



第六章 液体燃料燃烧

第一节 液体燃料的特性

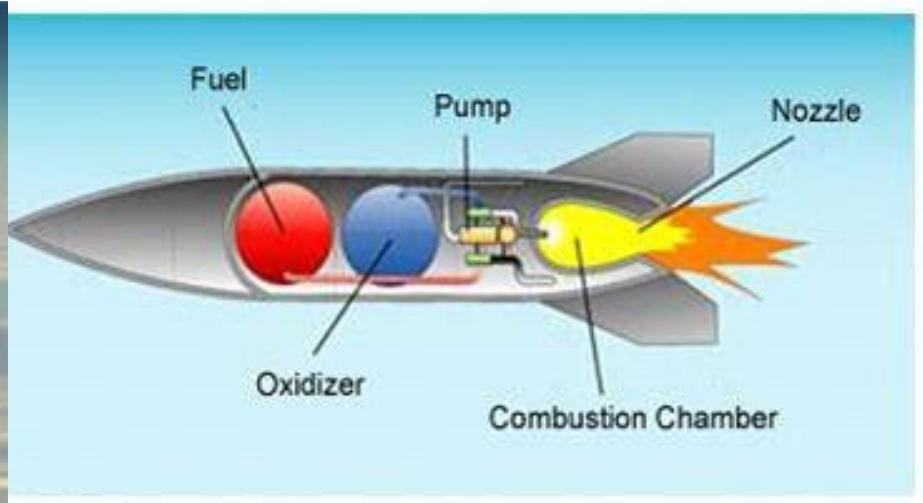
第二节 液体燃料的雾化

第三节 液滴的蒸发

第四节 液滴燃烧



學





问题：

汽车油改气的实现，为什么？

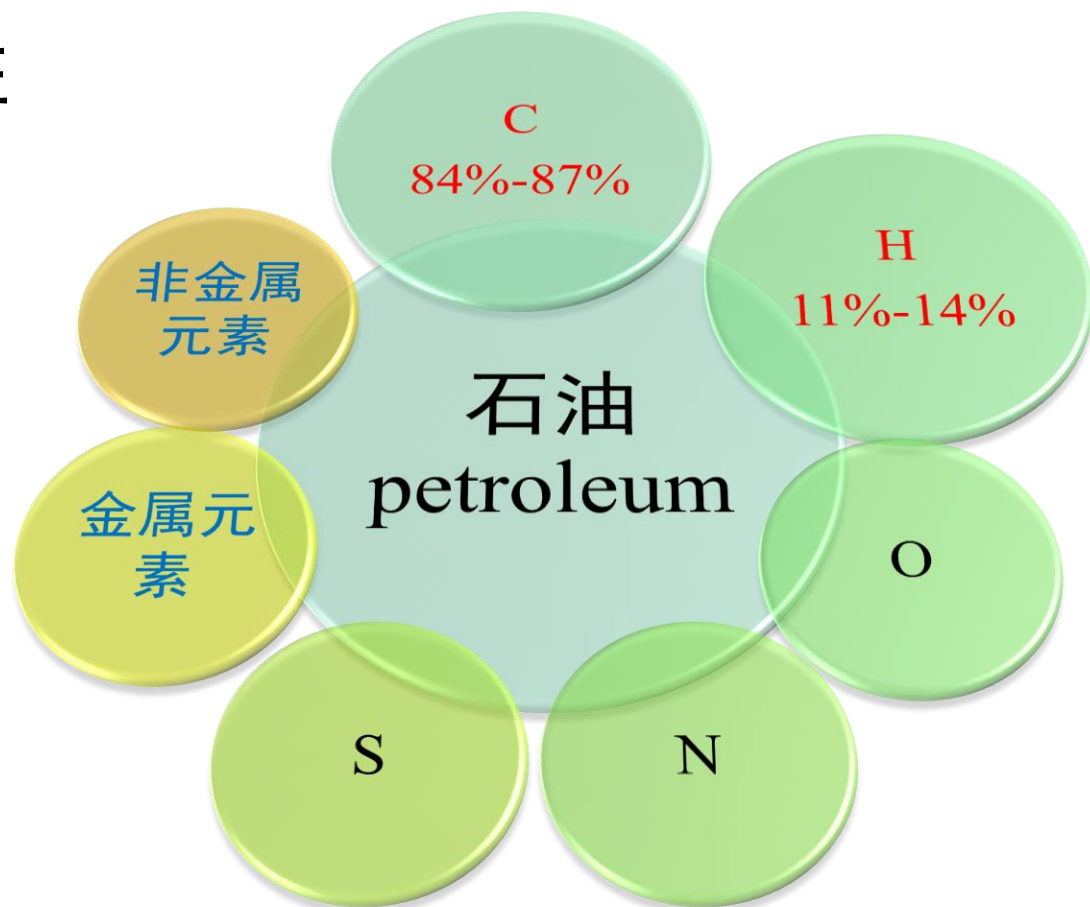
液体燃料和气体燃料的燃烧有何异同？



第一节 液体燃料的特性

一、油类燃料特性

1. 石油的元素组成





2. 碳氢化合物和胶状沥青物质

碳氢化合物是组成石油的主要成分，主要的烃类有：

烷类

- C_nH_{2n+2} ，常温常压下，可以为气态（甲烷，乙烷），液态（戊烷等）和固态(十八烷)等，性能稳定，不易自燃，主要集中在石油气体和低沸点的馏分中

环烷类

- C_nH_{2n} ，饱和脂环烃化合物，是石油的主要成分，环烷烃化学性质类似于开链烷烃，小环烷烃分子不稳定

芳香族

- C_nH_{2n-6} ，具有强烈的芳香味，如甲苯，但在石油中含量较少



■ 胶状沥青物质

由大分子非烃类组成的复杂混合物，相对分子质量较大，沸点较高，含量可达40%-50%，一般为百分之几。

胶状物中C、H外除，还含有O，S，和N的化合物，是高分子有机化合物，相对分子质量高，不易挥分，绝大部分都集中在石油的残渣中。



3. 石油的炼制

最基本的炼制方法是直接蒸馏法，利用石油中不同成分具有不同沸点的特点，对石油进行加热蒸馏，可以把石油分成不同沸点范围(即馏程)的蒸馏产物。每一个馏程内的产物称为馏分，它仍然是多种烃类的混合物。石油炼制中，各馏分的名称及温度范围大致如表5-1所列。

馏分	轻馏分		中馏分			重馏分	
	石油气	汽油	煤油	柴油	重瓦斯油	润滑油	渣油
温度 / °C	<35	35-190	190-260	260-320	320-360	360-530	>530



二、其它液体燃料

1.水煤浆

2.其他合成液体燃料

生物质燃料油、甲醇、乙醇、二甲醚等



油燃烧特点

雾化

受热蒸发

扩散混合

燃烧

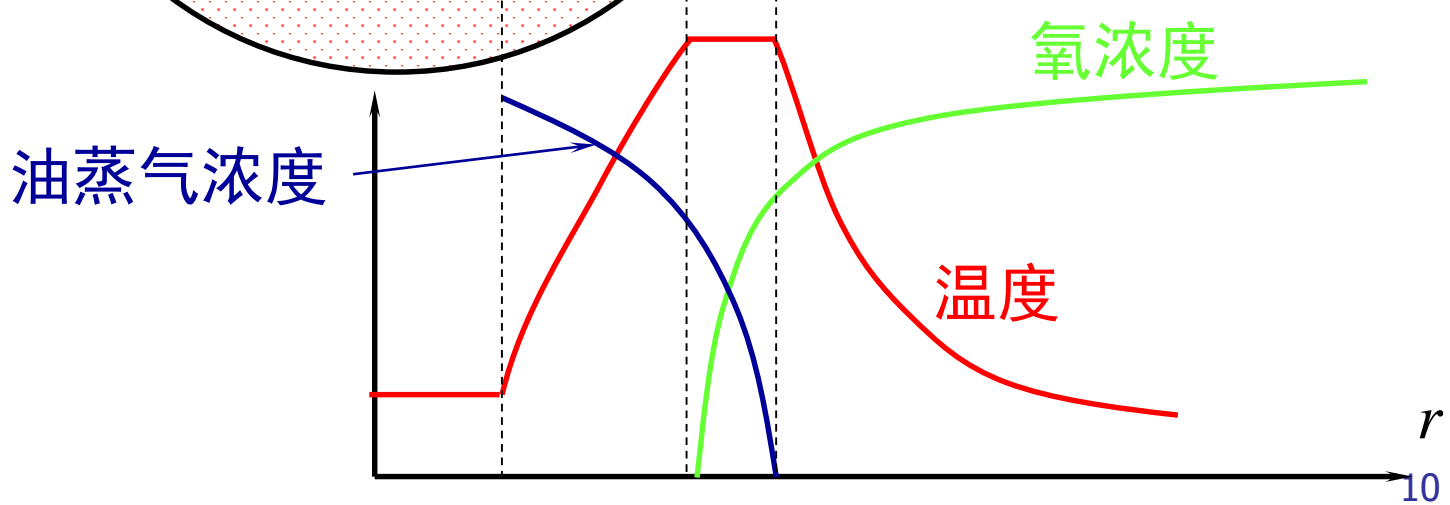
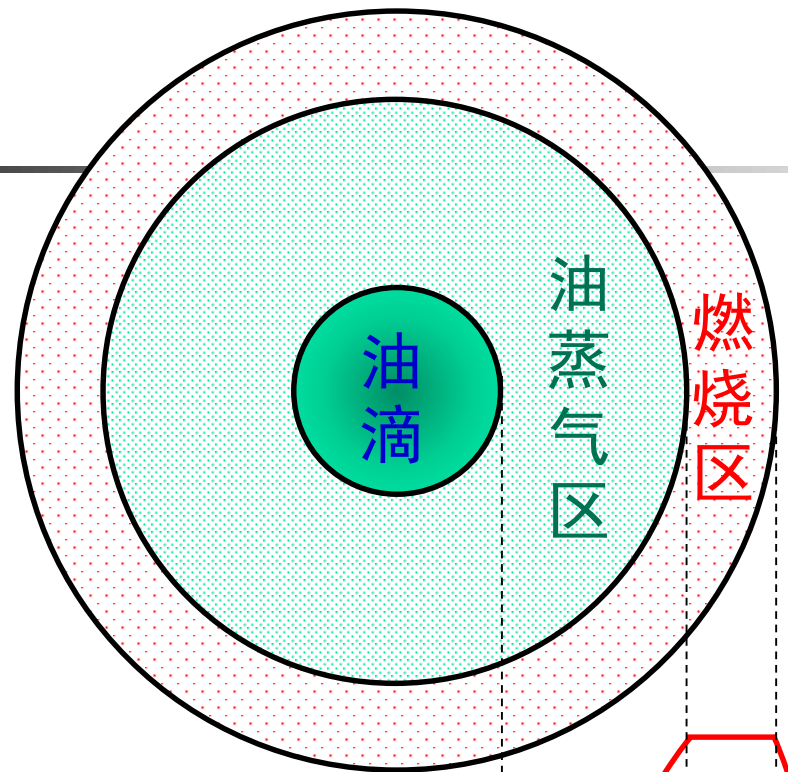
油燃烧是一个复杂的物理化学过程，由于油沸点低于其燃点，因此油滴总是先蒸发成气体，并以气态的方式进行燃烧。

■ **雾化**：燃料→细滴→油雾炬，雾滴粒径↓，表面积↑

增加了燃料的比表面积，有利于油滴的气化过程，同时也有利于与空气的混合，保证燃烧质量。



油滴的燃烧是一种扩散燃烧





第二节 液体燃料的雾化

控制雾化的准则数：Weber数和Ohnesorge数

$$We_g = \frac{\rho_g d_l (u_l - u_g)^2}{\sigma}$$

惯性力与表面张力的比值
(韦伯数)

$$Oh_d = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l d_l \sigma}}$$

粘性力与表面张力的比值
(奥内佐格数)

ρ_g ——气体密度，单位为 kg/m^3 ；

u_l 、 u_g ——分别为液体、气体速度；单位为 m/s ；

σ ——液体表面张力，单位为 N/m ；

d_l ——液滴的直径，单位为 m 。

μ_l ——流体粘性系数；

ρ_l ——流体密度；



一、雾化过程及机理

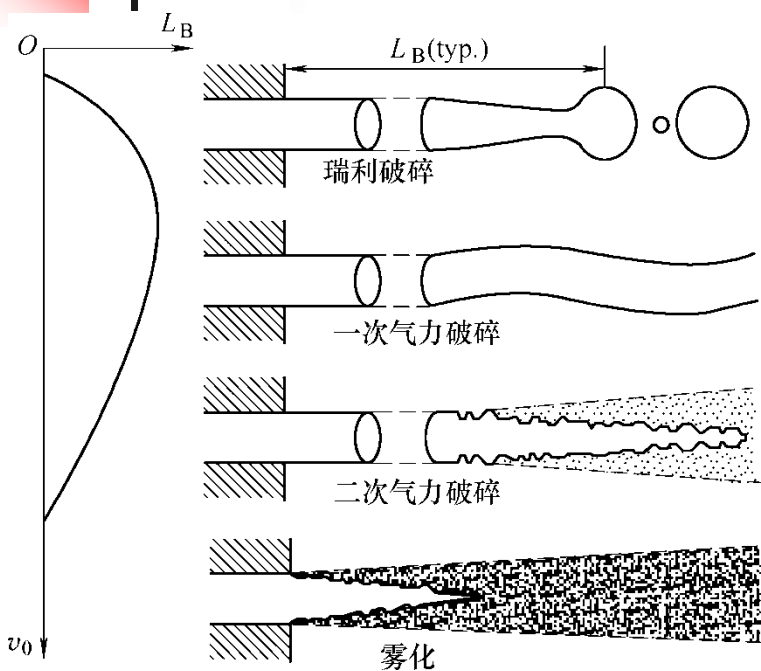


图5-4 不同参数下，
不同射流的破碎状况

- 射流速度非常低时，液流成滴（如水龙头滴水）。假如流体速度足够大，但仍然很低，射流为瑞利破碎，液体惯性与表面张力竞争，瑞利破碎使液滴直径几乎为射流两倍。
- 射流速度增加，转化为气力破碎， $(We_g \approx 1.0)$ 射流弯曲破碎，液滴直径接近射流器直径。射流速度继续增加，表面不稳定性助长了螺旋不稳定性，破碎为一系列不同尺寸的液滴，直径达到射流器直径。
- 再高的韦伯数 $(We_g > 10 \sim 40)$ ，射流在射流器出口破碎。该状态也叫做气力雾化，生成非常小的液滴。



一、雾化过程及机理

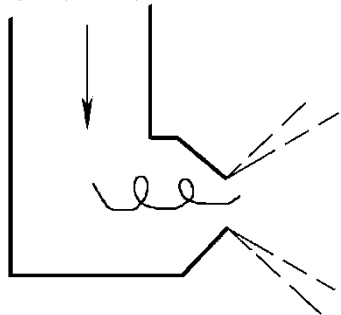
根据雾化过程和机理的分析可以看出，在工程中强化液体燃料雾化的主要方法有：

- 第一，提高液体燃料的喷射压力，喷射压力越高（喷射速度越大），雾化得越细。
- 第二，降低液体燃料的粘度与表面张力，如提高燃油的温度可降低燃油的粘度与其表面张力。
- 第三，提高液滴对空气的相对速度。而且增强液体本身的湍流扰动也可提高雾化效果。

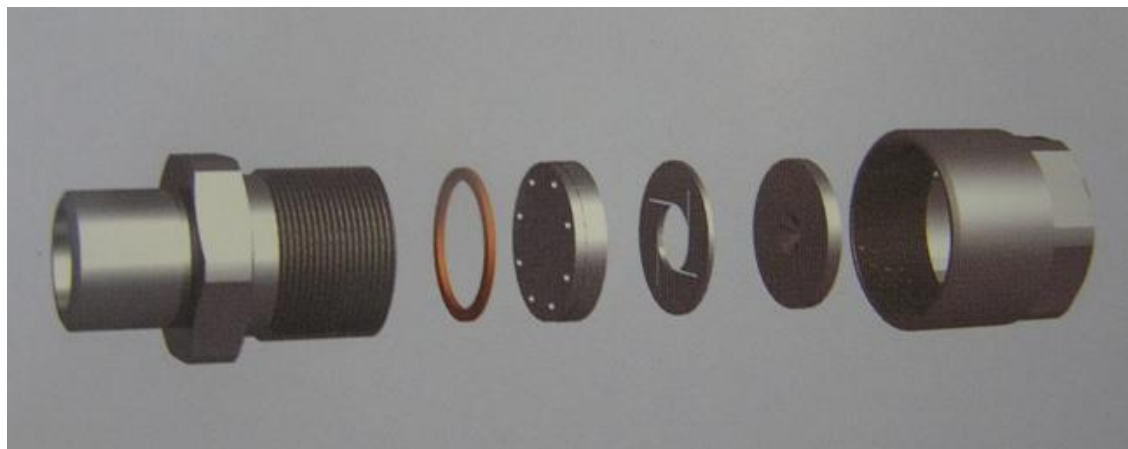


二、三大类典型的喷嘴结构

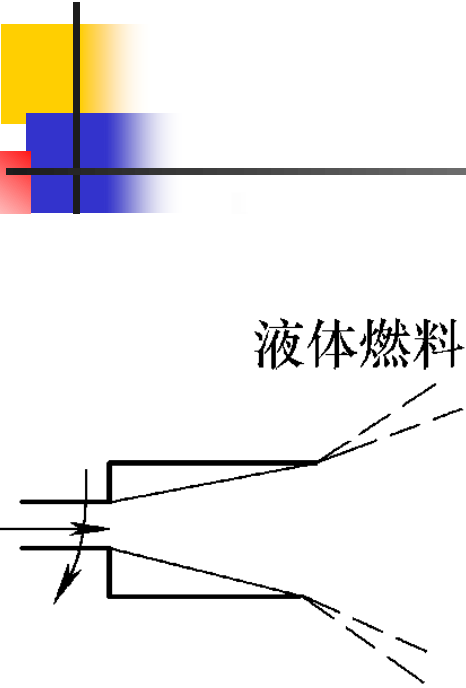
液体燃料



a)



压力式喷嘴（机械雾化） 是利用喷嘴进出口压差实现液滴从液体射流中分离



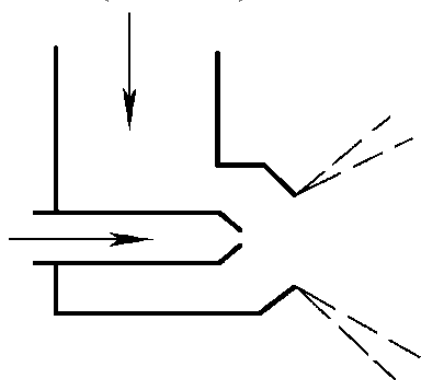
b)



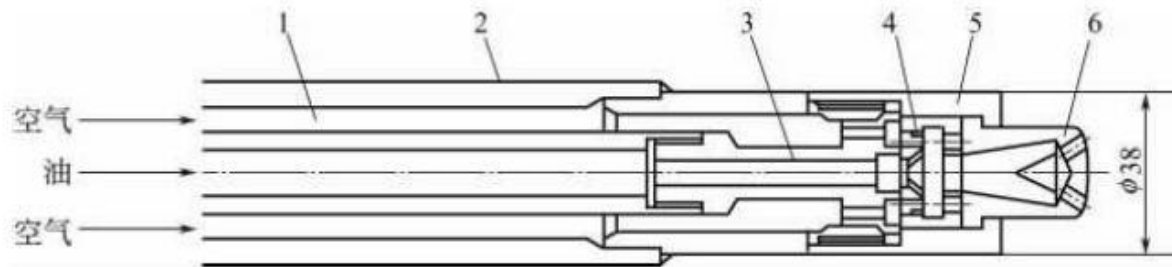
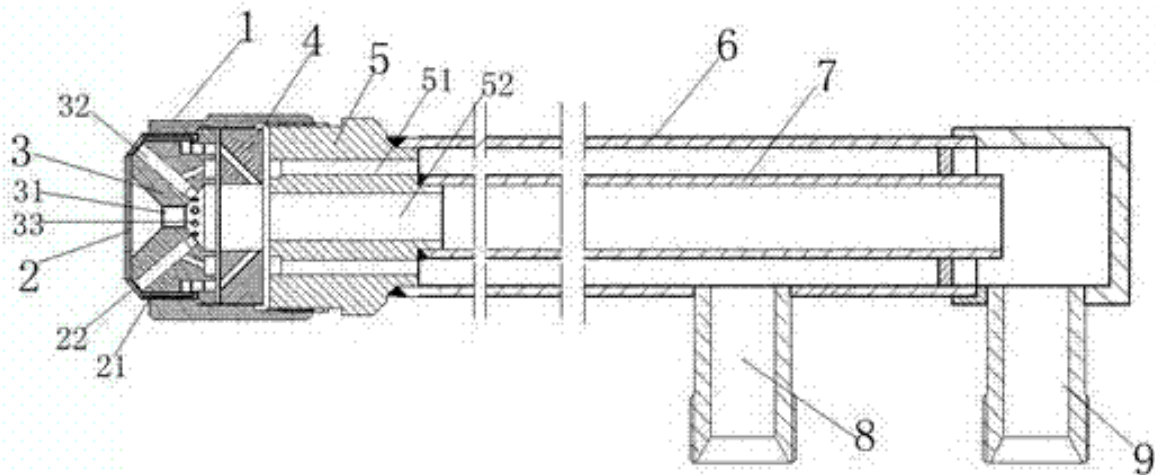
旋转式喷嘴（转杯雾化） 是利用喷嘴进出口压差和旋转离心力使液膜失稳而分离出液滴



空气(蒸汽)



c)



超声波雾化燃烧器 (UM 型)

1—内管; 2—外管; 3—隔离管; 4—超声波发生器; 5—锁紧压盖; 6—油雾化喷口

气动式喷嘴 (介质雾化) 则是利用空气和蒸汽作雾化介质使液滴从液体燃料中分离

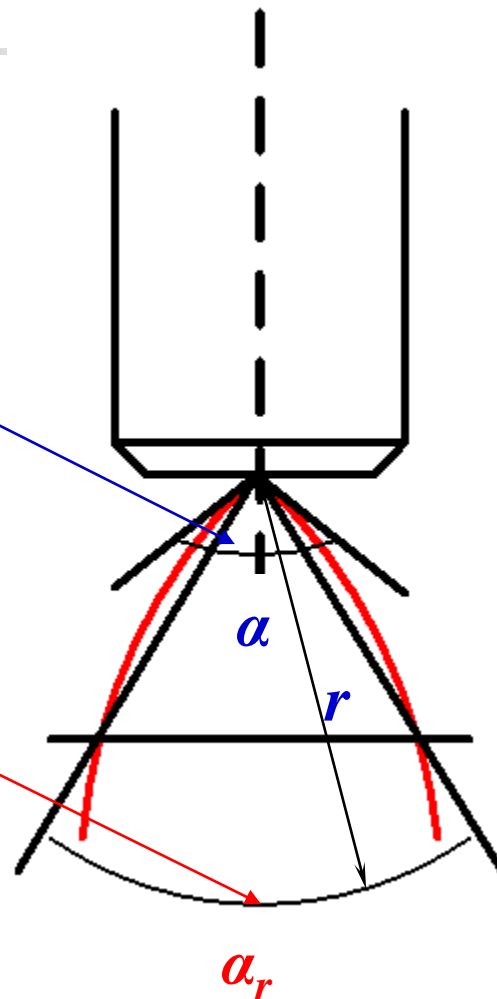


三、 液体燃料雾化性能

1、 雾化角

- 出口雾化角：在喷嘴出口处，做雾化锥边界切线，夹角为出口雾化角 α 。

- 条件雾化角：离开喷嘴一定距离 x 处，做垂直于油雾化锥中心线的垂线，与雾化锥边界相交于两点，两点与喷嘴中心相连得两线，夹角为 α_r 。





雾化角过大：

- ◆ 雾化角过大，油滴将会穿出湍流最强的空气区域而造成混合不良，燃烧不完损失增加，降低燃烧效率
- ◆ 燃油喷射到炉墙或燃烧室壁上造成结焦或积灰现象
- ◆ 火焰短而粗

雾化角过小：

- ◆ 使燃油液滴不能在效分布到整个燃烧室空间，与空气混合不良，使局部过量空气系数过大，着火困难和燃烧不良
- ◆ 火焰细而长

雾化角的大小对燃烧完善程度和经济性有很大的影响



2、雾化液滴细度：表示油滴颗粒大小的指标

(40~400 μm)表示油滴颗粒大小的指标，有平均直径，最大直径，中值直径等，常用平均直径法（又包含算术平均法，表面积平均法，体积平均法，质量平均法等）

索太尔平均直径 (S. M. D) $d_{SMD} = \frac{\sum N_i d_{1i}^3}{\sum N_i d_{1i}^2}$ (体面积平均直径)

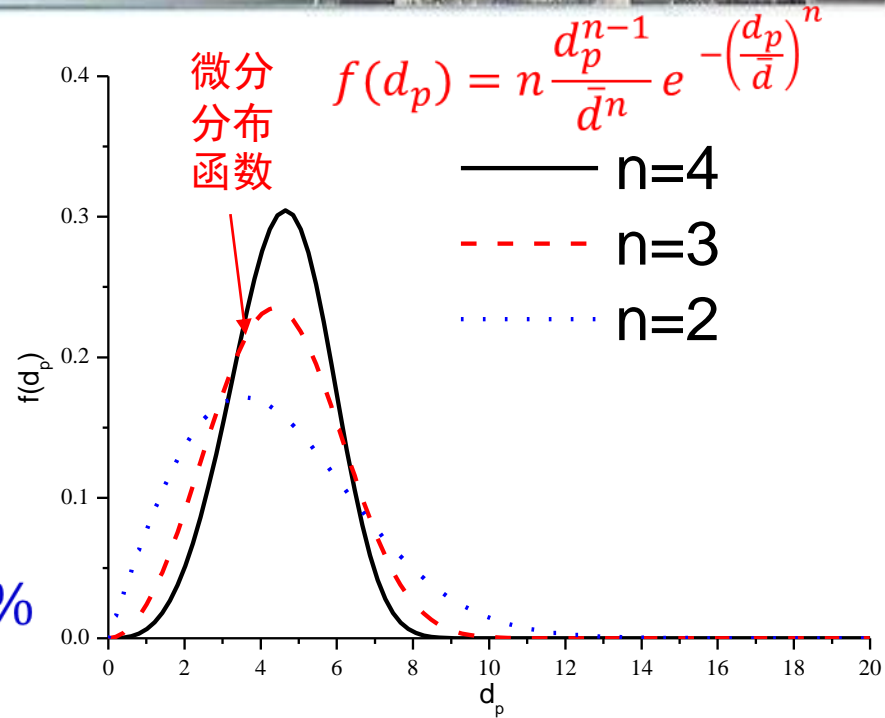
雾化粒径过粗：比表面积小，蒸发和燃烧速率低，使燃尽时间长，不完全燃烧损失大；

雾化粒径过细：油滴微粒易被气流带走；易造成局部地区燃料过富或过贫，不利于燃烧的安全与稳定。



3、雾化油滴均匀性

罗辛—拉姆勒(Rosin—Rammmler)
分布函数 (粒度均匀性指标)



积分分布函数

$$F(d_p) = e^{-\left(\frac{d_p}{\bar{d}}\right)^n}$$

$$R = 100 \exp\left(-\left(\frac{d_{1i}}{d_{1m}}\right)^n\right) \%$$

R: 液滴群中, 颗粒直径大于 d_{1i} 的质量分数

n: 均匀系数, 一般数值1~4。n值越大, 均匀性越好

d_{1m} : 特征尺度 (定义为 $R_d = \frac{1}{e} = 36.8\%$ 时油滴直径)

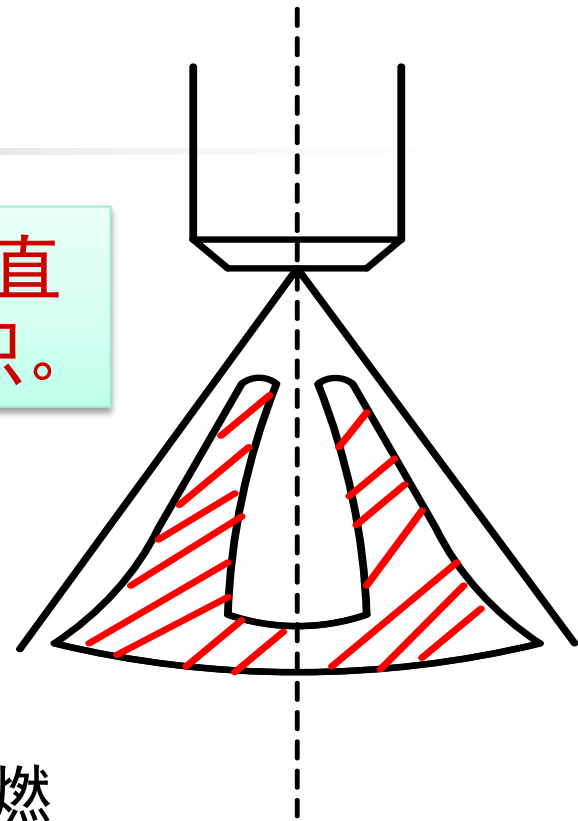
雾化均匀度差: 大液滴数目多, 不利于燃烧。

雾化过分均匀: 粒径集中, 使燃烧稳定性和可调节性变差。



4、喷雾射程：水平方向喷射时，喷雾液滴丧失动能时所能到达的平面与喷口之间的距离。

雾化角大和雾化很细的喷雾炬，射程比较短；密集的喷雾炬，由于吸入的空气量较少，射程比较远。一般射程长的喷雾炬所形成的火焰长度也长。



5、流量密度：单位时间内，流过垂直于油雾方向的单位面积上的燃油体积。

$$q_r \quad \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m}^2) \rightarrow \text{m/s}$$

流量分布密度对燃烧过程影响较大：

分布均匀的液流能将液体燃料分散到整个燃烧空间，并能在较小的空气扰动下获得充分的混合与燃烧。

流量分布密度通常是用实验方法测得。



单体式

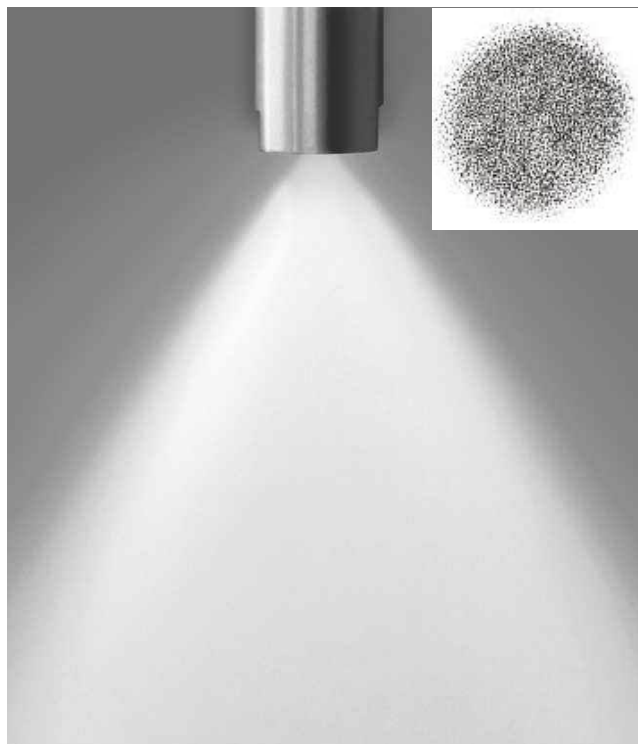


分体式



实心喷嘴

空心喷嘴





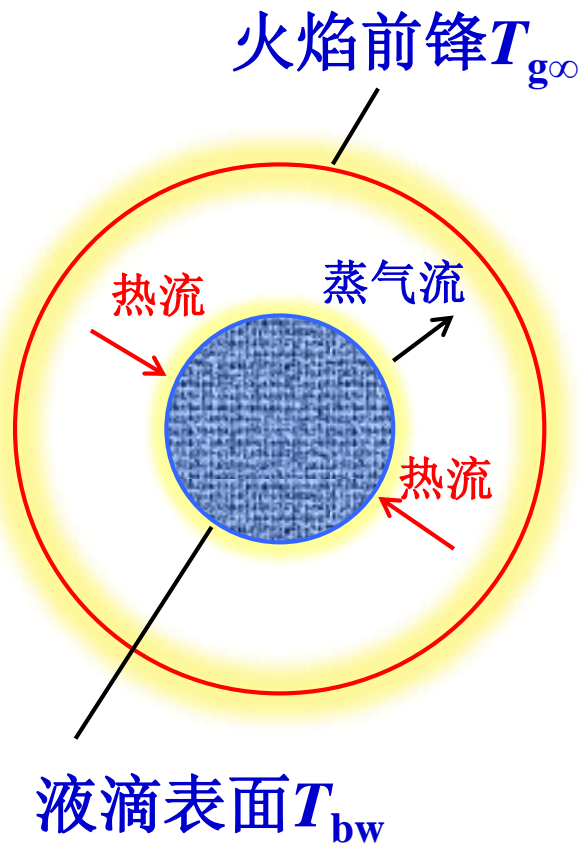
雾化质量
评价指标

- ① 雾化角
- ② 雾化液粒细度
- ③ 雾化油滴均匀性
- ④ 喷雾射程
- ⑤ 流量密度



第三节 液滴的蒸发

一、相对静止环境中液滴的蒸发



两份热量的平衡：

液滴所得的热量 = 液滴蒸发所需的汽化潜热

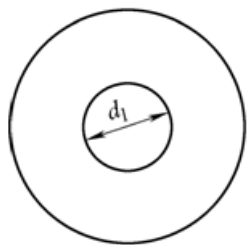
此时的温度就称为液滴蒸发时的平衡温度 T_{bw} 。

燃料蒸发掉的数量就等于扩散出去的燃料蒸气量，即蒸发速度等于扩散速度。

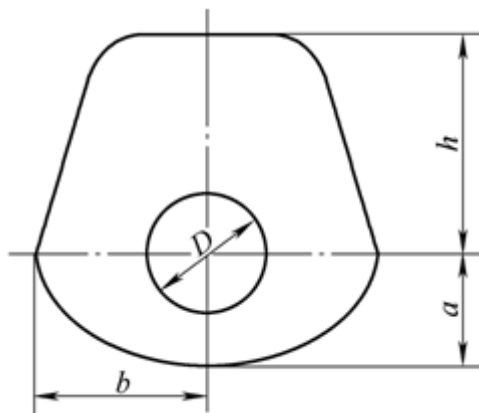


二、强迫气流中液滴的蒸发

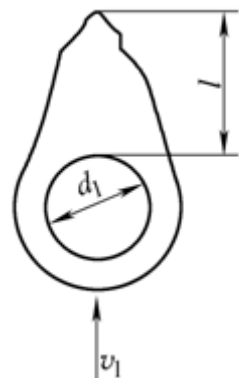
- 实际上液滴在蒸发和燃烧时，往往和气流有相对速度，即使在静止气流中蒸发和燃烧。
- 由于油滴和气流存在着温差，也会出现有明显的自然对流现象。



理想情况



有自然对流



和气流有
相对速度



相对速度大
于临界值

气流流速对液滴边界层的影响

当液滴喷射到炉内时，往往和气流存在有较大的相对速度，此时，液滴蒸发速度变快。



三、液滴群的蒸发

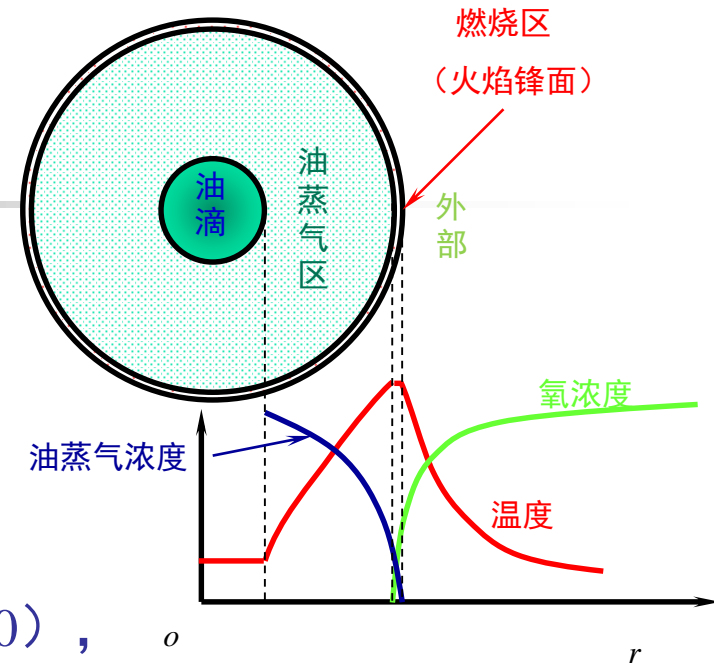
在实际喷嘴雾化过程中所形成液滴是由大小不同的液滴组成。细颗粒会先蒸发，而粗颗粒后蒸发。蒸发的过程和液滴颗粒群的粒径分布有关。

总的说来，液滴颗粒群的粒径分布均匀度越高，越容易控制整体的蒸发过程。



第四节 液滴燃烧

一、静止液滴的燃烧



- 1、油滴为球形，其周围温度场、浓度场均匀
- 2、油滴随气流而动，与气流间无相对运动 ($Re=0$)，忽略蒸发引起的宏观流动 (忽略斯蒂芬流)
- 3、油滴表面温度近似等于饱和温度 $T_0=T_b$
- 4、火焰锋面向内向外导热传递 (忽略辐射)，**向内导热量=产生的油气所需汽化潜热量+油气温度升高所需热量**，
- 5、油蒸气穿过锋面逃逸的量=0
- 6、 O_2 从远方扩散而来在锋面上全部消耗掉，锋面 O_2 的浓度=0，且 O_2 扩散到锋面的量符合化学反应中氧与油的化学计量比 β



火焰锋面内侧的平衡关系： 热量平衡方程

火焰锋面向内导热热量

油气温度升高所需热量

$$4\pi r^2 \lambda \frac{dT}{dr} = q_m [c_p (T - T_0) + H]$$

产生的油气所需汽化潜热量

λ : 气体导热系数

c_p : 气体比热

T : 当地 (r 处) 温度

T_0 : 油滴表面温度 (饱和温度)

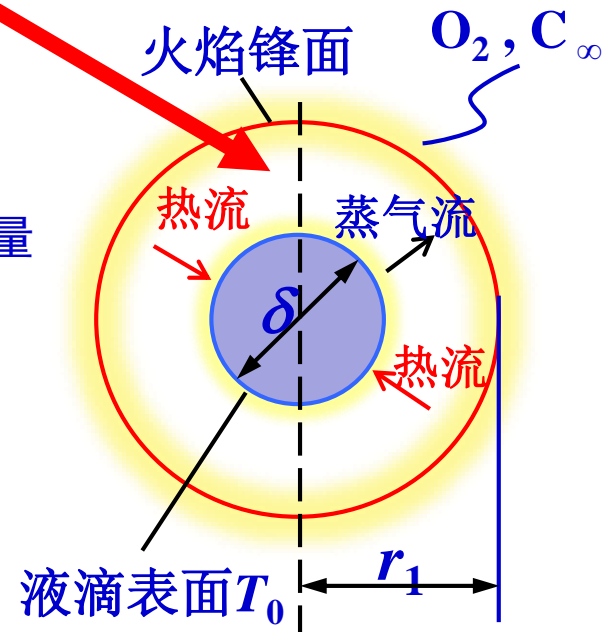
T_r : 火焰锋面温度

q_m : 油气流量 (气化量)

H : 单位质量油汽化潜热

r_0 : 油滴半径

r_1 : 火焰锋面半径





对上式在油滴表面 (r_0, T_0) 到火焰锋面 (r_1, T_r) 积分

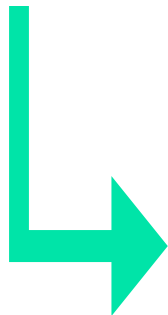
r_0 : 油滴半径

T_0 : 油滴表面温度 (饱和温度)

r_1 : 火焰锋面半径

T_r : 锋面火焰温度 (燃烧温度)

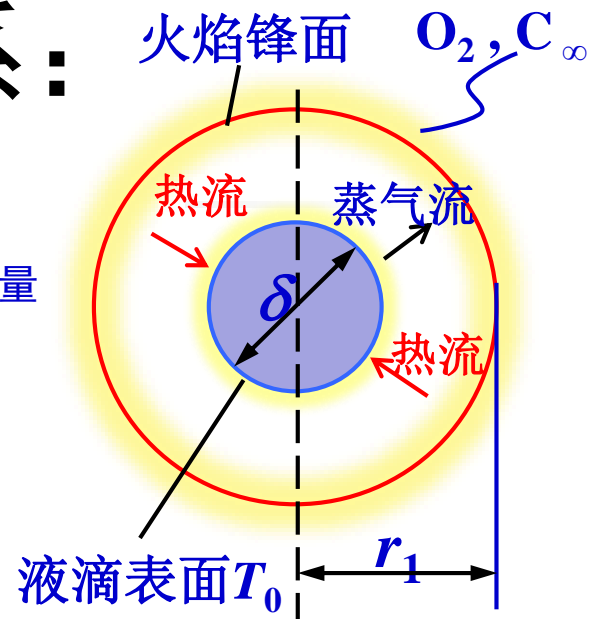
$$\int_{T_0}^{T_r} 4\pi\lambda \frac{dT}{c_p(T - T_0) + H} = \int_{r_0}^{r_1} q_m \frac{dr}{r^2} \rightarrow \frac{4\pi\lambda}{c_p} \ln \left(1 + \frac{c_p(T_r - T_0)}{H} \right) - 0 = q_m \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)$$



$$q_m = \frac{4\pi\lambda}{c_p \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] \quad (1)$$



火焰锋面外侧的平衡关系： 氧量及燃料量的物质平衡方程



外侧的氧气向火焰锋面的传质量

油蒸气燃烧的化学计量比所需的氧量

$$4\pi r^2 D \frac{dC}{dr} = \beta q_m$$

边界条件：在 ∞ 处 O_2 浓度 C_∞ ， $r=r_1$ 处 $C=0$

$$\int_0^{C_\infty} 4\pi D dC = \int_{r_1}^{\infty} \beta q_m \frac{dr}{r^2} \quad \longrightarrow \quad 4\pi D (C_\infty - 0) = -\beta q_m \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$r_1 = \frac{\beta q_m}{4\pi D C_\infty} \quad (2)$$



$$r_1 = \frac{\beta q_m}{4\pi DC_\infty} \quad \text{带入} \quad q_m = \frac{4\pi\lambda}{c_p\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1}\right)} \ln\left[1 + \frac{c_p}{H}(T_r - T_0)\right]$$

$$\Rightarrow q_m = \frac{4\pi\lambda}{c_p\left(\frac{1}{r_0} - \frac{4\pi DC_\infty}{\beta q_m}\right)} \ln\left[1 + \frac{c_p}{H}(T_r - T_0)\right]$$

$$\Rightarrow q_m \frac{c_p}{r_0} - \frac{c_p 4\pi DC_\infty}{\beta} = 4\pi\lambda \ln\left[1 + \frac{c_p}{H}(T_r - T_0)\right]$$

$$\Rightarrow q_m \frac{c_p}{r_0} = 4\pi\lambda \ln\left[1 + \frac{c_p}{H}(T_r - T_0)\right] + \frac{c_p 4\pi DC_\infty}{\beta}$$

$$\Rightarrow q_m = 4\pi r_0 \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln\left[1 + \frac{c_p}{H}(T_r - T_0)\right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$



$$q_m = 4\pi r_0 \left\{ \frac{\lambda}{C_p} \ln \left[1 + \frac{C_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

q_m : 气化量，火焰锋面单位时间消耗的燃料量

令 $k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{C_p} \ln \left[1 + \frac{C_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$ 得 $q_m = \frac{\pi k \rho_r \delta}{4}$

颗粒
密度

颗粒
直径

k : 燃烧速率常数，由实验确定

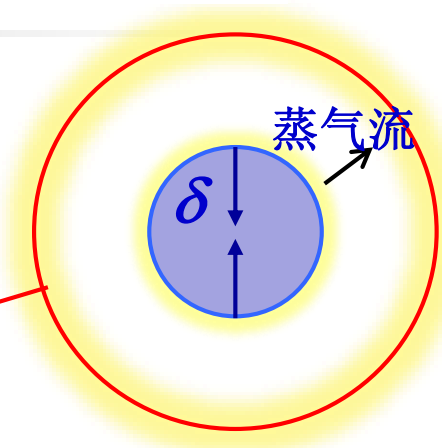


缩核模型：燃烧过程中油滴直径不断缩小

$$\tau = 0 \rightarrow \tau \rightarrow \tau_{rj} \text{ 时} \quad \delta = \delta_0 \rightarrow \delta \rightarrow 0$$

$$-\frac{d}{dt} \left(\rho_r \frac{\pi}{6} \delta^3 \right) = q_m = \frac{\pi k \rho_r \delta}{4}$$

火焰锋面



$$\rightarrow -\rho_r \frac{3\pi}{6} \delta^2 \frac{d}{dt} (\delta) = \frac{\pi k \rho_r \delta}{4} \rightarrow 2\delta d(\delta) = -k dt$$

$$\rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta} d(\delta^2) = - \int_0^{\tau} k dt \rightarrow \delta_0^2 - \delta^2 = k\tau$$

粒径平方-直线定律



$$\delta_0^2 - \delta^2 = k\tau \quad \longrightarrow \quad \tau = \frac{\delta_0^2 - \delta^2}{k}$$

① $\delta^2 \sim \tau$ 线性变化

② 燃尽时间 $\delta = 0 \rightarrow \tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k}$ ， $\delta_0 \downarrow$ 则 $\tau_{rj} \downarrow$ ，雾化质量是控制油滴燃烧的关键因素。

③ 该定律是针对扩散火焰的。

④ 如果油滴与气体间有相对运动，则两者之间的热质交换都要增强，燃烧强化。



- ⑤ 油气在扩散到火焰锋面前遇不到氧，不可避免裂解，总是发光火焰。
- ⑥ 燃油是多种烃混合物，燃烧时，轻质组分先蒸发燃烧，残渣裂解析碳而焦化。甚至残余液滴被半固态粘性外壳包封 → 受热蒸汽冲破外壳 → 焦粒按固体燃烧规律燃尽。



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

① $\rho_r \downarrow \rightarrow k \uparrow$ ，轻质油的燃烧速度更快。

措施：调整燃料成分汽油C4~C10，煤油C9~C16，柴油 C15~C18

部分烃类的相对密度

烃类	C6	C7	C8	C9	C10
正构烷烃	0.6594	0.6837	0.7025	0.7161	0.7300
正构 α -烯烃	0.6732	0.6970	0.7149	0.7292	0.7408
正烷基环己烷	0.7785	0.7694	0.7879	0.7936	0.7992
正烷基苯	0.8789	0.8670	0.8670	0.8620	0.8601



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

② $\lambda/c_p \uparrow \rightarrow k \uparrow$ 燃烧更快。

部分气体的 λ/c_p 值($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

甲烷 137.6×10^{-5}

乙烷 104×10^{-5}

丙烷 89.2×10^{-5}

丁烷 80.3×10^{-5}

戊烷 77.9×10^{-5}

庚烷 152.9×10^{-5}

措施：调整燃料成分



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

③ $H \downarrow \rightarrow k \uparrow$ ，汽化潜热少，燃烧更快。

部分液体常压下汽化潜热 kJ/kg

汽油310

甲醇1109

乙醇884

甲烷511

乙烷486

丙烷423

正丁烷384

正戊烷356

正庚烷310

压力 $p \uparrow \rightarrow H \downarrow$ 汽化潜热减少

措施：

- 调整燃料成分
- 增压燃烧



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

④ $T_r \uparrow \rightarrow k \uparrow$ ，燃烧温度高，燃烧更快。

措施：

- 减弱散热
- 控制过量空气系数
- 提升燃料发热量
- 对进入燃烧室的空气和燃料进行预热



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

⑤ $T_0 \downarrow \rightarrow k \uparrow$ ，油的饱和温度低，燃烧更快。

沸点随含碳量增加而升高，如 $C_2H_6 > CH_4$ 。

相同烃的同分异构体支链越多，沸点越低。

- 1) 先比C原子的个数，C原子的个数越多，沸点越高。
- 2) 当C原子的个数一样多的时候（即同分异构体的时候），支链越多，沸点越低（比如说：正戊烷、异戊烷、新戊烷，它们的沸点逐渐降低）。

措施：

- 调整燃料成分



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

⑥ $D \uparrow \rightarrow k \uparrow$ ，湍流传质能力强，燃烧更快。

措施：

- 强化湍流扰动



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

⑦ $C_\infty \uparrow \rightarrow k \uparrow$ ，环境氧浓度高，燃烧更快。



西安交通大学

xi'an jiaotong university

能源与动力工程学院
School of Energy & Power Engineering

<http://epe.xjtu.edu.cn>



土豆



快剪辑



아니

크바의 아사화질스

- 一氧化亚氮吗 - 不 费南多

这是古巴版的氧化亚氮

- Laughing gas? - Nah, Fed. This is cuban NOS.

快剪辑



西安交通大学

xi'an jiaotong university

能源与动力工程学院
School of Energy & Power Engineering

http://epe.xjtu.edu.cn



土豆

임시 터보엔진
진공 배관 빼놓고 기다려

- 你这是干什么 - 山寨版涡轮

- What are you doing? - Warm as turbo.

快剪辑



⑦ $C_{\infty} \uparrow \rightarrow k \uparrow$ ，环境氧浓度高，燃烧更快。

措施：

- 增大过量空气系数
- 涡轮增压技术
- 富氧/纯氧燃烧

NITROUS OXIDE SYSTEM (NOS)

氮气加速系统，该系统的准确译称应为：**氮氧化物加速系统**。是由美国HOLLEY公司开发生产的产品。

NOS的工作原理是把 N_2O 加压液化后装入钢瓶中，然后在发动机内与空气一道充当助燃剂与燃料混合燃烧（ N_2O 可放出氧气和氮气，其中氧气就是关键的助燃气体，而氮气又可协助降温）， N_2O 高温时产生两个氮原子一个氧原子，氧原子助燃，氮原子给气缸降温。以此增加燃料燃烧的完整度，提升动力。



提升油滴燃烧速度的措施

$$\tau_{rj} = \frac{\delta_0^2}{k} \quad k = \frac{8}{\rho_r} \left\{ \frac{\lambda}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p}{H} (T_r - T_0) \right] + \frac{DC_\infty}{\beta} \right\}$$

⑧ $\beta \downarrow \rightarrow k \uparrow$ ，单位燃料耗氧量低，燃烧更快。

措施：

- 调整燃料成分，提升H/C比
- 掺氢燃烧



二、强迫气流中液滴的燃烧

对于 $Re=0$ 时,

$$Nu = 2$$

对于 $Re \neq 0$ 时,

$$\frac{Nu^{Re \neq 0}}{Nu^{Re=0}} = 1 + 0.3 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

($Re < 200$)

$$Nu = 2(1 + 0.3 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}})$$

$$\frac{k^{Re \neq 0}}{k^{Re=0}} = \begin{cases} 1.67 & (Re = 10) \\ 3.67 & (Re = 100) \end{cases}$$

$Re \uparrow$, 液滴燃烧速度变快



三、液滴群的燃烧

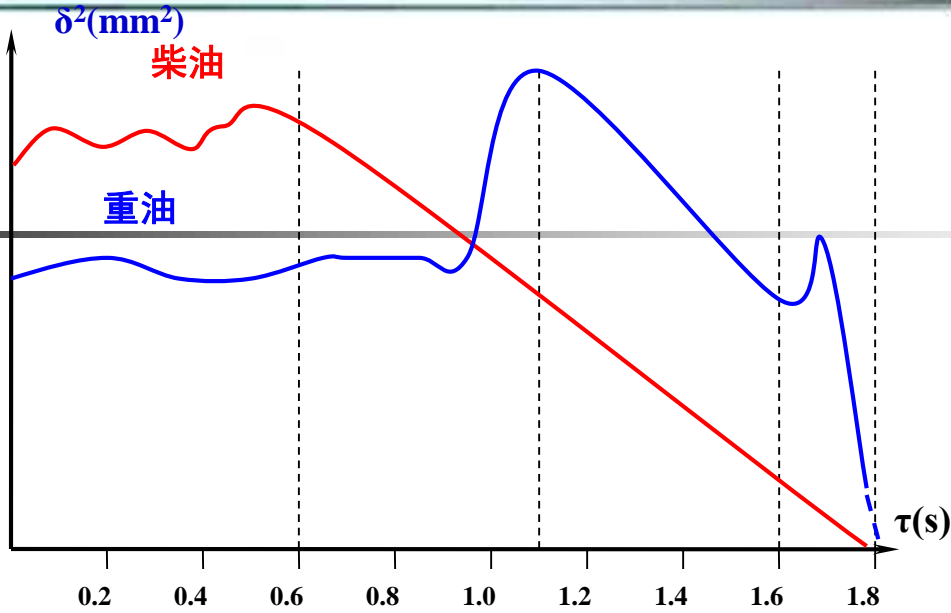
实验研究表明，在液滴群燃烧时，液滴燃烧时间仍遵循着前述的直径平方一直线规律。不过此时燃烧速度常数 k 与孤立单滴燃烧时有所不同。某些研究表明，认为 k 值与压力有关，提出了如下的关系式：

$$d_{1,0}^2 - d_1^2 = f(p)k\tau$$

式中 $f(p)$ ——压力 p 的函数，且 $f(p) \leq 1$ 。

Re=0时，液滴群燃烧时 k 的试验结果：

酒精	$k=0.81\text{mm}^2/\text{s}$
柴油	0.79
煤油	0.96
苯	0.97



$\delta^2 \sim \tau$ 曲线

柴油	规律好（轻质油）
重油：初期	油滴受热膨胀， $\delta \uparrow$
稳定期	轻质部分受热蒸发，规律好
后期	重质部分包覆， $\delta \uparrow$ 破裂， $\delta \downarrow$



问题：

扩散燃烧方式易产生不完全燃烧，但油滴的沸点低于燃点，是否可以采用预混燃烧方式呢？



两种液体燃烧方式的火焰类型



雾化燃烧：先雾化，然后在空间中一边气化，一边燃烧。火焰与气体燃烧的扩散火焰相似



气化燃烧：先气化，再燃烧。火焰与气体燃烧的预混火焰相似



两种液体燃烧方式的对比

	雾化燃烧	气化燃烧
油泵	需要	需要
气化换热器	不需要	需要
结焦性	弱	强
系统复杂性	简单	较复杂
设计难度	较容易	较难
实现大型化	容易	难



四、合理配风

- 油雾燃烧基本上属于扩散火焰，不会回火，也不易脱火。
- 保持火焰稳定性主要防止脱火：使用钝体、稳焰器，或者值班火焰
- 也不应使得火焰根部过于接近喷嘴，这样容易引起喷嘴积碳（雾化质量下降）甚至烧坏喷嘴。

良好的液体燃料燃烧要求：

雾化良好

合理配风

充分的混合

调风器的功能：

使空气均匀分配，并可调节；

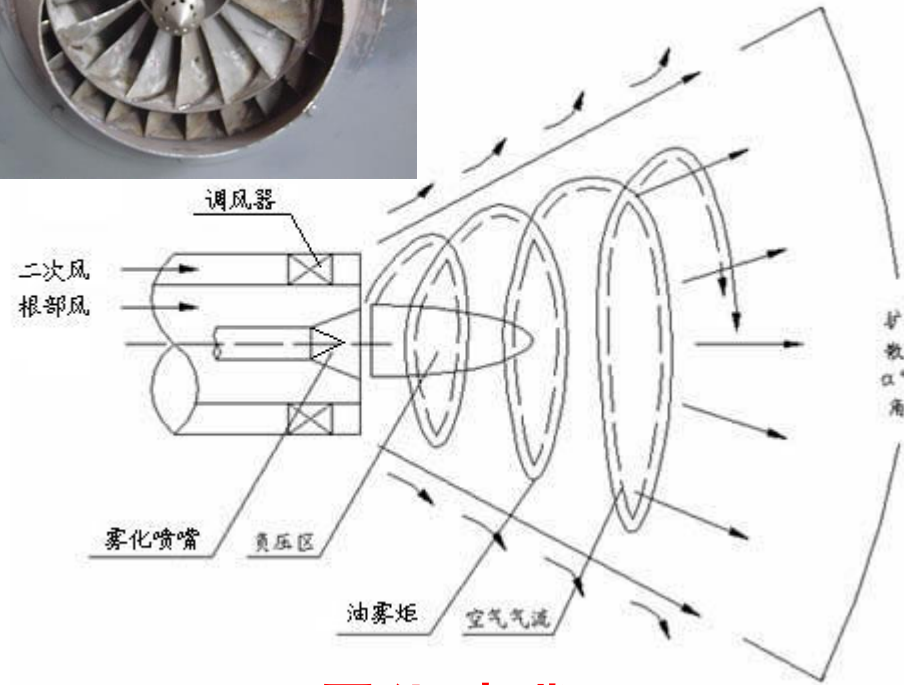
使油雾空气混合良好；

稳定火焰；

油燃烧器有旋流，平流两种



调风器:



- ① **有根部风**（在油还未着火燃烧之前，在油雾根部已有一部分空气混入油雾中，相当于15~30%一次风）——油料易燃，应该及早与氧气混合
- ② **早期混合要强烈**——扩散燃烧，应重点强化空气与油雾的混合
- ③ 有一大小位置适当的**回流区**——防止脱火
- ④ **加强后期混合**——利于残余的难燃组分的燃尽

雾化喷嘴



调风器

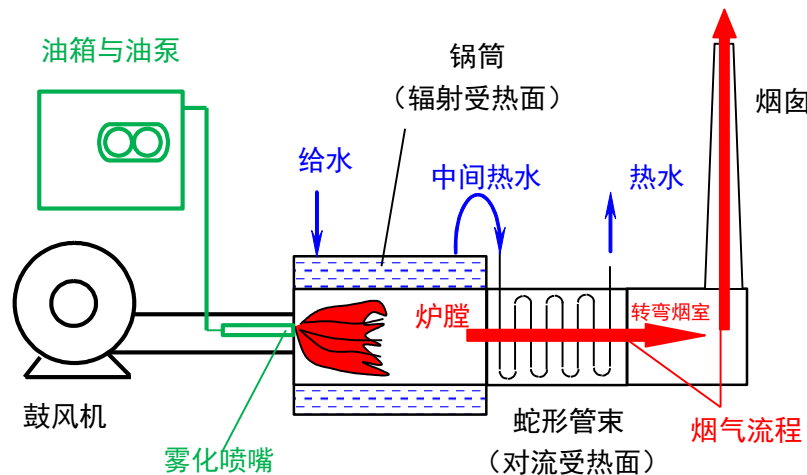


本章作业

试从流动、燃烧与传热的角度分析：
沿海地区的燃油锅炉与青藏高原地区的燃油锅炉设计方案有何区别？
(锅炉的结构型式和热功率相同)

提示：重点探讨雾化喷嘴、油泵、鼓风机、烟囱高度、炉膛容积、炉膛内表面积、对流受热面管束等部件的设计差异。

作业在两周以内以word文档（班级_姓名_学号.DOC）提交到学堂在线平台



燃油锅炉系统示意图