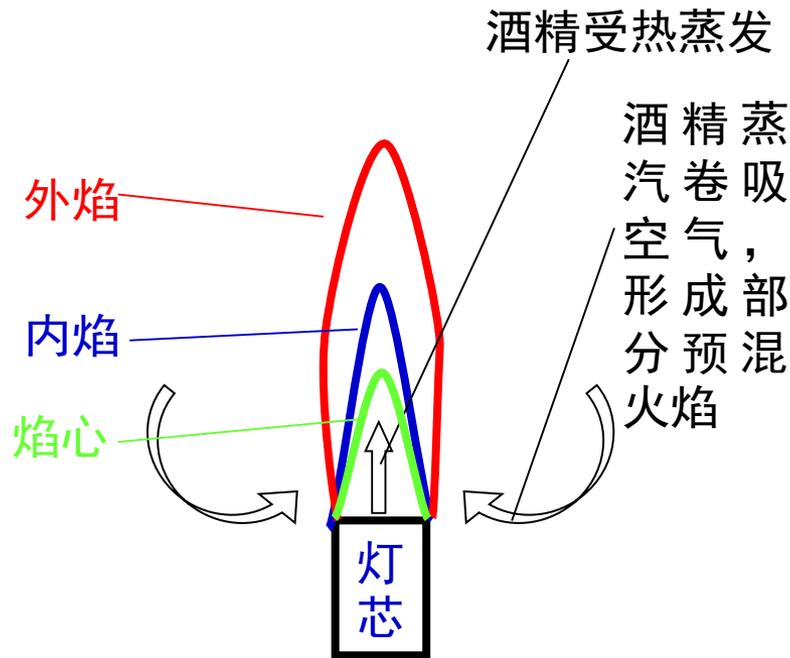


5、扩散火焰的稳定性

- 扩散燃烧时，燃气和空气未经预先混合，一次空气系数 $\alpha_{1k}=0$
- 喷口内不存在空气，因此，扩散燃烧不存在回火问题，其稳定性问题主要是**离焰，吹熄和脱火**。
- 当燃气喷出速度增大至一定数值时，火焰即脱离喷口，在其上方呈悬举状态，出现离焰现象
- 若燃气喷出速度继续增大，火焰离开喷口的距离也增大，火焰锥随之缩小，直至熄灭。



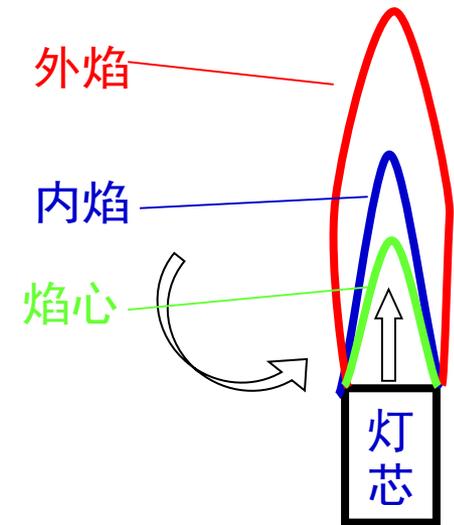
液体燃料的火焰情况分析（例如酒精灯）





- 乙醇燃料的燃烧反应有**分解**和**脱氢**两种途径；可以将燃烧产物CO明显产生的时刻做为判断乙醇燃烧着火的始点。

- 所以，乙醇的燃烧随氧量的不同，可能有几个锋面出现。正常使用的酒精灯火焰应分为焰心、内焰和外焰三部分。近年来的研究表明：**酒精灯火焰温度的高低顺序为：内焰 > 外焰 > 焰心。**
- 由于外焰与外界大气充分接触，燃烧时与环境的能量交换最容易，热量散失最多，致使外焰温度低于内焰。——**火焰不同位置的温度与供氧的状况以及整体的热平衡有很大的关系。**
- 有说法认为酒精灯的“外焰” 温度最高，其原因是酒精蒸汽在外焰燃烧最充分；但这种说法很可能是因为对“内焰” “外焰” 的定义不同造成的。





四、预混火焰的稳定性及其结构

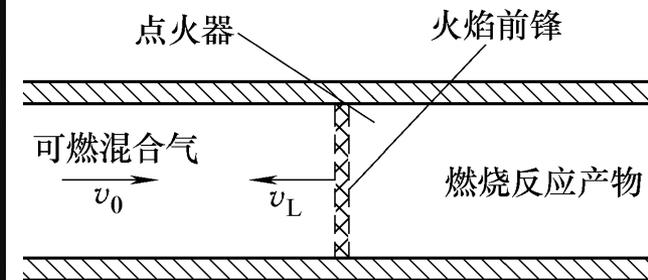
对燃烧装置来说，不仅要保证燃料能顺利着火，而且还要求在着火后形成稳定火焰，不出现离焰、吹熄、脱火、回火等问题。

- α_{1k} 的大小对于预混火焰稳定与否有很大影响；
- v_L 在 α 略小于 1 时最大，但 $\alpha \approx 1$ 时火焰稳定区不宽，尤其当 $\alpha > 1$ 时更窄。



一维管流火焰的稳定

- 可燃混合气以速度 v_0 流动，点火后所形成的火焰面向可燃混合气来流方向传播
- 火焰的位置应该稳定，火焰前锋应驻定而不移动



可燃混合气流动时的火焰传播



对于传播速度为 v_L 的层流火焰，火焰的绝对速度 Δv 为：

$$\Delta v = v_0 - v_L$$

火焰前锋相对于管壁的位移有三种可能的情况：

1) 若 $v_0 < v_L$ ，即 $\Delta v < 0$ ，火焰面将向混合气来流方向移动（**回火**）

2) 若 $v_0 > v_L$ ，即 $\Delta v > 0$ ，火焰面将被气流吹向下游（**脱火**）

3) 若 $v_0 = v_L$ ，即 $\Delta v = 0$ ，火焰面将驻定不动，即**火焰稳定**



水流速度 < 船在静止水中的运动速度



← 水流方向

水流速度 > 船在静止水中的运动速度



← 水流方向

水流速度 = 船在静止水中的运动速度



← 水流方向

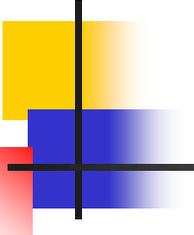


《增广贤文》

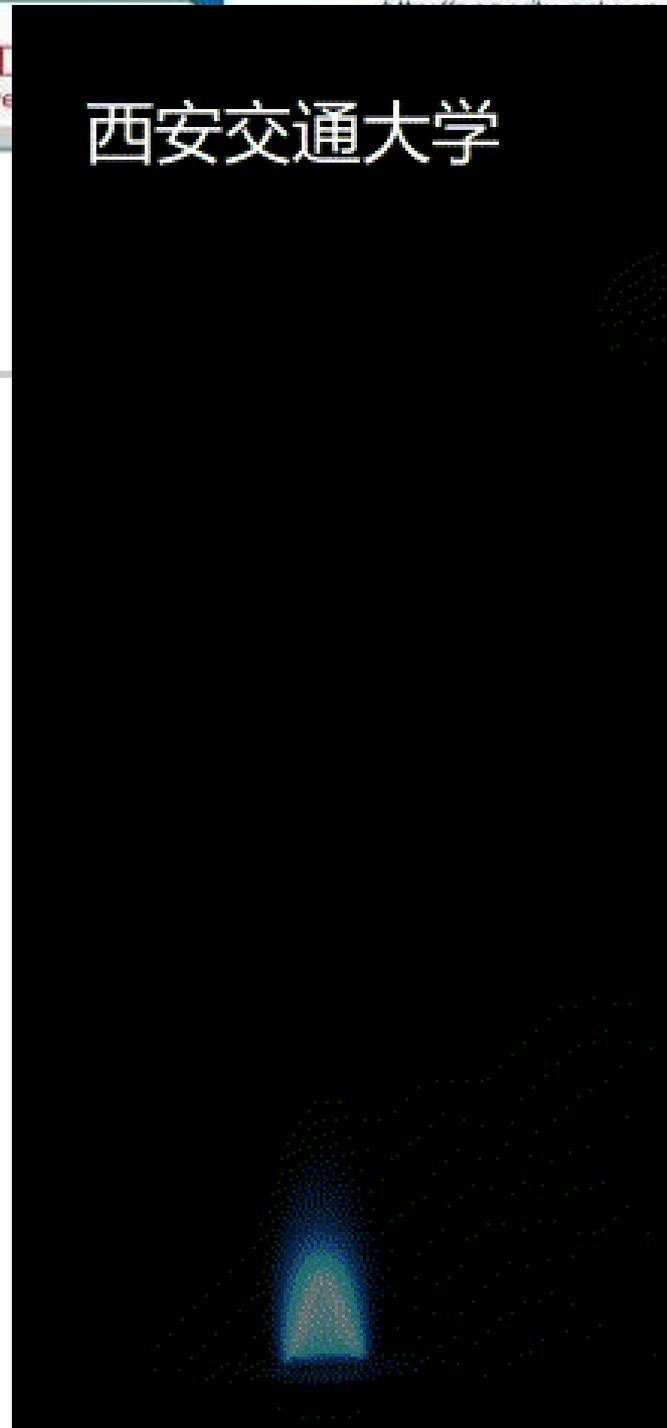
学如逆水行舟，
不进则退

心似平原走马，
易放难收

- 火焰在气流中的传播像“逆水行舟”。如果火焰传播速度大于新鲜气流速度，则会向来流上游方向“进”（“回火”）。如果火焰传播速度小于新鲜气流的速度，则会向下游方向“退”（“脱火”）。
- 社会也是不断前进的系统，人在社会系统中进步的速度比社会发展的平均速度快，那么人在社会中的位置就不断提升。反之，如果人在社会系统中进步的速度比社会发展的平均速度慢，那么人在社会中的位置就不断下降。

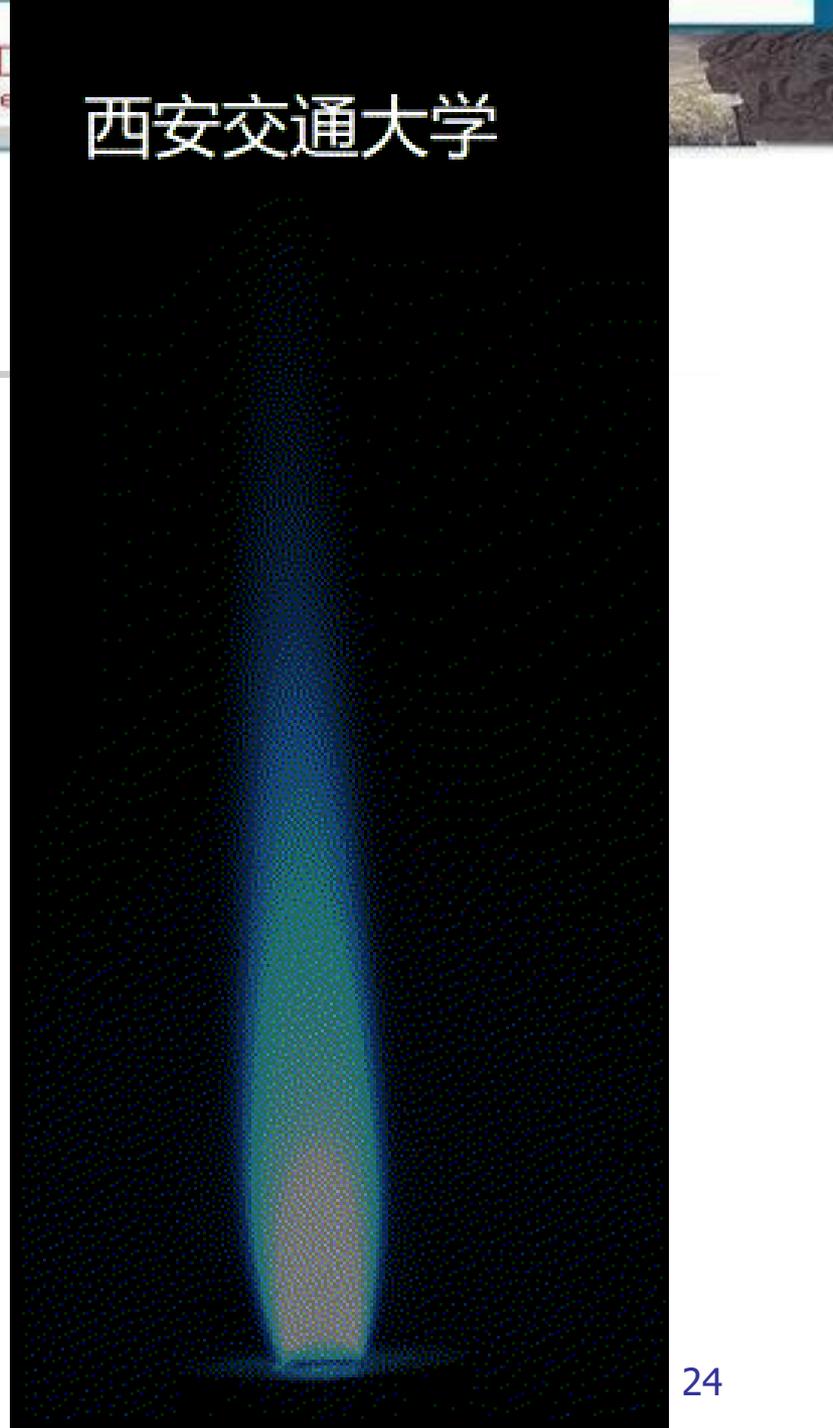


回火：随着气流流速降低，火焰不断缩短并最终回入管道内部





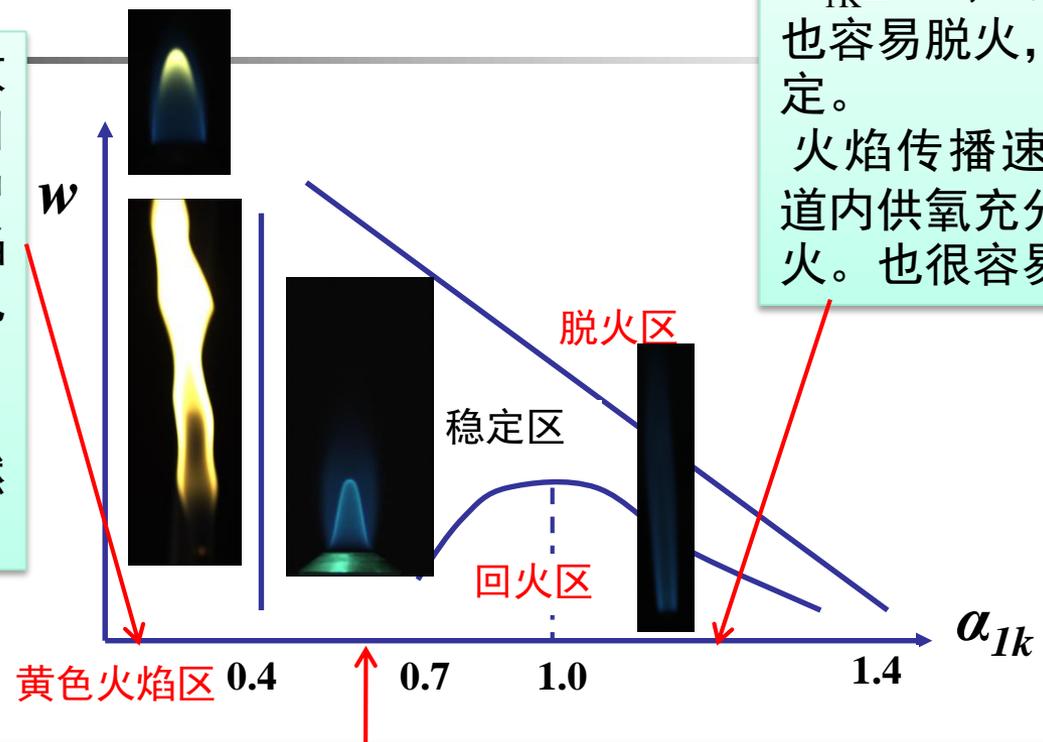
脱火：随着气流流速升高，火焰不断加长，形成“悬焰”（或“离焰”），并最终脱离喷口



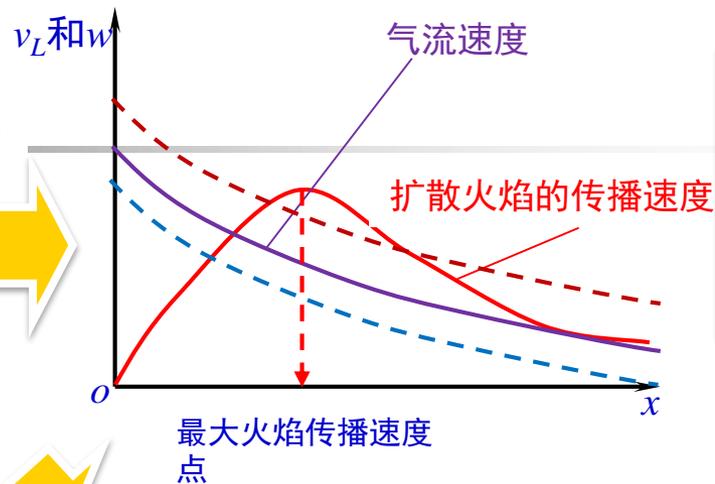
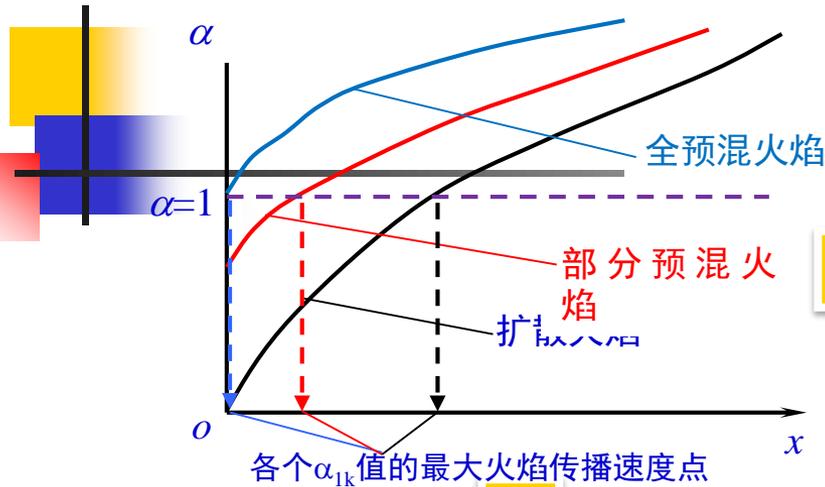


$\alpha_{1K} \geq 1$ 时，既容易回火，也容易脱火，火焰很不稳定。火焰传播速度很快，管道内供氧充分，很容易回火。也很容易脱火。

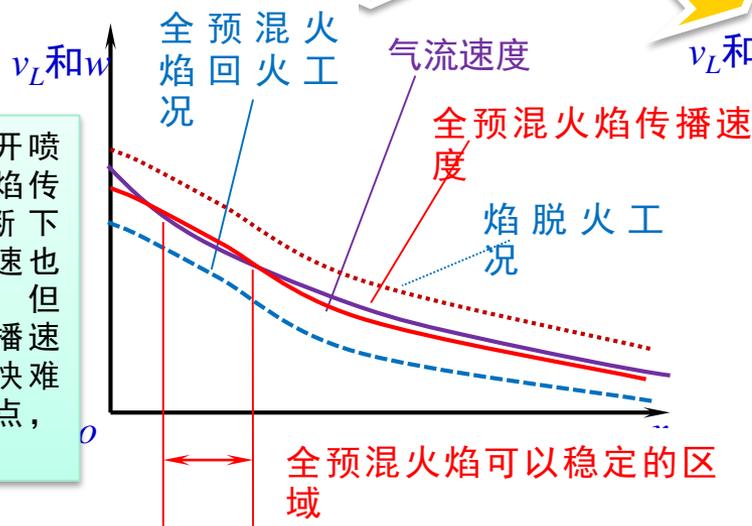
当 $\alpha_{1K} = 0$ ，纯扩散火焰，不可能回火，因为管道中没有氧气，火焰传播速度为0。也不易脱火。火焰极为稳定，但化学不完全燃烧损失大。



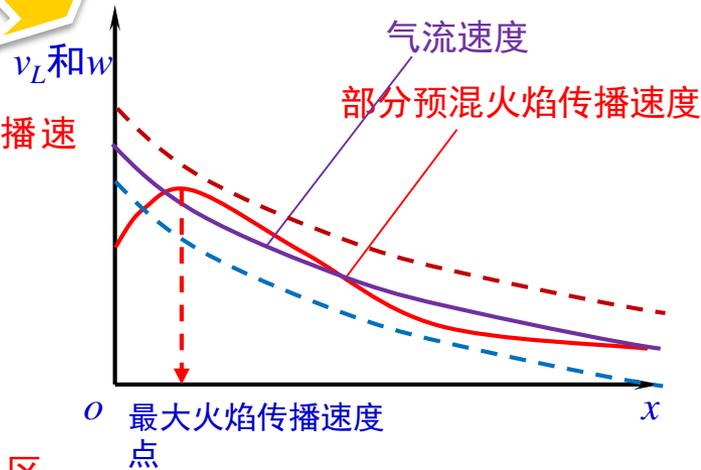
$\alpha_{1K} = 0.4 \sim 0.7$ ，稳定区域较大，运行较为可靠。混合物中火焰传播速度较低，不容易回火。与纯扩散火焰类似，较容易出现火焰稳定点。



随着燃料在环境中的扩散，与氧气混合，火焰传播速度上升，而射流流速却在扩散过程中不断下降，很容易出现火焰稳定点。



混合气流离开喷嘴以后，火焰传播速度不断下降，射流流速也不断下降，但是，火焰传播速度的下降更快难以找到稳定点，很容易脱火。



随着燃料在环境中的扩散，与氧气混合，火焰传播速度上升，而射流流速却在扩散过程中不断下降，较容易出现火焰稳定点。



小结

扩散	部分预混	全预混
燃烧不强, $T \downarrow \rightarrow v_L \uparrow$	$0 < \alpha_{1k} < 1$ 燃烧强烈	$\alpha_{1k} \geq 1$ 燃烧强烈
不可能回火	$T \uparrow \rightarrow v_L \uparrow$, 防止回火	既容易回火
$\alpha_{1k} = 0$, 也不易脱火	存在脱火可能	也容易脱火



第二节 火焰稳定的原理和方法

稳定火焰

防止回火

防止脱火

根本条件是保证：

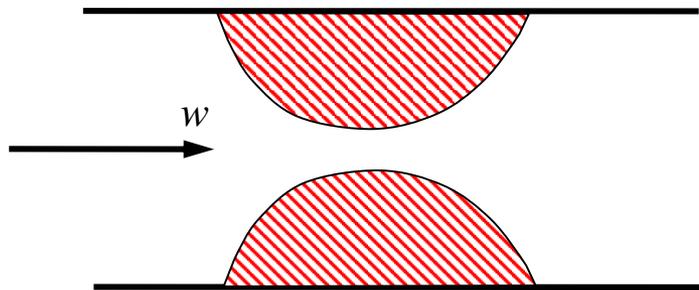
$$\vec{w} = \vec{v}_L$$



一、防止回火

采用喉口设计：加装收缩段；直径变小

使用冷却装置：降低混合物温度，从而降低火焰传播速度，甚至直接淬熄火焰。



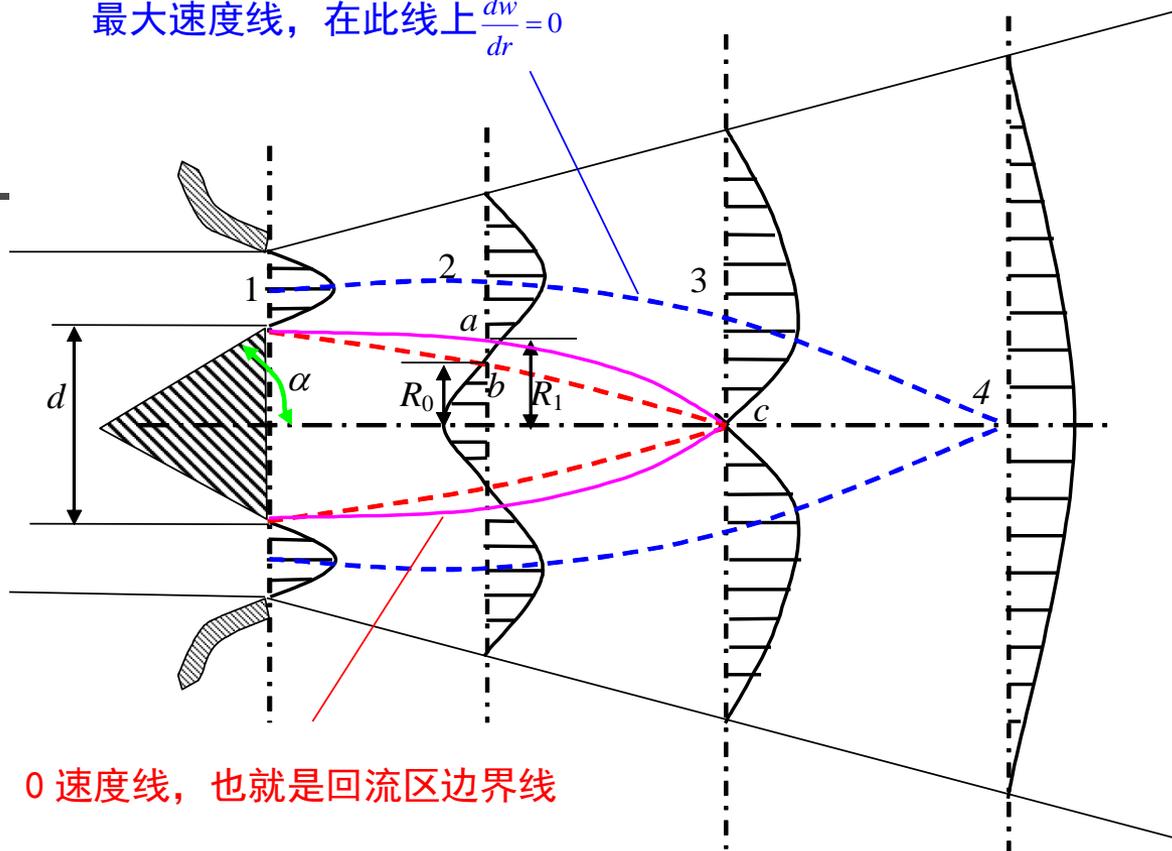


二、防止脱火

- 防止 $\alpha_{1k} > 1$
- 加稳焰器：利用钝体、旋转或者不对称射流稳焰，利用逆向喷流稳焰，等等形成回流区，在空间中形成0速度线，起到稳定点火源的作用。
- 钝体稳焰的第一个原理：绕流钝体时会出现有回流区，回流区由于吸入大量高温烟气，使燃烧反应物温度升高，在区内某处实现了着火条件，产生了稳定的着火。



最大速度线，在此线上 $\frac{dw}{dr} = 0$



0 速度线，也就是回流区边界线

钝体稳焰的第二个原理：钝体后方，燃料与空气混合物射流的主流区域中，存在从高速到负流速的分布区域，有0速度线存在，很容易形成 $\vec{w} = \vec{v}_L$ 的条件



钝体稳焰第一阶段：

随着气流流速的提高，
火焰缩短并附着在钝
体锥面

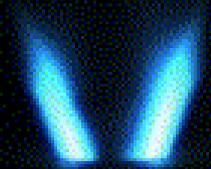
原因：钝体吸热形成
高温点火源，对气流
进行强迫点燃，使得
燃烧区集中在钝体的
迎风面





钝体稳焰第二阶段：随着气流流速进一步提高，火焰移动到钝体下游并驻留

原因：流速提升后新鲜冷气流的对流换热加强，钝体迎风面温度下降，而钝体尾迹区中存储燃烧的热量，形成点火源

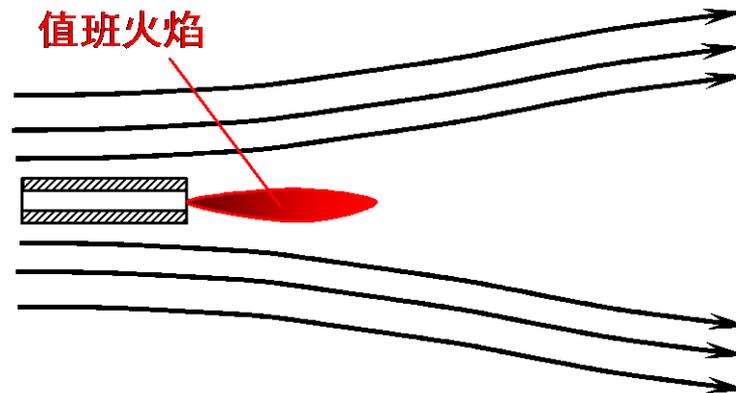




三、其它稳焰方法

① 小型点火焰

在流速较高的预混可燃主气流附近放置一个流速较低的稳定的小型点火焰（值班火焰、长明灯）

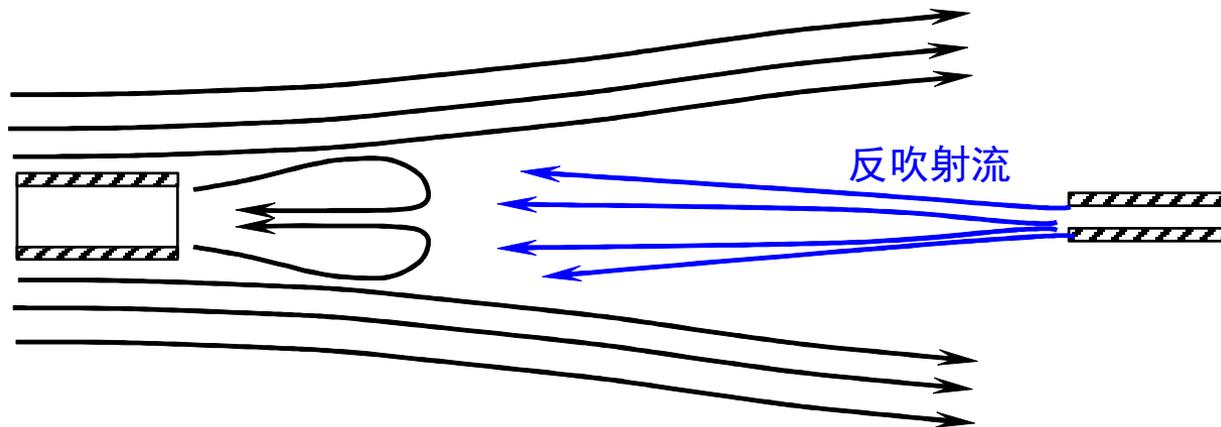




三、其它稳焰方法

② 反吹射流 稳定火焰

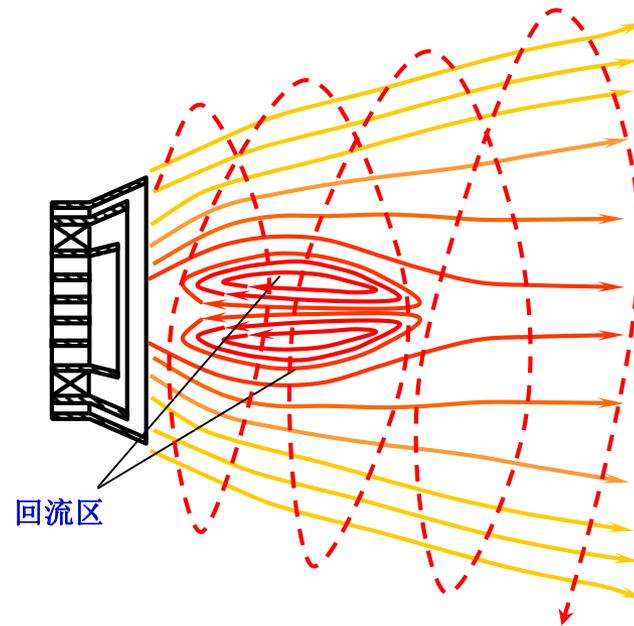
反吹射流引起中心回流区，流场减速，且具有高温（下游烟气，未燃尽可燃物，反吹空气等组成回流区）





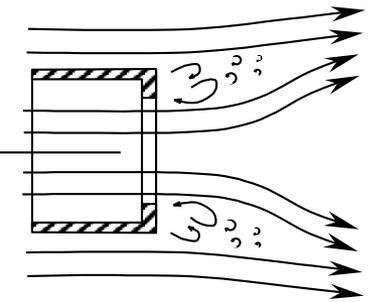
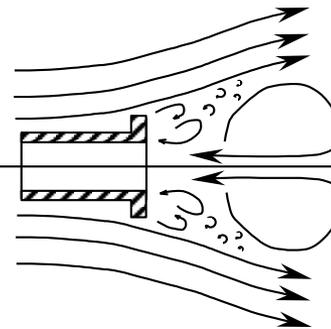
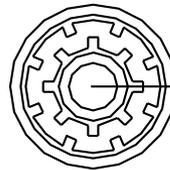
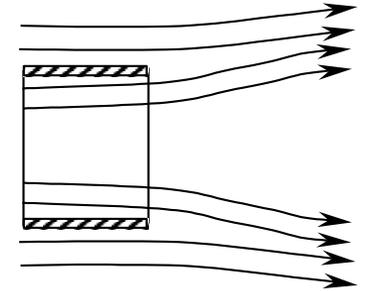
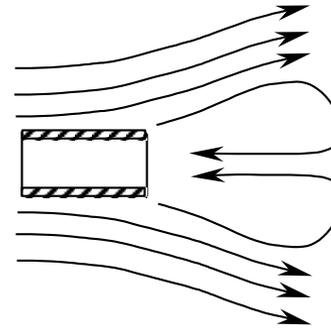
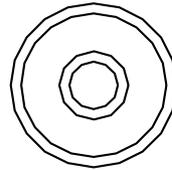
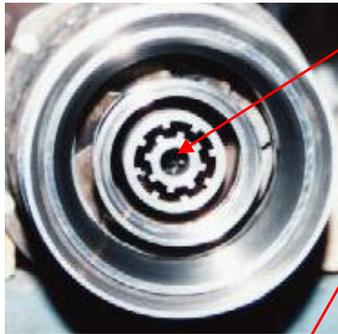
③ 旋转射流稳焰

利用强烈的旋转气流产生强大的高温回流区，强化燃料着火，加速燃料空气混合





④ 稳焰环





小结

稳焰方法

- 防止回火 —— 喉口，冷却
- 防止脱火 —— 控制 α ，钝体，旋流，稳焰环
- 其它稳焰方法
 - 小型点火焰
 - 反向射流稳定火焰
 - 旋转射流稳焰
 - 燃烧室壁凹槽稳定火焰
 - 流线型物体稳焰

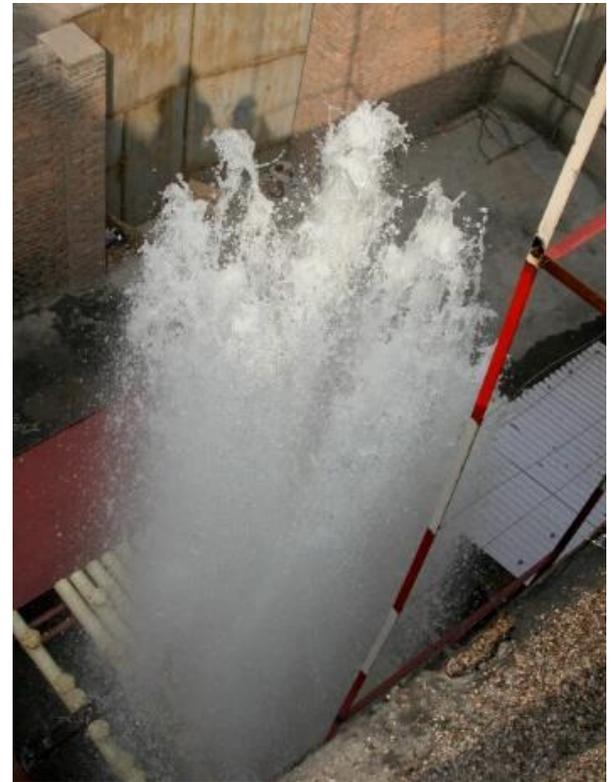


话题： 军运会点火仪式





本团队的液柱试验系统





本团队的液柱试验系统







视频资料

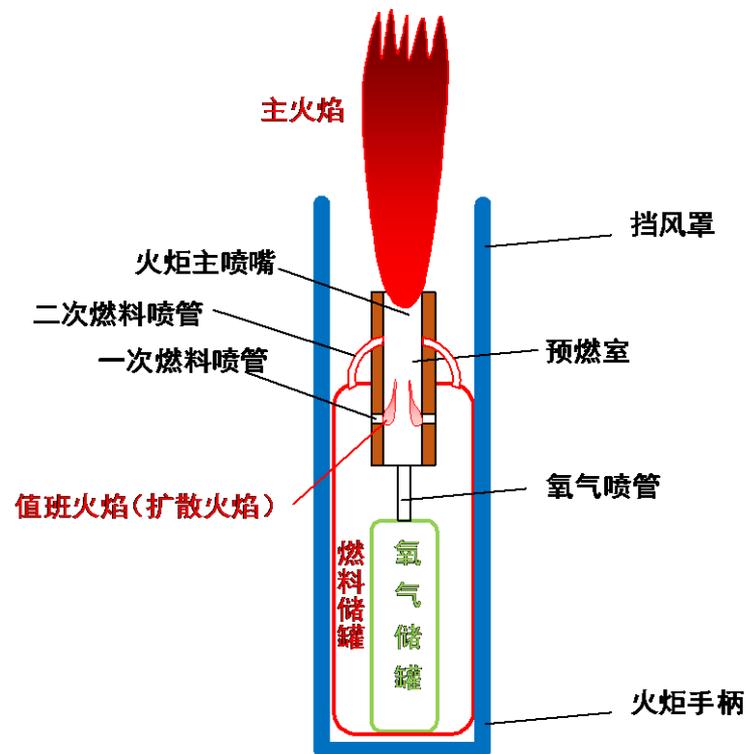
- 2008年5月，我国在珠穆朗玛峰进行了奥运火炬传递。
- 请问：能否根据视频材料提供的信息和特征，推测这种火炬可以在珠峰顶端传递过程中保持火焰稳定的设计方案？





珠峰火炬的燃烧学原理解读

- 特征一，能够在极度缺氧和寒冷的环境下燃烧，说明：氧气主要不靠大气供应，燃料和助燃的氧气都是火炬自带的，是预混火焰
- 特征二，火焰刚度较好，但是只能持续燃烧4~7分钟。说明：气流喷射速度较高，因此燃料消耗也比较快
- 特征三，点火的时候能看见喷嘴缩进外壳一定深度。说明：外壳顶端起到挡风罩的作用，防止火焰被吹熄，同时为火焰保温
- 特征四，风大的时候火焰已经消失了，应该是缩进了挡风罩之内，但是一会儿又能冒出来。说明：有特定的稳焰措施。推测使用了如图所示的预燃室，燃料先以扩散火焰的形式喷入充满氧气的预燃室，火焰稳定性很好，然后与氧气继续混合燃烧并从火炬主喷嘴中喷出，即使主火焰有时候因为风大而熄灭，但预燃室内的火焰不会熄灭，起到值班火焰的作用。



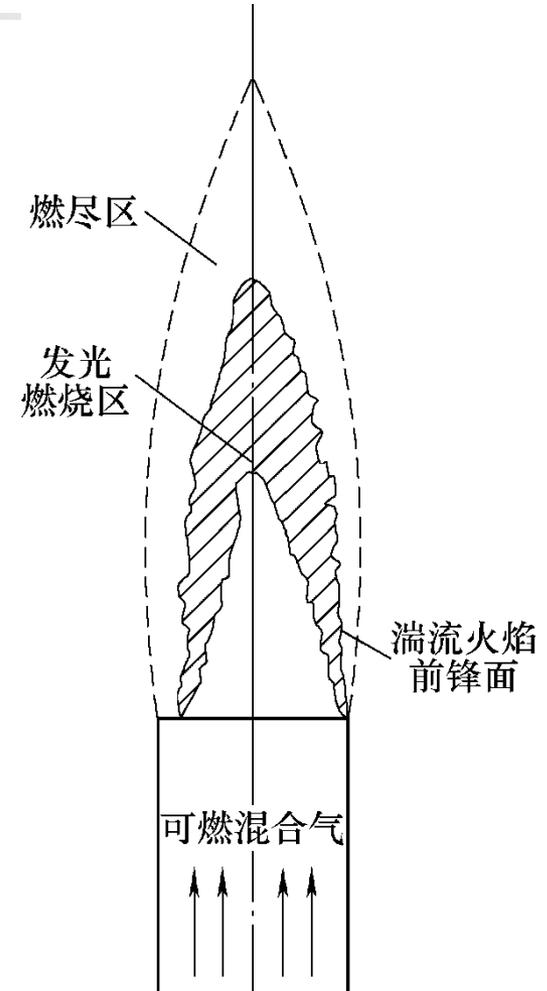


第三节 湍流燃烧火焰特点

湍流火焰结构的特点：

- 发光区较厚，火焰轮廓较模糊，存在弯曲皱折
- 火焰面有抖动，火焰长度也显著地缩短
- 燃烧过程中伴有噪声

在湍流中，预混可燃气体的火焰传播速度比层流时大许多倍



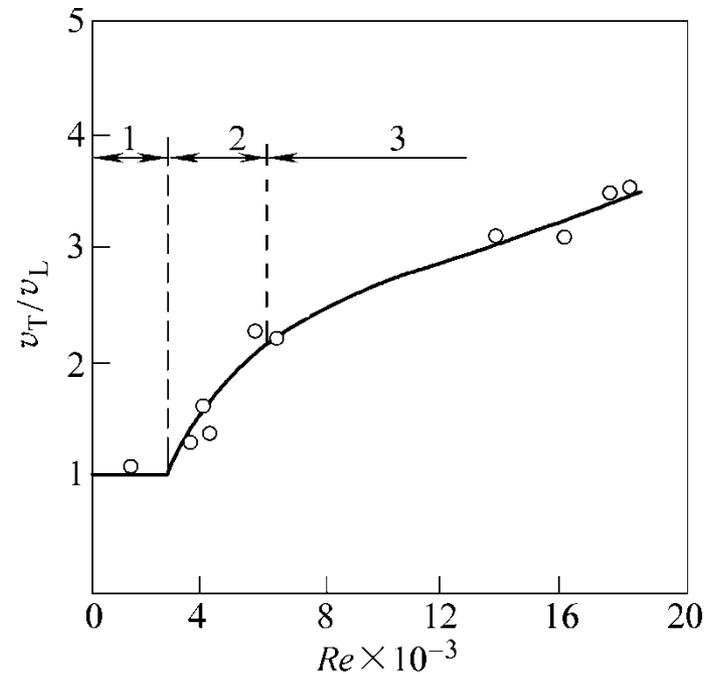


• 不同Re数下火焰传播速度的实验结果[达姆克勒(G. Damkohler)]

1) $Re < 2300$, 火焰传播速度的大小与Re数无关;

2) $2300 \leq Re \leq 6000$, 火焰传播速度与Re数的平方根成正比, 小尺度(或小规模)湍流燃烧

3) $Re > 6000$, 火焰传播速度与Re数成正比, 大尺度(或大规模)湍流燃烧



Re对火焰传播速度的影响

1—层流; 2—小尺度湍流; 3—大尺度湍流



一、湍流火焰传播的皱折表面燃烧理论

- 该理论将湍流引起火焰传播速度显著增大的原因归结为：
 - 1) 湍流的脉动作用使火焰变形，火焰前锋面发生弯曲和皱折，显著增大了已燃、未燃气体接触的焰锋表面积，增大了反应区，使火焰传播速度 v_T 增大；
 - 2) 湍流作用使得热传导速度及活性物质扩散速度加快，强化了热、质交换，促使 v_T 增大；
 - 3) 湍流脉动促使燃气与燃烧产物快速混合，缩短了混合时间，使火焰本质上成为均匀可燃混合物。

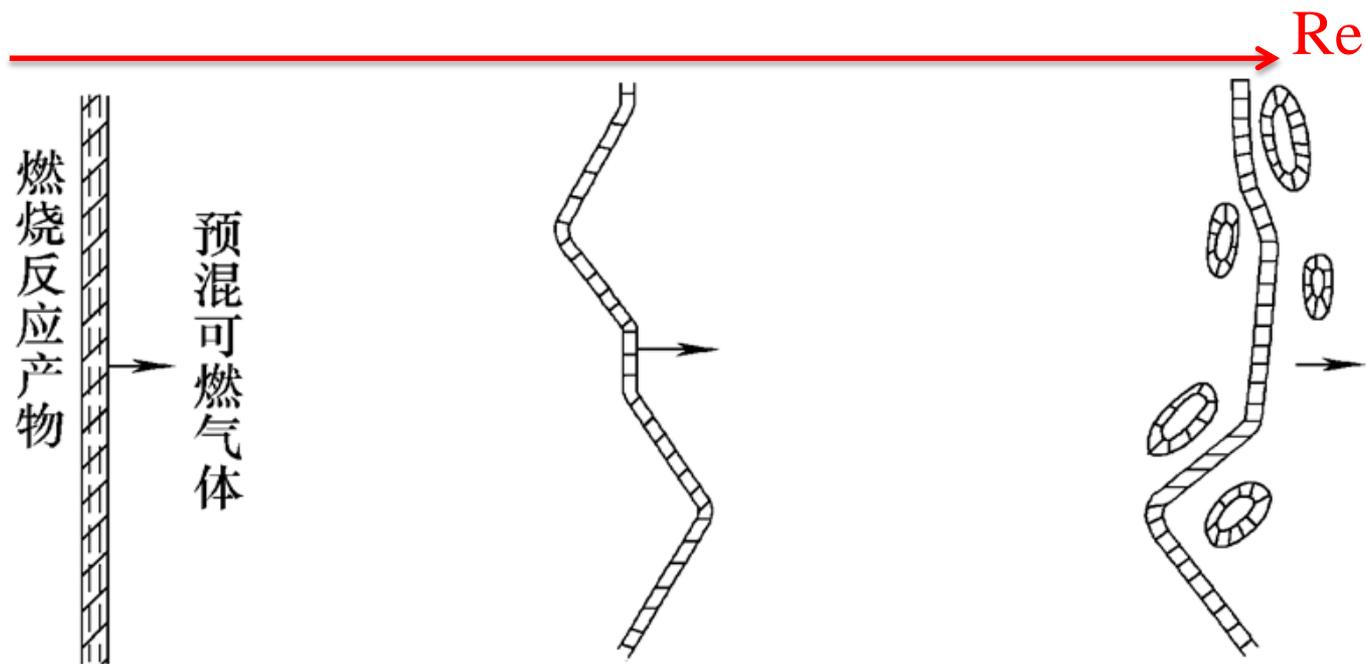


在湍流火焰中，气流脉动促使气体微团作不规则运动，

l_T ——气体微团的平均尺寸（湍流标尺）

w' ——脉动速度

δ_L ——层流火焰前锋厚度



a) 小尺度湍流火焰

$$l_T < \delta_L$$

b) 大尺度弱湍流火焰

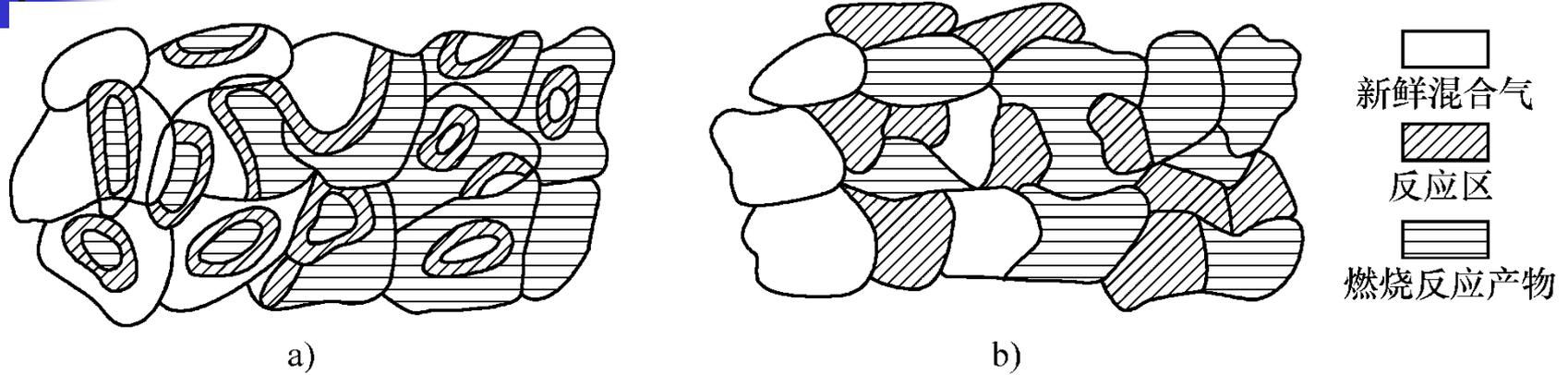
$$l_T > \delta_L, w' < v_L$$

c) 大尺度强湍流火焰

$$l_T > \delta_L, w' > v_L$$



二、湍流火焰传播的容积燃烧理论 适用于大尺度强湍流火焰



湍流火焰焰锋结构的两种模型

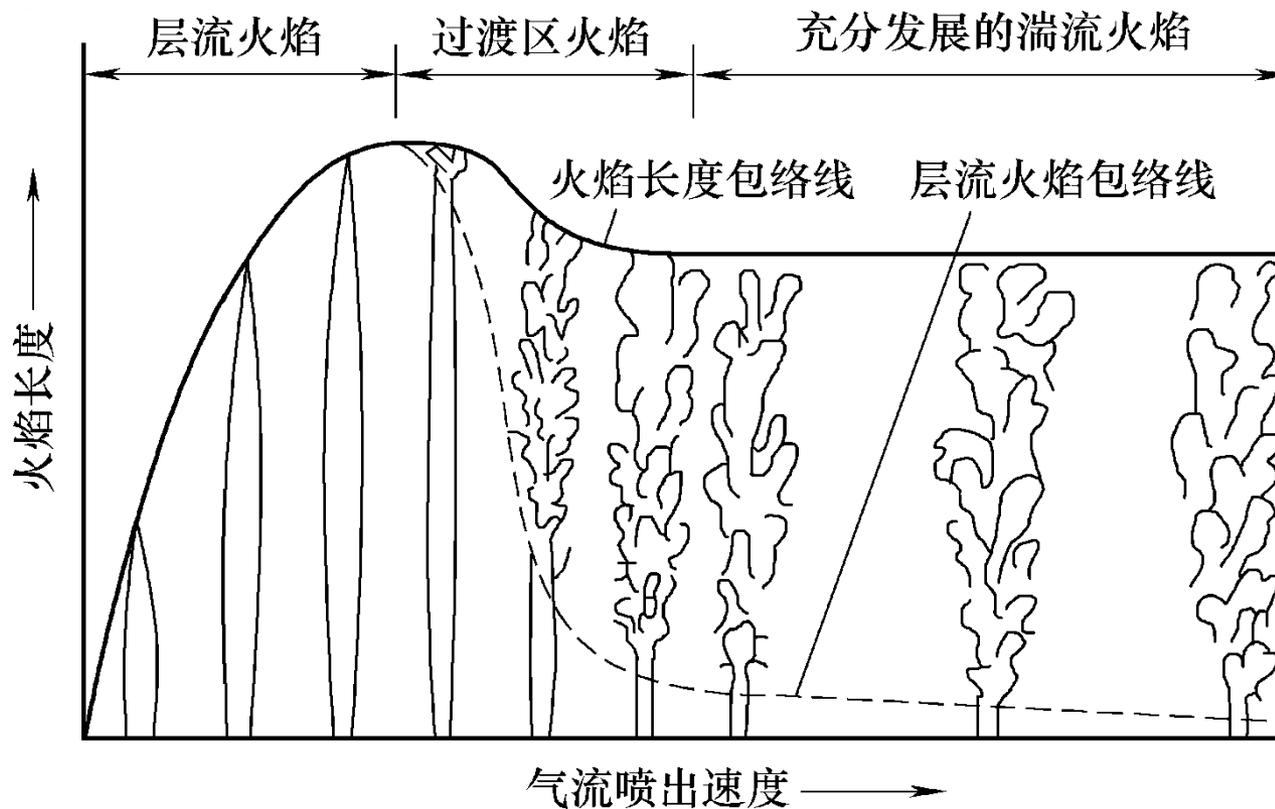
a) 表面燃烧

b) 容积燃烧

- 湍流扩散导致不可能维持层流火焰结构，已不存在将未燃可燃物与燃烧产物分开的火焰面；
- 在整个气团内存在着快慢不同的燃烧反应，达到着火的气团整体燃烧，未达到着火条件的在脉动中被加热并达到着火燃烧；
- 火焰不是连续的薄层，但到处都有；
- 各气团间互相渗透混合，不时形成新微团，进行着不同程度的容积化学反应



三、湍流扩散燃烧

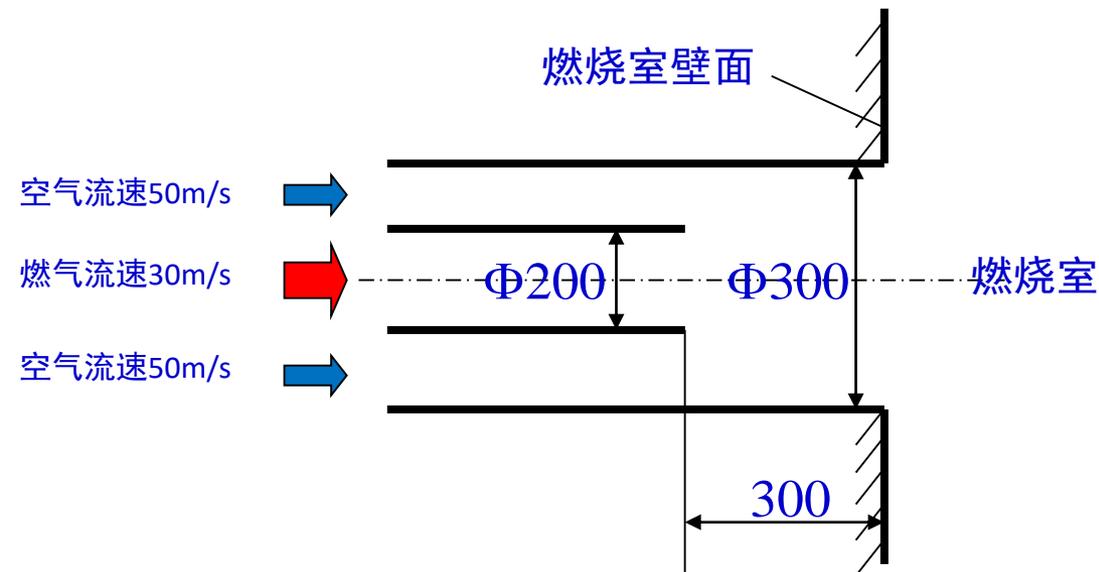


气相射流扩散火焰长度随流速的变化关系



本章作业

- 以下燃烧器喷嘴发生了脱火现象，请讨论：如何改进喷嘴结构或者参数从而保持火焰稳定？



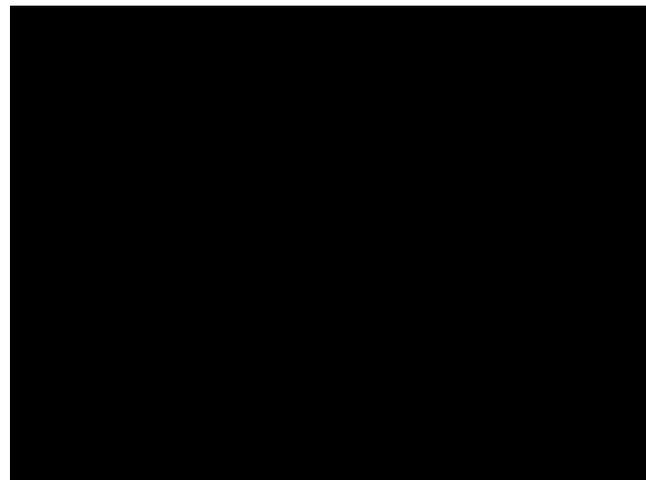
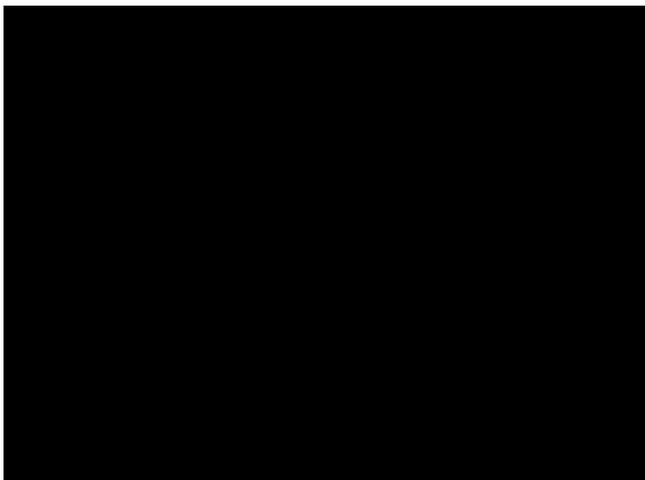
作业内容：

- 改造方案的示意图
- 对改造方案的文字说明
- 对改造方案对燃烧过程产生的影响进行讨论
- 作业提交到学堂在线平台



本章作业二（选做题）

- 请看视频。这是一项新推出的燃烧技术，一个燃气燃烧器上方放置一块耐火材料制造的多孔孔板，孔径较小大约在1mm左右。推出该技术的公司声称这种燃烧技术可以实现超低氮氧化物排放。





本章作业二（选做题）

请回答以下问题：

- 1、燃气燃烧器要做到超低氮燃烧（燃烧生成的氮氧化物主要是热力型NO，生成量要低于 $30\text{mg}/\text{m}^3$ ）的主要困难何在？
- 2、这种燃烧器的燃烧方式是预混燃烧，还是扩散燃烧？
- 3、燃烧器喷嘴中，哪个部分是燃气喷嘴，哪个部分是空气喷嘴？
- 4、要如何调整燃烧参数，才能做到火焰附着在多孔孔板上，而下方的喷嘴与孔板之间没有火焰？
- 5、该种燃烧器实现超低氮燃烧的原理是什么？