



第四章 着火理论

第一节 着火的基本概念

第二节 热自燃理论

第三节 链式自燃理论

第四节 强迫点燃理论

第五节 火焰传播

第六节 燃烧热工况



第一节 着火的基本概念

一、着火过程

着火的定义：燃料和氧化剂混合后，由无化学反应、缓慢的化学反应向稳定的强烈放热状态的过渡过程，最终在某个瞬间在空间中某个部分出现火焰。

着火过程：是化学反应的速度出现跃变的临界过程，即化学反应从低速状态在短时间内加速到极高速的状态。

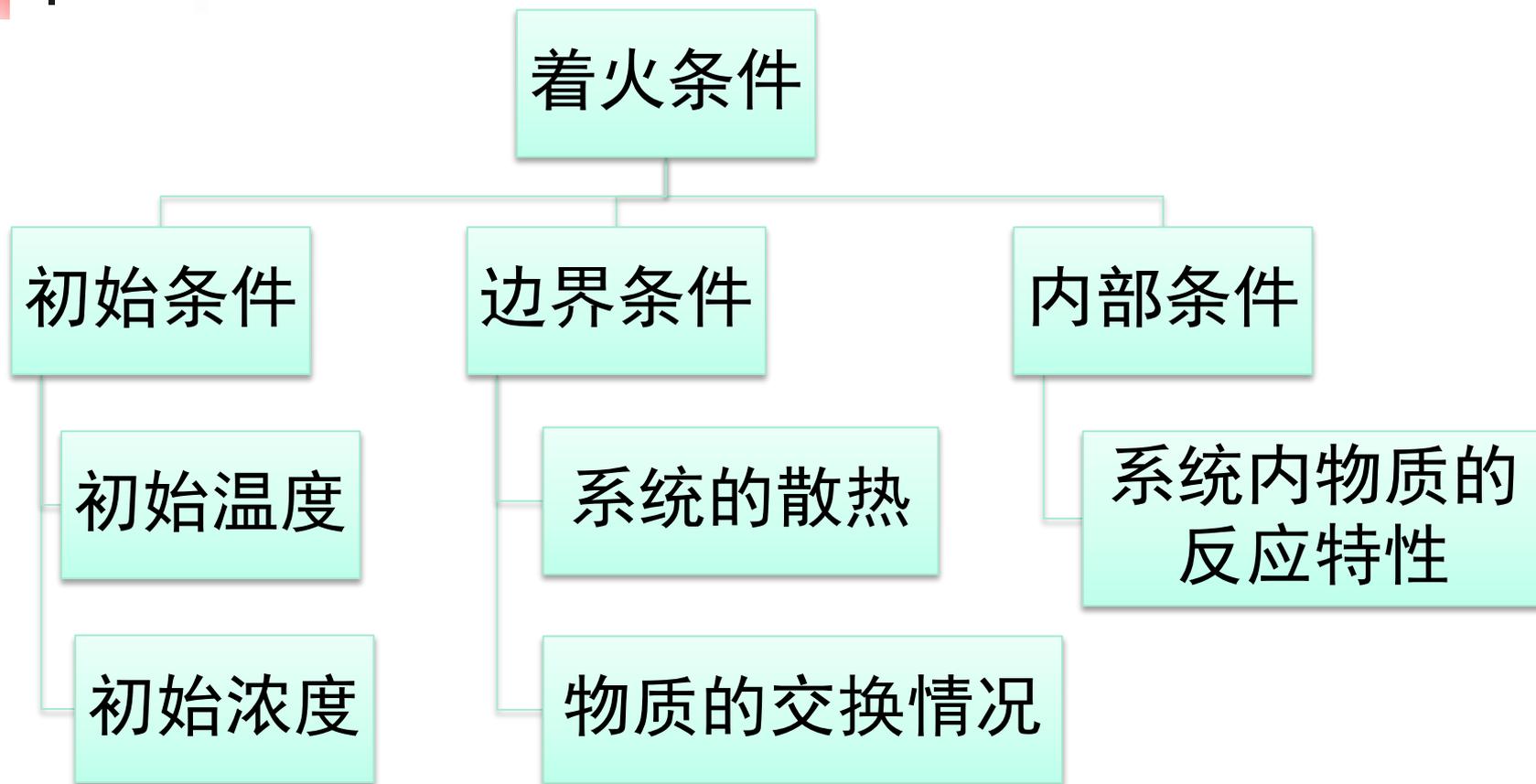


二、着火方式与机理

- **热着火**：可燃混合物由于本身氧化反应放热大于散热，或由于外部热源加热，温度不断升高导致化学反应不断**自动**加速，积累更多能量最终导致着火。——大多数气体燃料着火特性符合热着火的特征。
分为：**热自燃** **强迫点燃**
- **链式着火**：由于某种原因，可燃混合物中存在活化中心，活化中心产生速率大于销毁速率时，在分支链式反应的作用下，导致化学反应速度不断加速，最终导致着火。——某些低压下着火实验（如 H_2+O_2 ， $CO+O_2$ 的着火）和低温下的“冷焰”现象符合链式着火的特征。



三、着火条件的数学描述





着火条件应具备两个基本的效果：

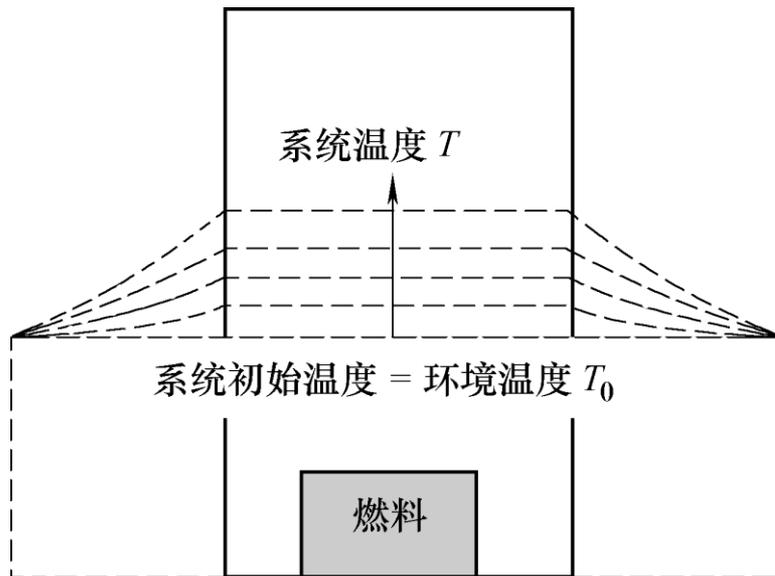
- (1) 能够使得系统的化学反应速率**自动地、持续地加速**。
- (2) 实际的化学反应速率**到达某个较高的数值**，系统在空间中存在剧烈发光发热（也就是燃烧）的现象。



第二节 热自燃理论

一、热自燃条件

以封闭容器内可燃物质的着火过程为例，来分析热自燃问题。



热自燃简化模型

为使问题简化，作如下假设：

1. 只有热反应，不存在链式反应；
2. 容器的体积 V 和表面积 F 为定值；
3. 容器内的参数（如温度浓度等）处处相同；
4. 容器与环境之间仅存在对流换热， α 为定值；
5. 可燃物质的反应热 Q 为定值；
6. 在整个着火过程中，可燃物质浓度变化很小，视作不变；
7. 反应开始时，系统温度和容器壁温与环境温度 T_0 相同；
8. 反应过程中，系统的温度为 T ，容器壁温与可燃物质温度相同，均为 T 。



一、热自燃条件

单位时间内容器内可燃物质化学反应的放热量 q_f :

$$q_f = wQV$$

$$w = kC_A^n = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A^n$$



$$q_f = VQk_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT}}$$

w —化学反应速率；

Q —单位体积内可燃物质的反应热；

V —容器的容积。

C_A —可燃物质浓度；

n —可燃物质总反应的反应级数；

E —可燃物质总体反应的活化能；

k_0 —频率因子。



单位时间内容器壁对环境的散热量 q_s 为：

$$q_s = \alpha F (T - T_0)$$

单位时间内容器内积累的热量 q_L 为：

$$q_L = C_v V \frac{dT}{dt}$$

C_v —单位体积内可燃物质的定容比热。

由能量守恒定律： $q_L = q_f - q_s$

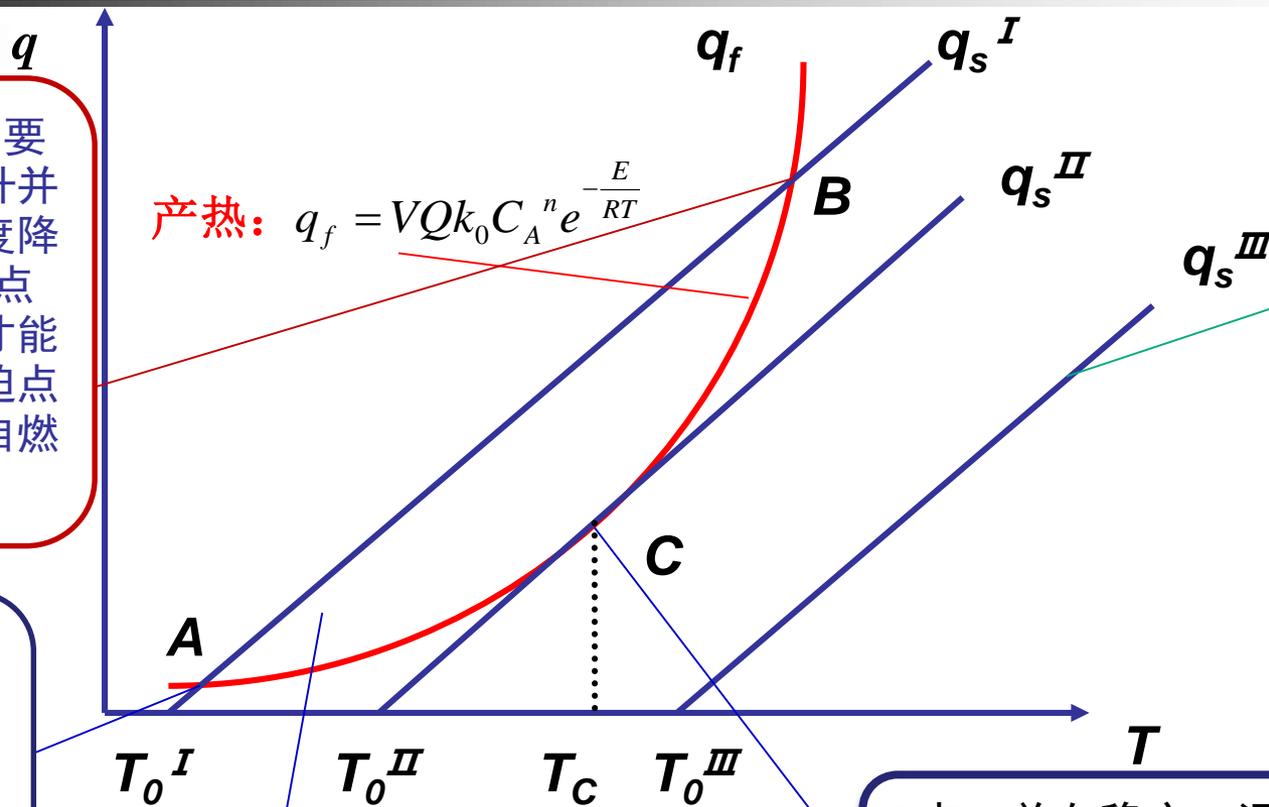
→ $C_v V \frac{dT}{dt} = V Q k_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT}} - \alpha F (T - T_0)$

着火条件： $\frac{dT}{dt} \geq 0$



$$q_f = VQk_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT}}$$

$$q_s = \alpha F(T - T_0)$$



B点，不稳定，要么温度波动上升并着火，要么温度降低到A点。但B点需要外热源的才能达到，是个强迫点燃点，而不是自燃点

A点，稳定，温度向下、向上波动都会返回到A点，但反应不会自动加速而着火，是个熄火点

C点，单向稳定，温度向下波动时，会回到C点，温度向上波动时，则会持续升温。这是着火的临界点

$q_f > q_s$ ，系统产热始终大于散热，可燃物温度不断提高 → 肯定着火



自燃的充分必要条件：

不仅放热量和散热量要相等，而且两者随温度的变化率也要相等。

数学描述：

$$\left\{ \begin{array}{l} q_f |_{T=T_C} = q_s |_{T=T_C} \\ \frac{dq_f}{dT} |_{T=T_C} = \frac{dq_s}{dT} |_{T=T_C} \end{array} \right.$$

C点—热自燃点；**T_c**—热自燃温度。



二、热自燃温度

$$\left\{ \begin{aligned} q_f &= VQk_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT}} \\ q_s &= \alpha F(T - T_0) \end{aligned} \right.$$

由 $q_f|_{T=T_C} = q_s|_{T=T_C} \Rightarrow VQk_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT_C}} = \alpha F(T_C - T_0)$

$$\frac{dq_f}{dT}|_{T=T_C} = \frac{dq_s}{dT}|_{T=T_C} \Rightarrow VQk_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT_C}} \cdot \frac{E}{RT_C^2} = \alpha F$$

或 $VQw \frac{E}{RT_C^2} = \alpha F$

将上两式相除得： $\frac{R}{E} T_C^2 - T_C + T_0 = 0$



$$\frac{R}{E} T_C^2 - T_C + T_0 = 0$$

解方程得：
$$T_C = \frac{E}{2R} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4RT_0}{E}} \right]$$
 (另一根舍去)

$$T_0 = 500 \sim 1000 \text{ K}$$

$$E = 80 \sim 400 \text{ kJ/mol}$$

$$R = 8.314 \text{ J/mol}$$

——谢苗诺夫公式

$$\left. \begin{array}{l} T_0 = 500 \sim 1000 \text{ K} \\ E = 80 \sim 400 \text{ kJ/mol} \\ R = 8.314 \text{ J/mol} \end{array} \right\} \Rightarrow 4RT_0/E \ll 1$$

所以：将 $\sqrt{1 - (4RT_0)/E}$ 展开，忽略高次项，

$$\sqrt{1 - \frac{4RT_0}{E}} \approx 1 - 2\frac{RT_0}{E} - 2\left(\frac{RT_0}{E}\right)^2$$



$$\left\{ \begin{aligned} T_C &= \frac{E}{2R} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4RT_0}{E}} \right] \\ \sqrt{1 - \frac{4RT_0}{E}} &\approx 1 - 2\frac{RT_0}{E} - 2\left(\frac{RT_0}{E}\right)^2 \end{aligned} \right. \quad \Rightarrow \quad T_C = T_0 + \frac{R}{E} T_0^2$$

$$\therefore \Delta T_C = T_C - T_0 \approx \frac{R}{E} T_0^2$$

若 $E=167.2\text{kJ/mol}$, $T_0=1000\text{K}$, 则

$$T_C - T_0 \approx 50 \ll T_0$$

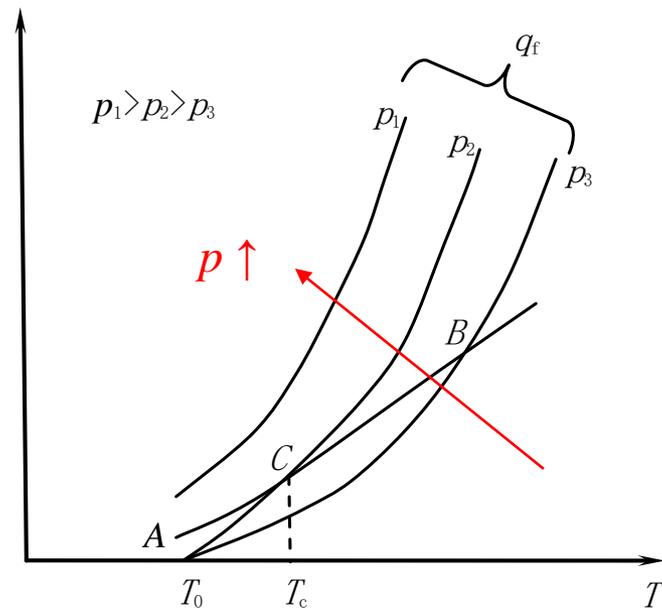
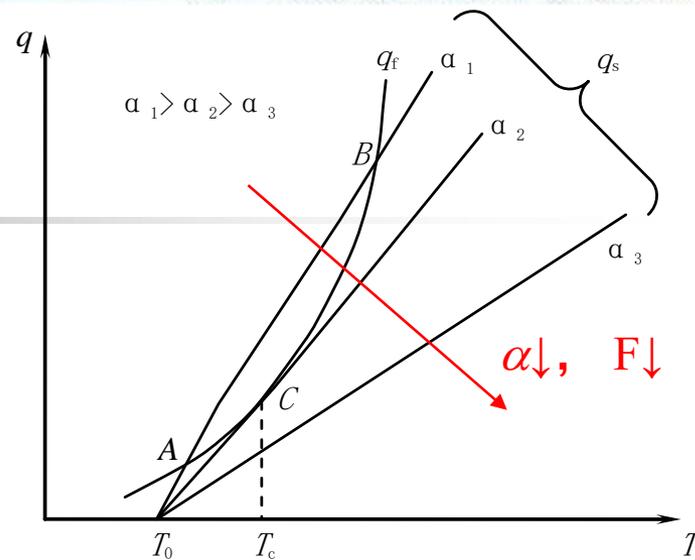
$$\Rightarrow T_C \approx T_0$$

表明在着火的情况下，自燃温度在数量上与给定的初始环境温度相差不多。



影响热自燃的因素:

1. 对流换热系数 α : $\alpha \downarrow$, 散热直线 q_s 的斜率 \downarrow , q_s 直线将以横轴上 T_0 点为轴心向右转动, 与 q_f 相切, 自燃。
2. 散热面积 F : $F \downarrow$, 与减小对流换热系数效果相同。
3. 压力 p : 可燃物浓度 $C \propto p \uparrow$, 放热曲线 q_f 向左上方移动, 与散热直线 q_s 相切, 自燃。





- 特别强调，无论定义 T_C 或 T_0 为着火温度 T_{zh} ，这个 T_{zh} **不是**一个物理常数，它是随着着火条件变化而变化的，散热条件增强，则着火温度上升。



表1 某些气体和液体燃料与空气混合物在**大气压力下**的着火温度

名称	分子式	着火温度/°C
氢	H ₂	530~590
一氧化碳	CO	654~658
甲烷	CH ₄	658~750
乙烷	C ₂ H ₆	520~630
乙烯	C ₂ H ₄	542~547
乙炔	C ₂ H ₂	406~480
苯	C ₆ H ₆	580~740
航空汽油	—	390~685
原油	—	360~367
重油	—	336
煤油	—	250~609



表2 一些固体燃料的着火温度

种类	着火温度/°C
木柴	250~350
泥炭	225~280
褐煤	200~350
烟煤	高挥发分 200~400
	低挥发分 300~500
无烟煤	600~700
焦炭	700
碳黑	560~600



- 烷、烯、炔的着火温度是烷烃最高（为饱和烃，所以活性低），炔烃最低（三价键不饱和烃，活性最强）。
- 液体燃料着火温度一般小于气体燃料着火温度。——注意，这里说的着火温度是热自燃的着火温度。
- 固体燃料中挥发分高的着火温度低，无烟煤、焦炭挥发分很少，所以着火温度最高。褐煤煤场、油炉空气预热器上积的油、制粉系统的积粉等等，在通风不良（散热 q_s 很小时），经相当长时间孕育，可燃物浓度达到着火限时，在低于室温的情况下，也会自燃着火。
- 着火温度与燃料空气混合物的浓度有关；通常用过量空气系数 α （ $\alpha = \text{实际空气量} / \text{符合化学当量比的空气量}$ ）来表示



露天煤矿自燃起火 锡林郭勒消防灭火除险





俄罗斯的“地狱之门”



新华网
WWW.NEWS.CN

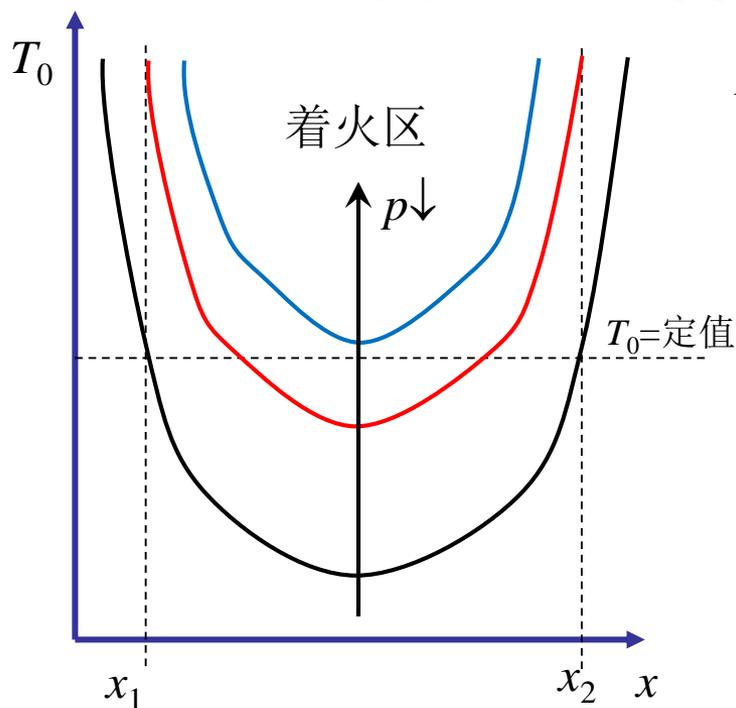




$$C_v V \frac{dT}{dt} = V Q k_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT}} - \alpha F (T - T_0)$$

三、热自燃界限

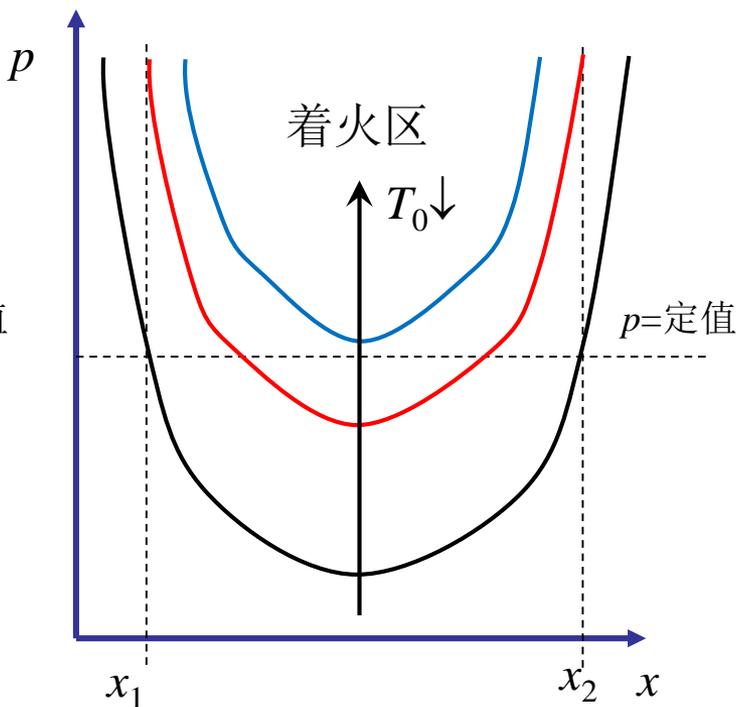
自燃温度还和燃料与氧化剂的混合比相关。



着火下限

着火上限

自燃温度与混合气成分关系



着火下限

着火上限

临界压力与混合气成分关系

- P或T ↓, 着火界限缩小。
- 当P或T下降到某一值时, 着火界限下降成一点。
- 当P或T继续 ↓, 则任何混合气成分都不能着火。



- 这些关系表明在一定的P(或T)下，并非所有混合气成分都能着火，而是有一定的摩尔分数范围。超过这一范围，混合气就不能着火。如在 T_0 - x 关系曲线图和 p_c - x 关系曲线图中，只有在 x_1 - x_2 的浓度范围内混合气才可能着火。
- 称 x_2 (即含燃料量多的)为着火浓度上限，称 x_1 (即含燃料量少的)为着火浓度下限。



大多数碳氢燃料的燃烧反应接近于二级反应，其用压力来表示的热自燃条件为：

$$\frac{VQk_0EX_f X_{ox}P_c^2}{\alpha FR^3T_c^4} e^{-\frac{E}{RT_c}} = 1$$

保持其他参数不变，则有

$$p_c^2 \frac{V}{F} = \text{常数}$$

对直径 d 的球形容器，则有

$$\frac{V}{F} = \frac{\pi d^3 / 6}{\pi d^2}$$



$$p_c^2 d = \text{常数}$$



$d \uparrow$ ，则 $p_c \downarrow$ ，从而提高可燃物质的着火性能。



四、热自燃孕育时间

- **直观意义**：指可燃物质由开始反应到燃烧出现的一段时间。
- **定义**：在可燃物质已达到着火的条件下，由初始状态到温度骤升的瞬间所需的时间。

按平均反应速率的计算式：

$$\tau_i = \frac{C_0 - C_c}{w_{c,0}}$$

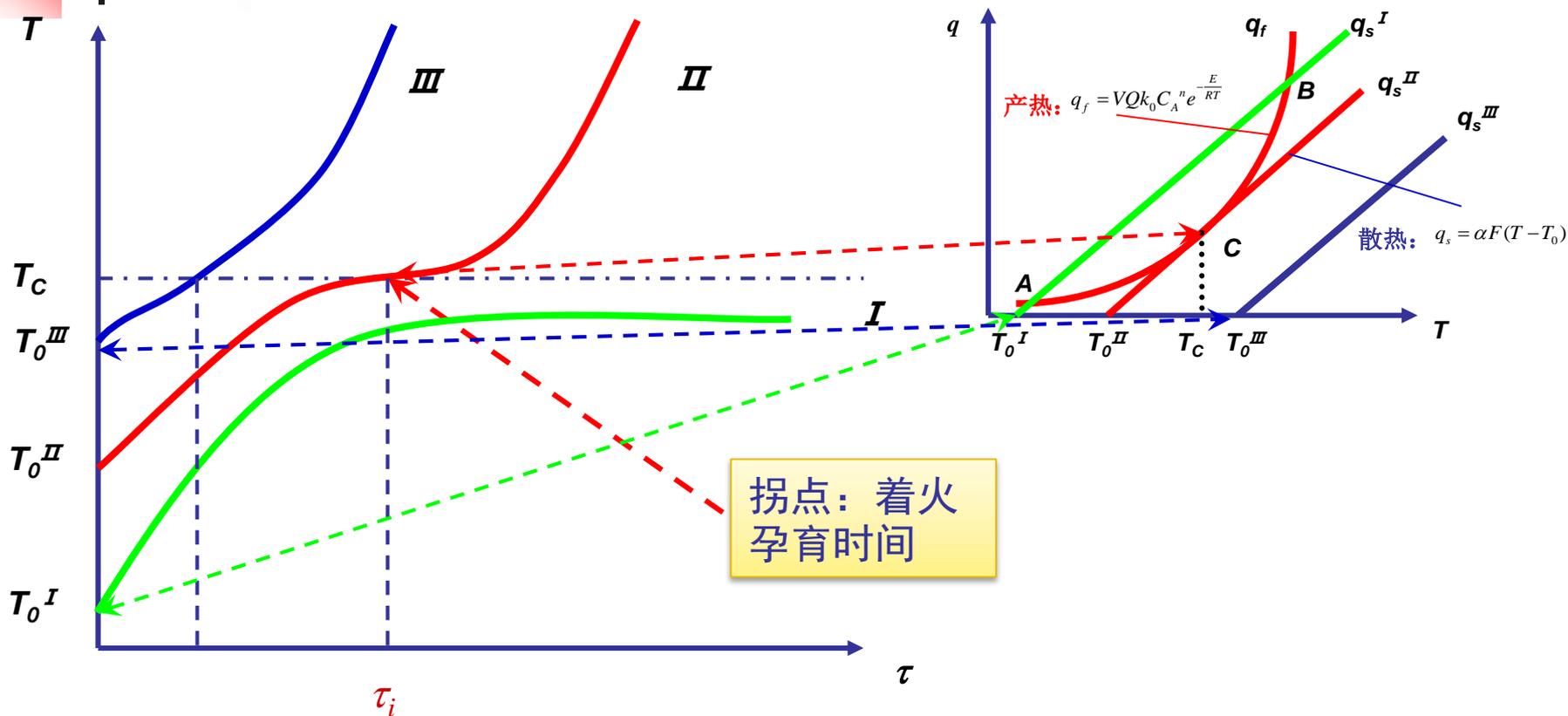
C_0 —可燃物质初始摩尔浓度；

C_c —可燃物质着火时的摩尔浓度；

$w_{c,0}$ —以摩尔浓度表示的初始平均反应速度。



$$C_v V \frac{dT}{dt} = V Q k_0 C_A^n e^{-\frac{E}{RT}} - \alpha F (T - T_0)$$



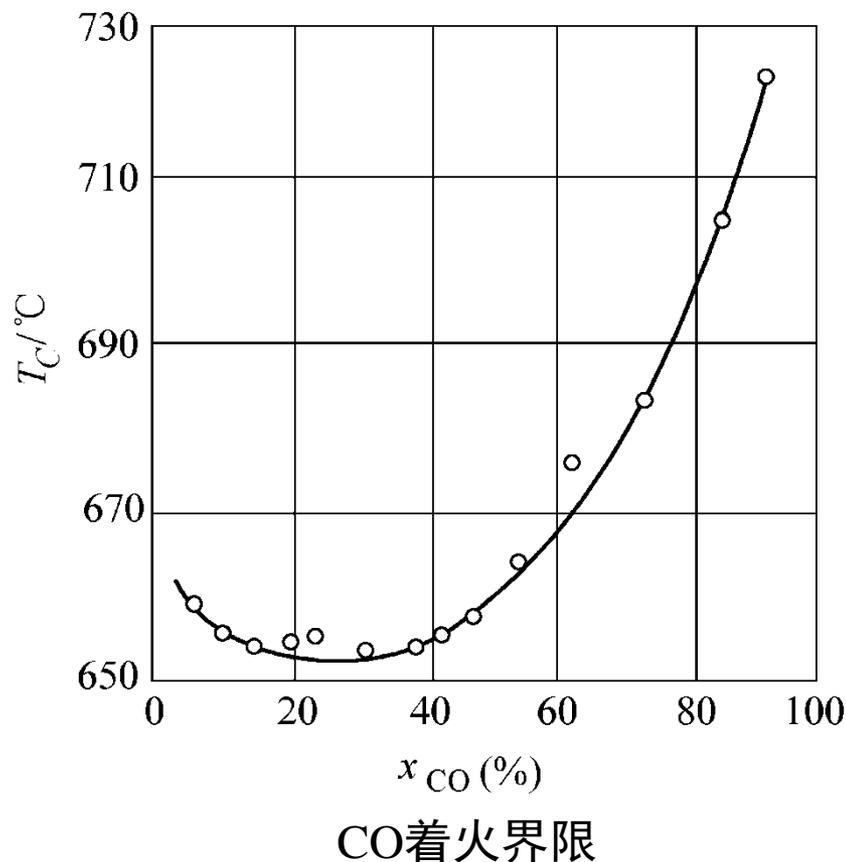
着火过程中的温度变化



第三节 链式自燃

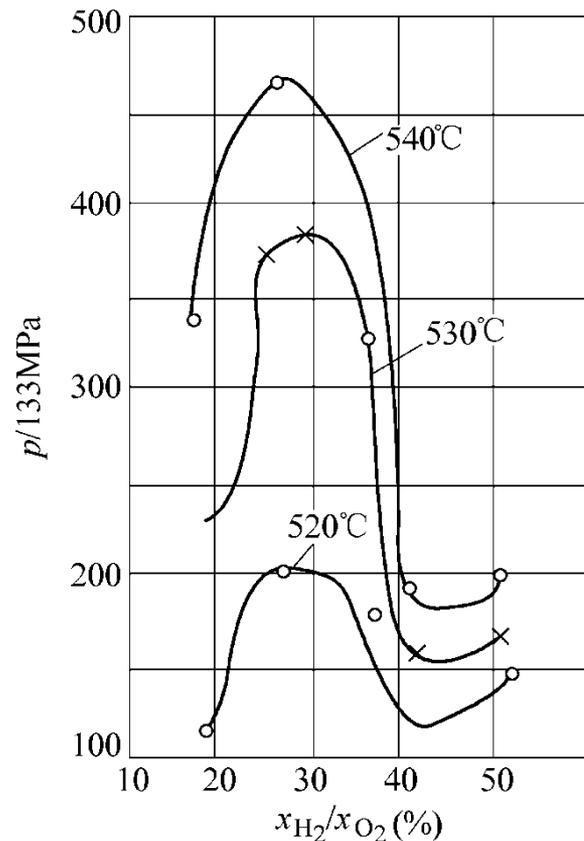
一、链式自燃与热自燃

- 着火的热自燃理论认为热自燃发生是由于在孕育期内化学反应的结果使热量不断积累，从而导致反应速度的自动加速。
- 热自燃理论可以解释很多着火现象。如图所示的一氧化碳着火浓度界限的实验结果从一个方面说明了热自燃理论的正确性。

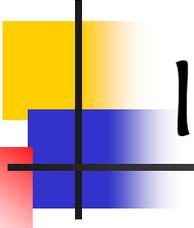




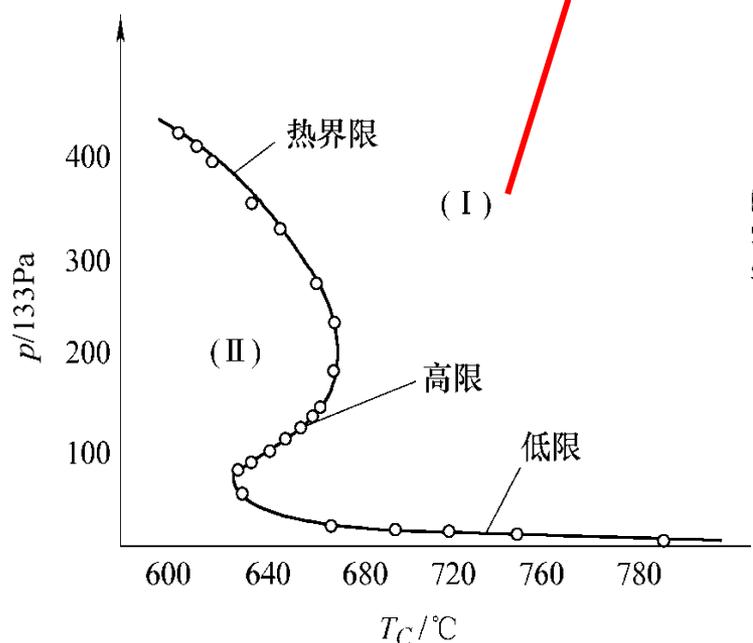
- 但是也有很多现象和实验结果，用热自燃理论是无法解释的。有一些可燃混合气在低压下，其着火的临界压力与温度的关系曲线也不像热自燃理论所论述的那样，即单调地下降且只有一个着火界限，而是着火界限呈半岛形，且有2个或3个，甚至更多的着火界限。



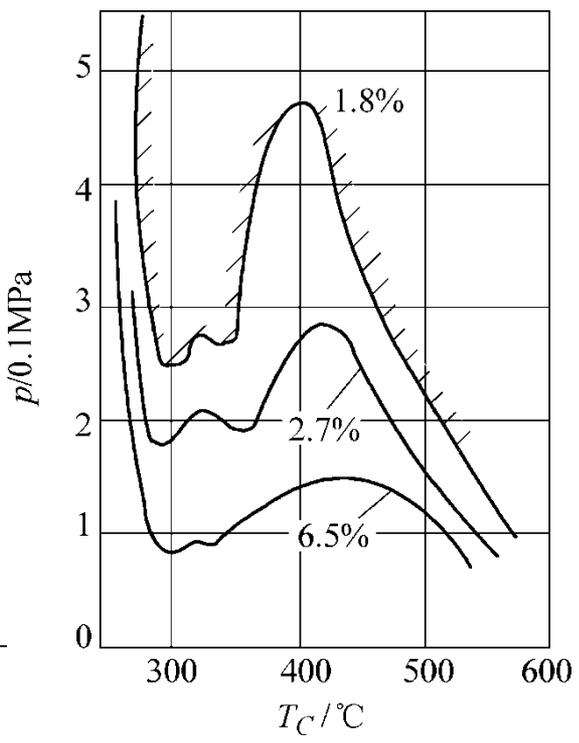
H₂+O₂的着火界限



三个着火界限



$\text{CH}_4 + \text{O}_2$ 的着火界限



乙烷+空气的着火界限

有些反应在高压区有多个着火界限出现。这些实验结果表明，着火并非在所有情况下都是由于放热的积累引起的。链式自燃理论有可能解释其中的一部分现象。



二、链式自燃的孕育时间

链式自燃反应发生，繁殖速率大于销毁速率，则

$$\varphi = f - g > 0$$

由第二章
链式反应知：

$$w_{\tau_i} = \varphi \cdot C = w_H e^{\varphi \tau} = A e^{\varphi \tau}$$

其中： w_H ，链载体的初生反应速率

$$\tau_i = \frac{1}{\varphi} \ln \frac{w_{\tau_i}}{A} \rightarrow \text{常数}$$

$$\therefore \tau_i \varphi = \text{常数}$$

$\varphi \uparrow$ 时，孕育期 $\tau_i \downarrow$



第四节 强迫点燃理论

一、强迫点燃与热自燃

	热自燃	强迫点燃
条件	$Q_1=Q_2, \quad \frac{dQ_1}{dT} = \frac{dQ_2}{dT}$	$T_w=T_\delta, \quad \frac{dT}{dx} = 0$
过程	自发整个空间，可燃混合物 w_C 很慢→放热→升温→多 放热→再升温：积蓄→达到 着火	强制，局部→整个空间，用 高温物体置于可燃混合物 中，温差→热传递，边界 层内加热→着火温度→着 火
原理上	均是化学反应急剧加速的结果	



强迫点燃的参数：

点燃温度、点燃孕育时间、点燃浓度界限和**点火源尺寸**。

影响因素：

可燃物质的化学性质、浓度、温度、压力、**点燃方法、点火能和可燃物质的流动性质等**。



二、强迫点燃方式

炽热物体
点燃

点燃静止的或低速流
动的可燃物质。

电火花
点燃

点燃低速流动的易燃的气体燃
料，如汽油发动机中预混合气内
的电火花点火。

火焰点燃

点火能量大，在工业上应用广
泛。

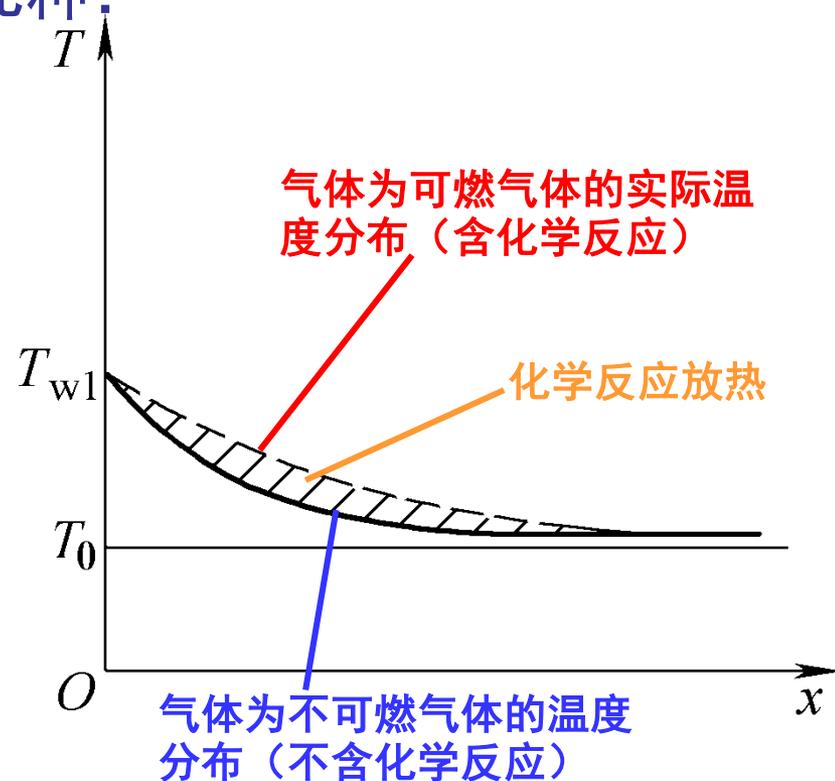


三、炽热物体点燃理论

把一炽热物体放在静止的气体中，且 $T_w > T_0$ ，炽热物体与周围气体的换热情况有以下几种：

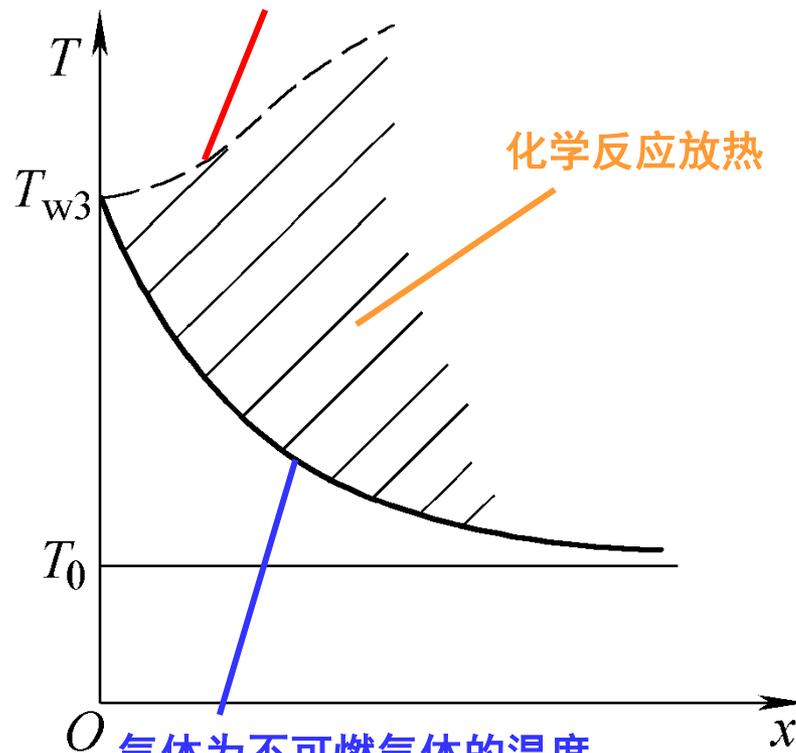
1. 物体表面温度 T_w 较低，如 $T_w = T_{wl}$ 时，若气体为可燃气体，则可燃气体只有微弱的化学反应，产生少量热量，使温度分布发生了变形，如右图虚线所示。

此时物体表面温度梯度为负值，即 $(dT/dx)_w < 0$ 。





气体为可燃气体的实际温度分布（含化学反应）



气体为不可燃气体的温度分布（不含化学反应）

2. 若 T_w 进一步升高，如 $T_w = T_{w3}$ 时，反应速度进一步加快，放热 $>$ 散热，由于热量积累，反应会自动地加速到着火。此时火焰温度比壁温高得多，如右图虚线所示。

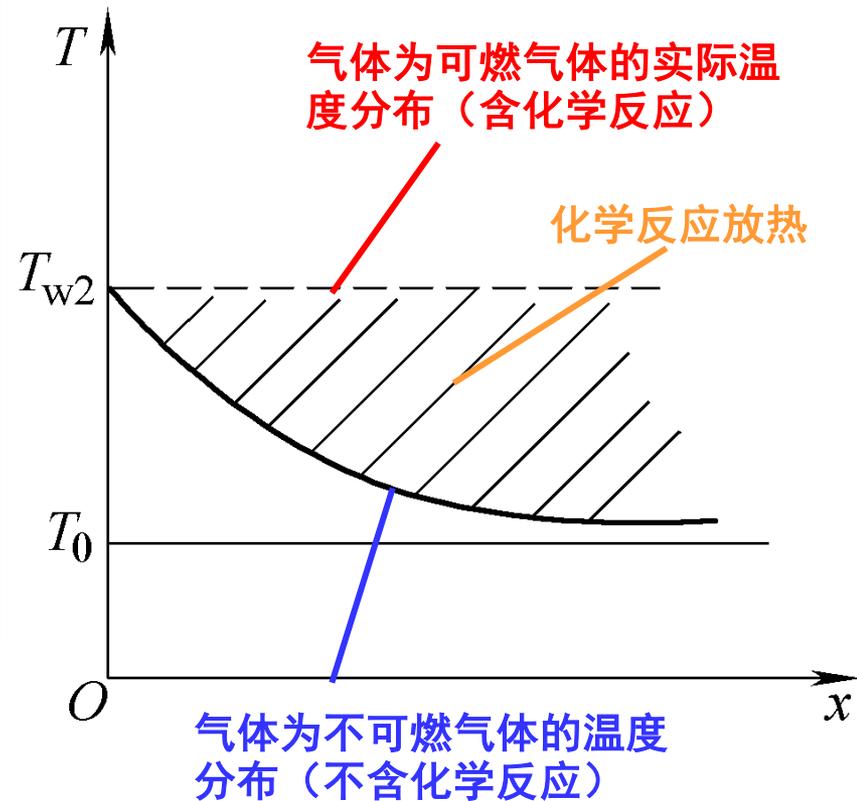
壁面处温度梯度将出现正值，即 $(dT/dx)_w > 0$ 。



3. 若 T_w 升高，则可燃气体化学反应速度 $w \uparrow$ ，放热量 \uparrow ， $(dT/dx)_w \uparrow$ ，阴影区域扩大，总可以找到这样的一个温度 T_{w2} ，使炽热物体表面与气体没有热量交换。

在壁面处 $(dT/dx)_w = 0$ ，边界层处放热 = 散热。 T_{w2} — 临界温度，称为强迫点燃温度。

点燃临界条件





球形炽热物体点燃条件的求解：

在球体附近的边界层内距壁面 x 处取一微元可燃气体，微元气体厚度为 dx 。设微元体与 x 轴垂直的两个表面积均为 ds 。

导入热量

$$q_1 = -\lambda \frac{dT}{dx} ds$$

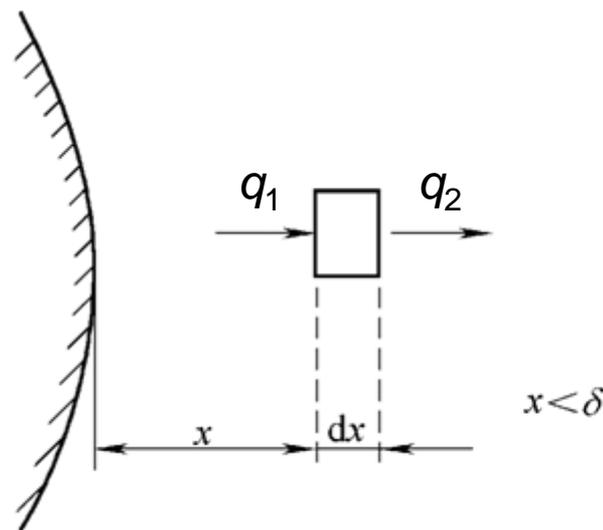
导出热量

$$q_2 = q_1 + dq_1 = \left(-\lambda \frac{dT}{dx} - \lambda \frac{d^2T}{dx^2} dx \right) ds$$

反应产热

$$q_3 = Qw dx ds$$

λ —导热系数；
 Q —反应热；
 w —反应速度。





由能量守恒有: $q_1 - q_2 + q_3 = 0$

→
$$-\lambda \frac{dT}{dx} ds - \left(-\lambda \frac{dT}{dx} - \lambda \frac{d^2T}{dx^2} dx \right) ds + Q_w dx ds = 0$$

整理得:
$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} + Q_w = 0$$
 代入 $w = k_0 C^n e^{-\frac{E}{RT}}$

∴
$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} + Q k_0 C^n e^{-\frac{E}{RT}} = 0$$



$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + Qk_0 C^n e^{-\frac{E}{RT}} = 0$$

该方程求解的难点：

- 1、 $Qk_0 C^n e^{-\frac{E}{RT}}$ 这一项很难积分；
- 2、二阶常微分方程，需要积分两次。

解决的思路：

$$\text{令 } y = \frac{dT}{dx}, \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} = y \cdot \frac{dy}{dT}$$

- 1、利用换元法减少一次积分；
- 2、利用近似处理的办法使得 $Qk_0 C^n e^{-\frac{E}{RT}}$ 可以积分。



求解结果

$$\frac{Nu}{d} (T_w - T_0) = \sqrt{\frac{2Qk_0 C^n RT_w^2}{\lambda E} e^{-\frac{E}{RT_w}} \left[1 - \frac{1}{e} \right]}$$

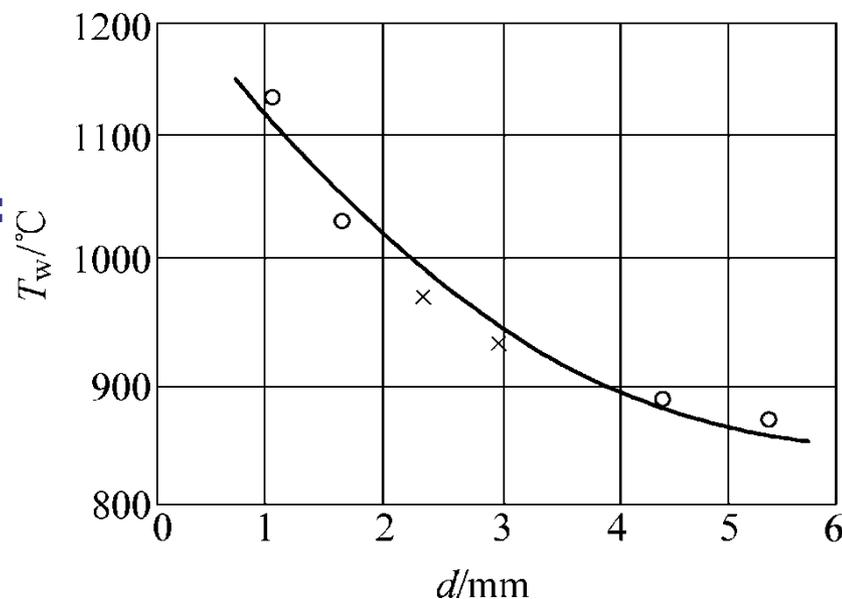
炽热物体点燃的条件



炽热球形物体放在静止的可燃气体中时， $Nu=2$ ，则 T_w 温度下能点燃的最小圆球直径 d 为：

$$d = \sqrt{\frac{2\lambda E}{Qk_0 C^n R} \frac{(T_w - T_0)^2}{T_w^2} e^{\frac{E}{RT_w}} \frac{e}{e-1}}$$

其他条件不变时，随着 $d \uparrow$ ，临界点燃温度 \downarrow ，可燃气体容易被点燃。



点燃温度 T_w 与热球直径 d 的关系
(在煤气中点燃)



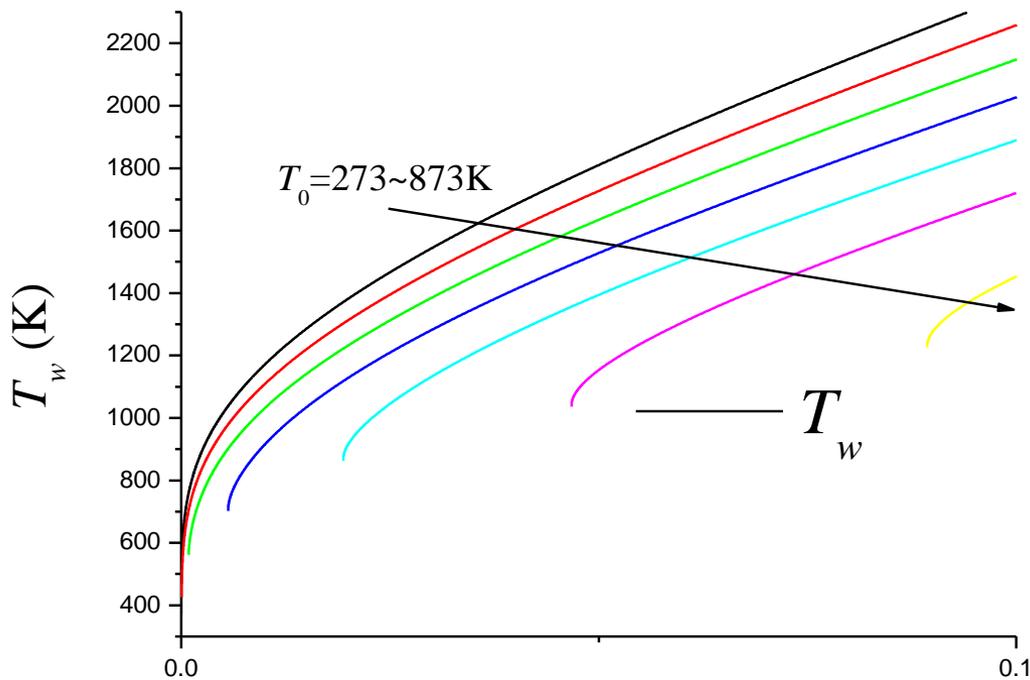
把 $d = \sqrt{\frac{2\lambda E}{Qk_0 C^n R} \frac{(T_w - T_0)^2}{T_w^2} e^{\frac{E}{RT_w}} \frac{e}{e-1}}$ 做一个改写

$$\frac{\sqrt{\frac{2\lambda E}{Qk_0 C^n R}}}{d} = \frac{1}{\sqrt{\frac{(T_w - T_0)^2}{T_w^2} e^{\frac{E}{RT_w}} \frac{e}{e-1}}} = \frac{\alpha \sqrt{\frac{2E}{Qk_0 \lambda C^n R}}}{Nu}$$

$$\frac{1}{d} \sqrt{\frac{2\lambda E}{Qk_0 C^n R}} = \sqrt{\frac{T_w^2}{(T_w - T_0)^2} e^{-\frac{E}{RT_w}} \frac{e-1}{e}} = \frac{\alpha}{Nu} \sqrt{\frac{2E}{Qk_0 \lambda C^n R}}$$



根据上式，以 T_w 为纵坐标， $\frac{1}{d} \sqrt{\frac{2\lambda E}{Qk_0 C^n R}}$ 或 $\frac{\alpha}{Nu} \sqrt{\frac{2E}{Qk_0 \lambda C^n R}}$ 为横坐标作图



$$\frac{1}{d} \sqrt{\frac{2\lambda E}{Qk_0 C^n R}} = \frac{\alpha}{Nu} \sqrt{\frac{2E}{Qk_0 \lambda C^n R}}$$

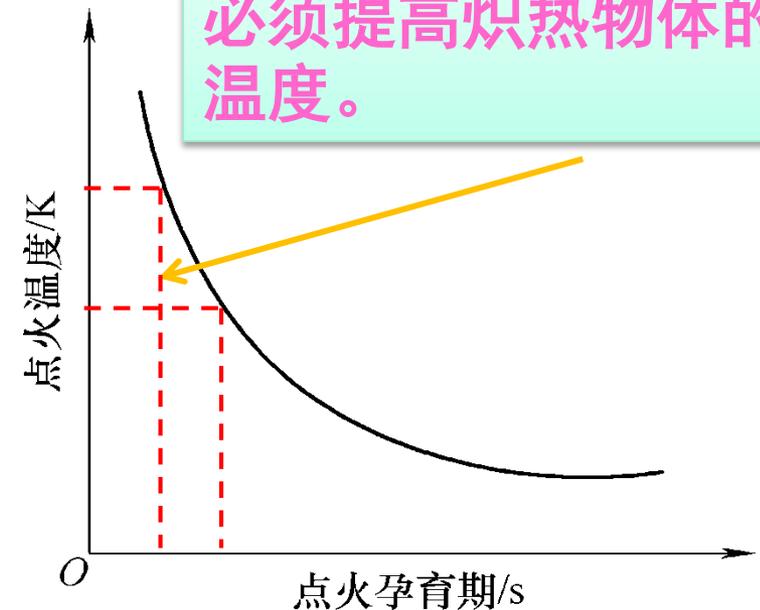
1. $d \downarrow, T_w \uparrow$
2. Nu 不变而 $\alpha \uparrow$ (散热增大), $T_w \uparrow$
3. $\lambda \uparrow$ (气体导热能力变强), $T_w \uparrow$
4. $k_0 \downarrow, E \uparrow$ (燃料活性下降), $T_w \uparrow$
5. $Q \uparrow, T_w \downarrow$
6. $P \uparrow (C \uparrow), T_w \downarrow$
7. $T_0 \uparrow, T_w \downarrow$



四、强迫点燃的点火孕育期

- 定义：当点火源与可燃气体接触后到出现火焰的一段时间。与点燃温度有关。
- 可以仿照零维热自燃模型设定孕育时间，但是散热条件不再是常数。需要进行全场的求解分析，才能确定火焰最早在什么区域出现。

欲缩短点火孕育期就必须提高炽热物体的温度。



点火温度与点火孕育期的关系
(混合气：汽油和氧气)



第五节 火焰传播

- 在可燃混合物中借助于外加能源使其局部着火，而后着火部分向未着火部分输送热量及活性粒子，使之相继着火燃烧，此即**火焰传播问题**。

火焰传播原理：火焰前锋内剧烈的燃烧化学反应使其在边界上产生了很大的温度和浓度梯度，从而导致了强烈的热质交换。热质交换又引起了邻近的混合气的化学反应，由此形成了化学反应区在空间的移动，故火焰传播是一个复杂的物理化学过程。



火焰传播的形式

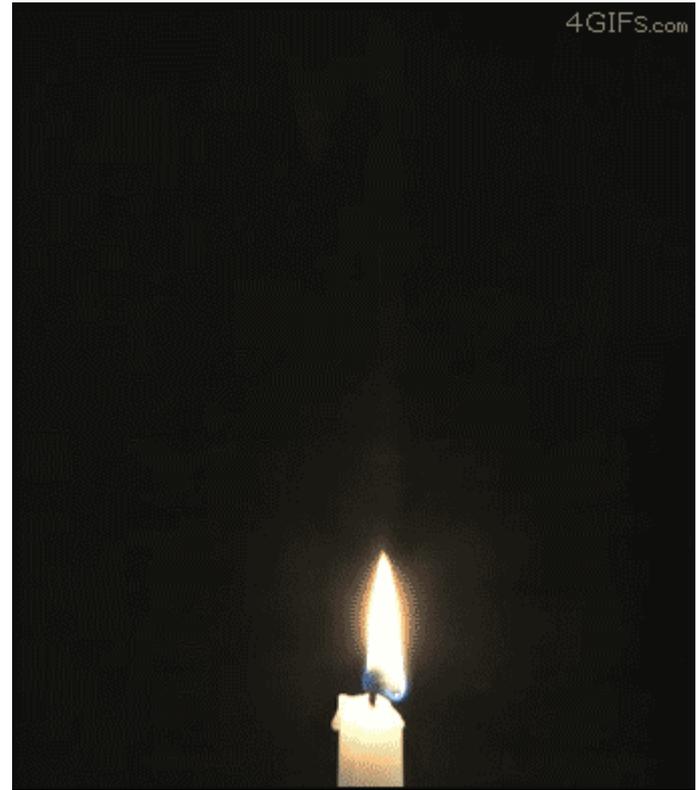
- **缓燃（正常传播）**：火焰锋面以导热和对流的方式下传热给可燃混合物引起的火焰传播，也可能有辐射（煤粉）。传播速度较低（1~3m/s），传播过程稳定。

爆燃：绝热压缩引起的火焰传播，是依靠激波的压缩作用使未燃混合气的温度升高而引起化学反应，从而使燃烧波不断向未燃气推进，传播速度可接近或达到声速。



火焰前锋

- 未燃气体和已燃气体的分界面，亦称火焰前沿、**火焰锋面** (flame front)





层流火焰传播速度 v_L （正常传播速度）

- 按气流的流动状况也可分为：

层流火焰传播和湍流火焰传播

层流火焰传播速度定义：火焰锋面在其法线方向相对于新鲜混合气的传播速度。

静止气： $\vec{v}=0$, $\vec{v}_L = \vec{v}_n$

v_n ：火焰锋面移动的速度

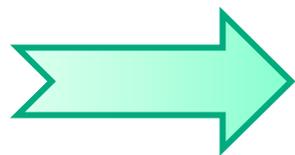
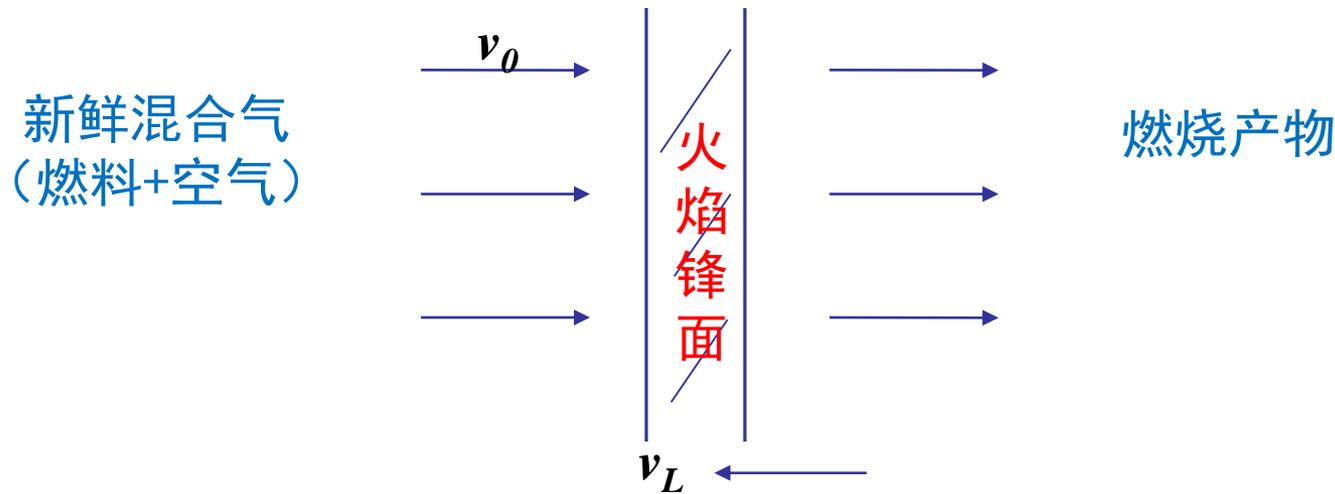
火焰锋面固定在某一位置不动： $v_L = -v_n$

v_n ：可燃混合气速度矢量在火焰前锋法线方向上的投影



平面火焰锋面在可燃混合物中的 v_L

设：① 锋面与气流速度垂直 ② 火焰锋面驻立不动



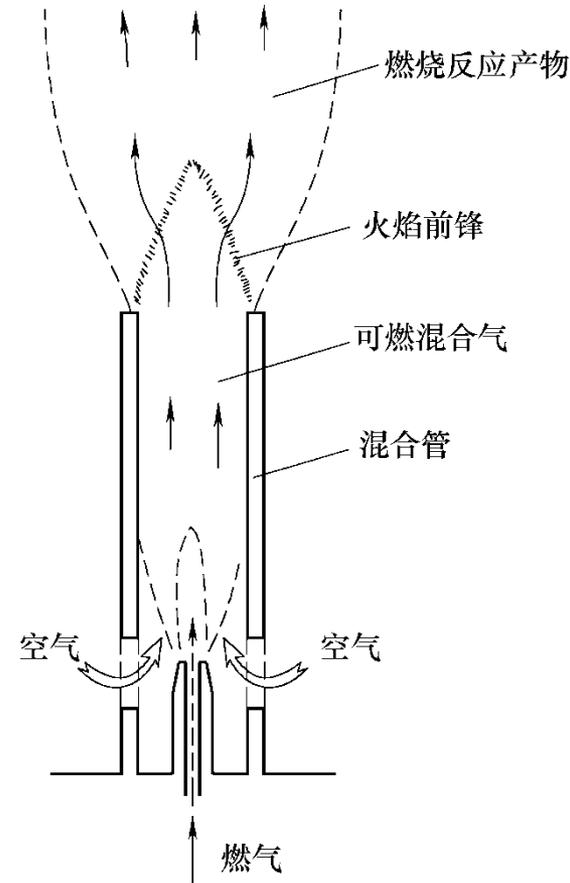
$$v_0 = v_L$$



本生灯锥形火焰正常传播

- 燃气、空气混合，形成均匀可燃混合气
- 点燃后，形成稳定的锥体形层流火焰
- $\alpha > 1$ ，内锥为蓝色预混火焰锥，外锥为紫红色燃烧产物火焰
- $\alpha < 1$ ，内锥为蓝色预混火焰，外锥变为淡蓝色或黄色扩散火焰

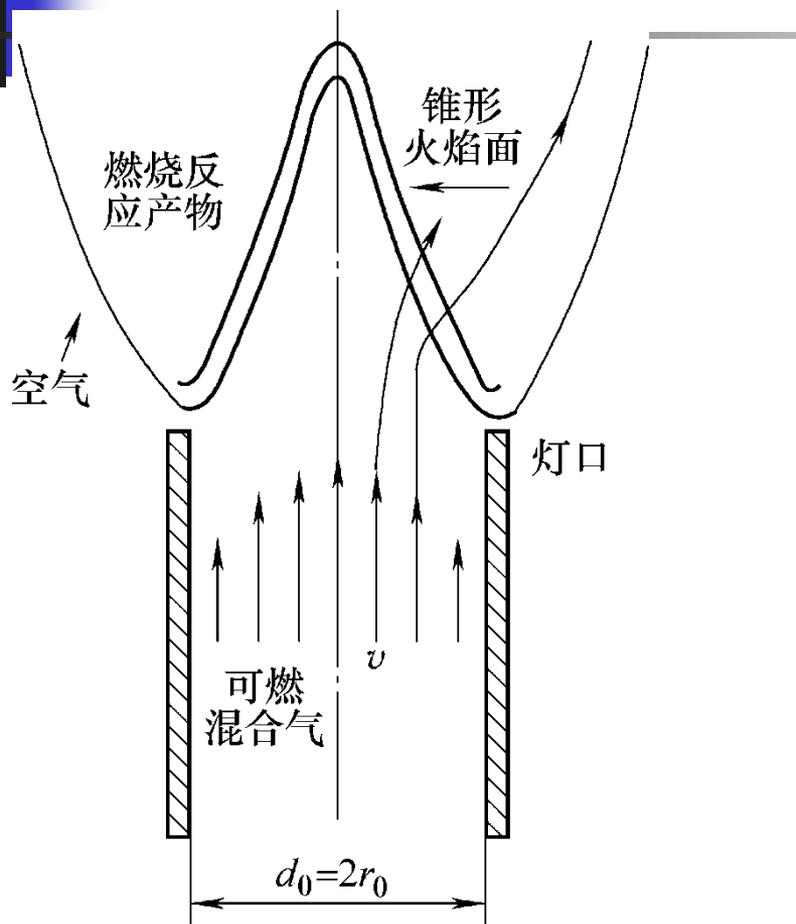
α : 过量空气系数



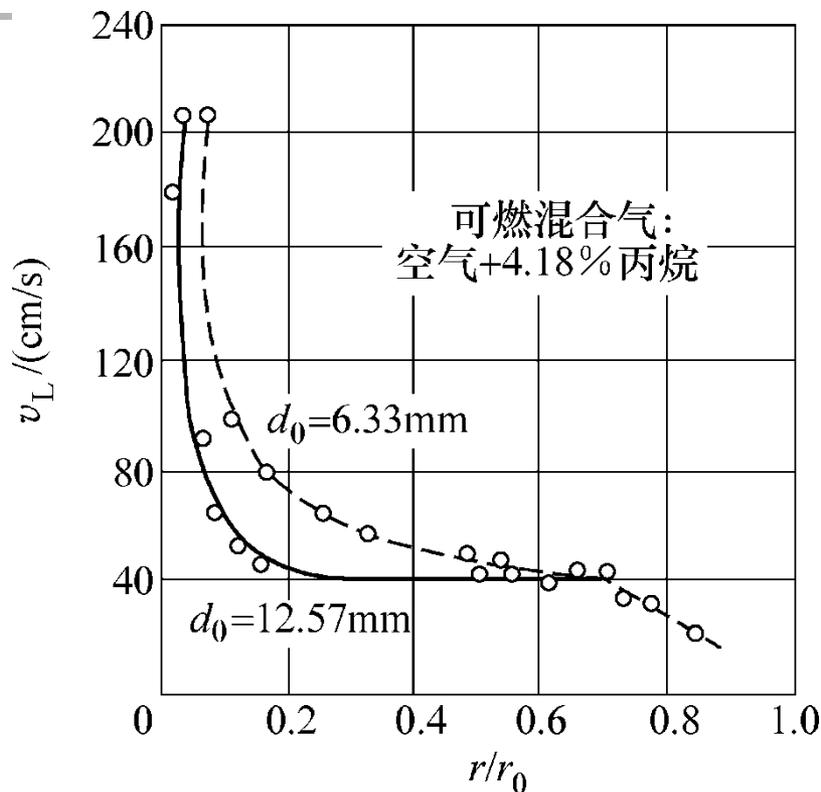
本生灯原理及其火焰示意图



本生灯实际火焰锥及其特点



本生灯实际火焰锥



本生灯火焰中各部位的
火焰前锋正常传播速度

(主要原因: 温度场不均匀) 50



可燃混合气在标准状态下(293 K, 0.101 MPa)
的火焰前锋正常传播速度

气体燃料	氧化剂	正常传播速度 $v_L / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
H ₂	空气	1.6
CO	空气	0.30
CH ₄	空气	0.28
C ₂ H ₂	空气	1.0
C ₂ H ₄	空气	0.5



层流火焰传播的机理有三种理论：

热理论：认为控制火焰传播的主要机理为从反应区到未燃区域的热传导

扩散理论：认为来自反应区的链载体的逆向扩散是控制层流火焰传播的主要因素

综合理论：认为热的传导和活性粒子的扩散对火焰传播可能有同等重要的影响



正常火焰传播速度的理论求解及分析

$$-\infty < x \leq 0$$

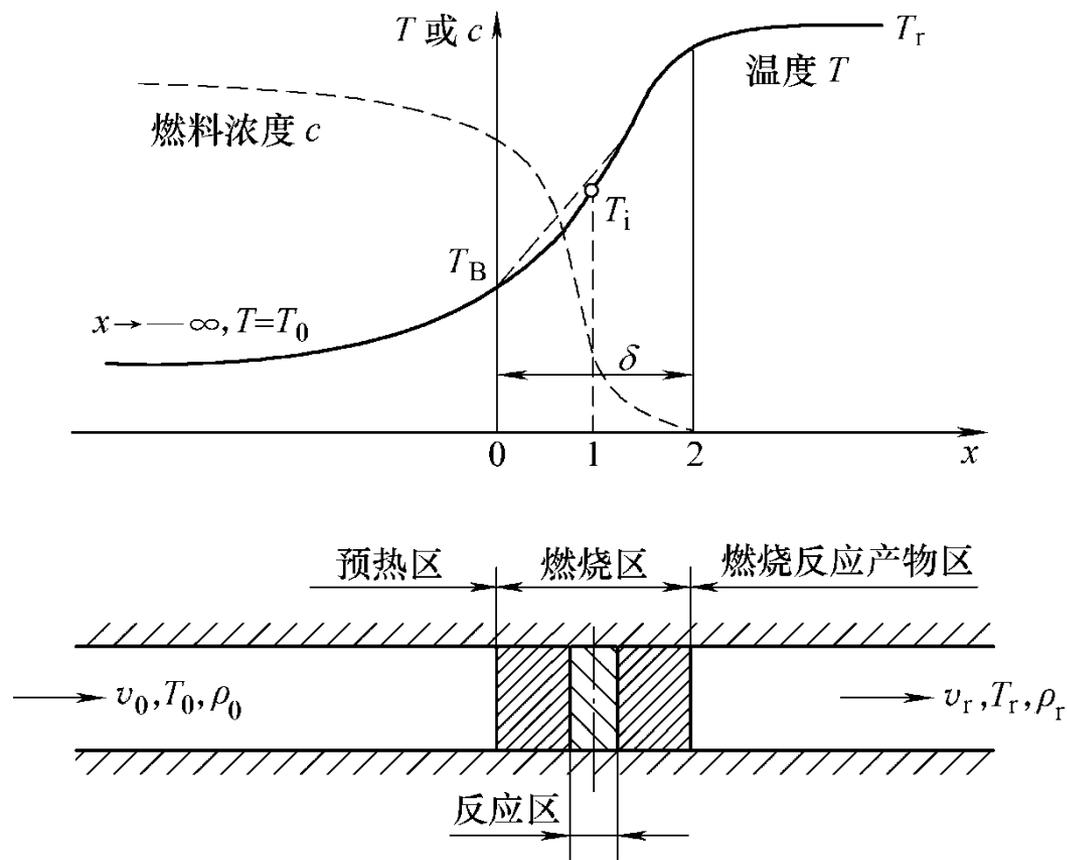
为可燃混合气预热区

$$0 \leq x \leq \delta$$

为可燃混合气燃烧区
(δ 为燃烧区的宽度)

$$\delta \leq x < +\infty$$

为燃烧产物区



一维层流燃烧室中气体工质的
温度和燃料浓度变化



控制火焰传播的方程:描述一维层流燃烧室系统中具有化学反应时的导热微分方程:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - c_p \rho_0 v_0 \frac{dT}{dx} + Q_w = 0$$

物理意义: 热量在传导过程中的源项 (或者说增加项) 是化学反应的放热。

■ 求解的两个困难:

1、 $w = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C^n$ 难于积分。

2、 怎么和火焰传播速度 v_L 关联?



$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - c_p \rho_0 v_0 \frac{dT}{dx} + Q_w = 0$$

- 在 $-\infty < x \leq 0$ 的预热区内，可燃混合气没有发生燃烧反应

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - c_p \rho_0 v_0 \frac{dT}{dx} = 0$$

求解可得可燃混合气在 $-\infty < x \leq 0$ 范围内的温度变化规律

- 边界条件 在 $x = -\infty$ 处 $\frac{dT}{dx} = 0$ 及 $T = T_0$

在 $x = 0$ 处 $T = T_B$

T_B 可以认为是在该处散热条件下发生热自燃的初始温度



$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - c_p \rho_0 v_0 \frac{dT}{dx} = 0$$

- 求解过程：根据边界条件积分

积分一次：

$$\int_0^{\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0}} d \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) = c_p \rho_0 v_0 \int_{T_0}^T dT$$

$$\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = c_p \rho_0 v_0 (T - T_0)$$

再积分一次：

$$\int_{T_0}^T \frac{\lambda dT}{T - T_0} = c_p \rho_0 v_0 \int_{-\infty}^x dx$$

或：

$$\int_T^{T_B} \frac{\lambda dT}{T - T_0} = c_p \rho_0 v_0 \int_x^0 dx$$



- 得到可燃混合气在 $-\infty < x \leq 0$ 范围内的温度变化规律

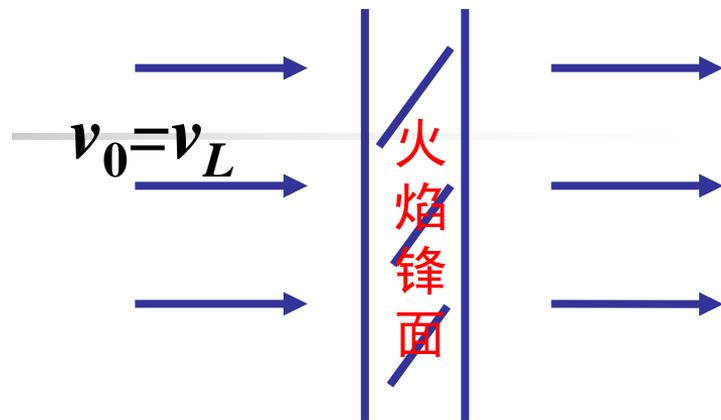
$$T = T_0 + (T_B - T_0) \exp\left(\frac{\rho_0 v_0 c_p}{\bar{\lambda}} x\right)$$

$\bar{\lambda}$ —— 气体介质在 $-\infty < x \leq 0$ 的平均热导率, W/(m·K)

可见: 在 $-\infty < x \leq 0$ 范围内, 可燃混合气的温度按指数规律
由初温 T_0 升高至其开始进入着火过程的温度 T_B



- **与火焰传播速度 v_L 建立关联：**假定如图所示的燃烧区中，温度不是按指数上升的，而是线性上升的。从着火温度 T_B 上升到燃烧温度 T_r



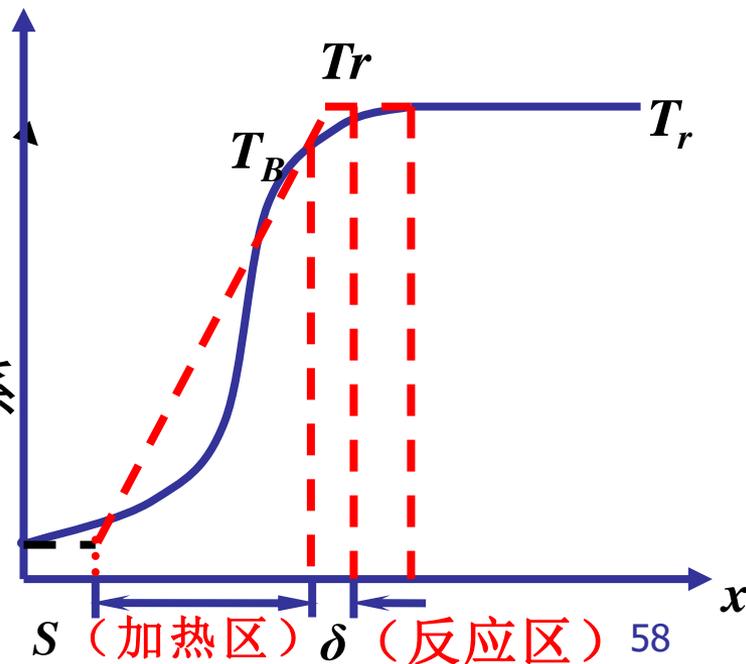
$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=\delta} = \frac{T_r - T_B}{\delta}$$

代入燃烧区的导热方程

$$\lambda \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = \bar{\lambda} \frac{T_r - T_B}{\delta} = c_p \rho_0 v_0 (T_B - T_0)$$

得到新鲜气流速度与热量之间的平衡关系

$$v_0 = \frac{\bar{\lambda}}{c_p \rho_0} \frac{1}{\delta} \frac{T_r - T_B}{T_B - T_0}$$





- 假定在单位时间内流入燃烧区的可燃混合气完全在该区域内进行燃烧反应，则可得

$$\frac{\bar{\lambda}}{w\tau} = \bar{w} \frac{\delta}{v_0} = c_0 \Rightarrow \bar{w}\delta = v_0 c_0 \Rightarrow \delta = \frac{v_0 c_0}{\bar{w}} \quad \text{代入} \quad v_0 = \frac{\bar{\lambda}}{c_p \rho_0} \frac{1}{\delta} \frac{T_r - T_B}{T_B - T_0}$$

c_0 — 可燃混合气的初始浓度

\bar{w} — 可燃混合气在燃烧区内 ($0 \leq x \leq d$) 的平均化学反应速度

$$\bar{w} \approx k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_r}\right) C_0^\alpha C_{O_2}^\beta$$

- 因此得到

$$v_0 = \frac{\bar{\lambda}}{c_p \rho_0} \frac{1}{\frac{v_0 c_0}{\bar{w}}} \frac{T_r - T_B}{T_B - T_0} \Rightarrow v_0 = v_L = \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{c_p \rho_0 c_0} \left(\frac{T_r - T_B}{T_B - T_0}\right) \bar{w}}$$

- 对于一维定常流动，可燃混合气进口流速 v_0 恰好保持火焰前锋静止不动，则 v_0 即为火焰前锋的正常传播速度 v_L



- 利用“ T_B 可以认为是在该处散热条件下发生热自燃的初始温度”的概念，假定所有流向锋面的气体在B点之前被加热到温度

$$T_B = \left(T_r - \frac{RT_r^2}{E}\right) \quad \text{且} \quad \frac{RT_r^2}{E} \ll T_r \quad \text{代入} \quad v_0 = v_L = \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{c_p \rho_0 c_0} \left(\frac{T_r - T_B}{T_B - T_0}\right)^{\bar{w}}}$$

- 可得

$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{c_p \rho_0 c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0}\right) \frac{RT_r^2}{E} \bar{w}}$$

再根据 $\bar{a} = \bar{\lambda}/(c_p \rho)$

$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{a}}{c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0}\right) \frac{RT_r^2}{E} \bar{w}}$$



二、火焰正常传播速度的主要影响因素

主要影响因素：

- 可燃混合气自身的特性
- 压力
- 温度
- 组成结构
- 惰性气体含量
- 添加剂等



1、可燃混合气自身的特性的影响

$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{a}}{c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0} \right) \frac{RT_r^2}{E} \bar{w}}$$

$$a \uparrow \rightarrow v_L \uparrow$$

$$E \downarrow, k_0 \uparrow \rightarrow \bar{w} = k c_A^a c_B^b \uparrow \rightarrow v_L \uparrow$$



$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{a}}{c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0} \right) \frac{RT_r^2}{E} \bar{w}}$$

理论燃烧温度 T_r : $c_{p, fuel+air} (T_r - T_0) = Q \Rightarrow T_r = \frac{Q}{c_{p, fuel+air}} + T_0$

过量空气系数的影响：在 $\alpha = 1$ 附近时 T_r 最高

$\alpha > 1$ 空气多

$\alpha < 1$ 燃料多



$$Q \downarrow, T_r \downarrow \rightarrow v_L \downarrow$$

- 火焰正常传播速度随着可燃混合气的热效应及燃烧反应速度的降低而减小
- 可燃混合气中的空气量不足或过多均将导致燃烧温度降低，从而降低火焰正常传播速度



2、燃料分子结构的影响：

实验证明 $\alpha \approx 1$ 且小于1时， v_L 最大

参数	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₈	C ₄ H ₁₀
$v_{L, \max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.8	0.56	0.38	1.52	0.67	0.43	0.50	0.42	0.46	0.38
α	0.57	0.46	0.90	—	0.85	0.90	0.90	1.00	1.00	1.00

- H₂和CO的燃烧是典型的链式反应，所以其 v_L 最大值对应的 α 值偏离热传递模型较多
- 烃类物质中，炔的火焰传播速度一般比烯高，而烯的数值比烷高
- 燃料相对分子量越大，其可燃范围越窄



	火焰传播浓度限（体积）
H ₂	4~74.2%
CO	12.4~73.8%
CH ₄	4.6~14.6%
乙烯	2.75~28.6%
乙炔	2.5~80%

火焰传播浓度限：可燃物质（可燃气体、蒸气和粉尘）与空气（或氧气）必须在一定的浓度范围内均匀混合，形成预混气，遇着火源才会发生爆炸，这个浓度范围称为爆炸极限，或爆炸浓度极限。

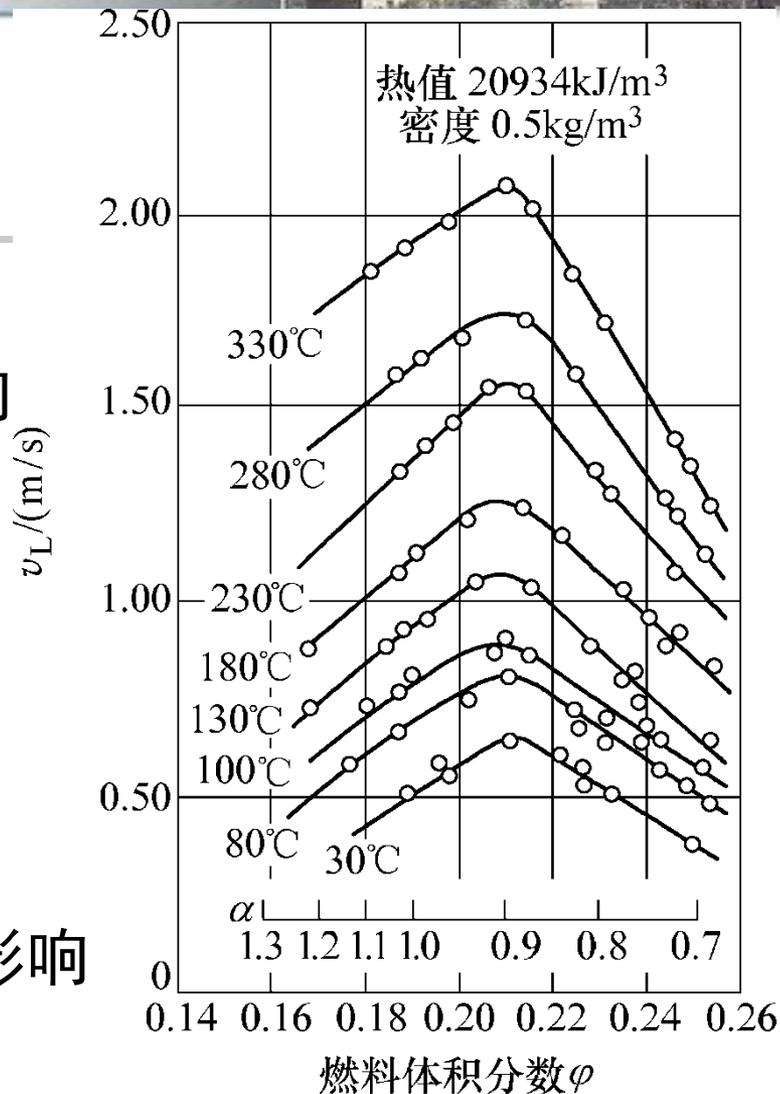


3、温度的影响

(1) 可燃混合气初始温度 T_0 的影响

$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{a}}{c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0} \right) \frac{RT_r^2}{E} \bar{w}}$$

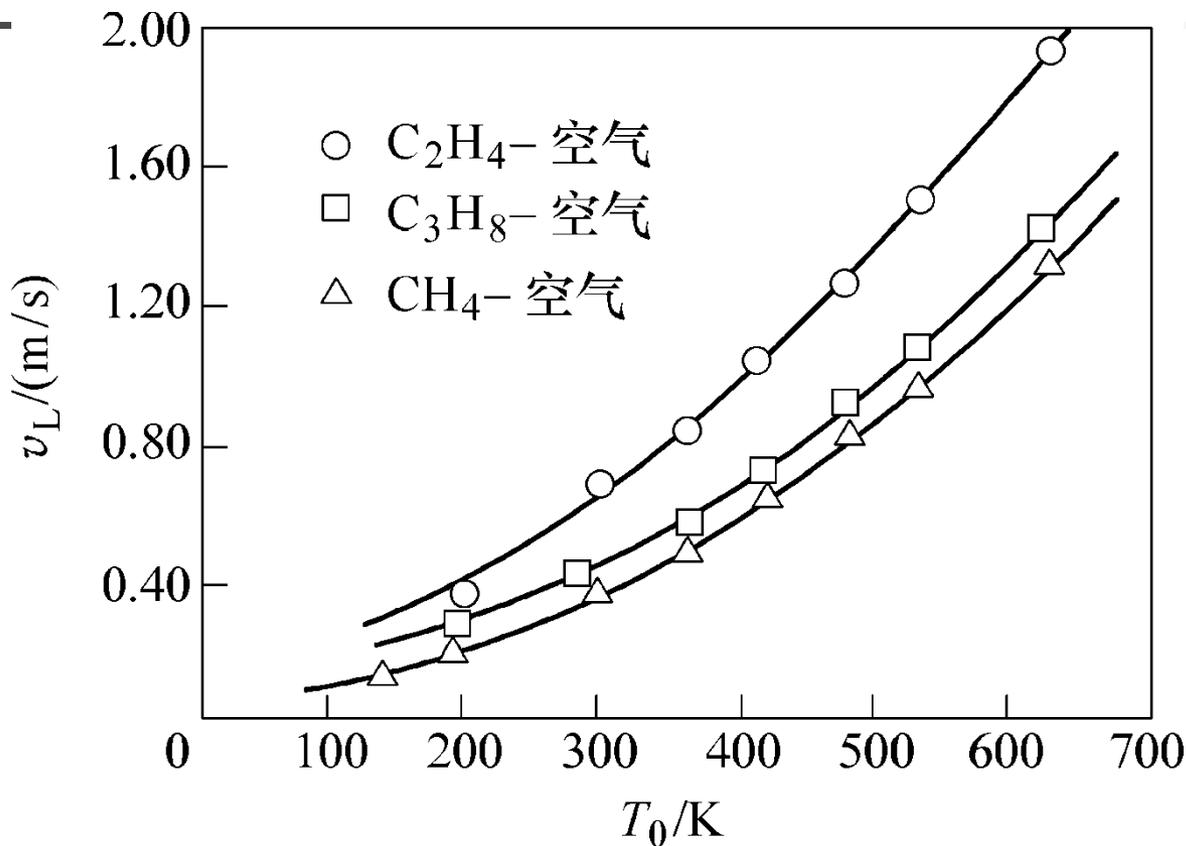
- 预热温度对城市煤气
(热值为 $20934 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$, 密度
为 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 燃烧速度的影响



预热温度对城市煤气燃烧速度的影响



可燃混合气初始温度 T_0 对火焰传播速度 v_L 影响的实验结果



可燃混合气初温对火焰传播速度的影响



• v_L 和 T_0 的关系式:

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

典型可燃气体 v_L ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 T_0 (K) 关系式 ($v_L = A_0 T_0^m$) 中的实验常数

实验常数	城市煤气 ($20934 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	CH_4	C_3H_8	C_4H_{10}
A_0	6.91×10^{-5}	2.55×10^{-5}	4.77×10^{-5}	9.10×10^{-5}
m	1.61	1.68	1.58	1.51

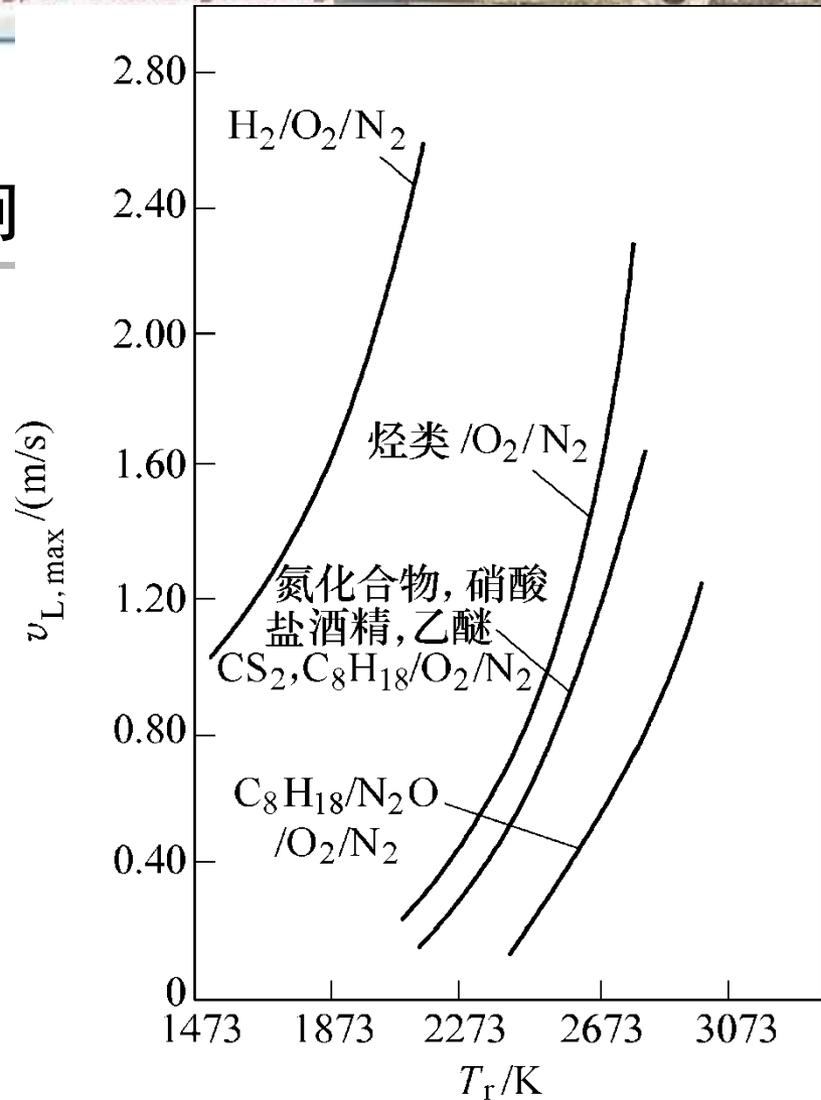


(2) 火焰温度 T_r 的影响

$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{a}}{c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0} \right) \frac{RT_r^2}{E} \bar{w}}$$

$$\bar{w} \approx k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_r}\right) C_0^\alpha C_{O_2}^\beta$$

燃烧过程的化学反应速度随着温度的升高而显著提高，从而大大提高火焰传播速度



火焰温度对火焰传播速度的影响



4、压力的影响：

$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{a}}{c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0} \right) \frac{RT_r^2}{E} \bar{w}}$$

$$c_0 \propto \rho \propto P$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \propto \frac{1}{\rho} \propto P^{-1}$$

$$w \propto P^n$$

$$\Rightarrow v_L \propto P^{\frac{1}{2}(n-2)}$$

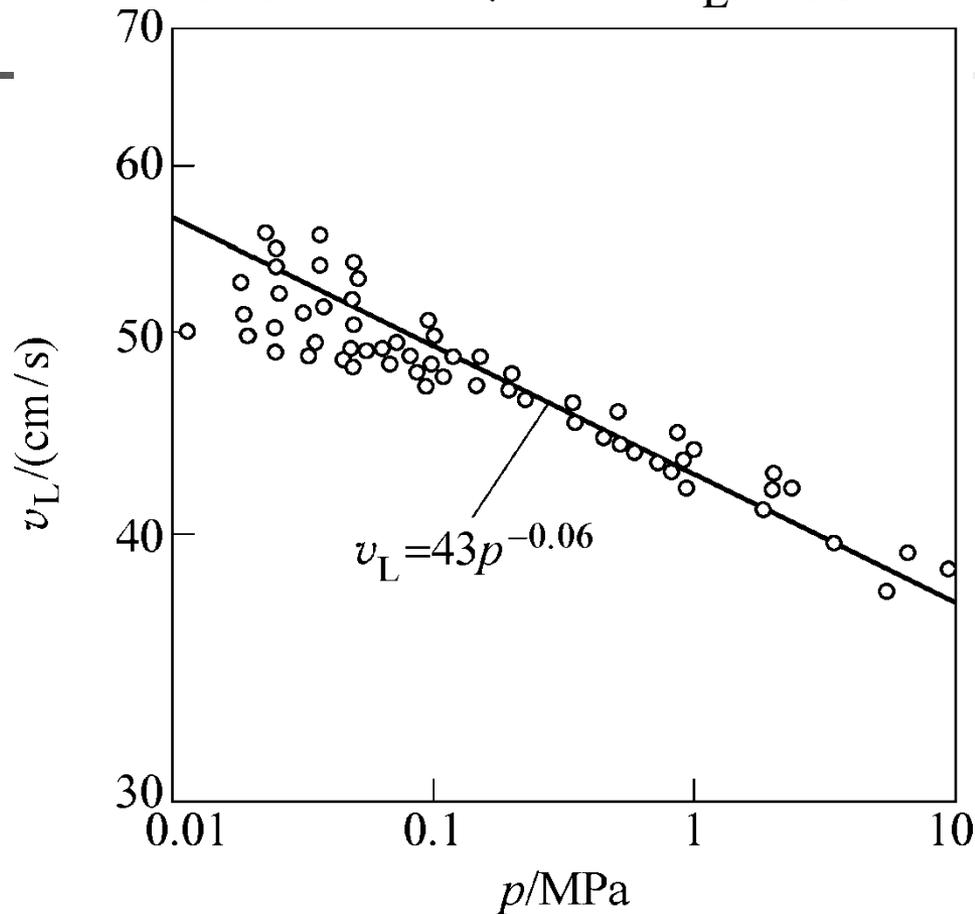
- 压力 p 对火焰传播速度影响的实验关系式

$$v_L \propto p^m$$

m — 刘易斯压力指数, $m = n/2 - 1$; n — 燃烧反应级数



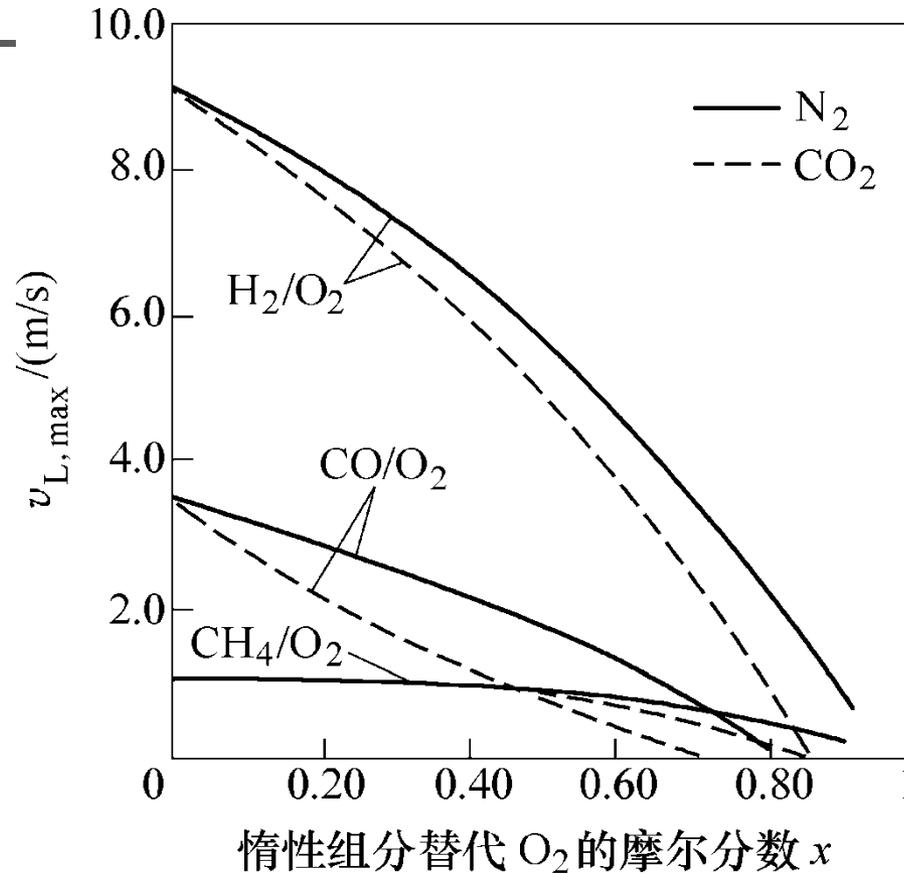
- 多数碳氢化合物的 $n < 2$ ，故其 v_L 随着压力 p 的升高而下降



甲烷-空气混合物的火焰传播速度与压力的关系



5. 惰性组分的影响



可燃混合气中掺入的惰性组分对火焰传播速度的影响



• 惰性组分 N_2 、 CO_2 对 v_L 的影响

$$v'_L = v_L (1 - \varphi_{N_2} - 1.2\varphi_{CO_2})$$

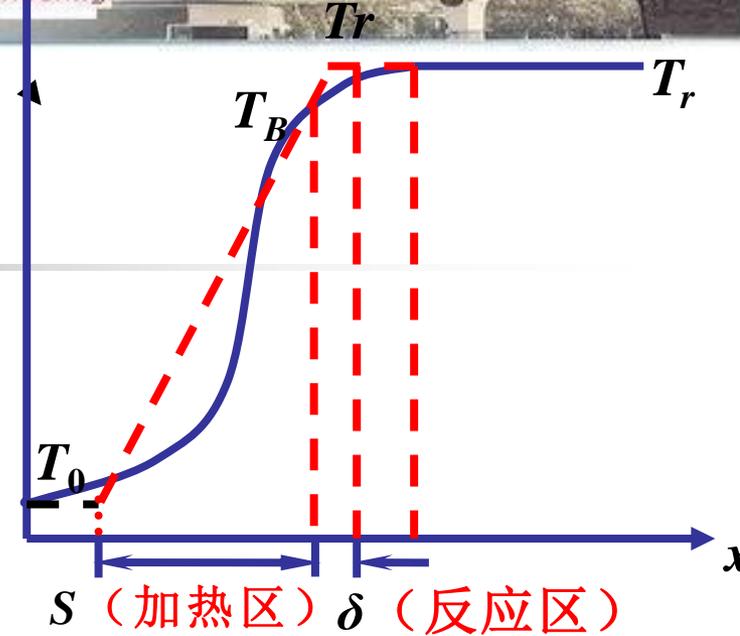
v_L 、 v'_L ——考虑惰性组分影响前、后的火焰传播速度，m/s

φ_{N_2} 、 φ_{CO_2} ——可燃混合气中 N_2 、 CO_2 的体积分数



火焰锋面厚度 δ 及可燃混合物 升温预热区厚度 s

$$v_L \rho c_p (T_B - T_0) \approx \lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_B \Rightarrow S \approx \frac{T_B - T_0}{\left(\frac{dT}{dx} \right)_B} = \frac{a}{v_L}$$



$$\delta = v_L \cdot \tau_{rj}$$

$$\tau_{rj} = \frac{c_0}{\bar{w}} = \frac{\rho c_p (T_r - T_0)}{\bar{w} Q} \Rightarrow c_0 = \frac{\rho c_p (T_r - T_0)}{Q} \Rightarrow \frac{\delta}{S} = \frac{v_L \cdot \tau_{rj}}{\frac{a}{v_L}} = \frac{v_L^2 \cdot \tau_{rj}}{a} = \frac{RT_r^2}{E(T_r - T_0)}$$

$$v_L = \sqrt{\frac{\bar{a}}{c_0} \left(\frac{1}{T_r - T_0} \right) \frac{RT_r^2 \bar{w}}{E}}$$

通常 $\delta < S$, 一般

$v_L = 10^{-2} \sim 1 m/s$

$\delta \leq 1 mm$



淬熄距离：距壁面数mm之内地方，壁面温度低， $\frac{dT}{dr} \uparrow \uparrow$ ，
散热强烈， $T_r \downarrow \downarrow \rightarrow v_L \downarrow \downarrow$ ，造成火焰无法传播的临界边界厚度
称为淬熄距离。





第六节 燃烧热工况

- 讨论气流（燃料与助燃气体的混合物）在点火之后的温度在某一**开口系统**中如何变化的问题。
- 本质是**开口系统**中的热平衡问题。
- 结论是燃烧过程能否在**开口系统**中达到稳定的问题。



著名的历史事件——赤壁大战

电影《赤壁》片程

赤壁

RED CLIFF II

决战

遥想公瑾当年，小乔初嫁了，雄姿英发。
羽扇纶巾，谈笑间，**檣櫓灰飞烟灭。**



三

个

问

题

- **连环计**：庞统诱使曹军将战船连成整体，除了试图一次性烧毁全部战船以外，还有别的作用吗？





三

个

问

题

苦肉计：为什么需要黄盖诈降并携带专门的引燃材料？直接使用射火箭、扔火把等方式点火能否成功？





三

个

问

题

- **借东风：**除了风向利于全面烧毁曹军战船和营地以外，东南风是否比西北风更有利于燃烧？





燃烧系统热工况的零维模型

出口

气体温度: T

氧气浓度: C

将燃烧系统简化为“零维”系统，假定系统内部的物理量均匀分布



燃烧发生区域

系统容积: V

气体温度: T

氧气浓度: C

进口气流参数:

体积流量: $q_V \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

气流初温: $T_0 \text{ K}$

氧气浓度: $C_0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$



系统产热量 Q_1 / J · s⁻¹

■ 按化学反应速度计算：

$$Q_1 = k_0 C V Q \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Diagram annotations for the equation above:

- 氧气浓度 (Oxygen concentration) $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ points to C
- 系统容积 (System volume) m^3 points to V
- 活化能 (Activation energy) $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ points to E
- 频率因子 (Frequency factor) s^{-1} points to k_0
- 燃料发热量 (Fuel heat of combustion) $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ points to Q
- 气体常数 (Gas constant) $\text{J} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}^{-1}$ points to R
- 温度 (Temperature) K points to T

■ 写成倒数形式：

$$Q_1 = \frac{CQ}{k_0 V \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)}$$



系统产热量 $Q_1 / J \cdot s^{-1}$

气体流量
 $m^3 \cdot s^{-1}$

单位氧量产热
 $J \cdot mol^{-1}$

- 按氧气消耗率计算:

$$Q_1 = q_V (C_0 - C) Q$$

进口氧气浓度
 $mol \cdot m^{-3}$

出口氧气浓度
 $mol \cdot m^{-3}$

- 写成倒数形式:

$$Q_1 = \frac{(C_0 - C) Q}{q_V}$$



系统产热量 $Q_1 / \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$

利用分式性质消去 C :

$$Q_1 = \frac{CQ}{k_0 V \exp(-\frac{E}{RT})} = \frac{(C_0 - C)Q}{q_v} = \frac{\cancel{CQ} + (C_0 - \cancel{C})Q}{\frac{1}{k_0 V \exp(-\frac{E}{RT})} + \frac{1}{q_v}}$$

最终得到:

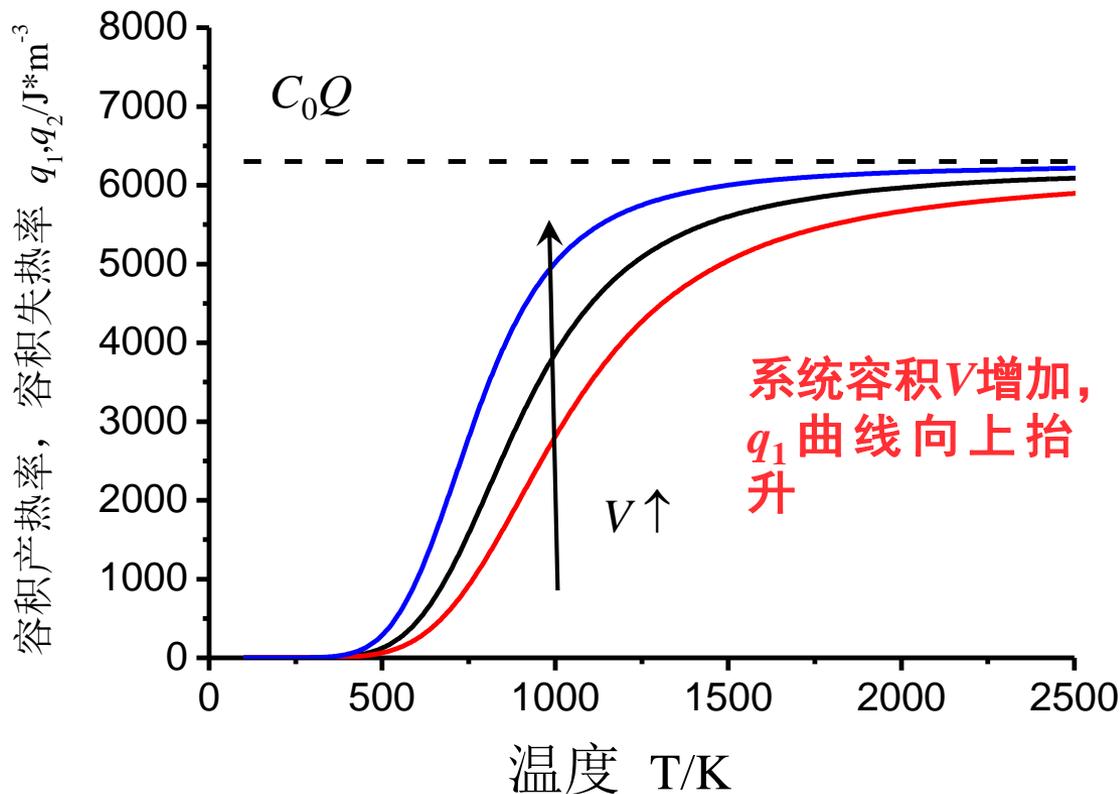
$$Q_1 = \frac{C_0 Q}{\frac{\exp(-\frac{E}{RT})}{k_0 V} + \frac{1}{q_v}}$$



容积产热率 $q_1 / \text{J} \cdot \text{m}^{-3}$

把系统产热量分摊给每 1m^3 进入系统的气体，则得容积产热率：

$$q_1 = \frac{Q_1}{q_v} = \frac{C_0 Q}{1 + \frac{q_v \exp(\frac{E}{RT})}{k_0 V}}$$





系统失热量 Q_2 / $J \cdot s^{-1}$

出口气流热焓减去进口气流热焓（忽略比热 c_p 变化）：

$$Q_2 = q_V \rho c_p (T - T_0)$$

气体流量 $m^3 \cdot s^{-1}$ 气体密度 $kg \cdot m^{-3}$ 比热 $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$

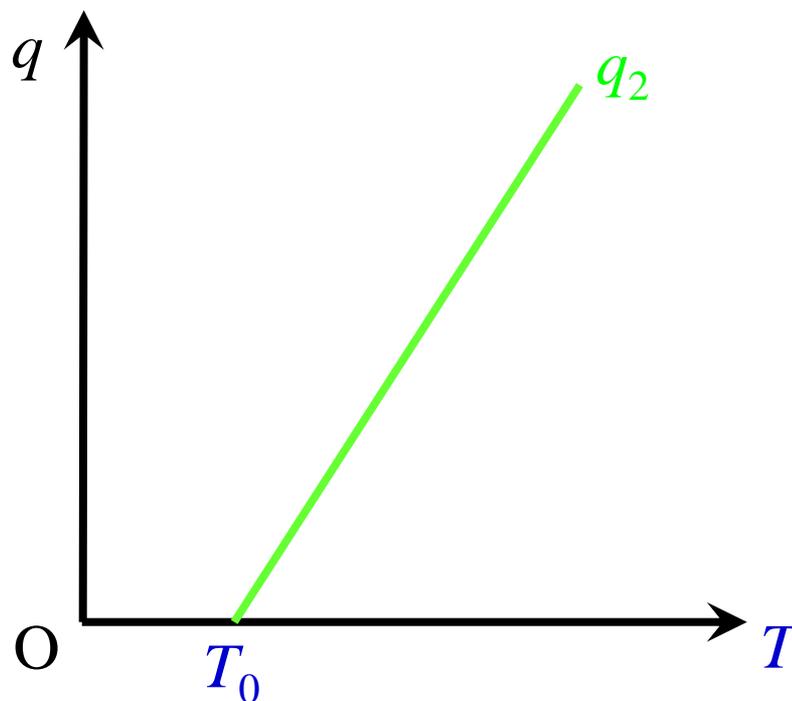
出口气流温度 K 进口气流温度 K



容积失热率 $q_2 / \text{J} \cdot \text{m}^{-3}$

把系统失热量分摊给每 1m^3 进入系统的气体，
则得容积失热率：

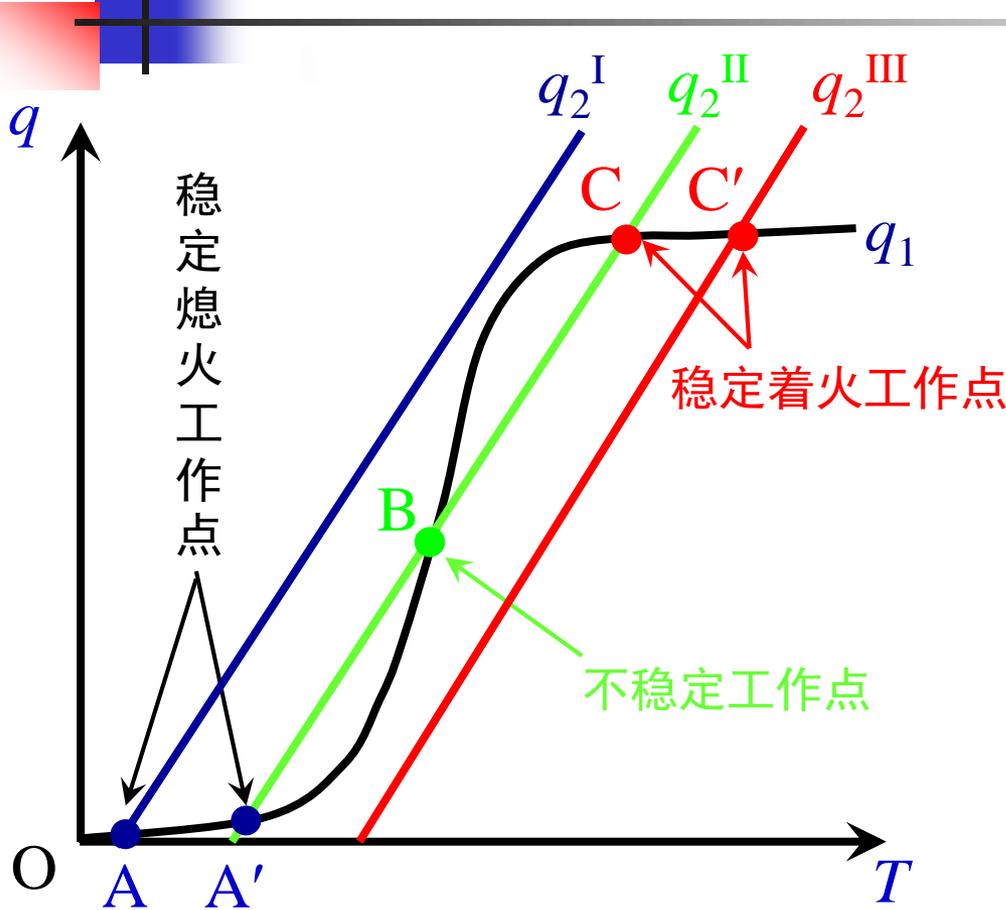
$$q_2 = \frac{Q_2}{q_V} = \rho c_p (T - T_0)$$



气流初温 T_0 上升， q_2 直线平行向右移动



系统的热平衡点：容积产热率=容积失热率



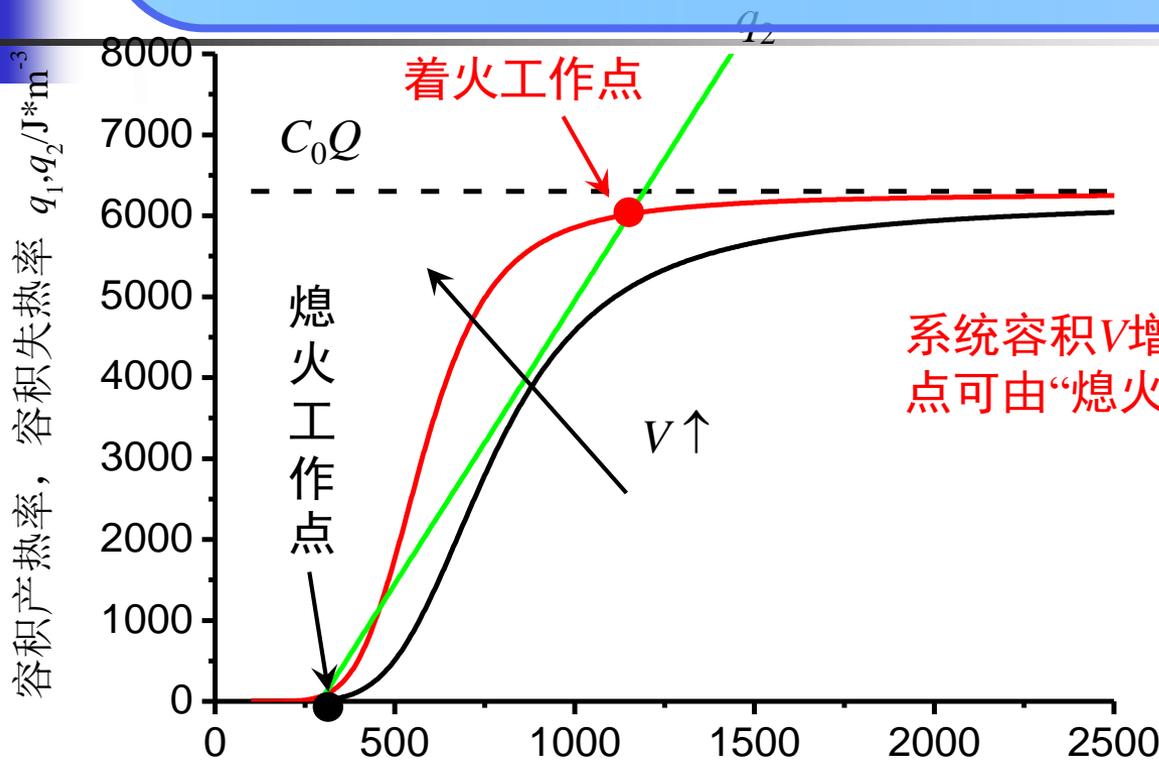
q_1 线和 q_2 线的交点
为系统的工作点

- a) 交点A和A'是稳定点，熄火点。
- b) 交点C和C'是稳定点，正常燃烧点。
- c) 交点B是不稳定点。如果温度向低温方向扰动，则交点移动到A点，发生熄火；如果温度向高温方向扰动，则交点移动到C点，正常燃烧。

零维系统燃烧的热工况



系统容积对热工况的影响



系统容积 V 增加, q_1 曲线上移, 工作点可由“熄火”变化到“稳定燃烧”。

众人拾柴火焰高

温度 T/K

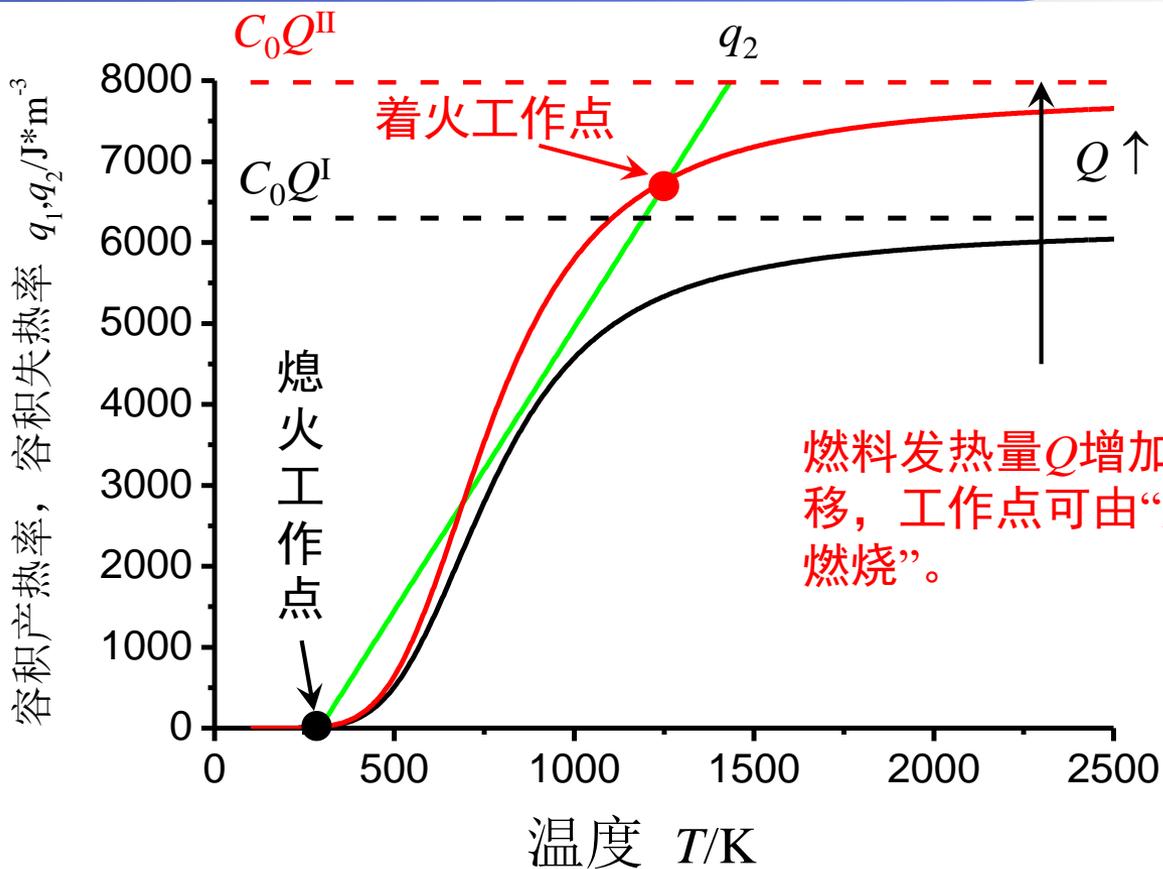
正面例子

负面例子

过火区域越大的火灾越难以扑灭, 需要“防患于未然”



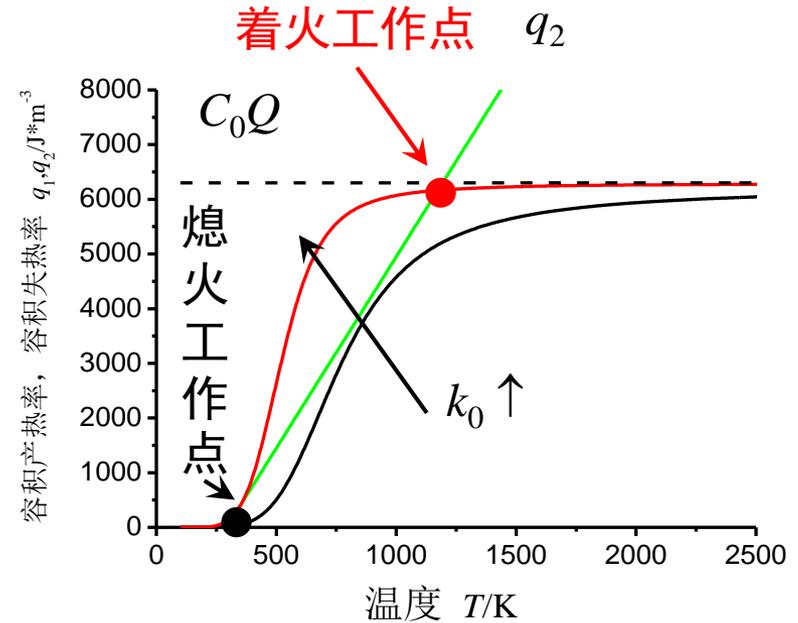
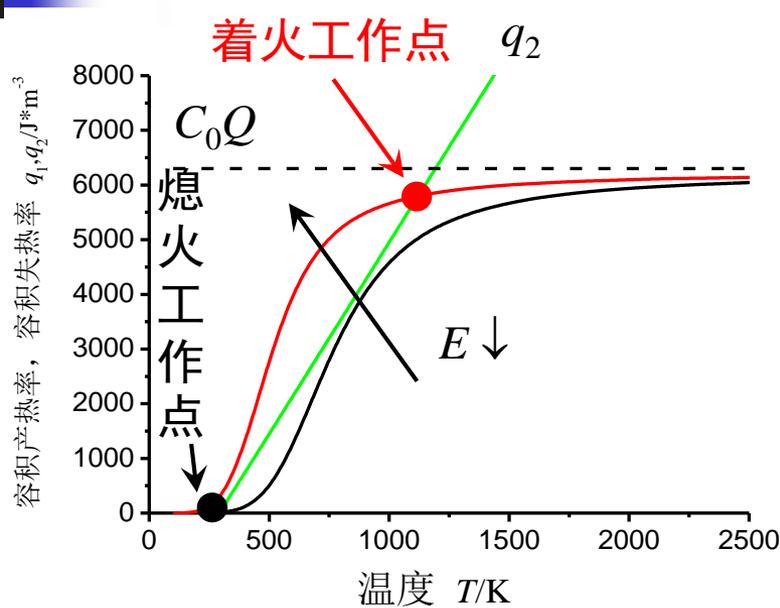
燃料发热量对热工况的影响



燃料发热量 Q 增加, q_1 曲线成比例上移, 工作点可由“熄火”变化到“稳定燃烧”。



燃料化学特性对热工况的影响

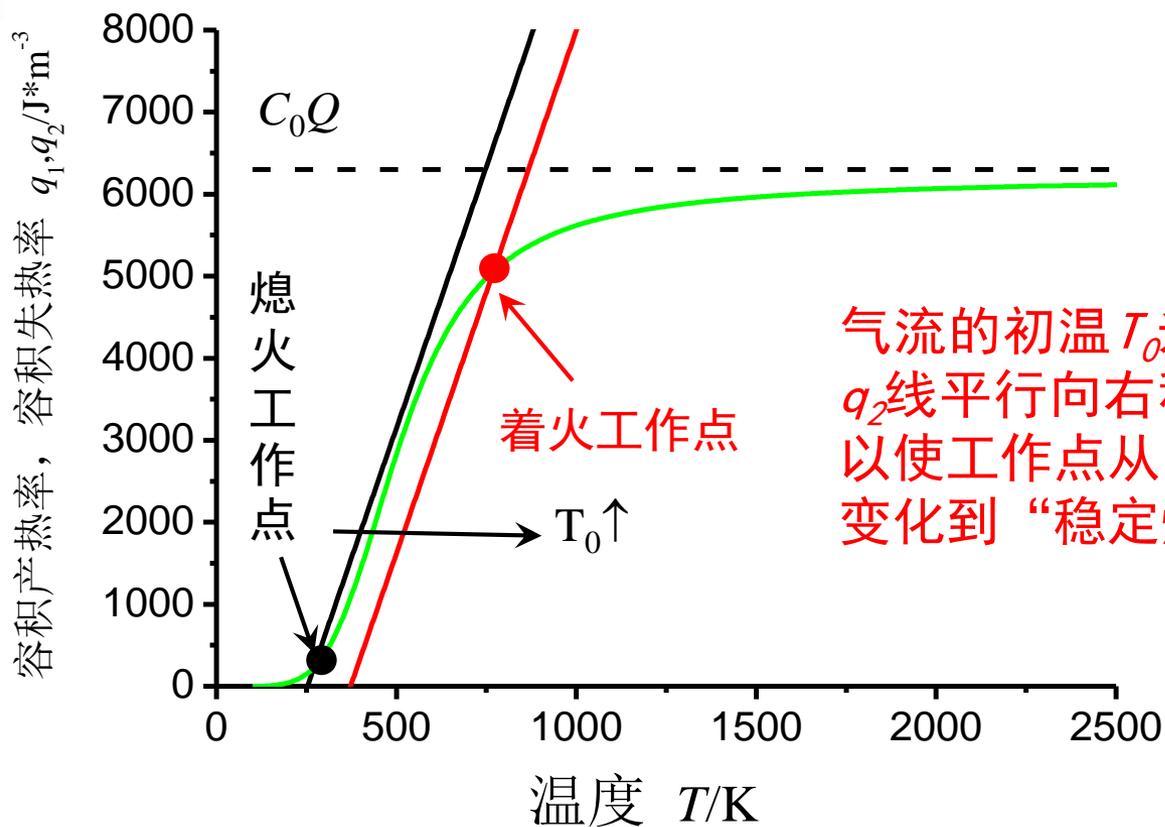


- 当燃料的活化能 E 减小的时候, q_1 曲线向上移动。
- 当燃料的频率因子 k_0 增加的时候, q_1 曲线向上移动。

提高燃料化学反应的活性, 可以使工作点从“熄火”变化到“稳定燃烧”。



气流初始温度对热工况的影响



实例：几乎所有的燃烧设备都会对送入的空气进行预热。



燃烧系统容积 $V \uparrow$
系统工作点温度 \uparrow

燃料发热量 $Q \uparrow$
系统工作点温度 \uparrow

零维系统燃烧
热工况总结

燃料活性 $k_0 \uparrow, E \downarrow$
系统工作点温度 \uparrow

气流初温 $T_0 \uparrow$
系统工作点温度 \uparrow



问 题 解 答

连环计：诱使曹军将战船连成整体，除了试图一次性烧毁全部战船以外，还有别的作用吗？



答：燃烧区域容积 V 增加，会使燃烧稳定性明显提升。



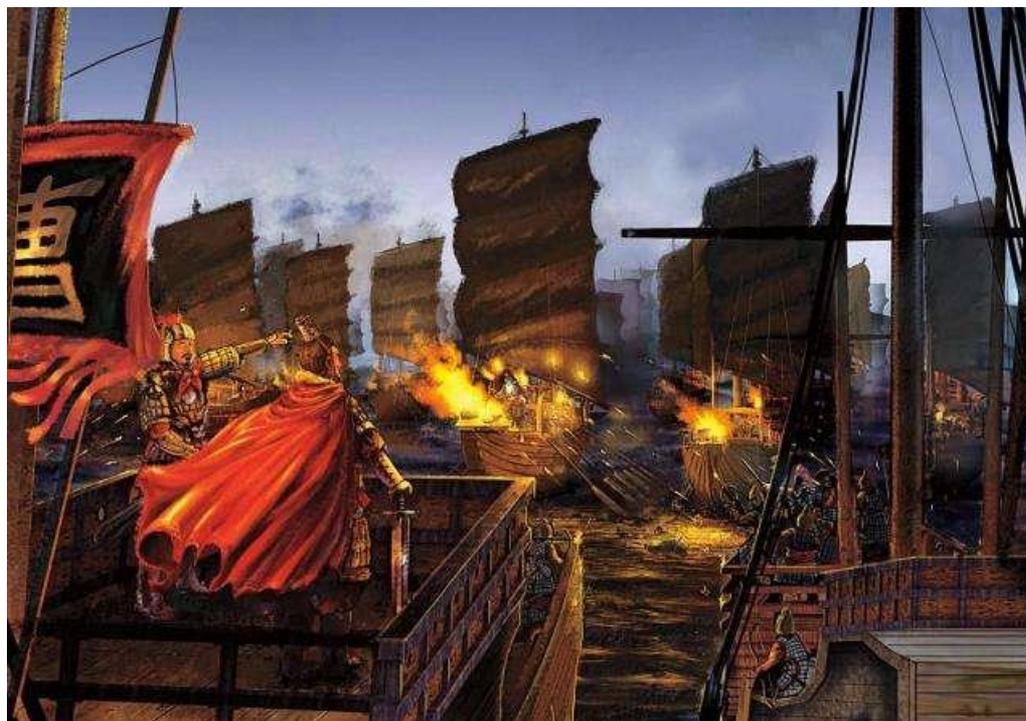
问

题

解

答

- **苦肉计**：为什么需要黄盖诈降并携带专门的引燃材料？直接使用射火箭、扔火球等方式点火能否成功？



答：燃烧料的发热量 Q 增加，化学反应活性增加，会使得燃烧更容易达到稳定。



问 题 解 答

借东风：除了风向利于全面烧毁曹军战船和营地以外，东南风是否比西北风更有利于燃烧？



赤壁之战发生的时间段：公元208年12月到公元209年1月。

以2018年1月天气为例，在风向不同的时间，赤壁当地的气温可以相差14~15°C

赤壁市历史天气 [切换国内城市](#) [切换国际城市](#)

2018年

1月

平均高温：7°C 平均低温：1°C

极端高温：16°C (1月15日)

极端低温：-4°C (1月28日)

平均空气质量指数：85

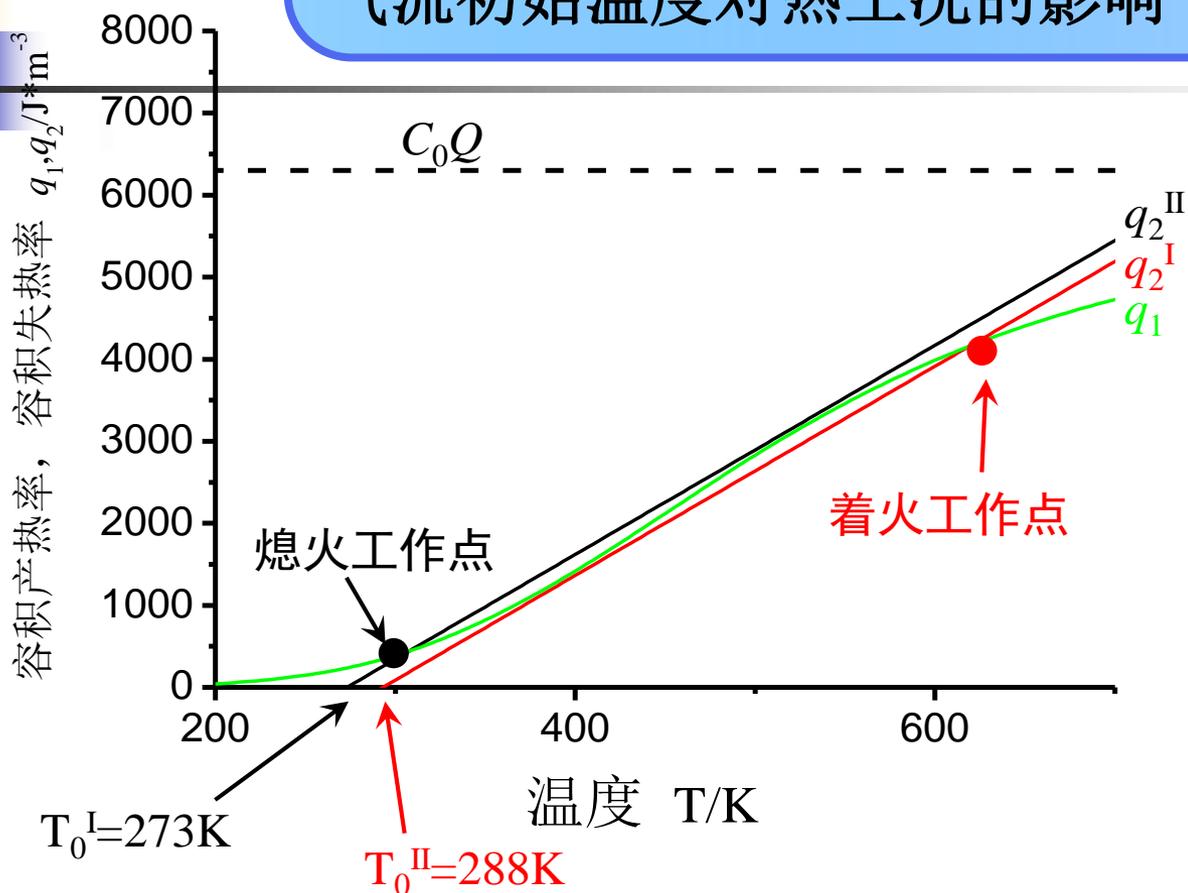
空气最好：29 空气优 (01月04日)

空气最差：165 中度污染 (01月19日)

日期	最高气温	最低气温	天气	风向风力	空气质量指数
2018-01-14 星期日	14°C	4°C	多云	南风1-2级	86 良
2018-01-15 星期一	16°C	7°C	多云~小雨	东风1-2级	100 良
2018-01-27 星期六	0°C	-2°C	大雪	北风1-2级	54 良
2018-01-28 星期日	0°C	-4°C	小雪~阴	北风1-2级	69 良



气流初始温度对热工况的影响



在特定参数条件下，气流初始温度从273K升高到288K，仅仅15K的变化，即可引起工作点温度从“熄火”改变到“稳定燃烧”。

答：东南风温度高于西北风，助燃空气温度提升，会使得燃烧稳定性明显提升。

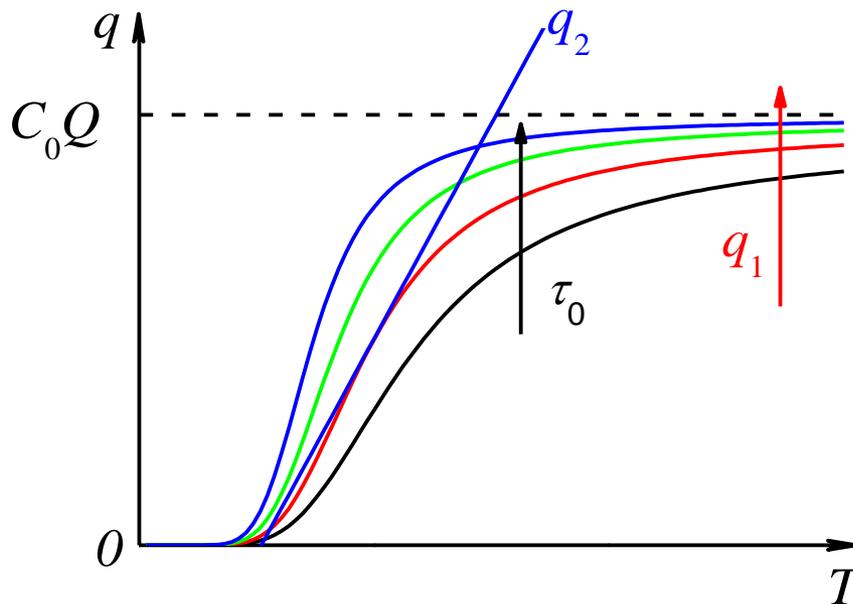


停留时间对零维系统燃烧稳定性的影响

$$q_1 = \frac{Q_1}{q_v} = \frac{C_0 Q}{1 + \frac{q_v \exp(\frac{E}{RT})}{k_0 V}}$$

$$\tau_0 = V / q_v$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{q_v} = \frac{C_0 Q}{1 + \frac{\exp(\frac{E}{RT})}{k_0 \tau_0}}$$



- 停留时间 τ_0 增加， q_1 上移，熄火的可能性减小，燃烧稳定性改善。



壁面吸热对零维系统燃烧稳定性的影响

- 当分析实际的燃烧室的时候，燃烧室的壁面不是绝热的，需要把火焰对燃烧室壁面的辐射散热考虑进去，则散热率为：

$$q_2 = \frac{Q_2}{q_V} = \rho c_p (T - T_0) + 4.9 \times 10^{-8} \alpha_l \zeta S_{yx} T^4 / q_V$$
$$= \rho c_p (T - T_0) + \frac{\sigma T^4 \tau_0}{V}$$

其中 $\sigma = 4.9 \times 10^{-8} \alpha_l \zeta S_{yx}$ 为决定燃烧室结构的系数；

ζ —燃烧室壁面的污垢系数；

S_{yx} —有效辐射受热面积；

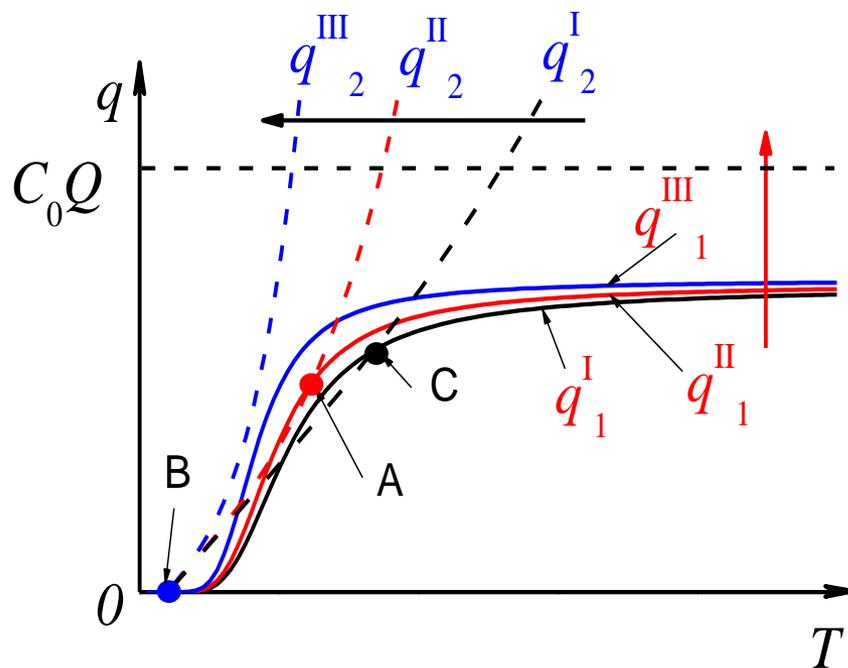
α_l —燃烧室系统黑度。



壁面吸热对零维系统燃烧稳定性的影响

- 当 $S_{yx} \uparrow$, 或 $\zeta \uparrow$, 或 $\alpha_l \uparrow$, 则导热系数 $\sigma \uparrow$, 从而散热增强, q_2 曲线向左移动, 燃烧的稳定性下降;
- 其它条件不变, 燃烧室容积 $V \uparrow$, 单位流量气流的散热量 \downarrow , 燃烧的稳定性提高;
- 其它条件不变, 停留时间 $\tau_0 \uparrow$, 产热 \uparrow ($q_1^I \rightarrow q_1^{II} \rightarrow q_1^{III}$), 散热也 \uparrow ($q_2^I \rightarrow q_2^{II} \rightarrow q_2^{III}$), 则 q_1 与 q_2 交点的移动有多种情况, 如图所示。如果产热上升幅度更大, 燃烧稳定性增加; 如果散热的上升幅度更大, 则燃烧的稳定性下降。

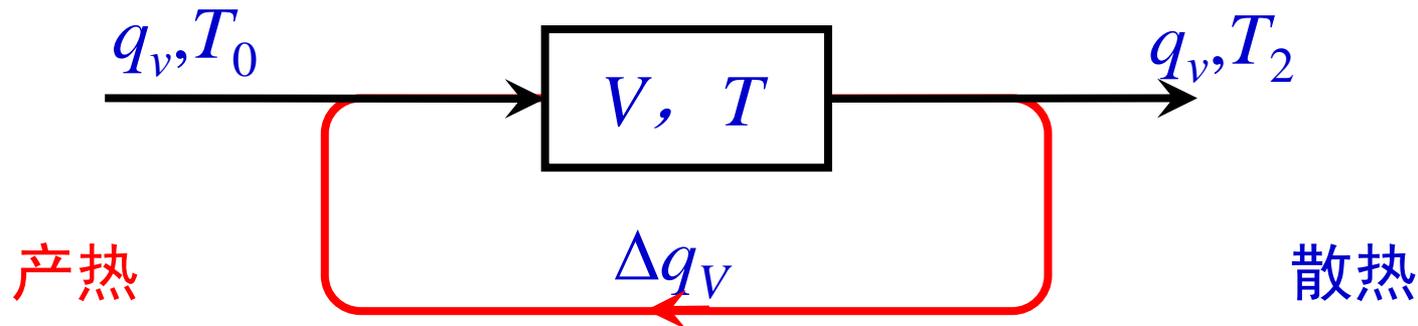
$$q_2 = \rho c_p (T - T_0) + \frac{\sigma T^4 \tau_0}{V}$$





热量回流对零维系统燃烧稳定性的影响

对于存在烟气回热的情况，由于系统流动和化学反应工况的整体不变，所以停留时间和产热量不变。根据热平衡的原理，烟气回热的作用是把排烟损失中的部分热量返回进口烟气，减少散热量。假定烟气回热量相当于 Δq_v 回流量的烟气的热焓：



$$q_1 = \frac{Q_1}{q_v} = \frac{C_0 Q}{1 + \frac{\exp(\frac{E}{RT})}{k_0 \tau_0}}$$

$$Q_2 = (q_v - \Delta q_v) \rho c_p (T - T_0)$$

$$q_2 = \frac{Q_2}{q_v} = \rho c_p (T - T_0) \left(1 - \frac{\Delta q_v}{q_v} \right)$$



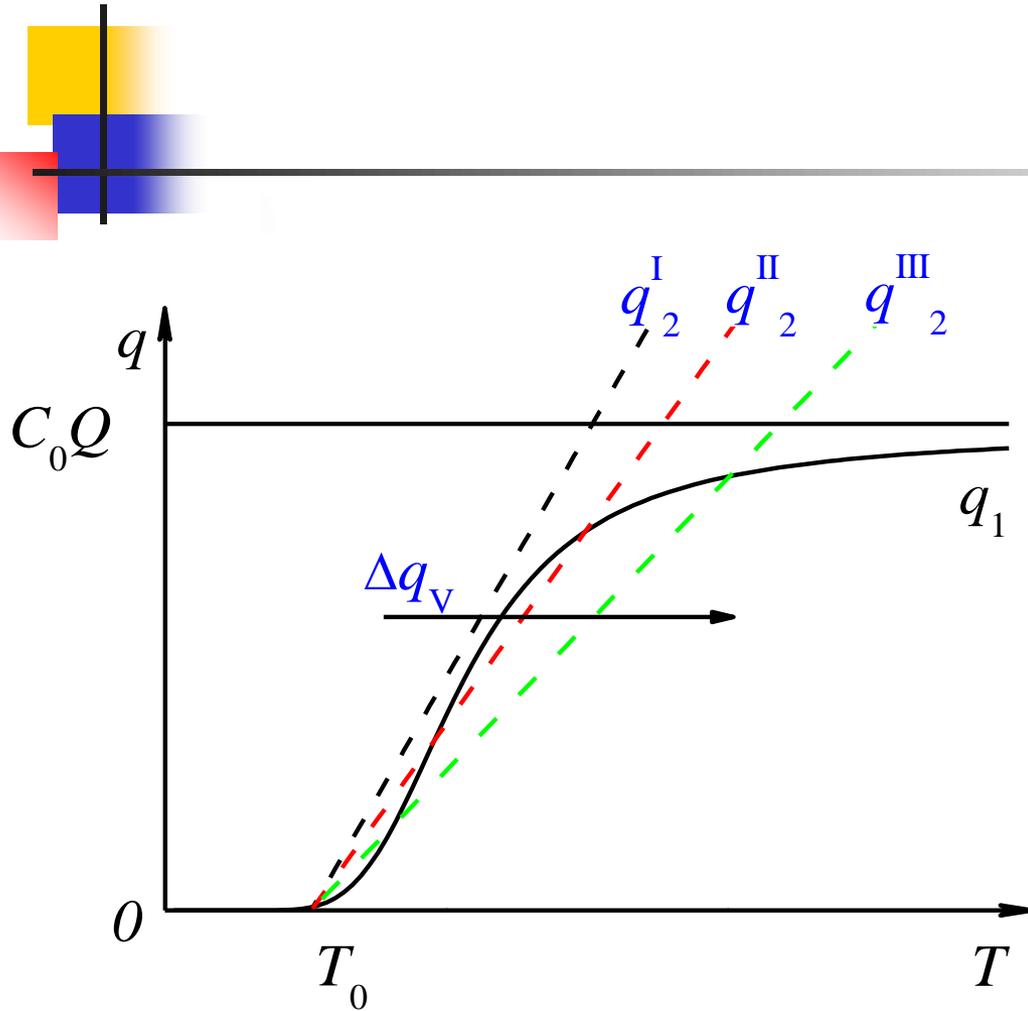
若以实际排烟温度来计算散热量，得到

$$Q_2 = q_V \rho c_p (T_2 - T_0)$$

与 $Q_2 = (q_V - \Delta q_V) \rho c_p (T - T_0)$

对比得：
$$T_2 = \left(1 - \frac{\Delta q_V}{q_V}\right) T + \frac{\Delta q_V}{q_V} T_0 = T - \frac{\Delta q_V}{q_V} (T - T_0)$$

烟气回热减少从出口流出的热量损失，进口温度 T_0 不变，而排烟温度降低。



- 当回热流量 $\Delta q_v \uparrow$, q_2 曲线在 T 轴上的节距不变, 但斜率发生变化, q_2 曲线绕 T_0 点向右旋转, 改善了燃烧稳定性, 从不能着火状态变为正常燃烧的工况。

回流量对燃烧热工况的影响



(5) 零维系统燃烧热工况的结论

因素名称	符号	趋势	燃烧稳定性
炉膛容积	V	↑	↑
燃料流量	q_v	↑	↓
燃料发热量	Q	↑	↑
燃料活性	k_0, E	k_0 ↑, E ↓	↑
气流初温	T_0	↑	↑
炉膛吸热		↑	↓
烟气回热	Δq_v	↑	↑

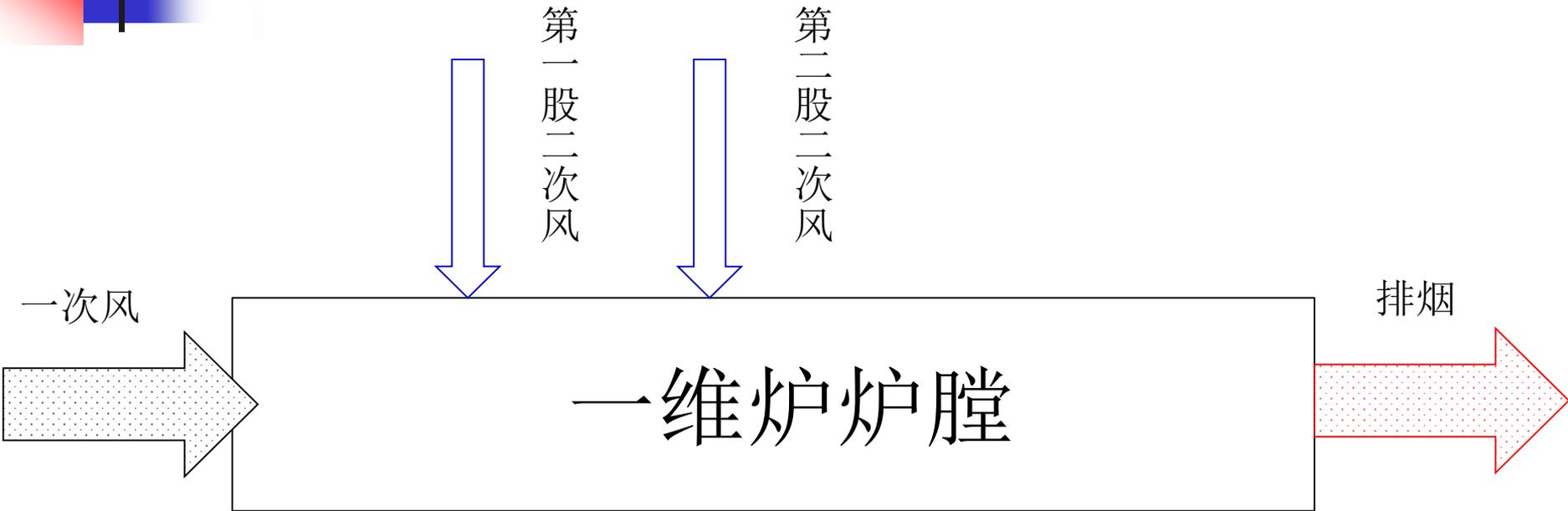


二、一维系统的燃烧热工况

- 一维系统：系统中在气流的横截面上温度、浓度等参数是均匀的，仅沿气流方向这些参数才有变化。一维系统中可以对气流燃烧过程进行计算。（一维炉系统图）



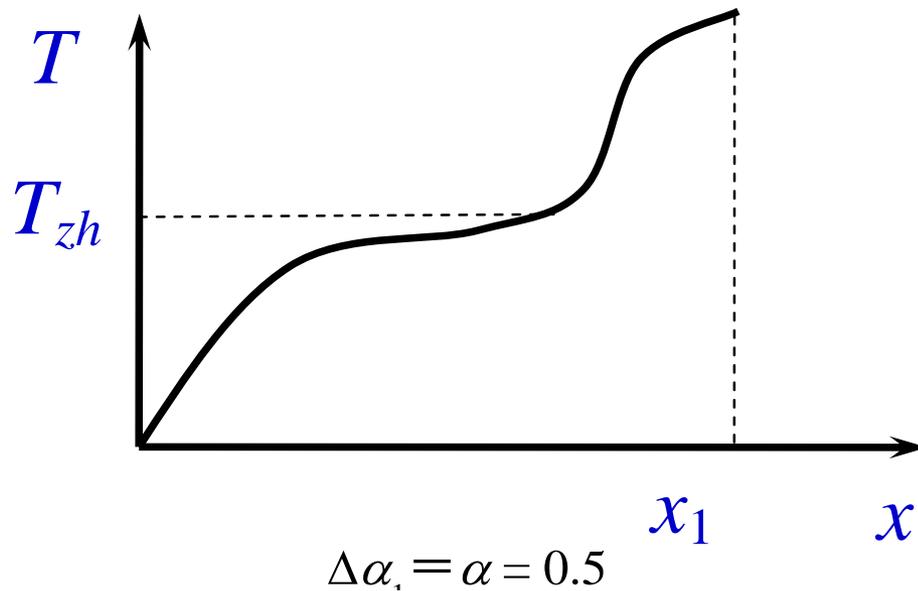
一维炉系统图





方案1

- 所有空气 ($\alpha = 0.5$) 作为一次风和煤粉一起进入炉内 (即 $\Delta\alpha_1 = \alpha = 0.5$)

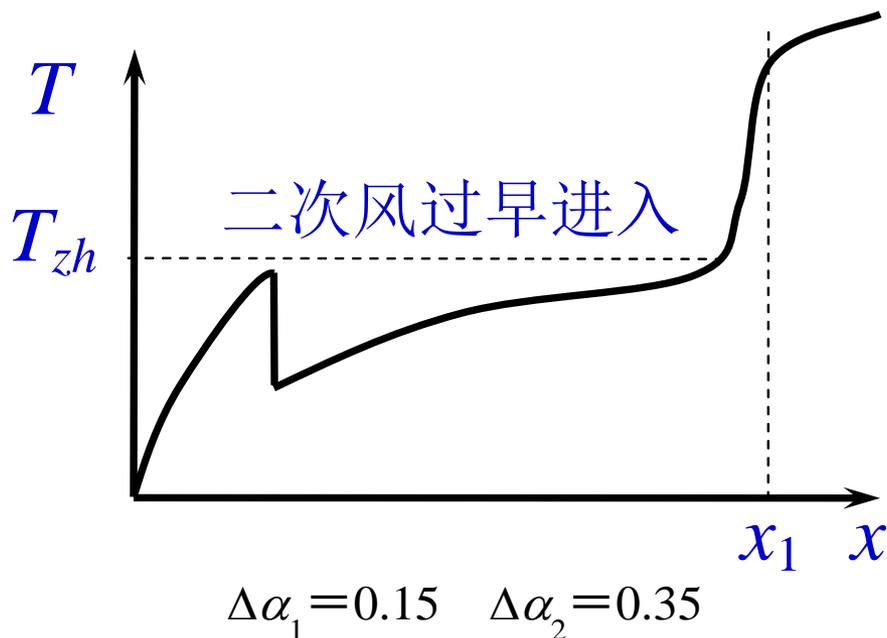


从这个方案可以看出，全部空气都用作一次风，提高了最初的煤粉气流的热容量，使加热到着火的时间（由此也决定了空间长度）延长，这样就不能缩短整个火焰长度。



方案2

- 空气分成一次风($\Delta\alpha_1=0.15$)与二次风($\Delta\alpha_2=0.35$), 二次风过早进入。

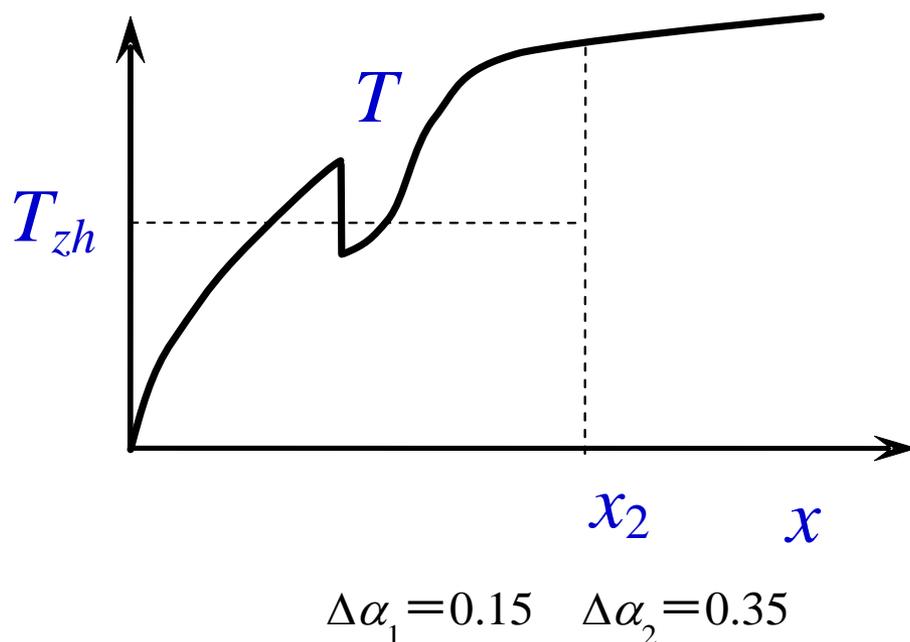


从这个方案可以看出，二次风过早地在一次风与煤粉气流尚未着火燃烧以前送入，其结果与全部空气都作为一次风一样，也不能缩短火焰长度。



方案3

- 空气分成一次风($\Delta\alpha_1=0.15$)与二次风($\Delta\alpha_2=0.35$), 推迟二次风加入点。

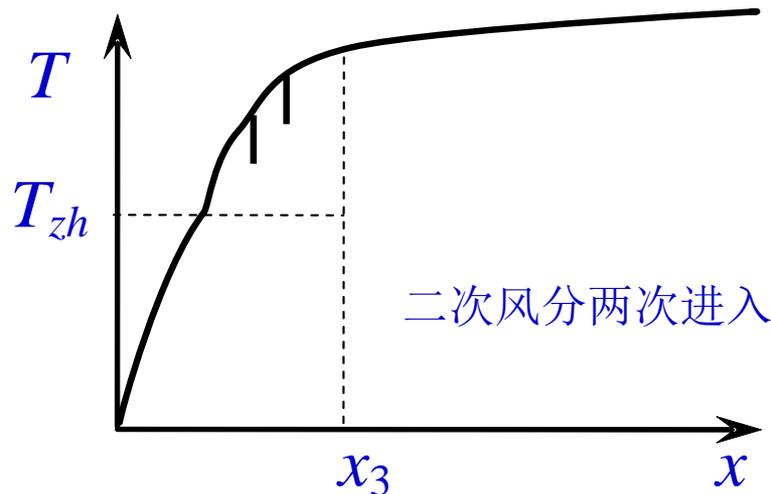


从这个方案可以看出，二次风在一次风中的氧消耗完以后加入，对于缩短火焰长度是有帮助的。但是一次加入的二次风过多，使燃烧中断，所以火焰长度缩短得不多。



方案4

- 二次风分为两批，空气分成一次风($\Delta\alpha_1 = 0.15$)与二次风($\Delta\alpha_{21} = 0.15$ 和 $\Delta\alpha_{22} = 0.2$)。



$$\Delta\alpha_1 = 0.15 \quad \Delta\alpha_{21} = 0.15 \quad \Delta\alpha_{22} = 0.2$$

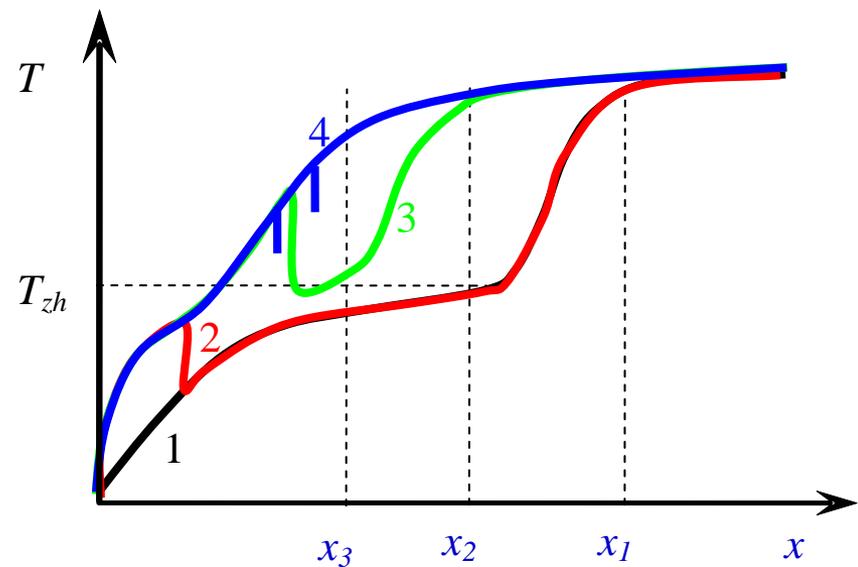
从这个方案可以看出，二次风加入点燃烧温度高，虽然温度略微降低，但燃烧依然十分强烈，温度又较快回升上去。



四种方案比较

■一维系统的燃烧热工况分析可以正确地反映合理组织气流燃烧过程的方法。归纳起来，可列成下列原则：

- 1) 供应的空气应该分成一次风与二次风，可以加快气流的升温着火。
- 2) 二次风应分批加入，第一批烧完了再加入第二批。
- 3) 二次风每批送入的数量应有限制，避免中途淬熄、保证燃烧继续进行。





本章作业：使用编程语言求解常微分方程的方法，求解零维系统自燃问题

- 求解对象：系统热平衡方程 $V \rho c_v \frac{dT}{d\tau} = Q_1 - Q_2$

- 其中，系统产热为 $Q_1 = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C^n \cdot V \cdot Q$

- 系统散热为 $Q_2 = \eta \cdot S \cdot (T - T_0)$

- 得到一个常微分方程

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C^n \cdot V \cdot Q - \eta \cdot S \cdot (T - T_0)}{V \rho c_v}$$

- 这个方程手工求解很困难，但是用计算机编程的方法求解则很容易



- k_0 ——频率因子，初值取100.0
 - E ——活化能，初值取1.E5
 - R ——气体常数，初值取8.314
 - C ——可燃混合物中反应物浓度，初值取1.0
 - n ——反应级数，初值取1.0
 - V ——容器体积，初值取1.0
 - Q ——可燃混合物的燃烧热，初值取2.E7
 - T ——容器内可燃混合物温度，初值取与 T_0 相等的数值。
 - η ——散热系数，初值取5.0
 - S ——容器壁散热面积，初值取6.0
 - T_0 ——容器壁温度，初值取800.0
 - ρ ——混合气密度，初值取1.0
 - c_v ——比热，初值取1.E3
- 定解条件： $\tau=0$ 时， $T=T_0$ 。以上方程描述了一个零维系统的温度从 $\tau=0$ 开始随时间变化的过程。



作业内容

- 1、使用Euler法，求解上述定解条件下的常微分方程，获得系统温度 T 随时间 τ 的变化曲线。
- 2、分别令系统初温 $T_0=300$ 、400、500、600、700、800、900、1000、1100（其他参数不变），获得不同初始温度下的系统升温曲线，并讨论系统初温对热自燃过程的影响。
- 3、分别令散热系数 $\eta=1.0\sim 10.0$ （ T_0 保持800K），获得不同初始温度下的系统升温曲线，并讨论散热系数对热自燃过程的影响。



Euler法求解常微分方程

- 设有一个常微分方程 $\frac{dy}{dx} = f(x, y(x))$
- 定解条件: $x = x_0, y = y_0$
- 取向前差分, 令 $\frac{dy}{dx} = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$
- 得 $y_{n+1} = y_n + (x_{n+1} - x_n) \cdot f(x_n, y_n)$

由此可以构造一个由初始条件进行递推的算法:

$$\begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 \end{cases} \Rightarrow f(x_0, y_0) \Rightarrow y_1, \begin{cases} x = x_1 \\ y = y_1 \end{cases} \Rightarrow f(x_1, y_1) \Rightarrow y_2 \cdots \Rightarrow y_n$$

可以通过 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ 的值算出对应的 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ 的值



示例程序

- 设有一个常微分方程 $\frac{dy}{dx} = y$
- 定解条件: $x = 0, y = 1$
- 解析解 $y = e^x$



program selfignition

implicit none

real::tao0,CH0,tao,CH,tao1,CH1,dtao,taomax,CHmax

integer::i

i=0

tao0=0.

CH0=1.

dtao=0.1

tao1=tao0

CH1=CH0

taomax=100.

CHmax=1.e30



```
open(01,file='CH.dat')
```

```
do while(abs(tao)<=taomax.and.abs(CH)<=CHmax)
```

```
    i=i+1
```

```
    tao=tao+dtao
```

```
    CH=CH1+dtao*CHT(CH1)
```

```
    print *,i,tao,CHT(CH),CH
```

```
    write(01,*) tao,CHT(CH),CH
```

```
    tao1=tao
```

```
    CH1=CH
```

```
enddo
```

```
close(01)
```

```
contains
```

```
function CHT(CH)
```

```
    implicit none
```

```
    real CHT,CH
```

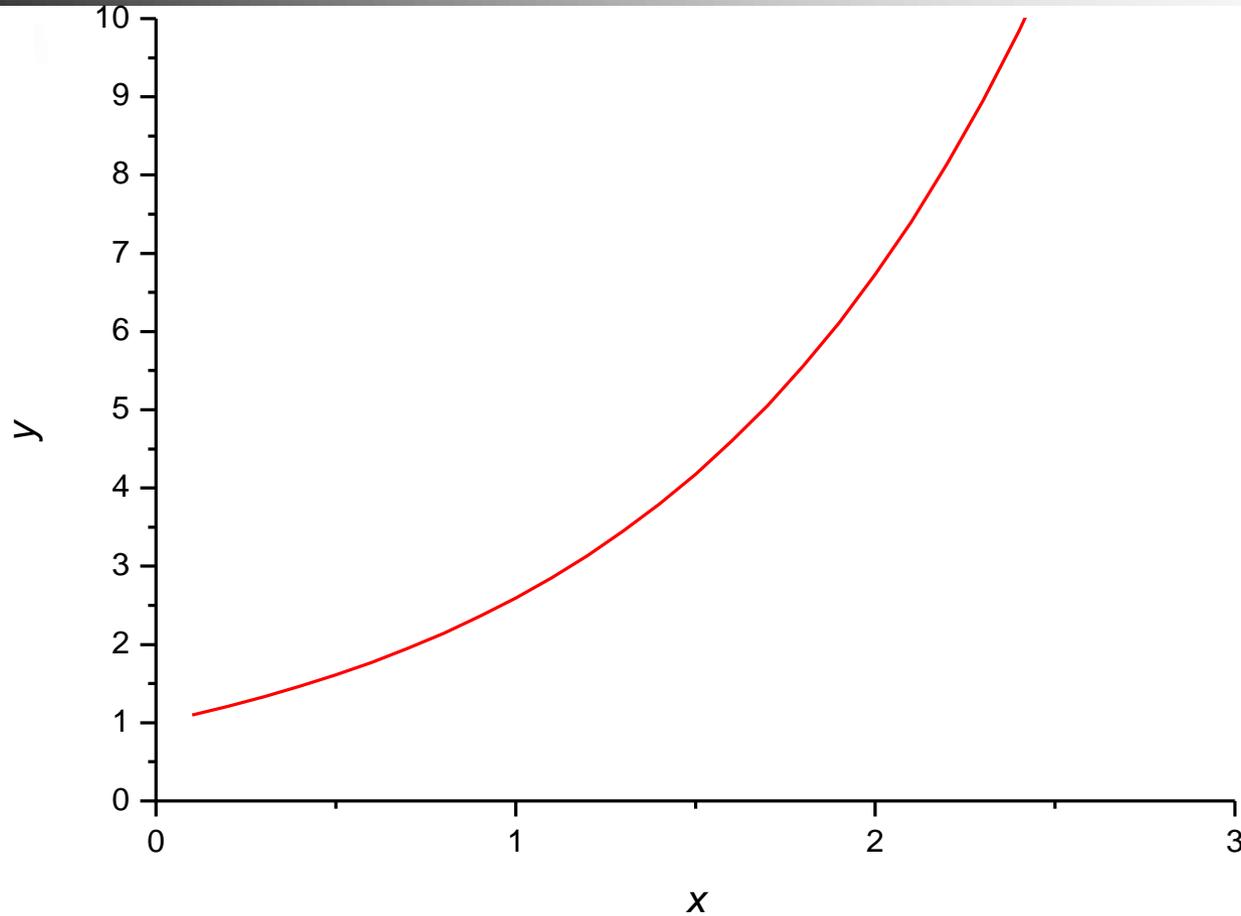
```
    CHT=CH
```

```
end function
```

```
end program selfignition
```

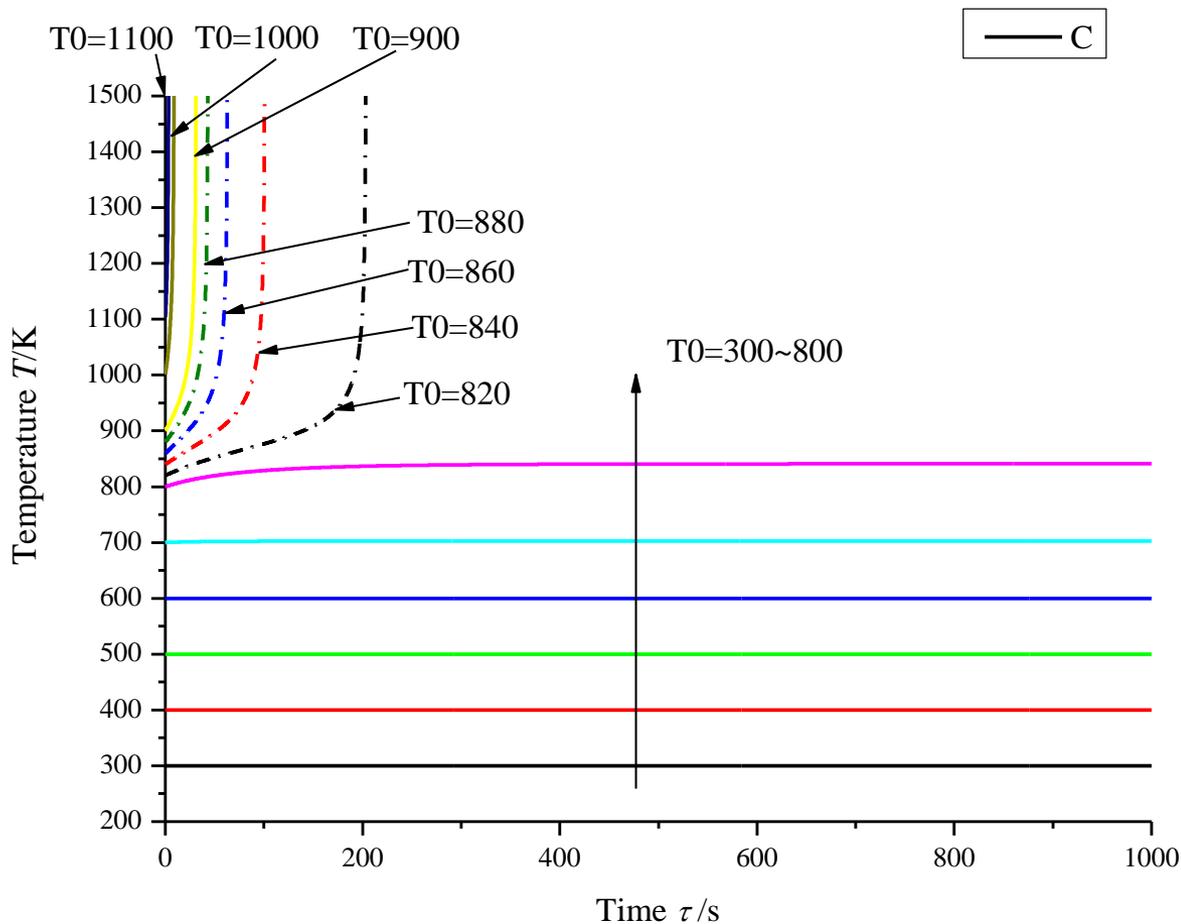


示例程序的求解结果



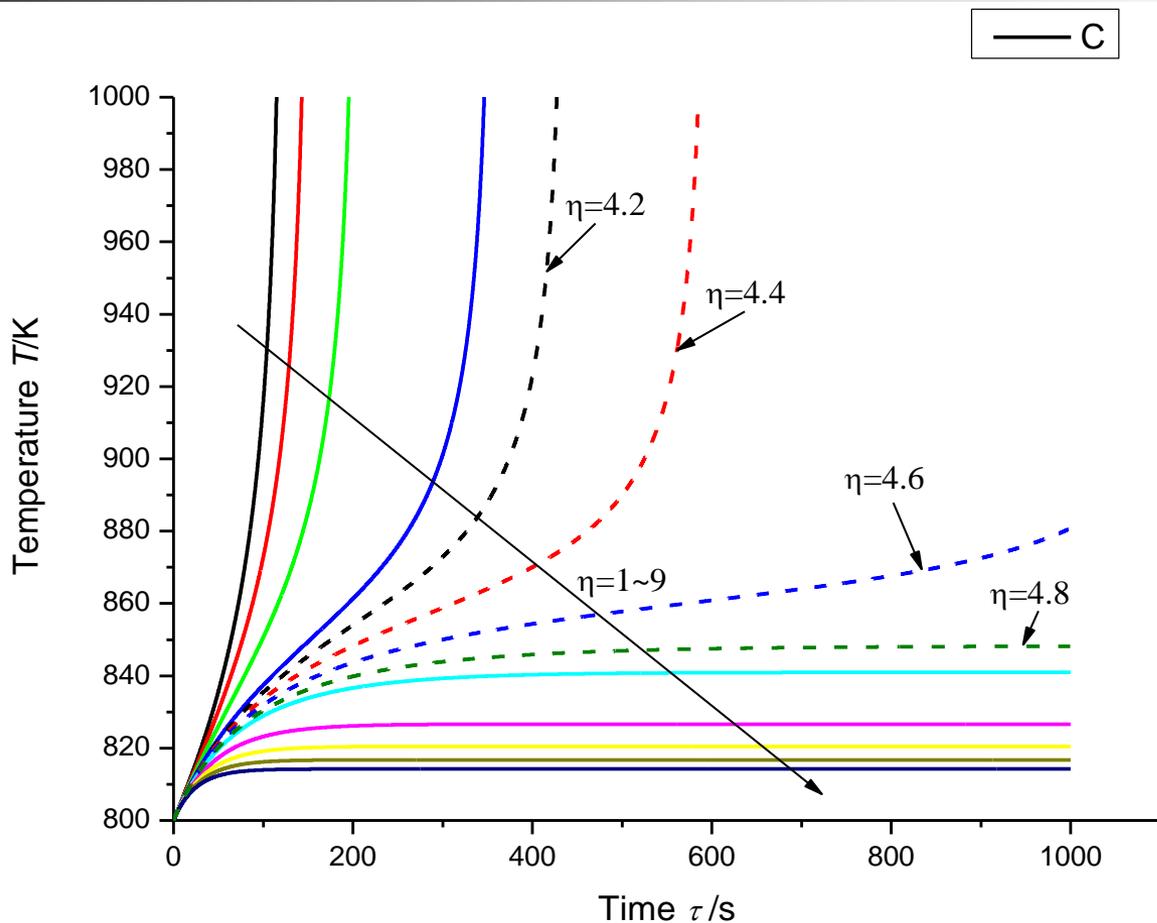


求解结果示例：变化初始温度 T_0 的情况





求解结果示例：变化散热系数 η 的情况





自选作业内容（根据个人能力和兴趣完成）

- 以上方程没有考虑燃料浓度随反应进程的变化，也没有考虑氧气浓度的影响，假定燃烧反应的化学平衡式为 $F + O_2 = FO_2$
- 考虑了以上两个因素的控制方程可以改写成以下形式

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= \frac{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C_F \cdot C_{O_2} \cdot V \cdot Q - \eta \cdot S \cdot (T - T_0)}{V \rho c_v} \\ \frac{dC_F}{d\tau} &= -k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C_F \cdot C_{O_2} \\ \frac{dC_{O_2}}{d\tau} &= -k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C_F \cdot C_{O_2} \end{aligned} \right.$$

- 定解条件： $\tau=0$ 时， $T=T_0$ ， $C_{F,0}=1.0$ ， $C_{O_2,0}=1.0$ 。



- 1、求解上述定解条件下的常微分方程，获得系统温度 T 随时间 τ 的变化曲线。
- 2、求解不同燃料和氧气配比情况下的系统温度 T 随时间 τ 的变化曲线。即，保持燃料和氧气的初始浓度 $C_{F,0}+C_{O_2,0}=2.0$ ，分别令 $C_{F,0}=0.1\sim 1.9$ ， $C_{O_2,0}=2.0-C_{F,0}$ ，并根据这一组求解结果讨论发生热自燃的燃料浓度限问题。
- 3、变化系统初始温度 T_0 、散热系数 η ，可以绘制出一组横坐标为燃料初始浓度，纵坐标为系统热自燃温度的U形曲线图。
- **重要提示：** 由于使用Euler法求解燃料浓度 C_F 和氧浓度 C_{O_2} 的时候，可能出现浓度数值减少到负值从而使得求解结果变得不合理的情况。因此必须在程序里面限定，一旦浓度的数值 $C_F\leq 0$ 或 $C_{O_2}\leq 0$ ，则强行令 $C_F=0$ 或 $C_{O_2}=0$ 。



作业内容包括

- 编制的源程序代码
- 源代码内容的简单说明
- 由程序求解结果绘制的图样
- 对图样展现的规律进行讨论
- 作业提交到学堂在线平台