

第六部分 火焰传播与火焰稳定

要求：掌握层流火焰、湍流火焰的概念，影响火焰、湍流火焰传播的因素与规律；掌握本生灯的工作过程及其火焰稳定机理；掌握回流区的稳定火焰的机理；了解高速气流中稳定火焰的方法。

火焰结构

□ (1)按燃料种类:

- 1)煤气火焰，指燃烧气体燃料的火焰。
- 2)油雾火焰，指燃烧液体燃料的火焰。
- 3)粉煤火焰，指燃烧粉煤的火焰。

□ (2)按燃料和氧化剂(空气)的预混程度:

- 1)预混燃烧(动力燃烧)火焰，指煤气与空气在进入燃烧室之前已均匀混合的可燃混合物燃烧的火焰。
- 2)扩散燃烧火焰，指煤气和空气边混合边燃烧的火焰，油的燃烧和煤的燃烧火焰也属于扩散火焰
- 3)介于上述两者之间的中间燃烧火焰。

火焰结构

□ (3)按气体的流动性质:

1)层流火焰。

2)湍流火焰。

□ (4)按火焰中的相成分:

1)均相火焰。

2)非均相(异相)火焰，指火焰中除气体外还有固相或液相存在的火焰，例如粉煤火焰、油雾火焰等。

□ (5)按火焰的几何形状:

1)直流锥形火焰。

2)旋流火焰或大张角火焰。

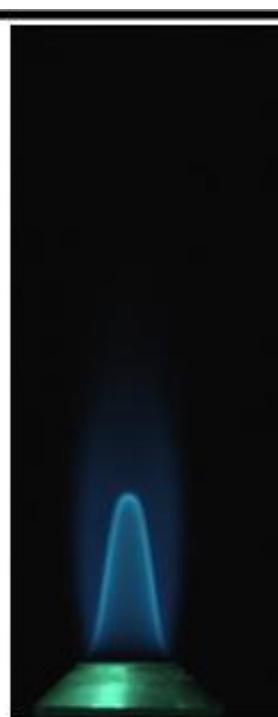
3)平火焰，指用平展气流或其他方法形成的张角接近于 180° 的火焰。



层流扩散火焰



湍流扩散火焰



层流预混火焰

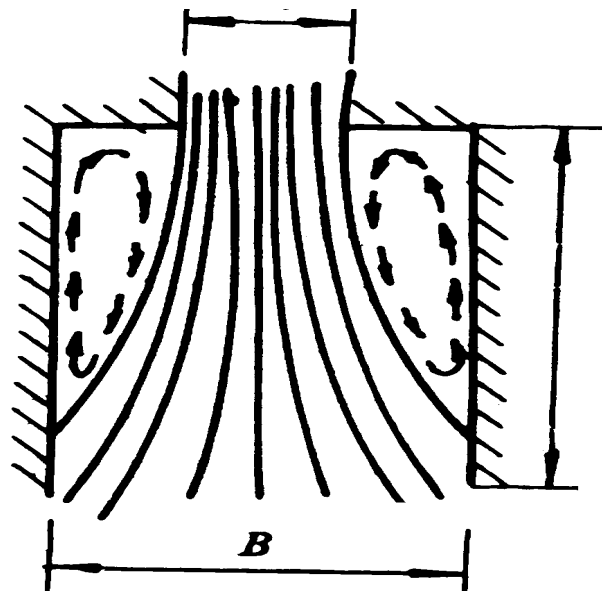


湍流全预混火焰

预混火焰结构

□ 预混火焰的特点

- 放热强度大，火焰温度高
- 燃烧室长度短
- 可实现无焰燃烧
- 容易回火

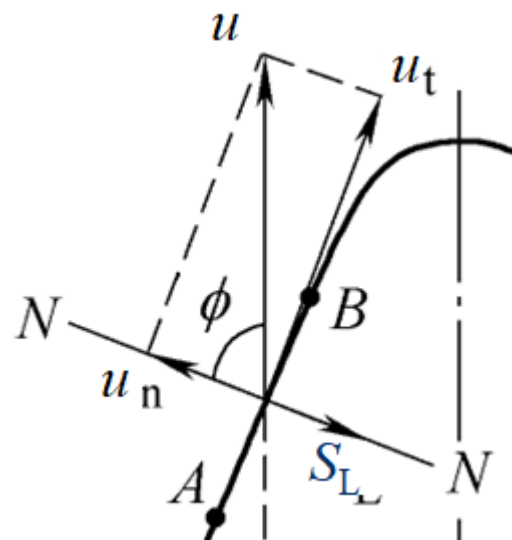


火道燃烧室（无焰燃烧）

平衡法向分速 u_n ——使火焰前锋不致沿N—N方向移动的
的必要条件(满足余弦定律)

$$S_L = u_n = u \cos \varphi \quad 0 < \varphi < 90^\circ$$

- $\varphi=0$ ，即气流速度垂直于火焰前锋，则为平面火焰，实际上极不稳定
- $\varphi=90^\circ$ ，气流速度平行于火焰前锋， $S_L=0$ ，实际上不可能出现的情况
- 随着气流速度 u 的增大，为维持火焰的稳定，火焰会变得细长(φ 角增大)；当 u 减小时，火焰则会变短(φ 角减小)
- u 发生变化时，火焰前锋会调整形状而在新的条件下稳定



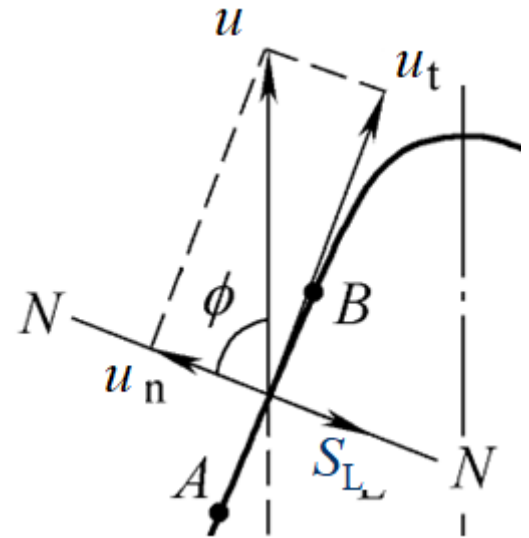
- 因此，为避免火焰被吹走，在火焰的根部必须具有一个固定的点火源，不断地点燃火焰根部附近新鲜可燃混合气，以补充在根部被气流带走的质点
- 点火源应具有足够的能量，否则无法保证火焰稳定

结论：为了确保气流中的火焰稳定，必须具备两个基本条件：

- 1) 火焰传播速度 S_L 应与可燃混合气在火焰前锋法线方向上的分速度 u_n 相等，即满足余弦定律；
- 2) 在火焰的根部必须有一个固定的点火源，且该点火源应具有足够的能量。

(2) 切向分速 u_t 对火焰前锋位置移动的影响 ($A-B$ 方向)

- 当 u 增大时, u_t 增大, 使火焰前锋表面上的质点向前移动
- 为保证火焰的稳定, 必须有另一质点补充到被移动点的位置
- 火焰前锋根部的质点则将被新鲜气流带走, 从而使火焰被吹走



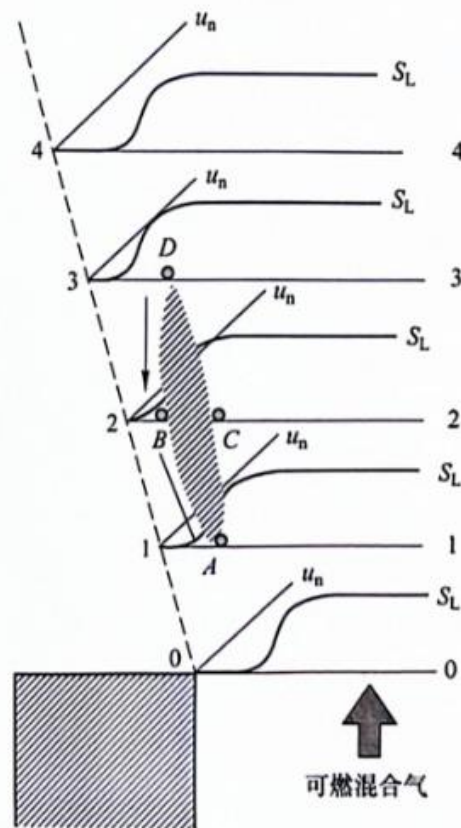
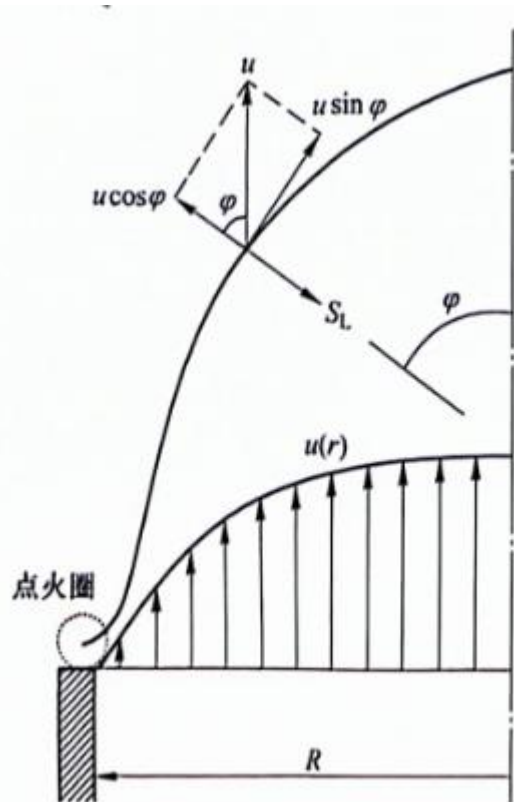
层流预混火焰结构

- 火焰面上，除顶点及底边外，火焰面上任一点轴向速度的法向分速度与火焰传播速度大小相等，方向相反。
- 焰面顶点气流速度与火焰传播速度相等，达到最大值；
- 火焰面底部边缘有一小段水平段，由于射流与火焰传播的特殊性，使气流速度与火焰传播速度达到直接平衡，形成一个点火圈，使火焰保持稳定。

层流预混火焰结构

点火圈的形成是由气流速度和火焰传播速度在管壁和射流边界附近的分布体系所致。受两个因素的影响：

- (1)管口壁面散热的影响。离管口越远，熄火效应影响越小；
- (2)混合气浓度的影响。由于射流的卷吸作用，离管口越远，可燃气体浓度冲淡。

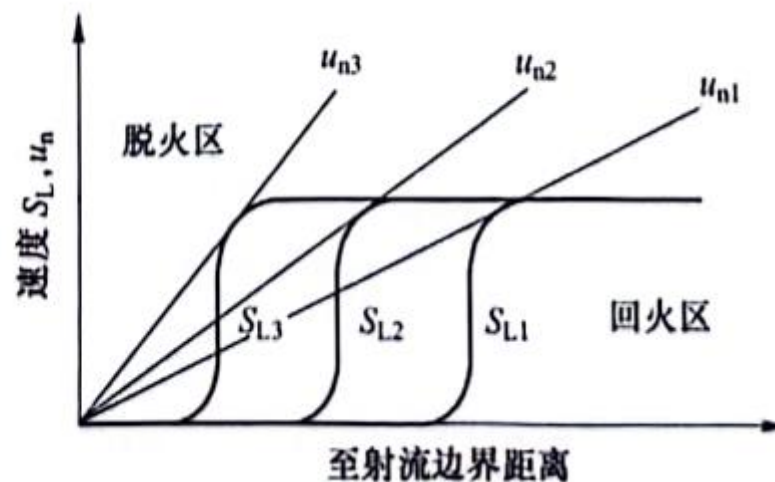
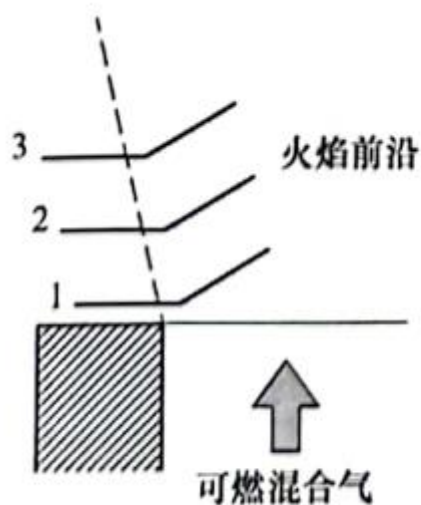


层流预混火焰结构

点火圈的位置及大小随气流速度的变化而改变:

- 当速度较大时，点火圈稳定区域将向下游移动并逐渐缩小，最后形成一点，再增加气流速度，火焰将会被气流吹熄，产生脱火。
- 当速度较小时，点火圈稳定区域将向上游移动并逐渐扩大，直到喷口截面处，如果再降低流速，将会使稳定点A向管内窜动，产生回火。

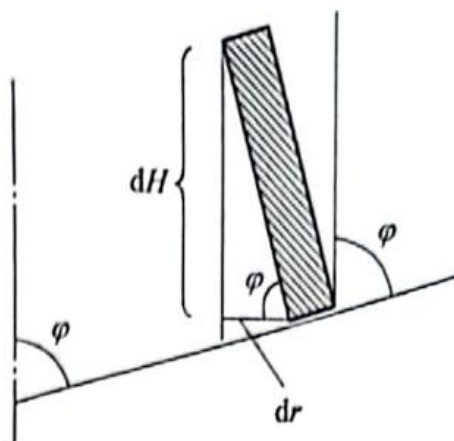
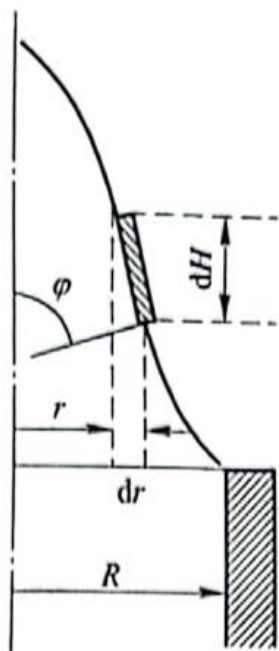
层流预混火焰结构



$$\begin{cases} S_L = u_n \\ \frac{\partial S_L}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow R'} = \frac{\partial u_n}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow R'} \end{cases}$$

层流预混火焰结构

• 火焰锥体的高度(火焰长度) H
 火焰锥表面微元面在高度方向上的
 投影为 dH ，在径向上的
 投影为 dr ，则由几何关系可得



$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dH}{dr}\right)^2}} = \frac{S_L}{u}$$

$$\frac{dH}{dr} = \pm \sqrt{\left(\frac{u}{S_L}\right)^2 - 1}$$

层流预混火焰结构

假定：正锥体火焰，底面半径等于喷口半径 R ；

S_L 为常量，与 r 无关；

气流速度取为喷口断面的平均流速 \bar{u}

$$H = R \sqrt{\left(\frac{\bar{u}}{S_L}\right)^2 - 1} \quad H = R \sqrt{\left(\frac{q_v}{\pi R^2 S_L}\right)^2 - 1}$$

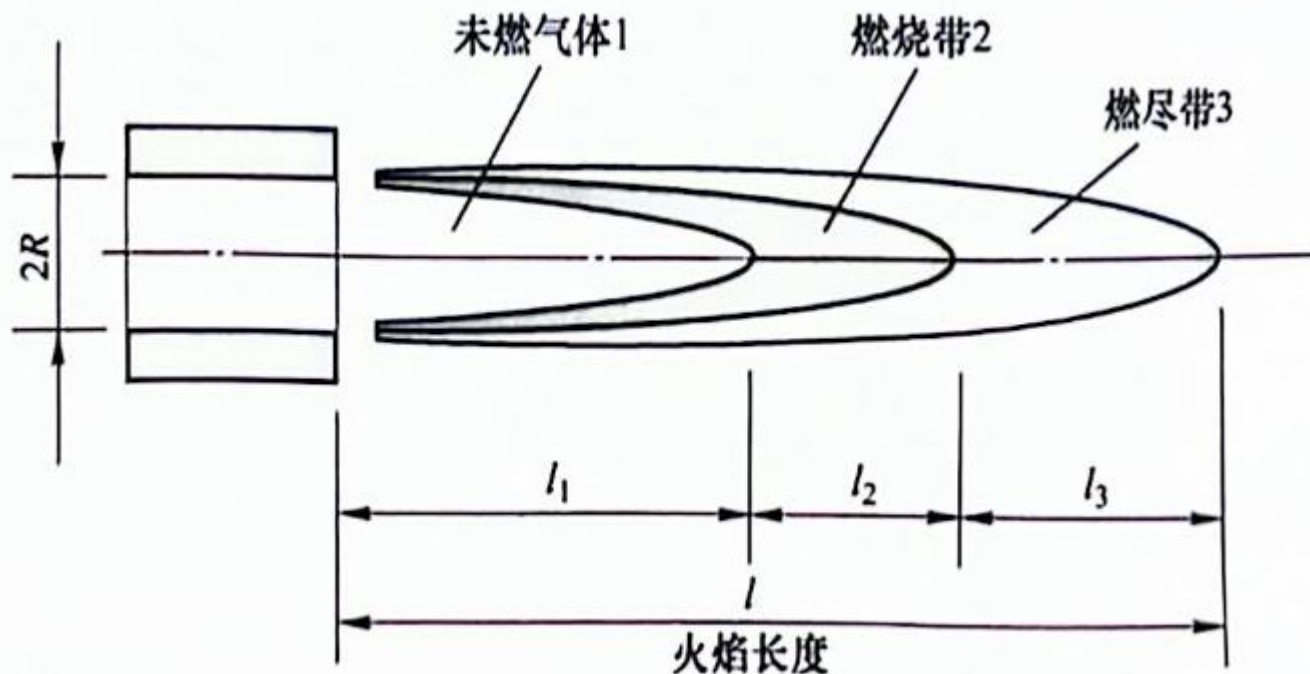
可见，层流预混火焰长度随着可燃混合气喷出速度或喷口管径的增大而增大，却随着火焰传播速度的增大而减小

层流预混火焰结构

结论：

- 1) 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 H 增大；
- 2) 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。

湍流预混火焰结构



中心部分1是未燃的可燃混合物；
燃烧带2是可见的湍流燃烧前沿，大部分可燃气体在这一区域中燃烧；
燃尽带3是达到完全燃烧的区域，

湍流预混火焰结构

$$l_1 \approx K_1 \frac{\bar{u}R}{S_T}$$

$$l_2 \approx K_2 \frac{\bar{u}R}{S_T}$$

$$l_3 \approx K_3 u_p$$

式中， K_1 、 K_2 、 K_3 为实验常数；

u_p 为燃烧产物的速度。

将三部分长度相加就是湍流预混火焰的长度。湍流火焰长度随气流速度的增加而增加，随火焰传播速度的增加而减小。

湍流预混火焰结构

预混火焰防止回火的方法主要是降低喷口处的火焰传播速度和提高可燃气体在喷口处的速度。具体措施有：

- (1)减小喷口直径，增加喷嘴数量。利用喷孔壁面的冷却作用使火焰传播速度降低。
- (2)采用导热性差的材料制造喷嘴，减少喷嘴对燃气的传热。
- (3)对大型喷嘴进行水冷或空冷。
- (4)减少一次空气量，增设二次空气，使燃料与一次空气的混合气偏离化学当量比，使火焰传播速度降低。
- (5)保持一定的可燃气体压力，维持一定的出口流速。

扩散火焰结构

一、扩散火焰结构

扩散火焰

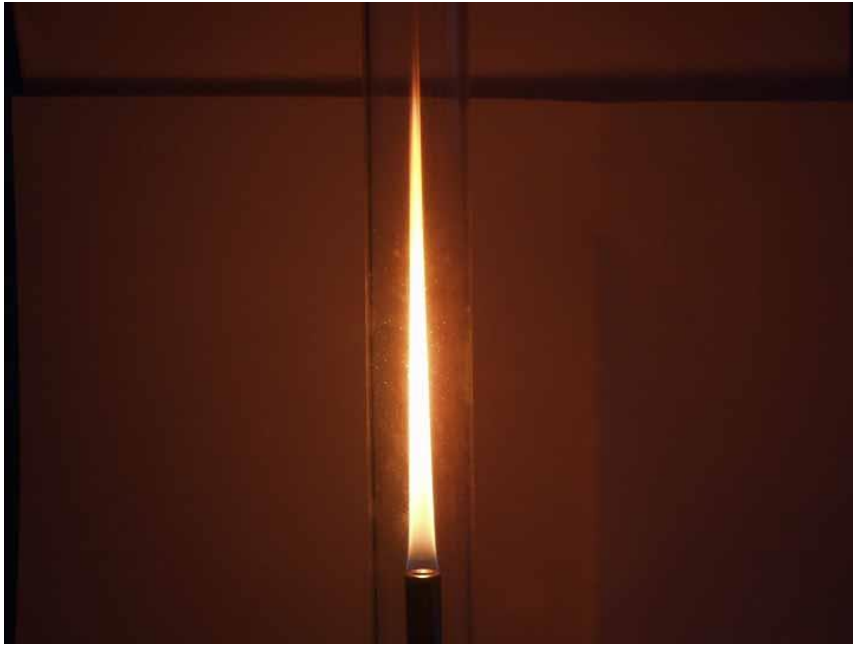
层流扩散火焰

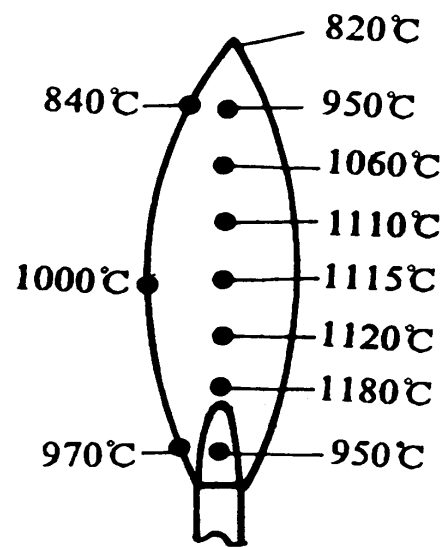
质量扩散以分子扩散的方式实现

湍流扩散火焰

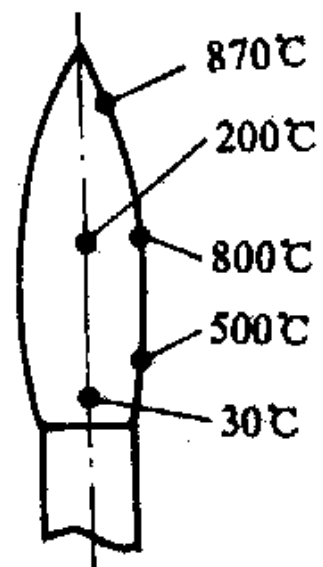
质量扩散以气团扩散的方式实现

扩散火焰结构



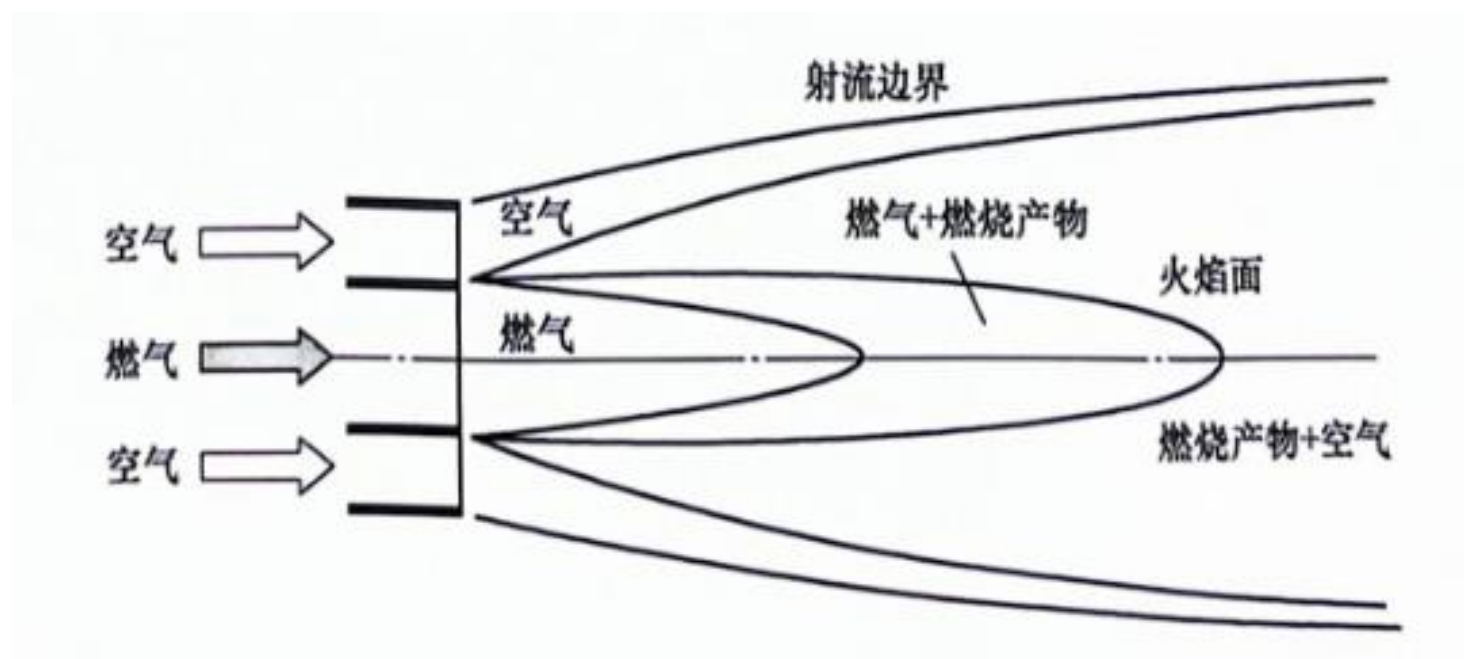


人工煤气预混火焰



人工煤气扩散火焰

层流扩散火焰结构



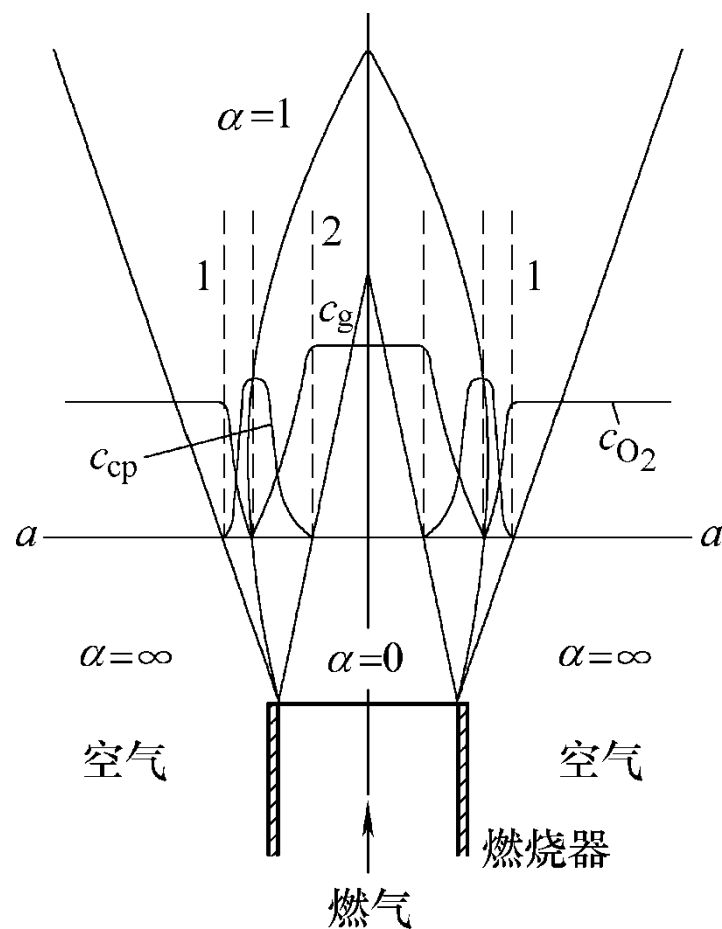
同心射流形成的层流扩散火焰结构

层流扩散火焰结构

火焰面必定在燃料与空气按照化学恰当比混合的位置上：

- 层流扩散火焰分为四个区域：

- 1) 中心的纯燃料区
- 2) 外围的纯空气区
- 3) 火焰面外侧的燃烧产物和空气的混合区
- 4) 火焰面内侧的燃烧产物和燃料的混合区



焰面：燃料与空气的理论浓度为零

层流扩散燃烧火焰结构

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

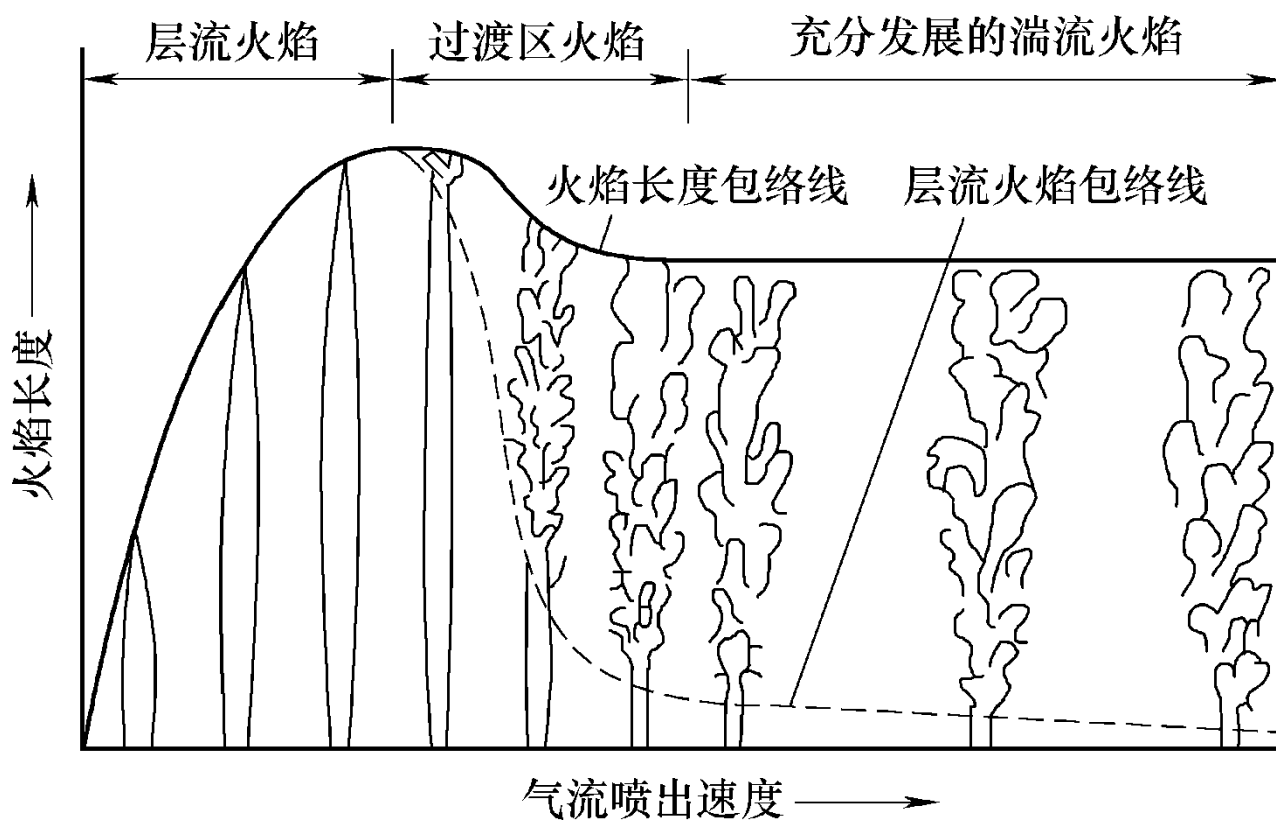
层流扩散燃烧火焰结构

$$H_l \propto \frac{u_0 D_0^2}{D} \propto \frac{qv}{D}$$

- (1)当燃料和氧化剂一定时，层流扩散火焰长度与燃料和氧化剂的体积流量成正比，与分子扩散系数成反比
- (2)燃料和氧化剂的体积流量一定时，层流扩散火焰长度与管径无关
- (3)流速不变，管径增加，那么增加了体积流量，火焰长度随之增加；
- (4)管径不变，流速增加，也使得体积流量增加，火焰长度也随之增加。

湍流扩散火焰结构

湍流扩散火焰



湍流扩散火焰结构



湍流扩散火焰结构

2. 湍流扩散燃烧和火焰结构

特点：

- 燃气喷出速度高，气流处于湍流状态，燃气和空气的混合依靠气流卷吸作用进行
- 火焰高度受流出速度影响不大
- 火焰面严重皱折
- 亮度明显降低
- 出现噪声
- 不会回火，但可能脱火

湍流扩散火焰结构

湍流扩散火焰高度

水平自由射流火焰长度:

$$\frac{l}{d_0} = (13.5 \sim 14.0) Ku_0^{0.34} d_0^{-0.17}$$

双股同心射流火焰长度:

$$\frac{l}{d_0} = \frac{u_g}{2.4 + 0.925u_g + u_a} (5.6 + 0.021Q_{\text{net}})$$

旋转射流火焰长度:

$$\frac{l}{d_0} = 5.3 \frac{1}{\phi'} \left(\frac{\rho_{\infty}}{\rho_{\text{st}}} \right)^{0.5} - BS$$

高速混气流中火焰稳定

1. 高速气流中火焰稳定的基本条件

- 火焰在可燃混合气流中稳定的必要条件之一是火焰前锋根部存在气流速度等于火焰传播速度的速度平衡点，以形成固定点火源
- 实际燃烧装置中的气流速度(40~120 m/s)比最大可能的湍流火焰传播速度(~315 cm/s)要高出10倍以上
- 高速气流中，火焰难以稳定，必须在高速气流中采用某些特殊手段来稳定火焰

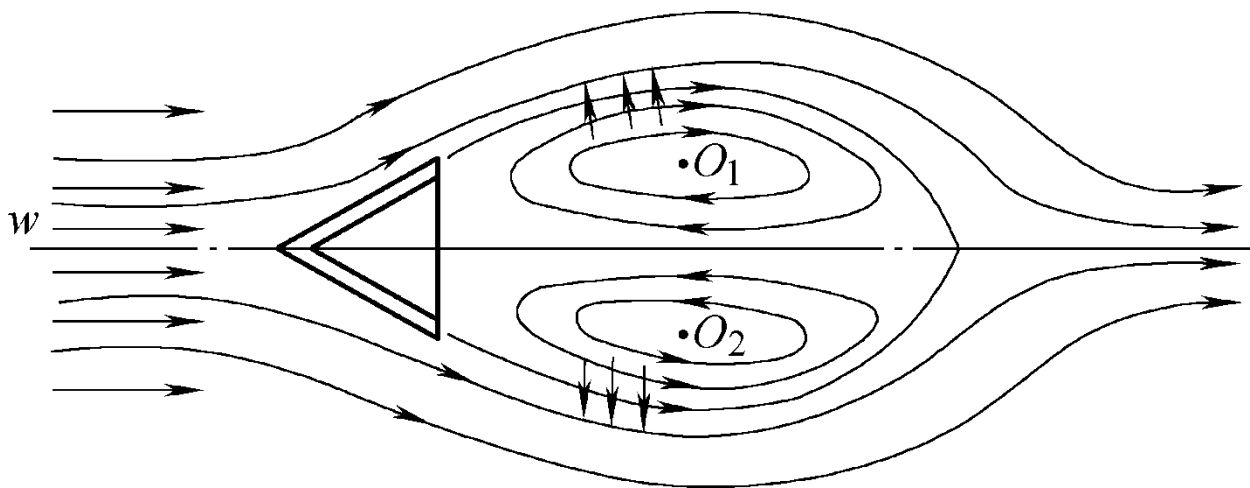
高速混气流中火焰稳定

- 通常在气流中人为地产生一个自偿性点火源，以满足气流法向分速等于湍流火焰传播速度的要求
- 采用的主要手段：
 - 利用引燃火焰或称值班火焰，即在主气流旁引入小股低速气流，着火后不断引燃主气流
 - 利用燃烧装置形状变化，如偏转射流(突然转弯)、壁面凹槽、突然扩张等改变气流方向的方法，形成回流区
 - 利用金属棒(丝、环)，把金属棒放在火焰上，以改变速度分布，起到稳定火焰的作用
 - 采用稳焰旋流器，利用旋转射流，产生回流区
 - 利用钝体，产生回流区，以稳定火焰

高速混气流中火焰稳定

钝体稳定火焰的机理

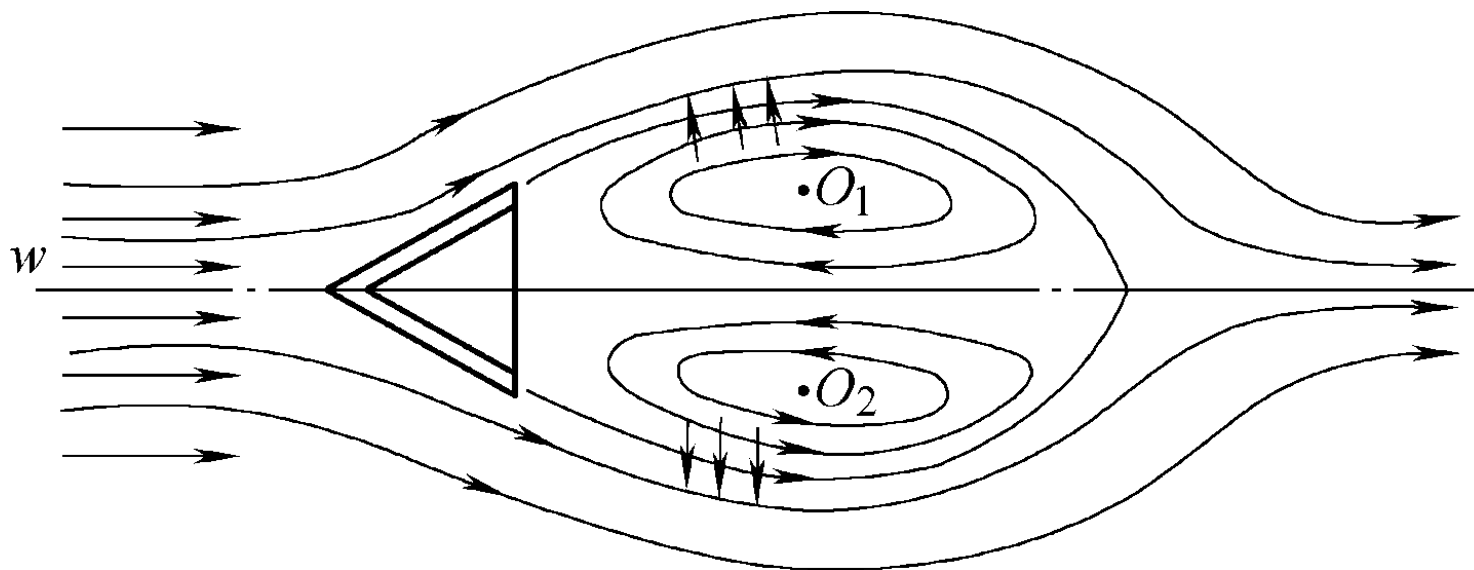
- 采用钝体是最常用、最有效的稳定火焰的方法之一
- 钝体的形状很多，如：圆形、平板、半圆锥体、V形槽等
- 粘性气体绕流脱体，在其后方形成稳定的涡流区(回流区)
- 回流区的形成及其大小和形状对稳定火焰起着决定性作用



钝体火焰稳定器回流区的形成

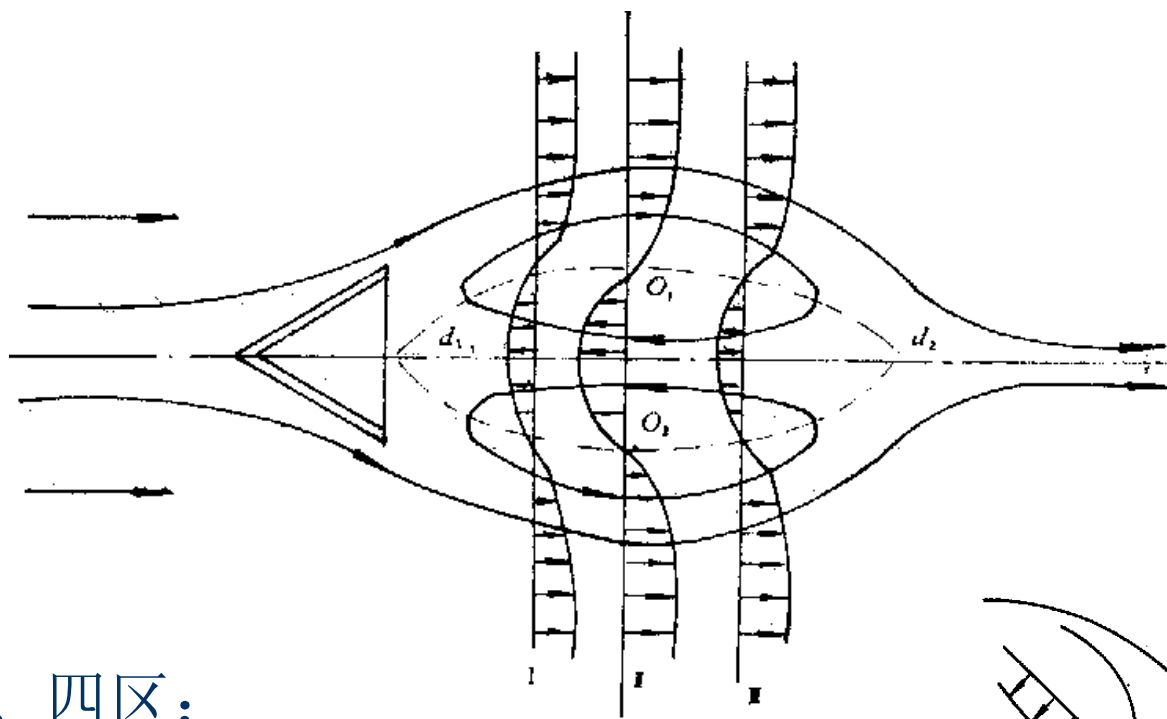
高速混气流中火焰稳定

一、回流区的建立



冷吹时，回流区长度约 $1.5H$ ，燃烧时回流区长度约为 $6H$ 。 H 为V型稳定器尾槽宽。

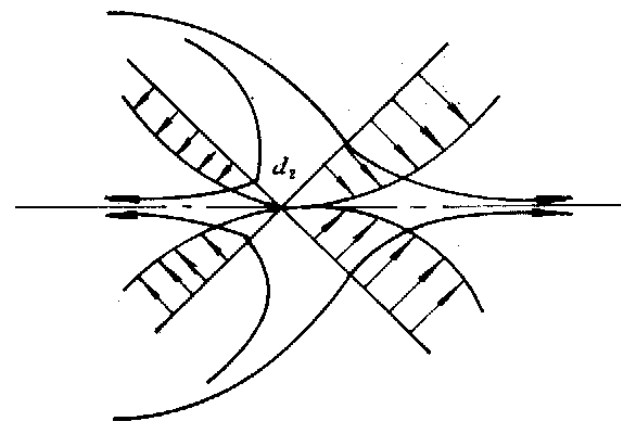
高速混气流中火焰稳定



四心、四区：

上涡心、下涡心、前死心、后死心

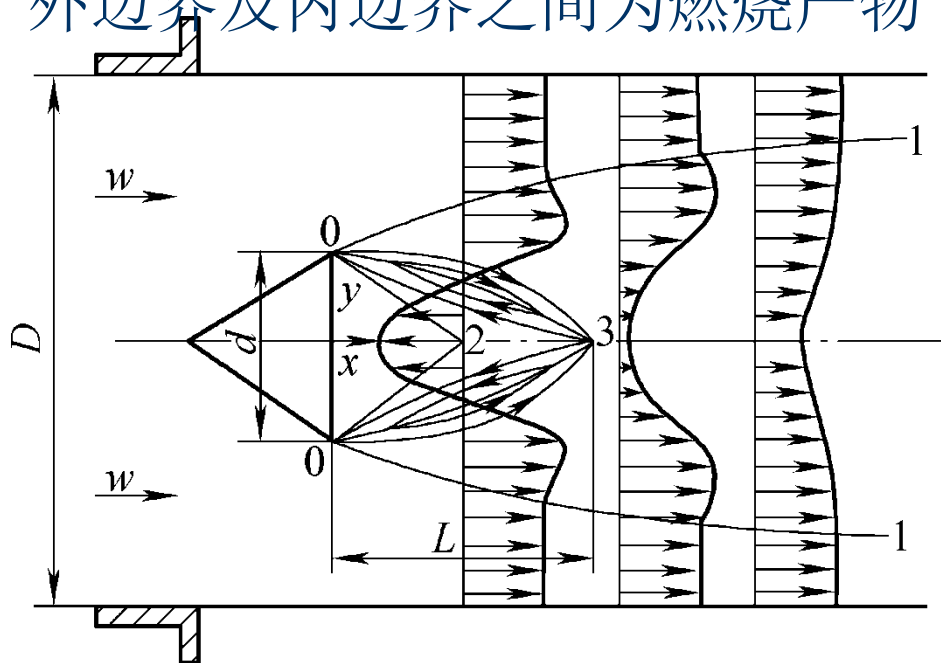
顺流区、逆流区、前死区、后死区



高速混气流中火焰稳定

(1) 钝体后回流区中气流结构

- 0-1、0-2分别为气流流经钝体后的湍流外边界及内边界
- 外边界的外侧为主流区，外边界及内边界之间为燃烧产物和预混可燃气的混合物
- 0-3-0为各截面上轴向速度为零的点的连线，为回流区边界
- 回流区内充满燃烧产物，其流向是逆向稳焰器，起固定连续点火源作用

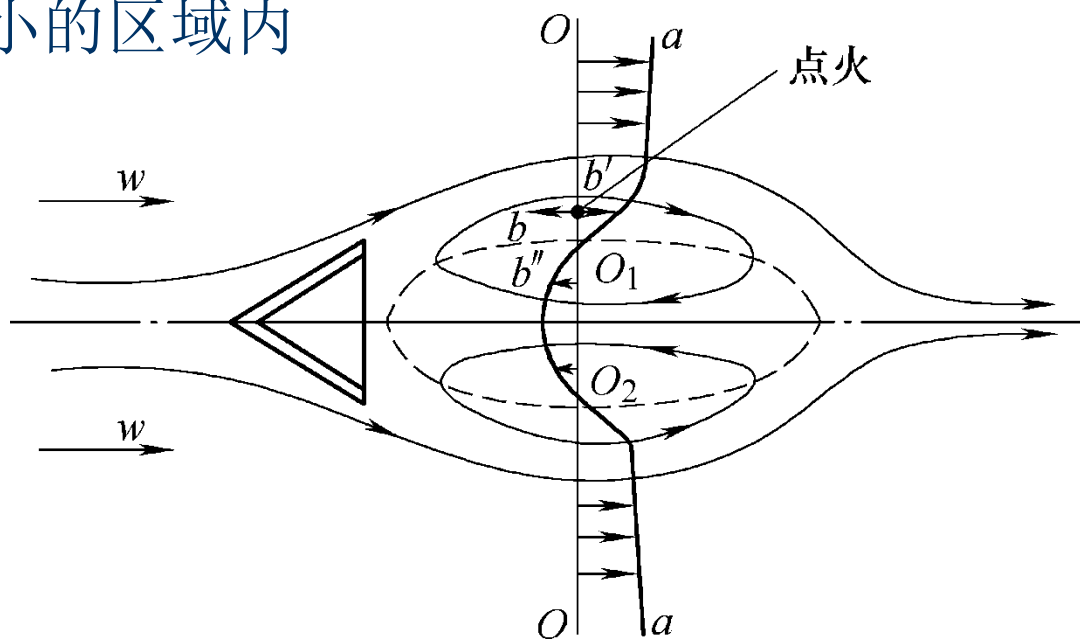


钝体火焰稳定器后回流区的气流结构

第四节 高速混气流中火焰稳定

(2) 钝体后回流区火焰稳定原理

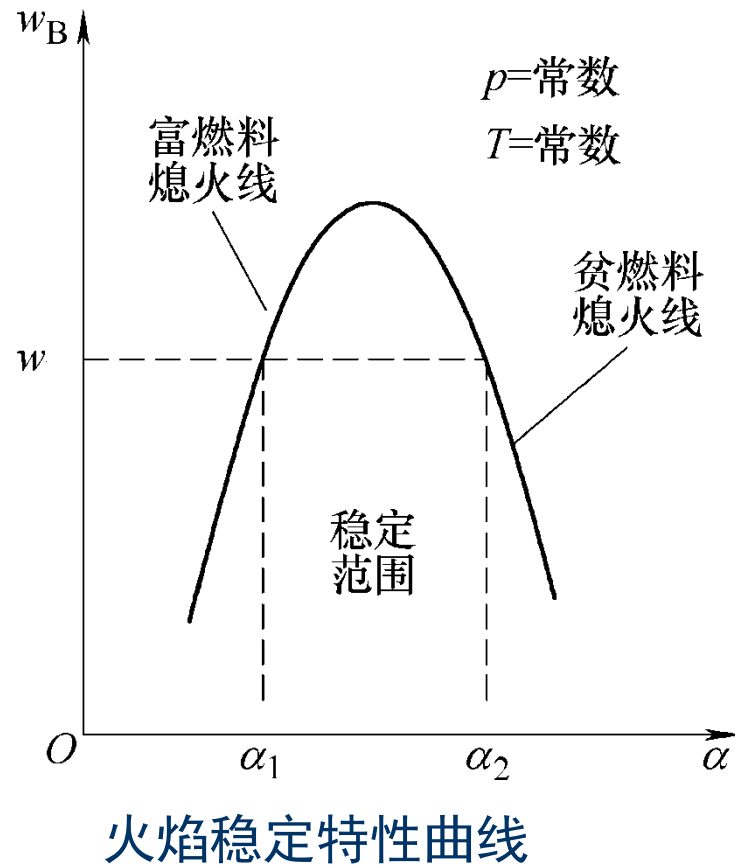
- 可燃混合气绕流钝体，改变原先的流动特性，产生回流区
- 回流旋涡将高温产物带回钝体，燃烧反应温度显著升高，火焰得以稳定在一个小的区域内
- $O-O$ 截面，顺流区轴向速度 u 在0至 u_m 之间，该区中总可找到一点(如 b 点)，满足 $u=S_t$ ，即火焰稳定，火焰在此形成了一个固定点火源



钝体火焰稳定器点火源的位置

高速混气流中火焰稳定

- 钝体稳焰器维持火焰稳定，要求：
 - 其后形成一个固定点火源
 - 还要求它具有足够的能量
- 若流过钝体稳焰器的新鲜混合气组成超过着火极限，也不能稳定火焰
- 给定可燃混合气流速 u 、温度 T 和压力 p 时，其组成(如 α)须处于一定范围，火焰才可稳定
- 若可燃混合气组成一定，在给定的温度和压力下，增大气流速度同样会把火焰吹熄



高速混气流中火焰稳定

四、回流区稳定火焰的界限

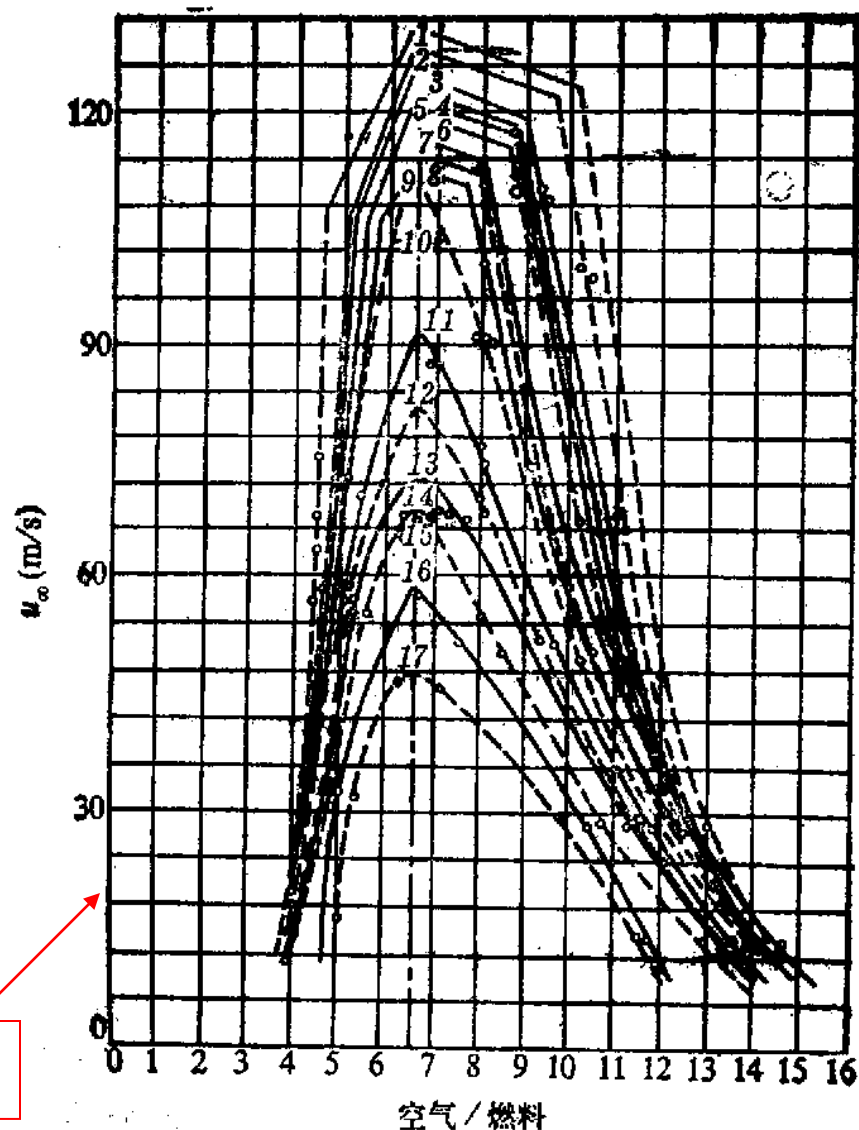
临界火焰吹熄速度 u_B :

引起吹熄的临界
气流速度。

影响火焰稳定界限的因素:

燃料性质、可燃混合气成分、可燃混合气流速及湍流强度，可燃混合气的温度、钝体形状、尺寸、温度，燃烧室压力和温度等。

钝体直径1—17逐渐减小

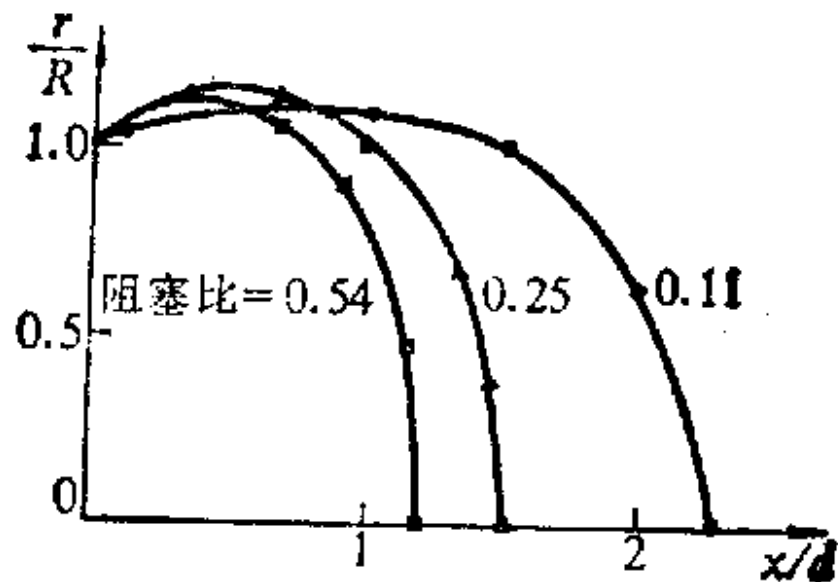


高速混气流中火焰稳定

- 火焰稳定器的稳定性优良，主要是指 ——
具有较高的吹熄速度和在较宽广的混合气浓度范围内可实现稳定的燃烧
- 影响扩散火焰稳定的因素 ——
可燃混合气的着火极限与点燃能量
取决于燃气的种类、可燃混合气的组成、气流速度、湍流强度以及可燃混合气的压力和温度等；
回流区所具有的能量
取决于稳焰器的结构形状和尺寸大小、气流速度及旋转与否，以及燃烧室尺寸等

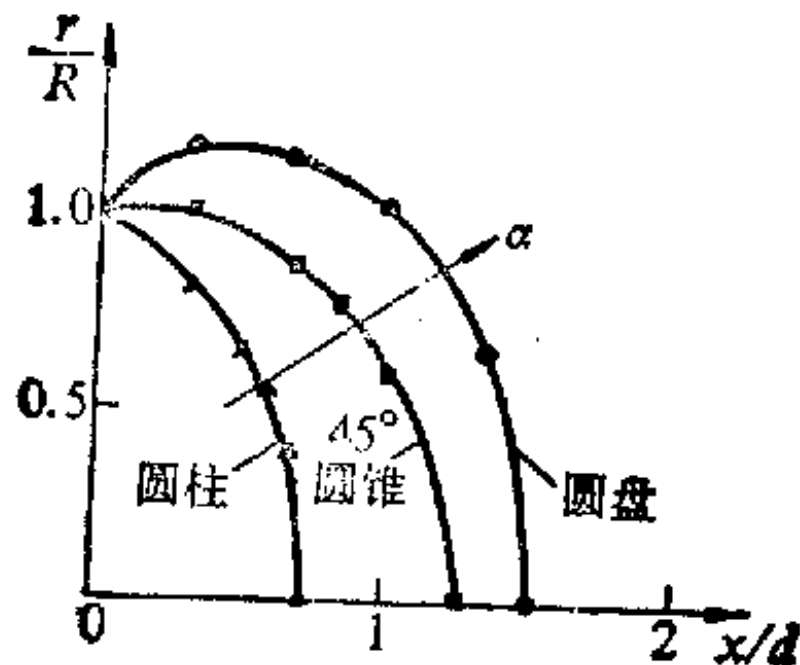
高速混气流中火焰稳定

影响回流区稳定火焰的因素



(a) (钝体为圆盘)

阻塞比的影响

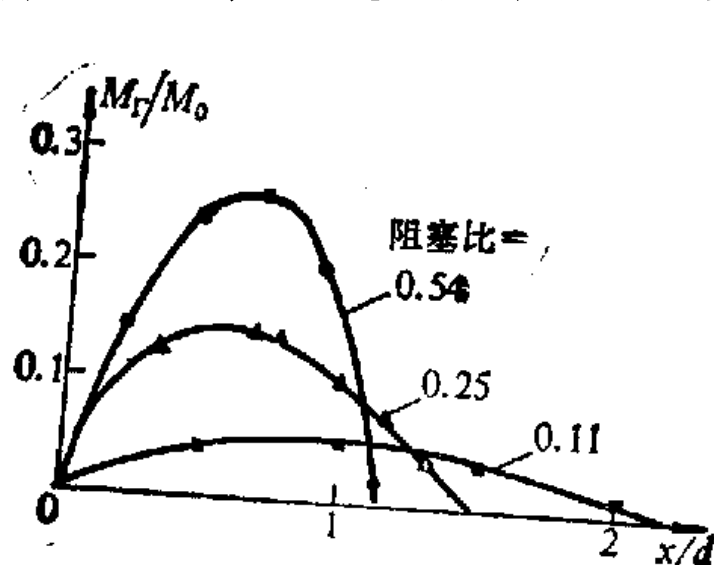


(b) $(\frac{d}{D})^2 = 0.25$

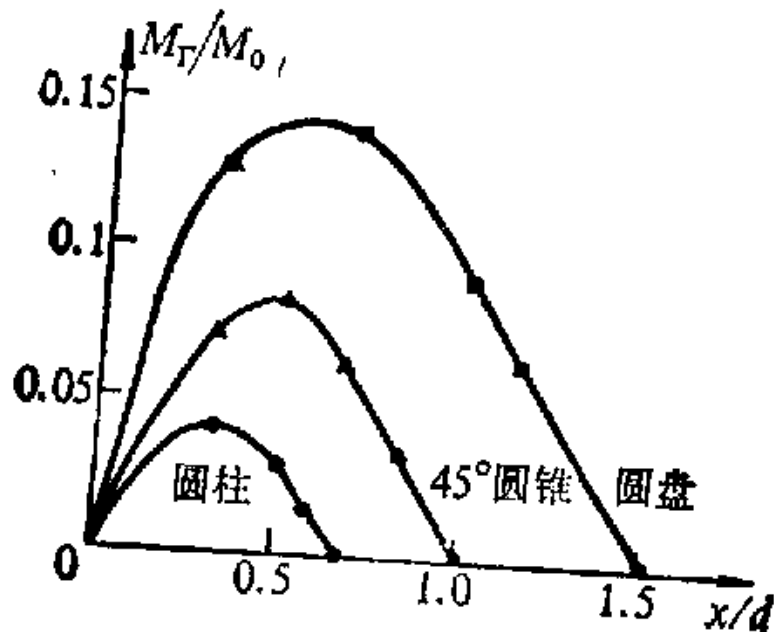
钝体形状的影响

高速混气流中火焰稳定

影响回流区稳定火焰的因素



(a) 钝体为圆盘



(b) $(\frac{d}{D})^2 = 0.25$

回流量的影响

回流区中某截面回流的质量占主流质量的分数是回流区的一个重要特征参数，对火焰稳定有重要的影响：

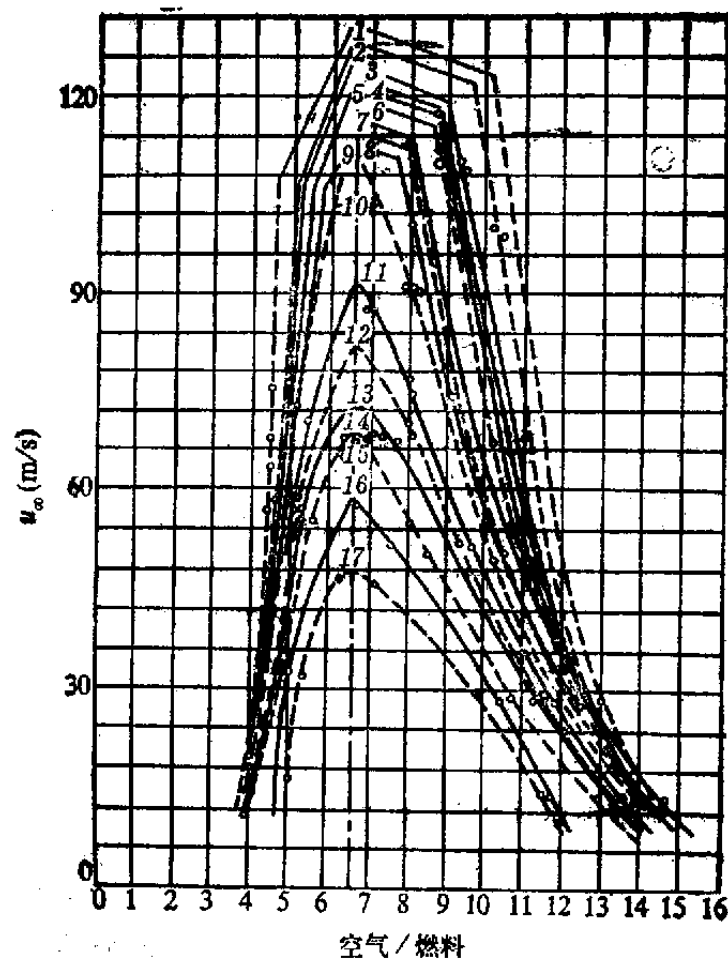
$$m_r = \int_0^{r_0} 2\pi r \rho u dr$$

高速混气流中火焰稳定

四、回流区稳定火焰的界限

主流速度和湍流程度的影响：

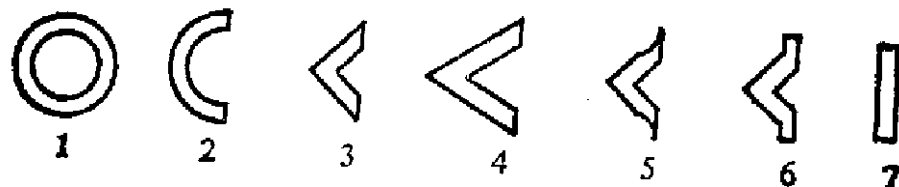
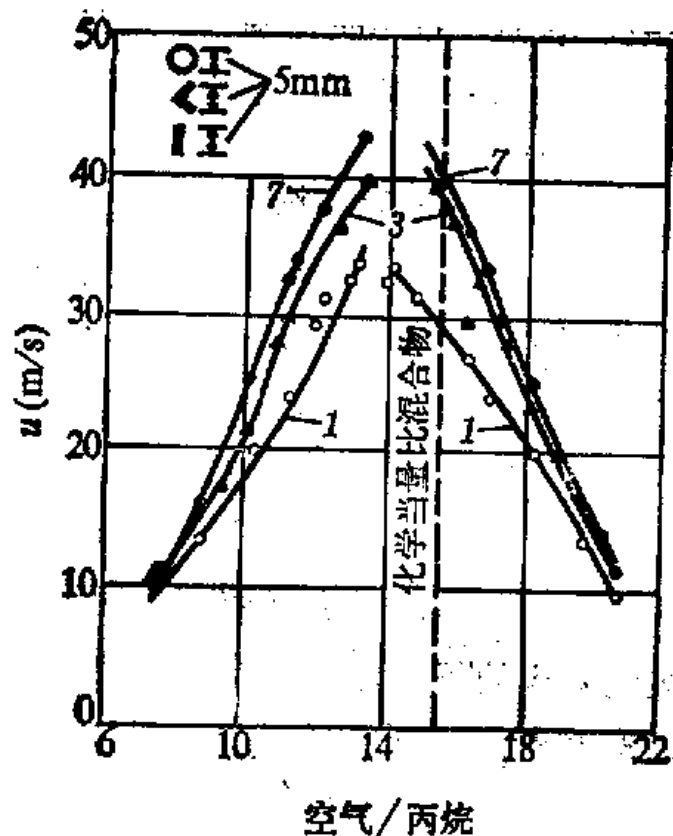
1. 气流速度增大，将缩小火焰稳定界限；
2. 增大钝体前主流的湍流程度将减小火焰的稳定性。其原因是湍流影响边界层内速度的稳定性。



高速混气流中火焰稳定

四、回流区稳定火焰的界限

钝体形状与尺寸的影响：



$$\frac{u_B}{dC_x} = f(\alpha)$$

C_x —钝体迎面阻力系数

高速混气流中火焰稳定

四、回流区稳定火焰的界限

燃烧室形状与尺寸的影响：

1. 阻塞比较小时，增加阻塞比可以增加火焰稳定界限，但过份增大阻塞比，稳定界限反而下降，存在最佳阻塞比。
2. 加长燃烧室将会缩小火焰稳定界限。

声学效应的影响：

1. 增大噪声强度对火焰稳定性有不利的影晌

高速混气流中火焰稳定

五、回流区稳定火焰理论

能量理论：

混气是受到回流区高温燃气的加热，达到着火温度而使火焰保持稳定。如果回流区传给可燃新鲜混气的热量不足以使混气达到着火温度，则火焰熄灭。

回流区的能量： $Q_r = VWQ$

点燃混气需要的能量：

$$Q_s = \dot{m}C_p(T_C - T_0)$$



高速混气流中火焰稳定

五、回流区稳定火焰理论

特征时间理论：

火焰稳定性取决于两个特征时间的关系，一个是新鲜混气在回流区外边界停留的时间 τ_s ，另一个是点燃新鲜混气所需的准备时间，即感应期 τ_i 。

$\tau_s \geq \tau_i$ ，则火焰可以稳定，反之则火焰就会熄灭。

高速混气流中火焰稳定

六、高速气流中稳定火焰的方法

火焰稳定的主要方法有(除了钝体稳焰器之外):

1. 利用引燃火焰稳定
2. 利用旋转射流稳定
3. 利用反吹射流稳定
4. 利用不对称射流稳定等
5. 突扩管道等

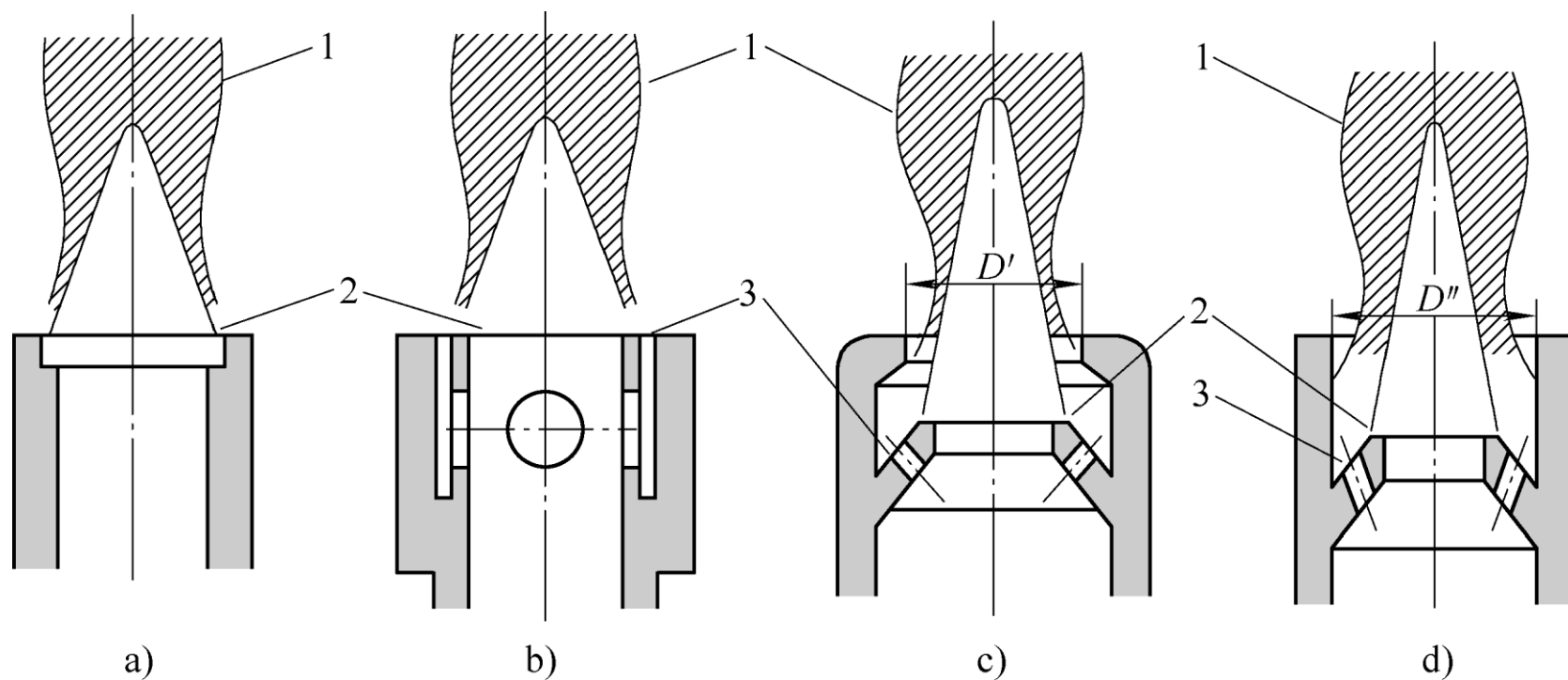
高速混气流中火焰稳定

1. 利用值班火焰稳定火焰

- **技术原理：** 在高速可燃混合气流(主气流)附近布置一稳定的引燃火焰(或称值班火焰)，使主气流得到不间断地点燃，从而稳定主火焰
- **引燃火焰特点：** 为流速较低、燃烧量较少的分支火焰，其流速可为主火焰的数十分之一，燃烧量可达主火焰的20%~30%
- **物理机理：** 强烈的扩散和混合作用导致由引燃火焰产生的炽热气流与新鲜可燃混合气流之间发生强烈热、质交换，反应速度增大，并进一步着火和燃烧

高速混气流中火焰稳定

- 利用值班火焰稳定主火焰的典型方法



利用值班火焰稳定主火焰的典型方法

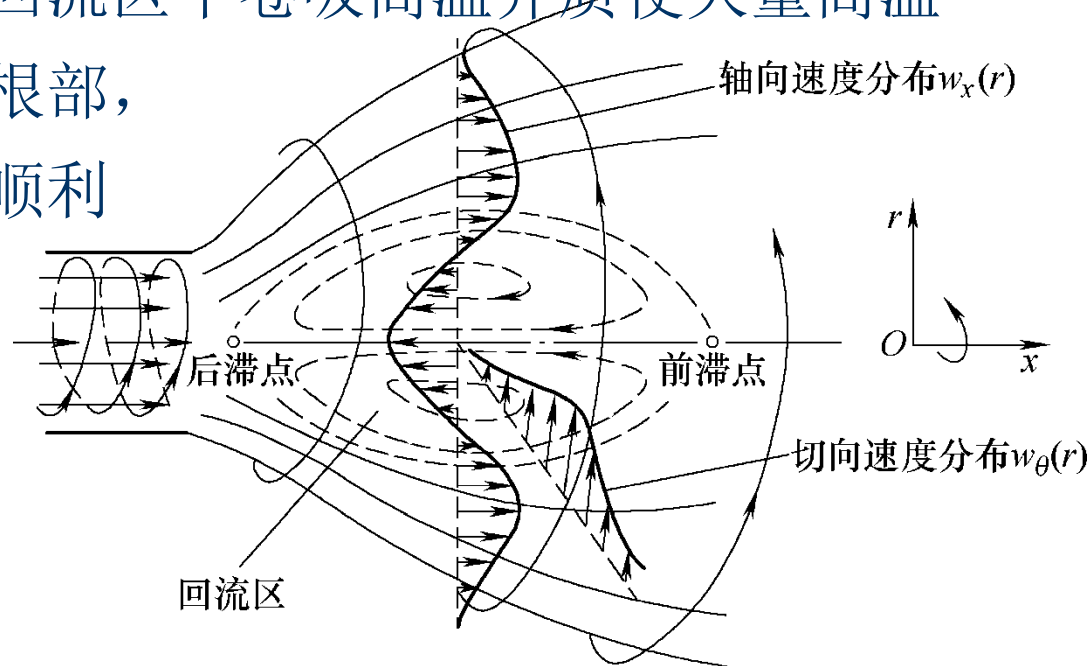
a) 无引燃火焰；b)、c)、d) 有引燃火焰

1—主火焰；2—主焰孔；3—引燃焰孔

高速混气流中火焰稳定

2. 利用旋转射流稳定火焰

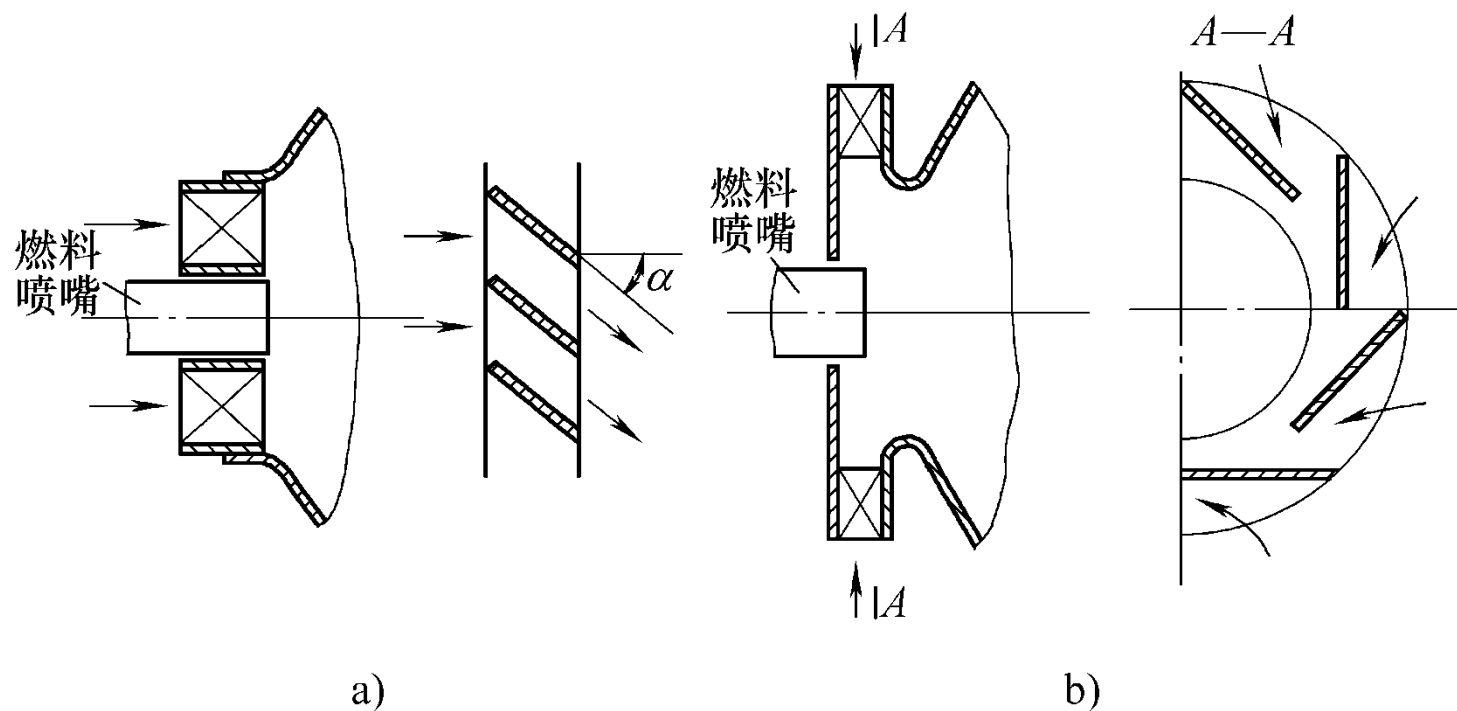
- **原理：**气流在旋流器的作用下作螺旋运动，形成旋转射流，并形成一个内部回流区，不但从射流外侧卷吸周围介质，还能从内回流区中卷吸高温介质使大量高温烟气回流至火焰根部，保证燃料及时、顺利着火和稳定燃烧



旋转射流流场示意图

高速混气流中火焰稳定

- 燃气轮机燃烧室中的应用 (高比容积热强度和进口气流速度)
目前广泛采用叶片式旋流器 (主要有轴向式和径向式两种)
作为火焰稳定器



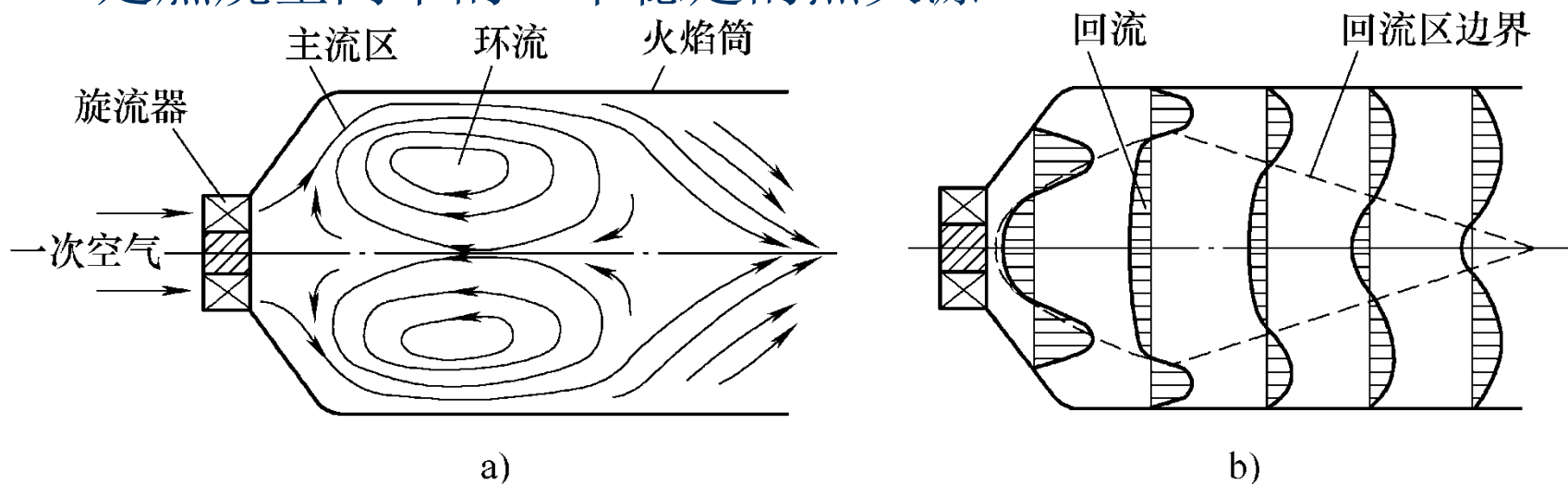
叶片式旋流器结构示意图

a) 轴向式 b) 径向式

高速混气流中火焰稳定

- 燃气轮机燃烧室中的应用 (高比容积热强度和进口气流速度)

经旋流器流入火焰筒的空气流 (约占总空气量的5%~10%)
形成三维旋转气流及回流区, 回流的高温燃气, 实际上就是燃烧空间中的一个稳定的点火源

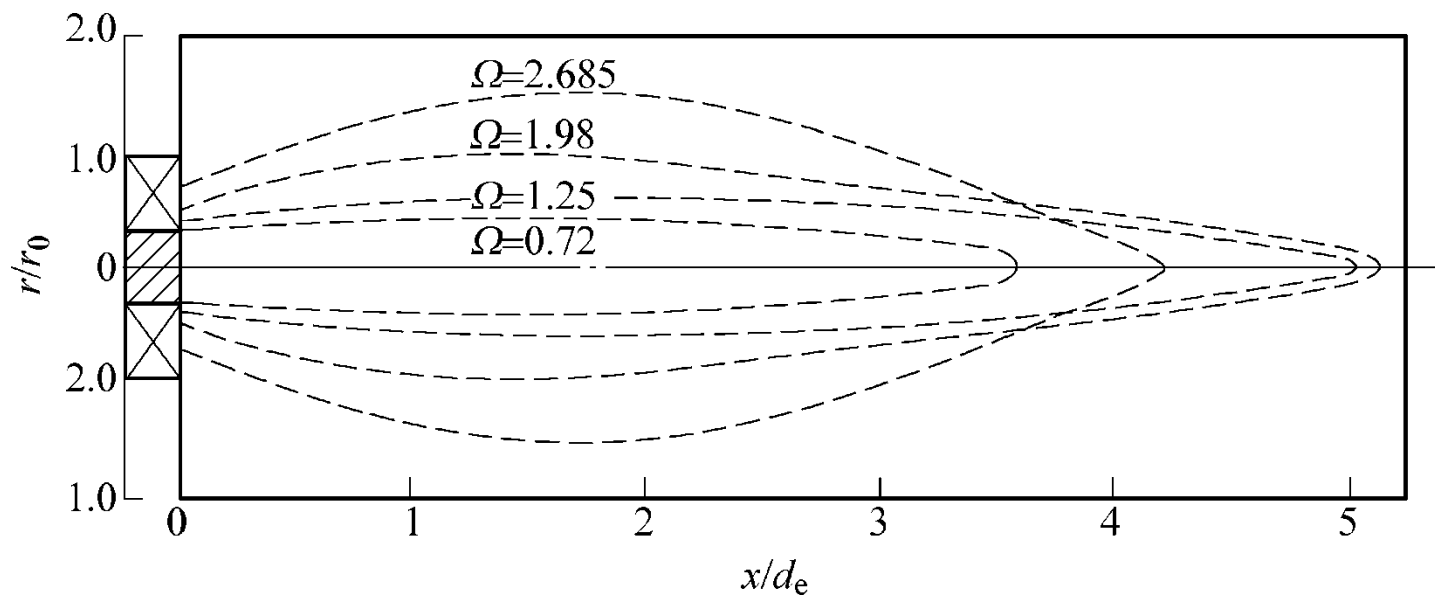


燃烧室火焰筒中气流的流动状况

a) 气流流动状况 b) 气流轴向速度分布

高速混气流中火焰稳定

- 实践中，可调节旋流器叶片角度来改变旋流强度 Ω (旋流数)，以调节回流区尺寸和高温烟气回流量，适应稳定火焰的要求
- 对于强旋转射流($\Omega > 0.6$)，当 Ω 由0.72增大至1.25时，回流区长度将增大大约40%。

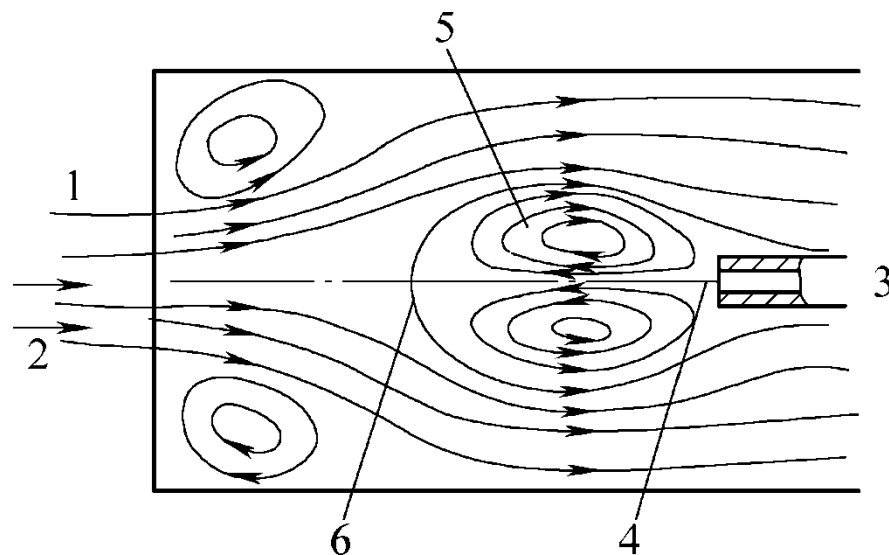


旋流强度对环形喷口旋转射流回流区的影响

高速混气流中火焰稳定

3. 利用反吹射流稳定火焰

- **特点：**一次风燃料气流呈直流射流喷入炉膛；二次风喷口在一定轴向距离处沿切向布置；沿炉膛中心线上反向布置反吹射流喷嘴，反吹射流风速可达60~70 m/s



反吹射流直流燃烧器

1—燃料 2—一次风 3—喷口

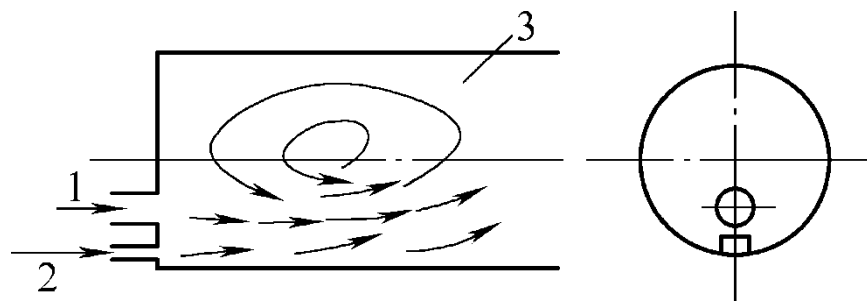
4—射流出口 5—临界区 6—滞止点

- **原理：**反吹射流强烈的卷吸作用使炉膛中心的高温烟气随着反吹射流一起倒流，形成回流区，满足稳定着火的条件，形成保持一次风燃料气流能稳定着火的着火源

高速混气流中火焰稳定

4. 利用不对称射流(偏置射流)稳定火焰

- **特点：**一次风燃料气流通过下偏置的一次风管进入圆形或矩形截面预燃室；略向上倾斜的一次风管下方另设偏置射流
- **原理：**主射流(一次风燃料气流)喷入，卷吸周围介质，形成大回流区；偏置风投入，使主射流倾斜，回流区扩大；燃料气流直接进入回流区，形成高温、高燃料浓度、较高 O_2 浓度的三高区域，成为的稳定点火源



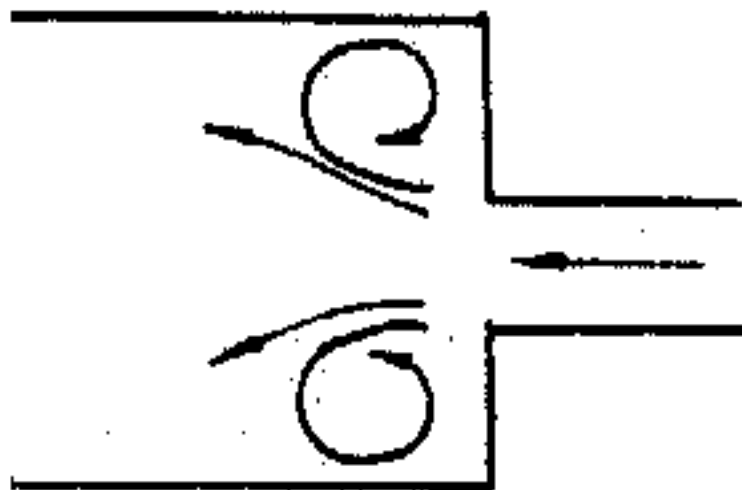
偏置射流燃烧室

1—一次风 2—吹灰风 3—预燃室

高速混气流中火焰稳定

5. 突扩管道等

- 原理：主射流喷入，卷吸周围介质，形成回流区；



突扩管道的流动

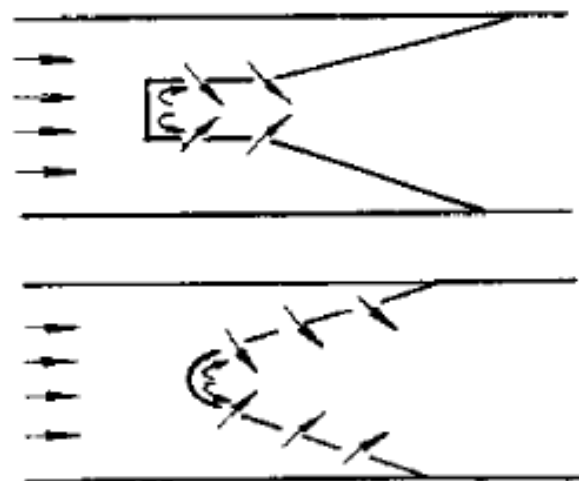


图 6-26 利用带孔圆筒稳定火焰
(罐式火焰稳定器)

高速混气流中火焰稳定

