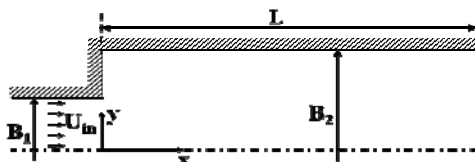


## 计算传热学第三次大作业

提交的报告包括三个问题，即突扩管道内燃烧问题、直通道内的燃烧问题、圆管内的扩散燃烧。

### 问题一：后台阶燃烧问题



考虑后台阶流动的问题，流体以一定的速度流入计算区域，在后台阶附近形成旋涡，影响表面处的换热能力，同时在内部给定一个初始温度场，研究其中的燃烧以及组分混合问题。在远离入口处，流动逐渐趋于均匀，表面换热能力逐渐稳定。

为了更好的理解初始温度场、来流温度、壁面温度、来流速度四个变量，我们采用单变量方法分析这四个变量对于后台阶燃烧问题的影响。

#### (1) 设定问题的基本方程和边界条件

连续性方程：
$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0$$

X方向动量方程：
$$\frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \Phi$$

Y方向动量方程：
$$\frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \Phi$$

能量方程：
$$\frac{\partial \rho u c_p T}{\partial x} + \frac{\partial \rho v c_p T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial c_p T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial c_p T}{\partial y} \right) + \Phi$$

表1 初边值条件

	不同入口温度	不同壁面温度	不同流速	不同初始场温度
入口温度	300/800/1700	800	300	800
入口速度	50	50	1/10/50	50
出口	$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right _{out} = 0, \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right _{out} = 0, \left. \frac{\partial V}{\partial x} \right _{out} = 0$			

上边界	$T_{up} = 500$ $U_{up} = 0$ $V_{up} = 0$	$T_{up} = 500 / 800$ $U_{up} = 0$ $V_{up} = 0$	$T_{up} = 800$ $U_{up} = 0$ $V_{up} = 0$	$T_{up} = 500$ $U_{up} = 0$ $V_{up} = 0$
下边界	$\frac{\partial T}{\partial y}\bigg _{down} = 0, \frac{\partial U}{\partial y}\bigg _{down} = 0, V_{down} = 0$			
左边界	$T_{left} = 500$ $U_{left} = 0$ $V_{left} = 0$	$T_{left} = 500 / 800$ $U_{left} = 0$ $V_{left} = 0$	$T_{left} = 800$ $U_{left} = 0$ $V_{left} = 0$	$T_{left} = 500$ $U_{left} = 0$ $V_{left} = 0$
初始温度场	1700	1700	1700	500/1700

## (2) 区域离散方案

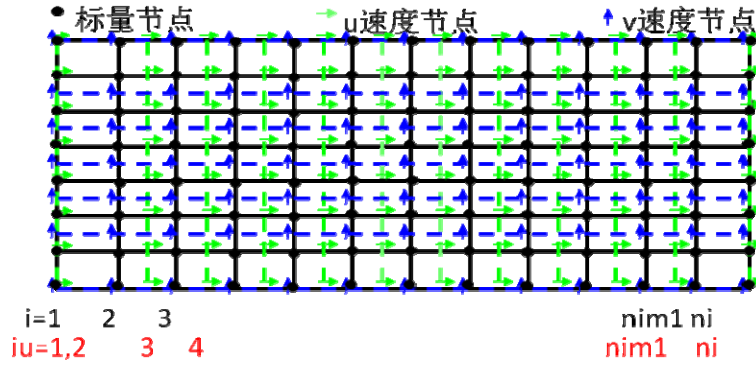


图 1 网格划分

采用交错网格，先生成标量网格如下图实线所示。在  $x$  方向和  $y$  方向分别布置  $NI$  和  $NJ$  个网格节点。然后再生成  $u$  网格，如图 1，水平实线和垂直虚线。最后生成  $v$  网格，如图水平虚线和垂直实线所示。

## (3) 离散方程

通用形式的扩散方程离散：

$$\frac{\partial \rho u \phi}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}$$

设，

$$J_x = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}, J_y = \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

$$\int_s^n \int_w^e J_x dx dy + \int_w^e \int_s^n J_y dy dx - \int_w^e \int_s^n S_\phi dy dx = 0$$

$$(J_{xe} - J_{xw})\Delta y + (J_{yn} - J_{ys})\Delta x + S_\phi \Delta y \Delta x = 0$$

其中,

$$J_{xe}\Delta y = F_e\varphi_P + D_e A(P_e)(\varphi_P - \varphi_E), \quad J_{xw}\Delta y = F_w\varphi_P + D_w B(P_w)(\varphi_W - \varphi_P)$$

$$J_{yn}\Delta x = F_n\varphi_P + D_n A(P_n)(\varphi_P - \varphi_N), \quad J_{ys}\Delta x = F_s\varphi_P + D_s B(P_s)(\varphi_S - \varphi_P)$$

整理, 并注意到连续方程的离散式  $F_e - F_w + F_n - F_s = 0$ , 得到:

$$(D_e A(P_e) + D_w B(P_w) + D_n A(P_n) + D_s B(P_s) - S_p \Delta x \Delta y) \varphi_P$$

$$= D_e A(P_e) \varphi_E + D_w B(P_w) \varphi_W + D_n A(P_n) \varphi_N + D_s B(P_s) \varphi_S + S_C \Delta x \Delta y$$

其中,

$$DA(P) = DA(|P|) + [-F, 0], \quad DB(P) = DA(|P|) + [F, 0]$$

计算时采用乘方格式, 其相应的  $A(|P|)$  的表达式如下:

$$A[|P|] = \left[ \left[ (1 - 0.1|P|)^5, 0 \right] \right]$$

#### (4) 数值求解的流程

求解流程如图 2 所示。

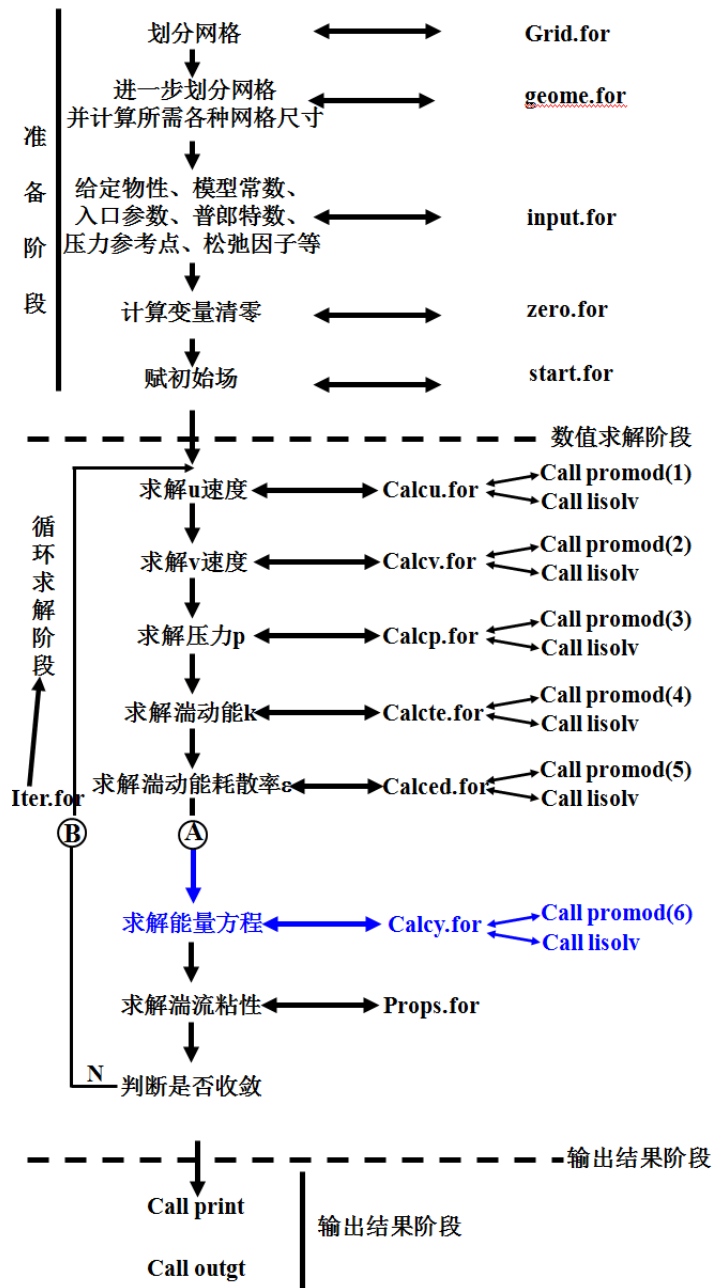


图 2 求解流程图

## (5) 计算结果及分析

经过对不同来流温度、不同流速、不同壁面温度以及不同的初始温度的计算结果进行计算，分析如下：

### A、入口温度

根据我们的调研，甲烷着火点 801K，据此对实验变量进行设定。当壁面温度为 500K，

流速 50m/s 时，设定甲烷来流温度分别为 300K、800K、1700K。所得结果如图 3：

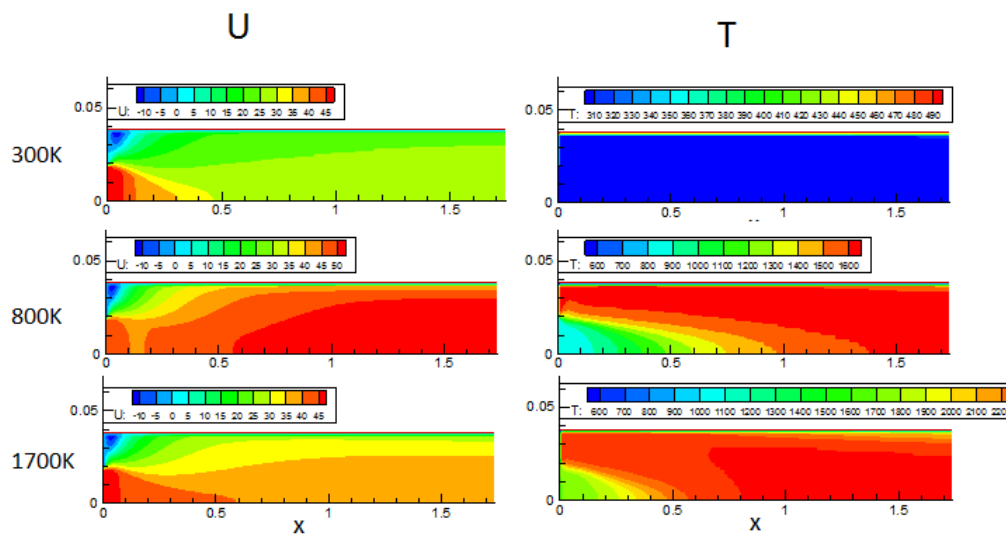


图 3 不同来流温度时的速度场和温度场

在壁温较低的情况下，来流温度较小时不能够发生燃烧。随着来流温度的提高，温度场的变化梯度更大，火焰面更靠近入口处。这是因为温度越高，燃烧速度越快，放热率越大，温度升高的也就越快。

B、入口速度

设计入口温度为 300K，壁面温度 800K，计算入口速度分别为 1m/s、10 m/s、50 m/s 时的燃烧情况，计算结果如图 4 所示。

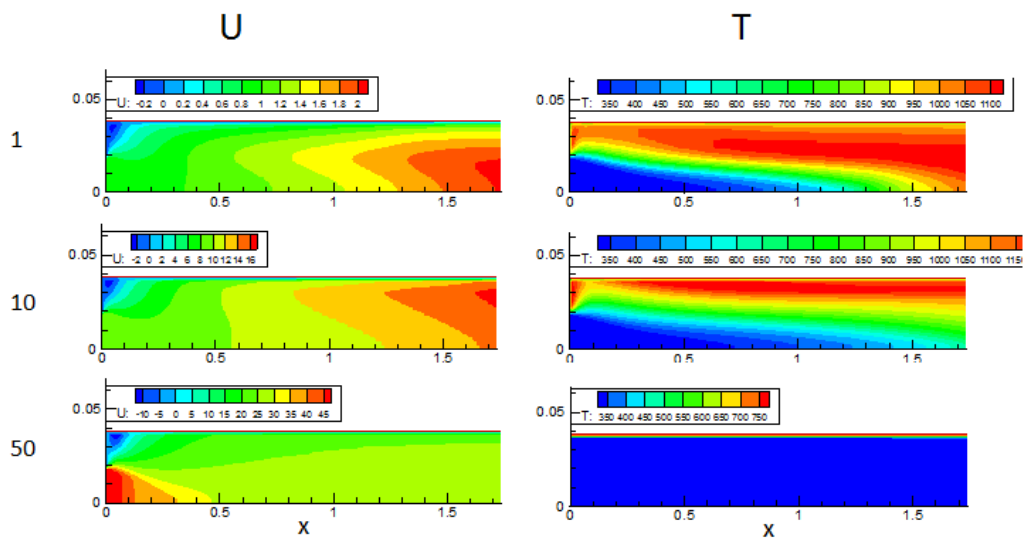


图 4 不同入口速度时的速度场和温度场

随着入口速度的提高，火焰面逐渐被拉长，火焰面的椎角越来越小。这是因为火焰燃烧时，火焰面处，燃烧速度应与流动速度相同。入口速度越大，那么火焰面的椎角也就越大。计算结果与理论符合的很好。

当入口速度继续增大时，在我们的考察范围内看不到明显的燃烧现象。可能是因为火焰面被推至较远处，也有可能是因为没有燃烧。

C、壁面温度

设计入口温度 800K，入口速度 50m/s。分别设定壁面温度为 500K 和 800K。计算结果如图 5 所示。

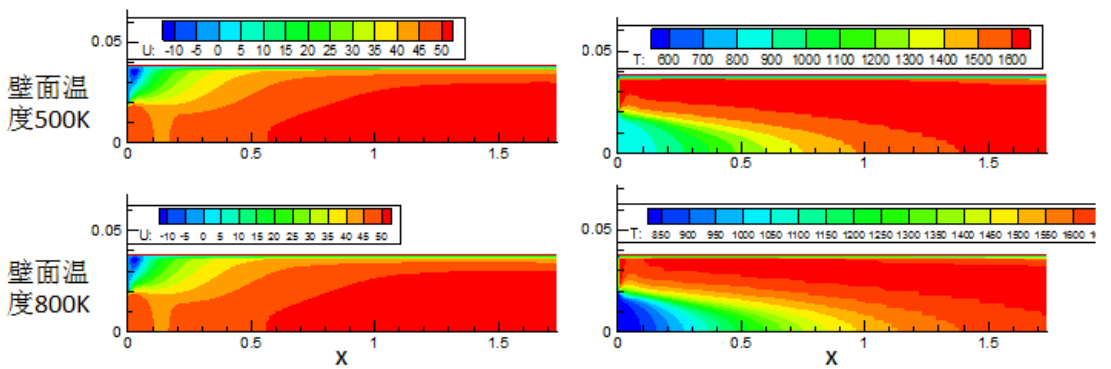


图 5 不同壁面温度时的速度场和温度场

根据前面的计算结果可知，在速度较小时，入口温度 300K 时，壁面温度 800K 也是能够着火的。但是壁面温度为 500K 时不能着火。这说明，壁面温度对燃烧过程有一定的影响。

如图 5 计算结果表明，在入口温度较高时，壁面温度对燃烧的影响很小。

D、初始场温度

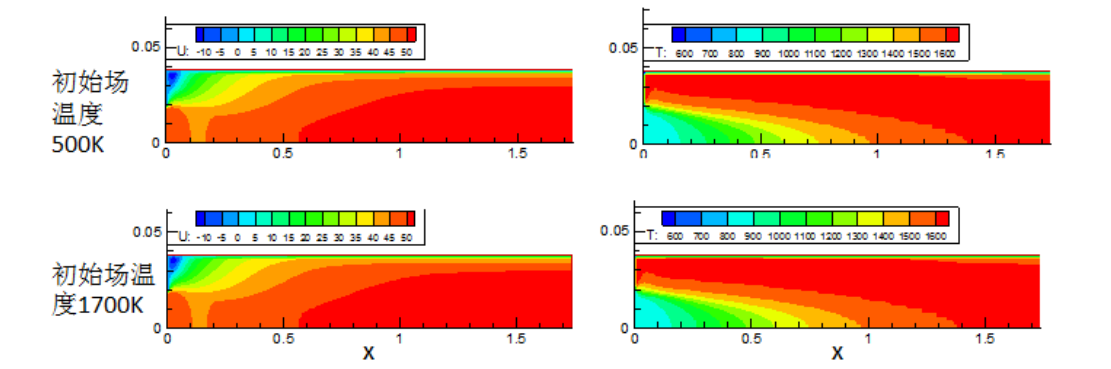
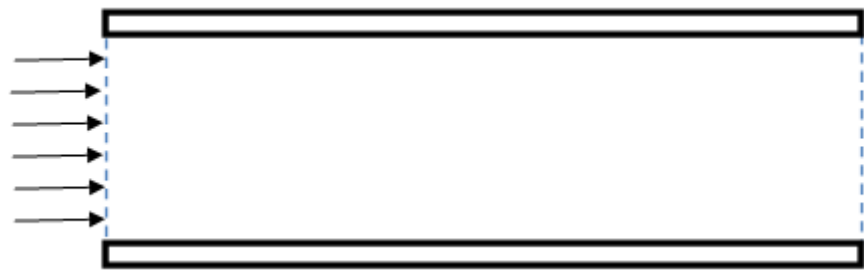


图 6 不同初始场温度时的速度场和温度场

设计入口温度 800K，入口速度 50m/s，壁温 500K，对初始场温度 500K 和 1700K 分别进行计算，所得结果如图 6。

在入口温度较高、来流速度较大的情况下，初始场温度对燃烧影响不大。

问题二：直通道内的燃烧问题



入口为燃料和空气的混合气体，以相同的速度和温度流入直通道内，计算域的上下边界为固壁边界，出口为充分发展条件，计算得到了不同来流速度下的速度场和温度场。

控制方程、区域离散、离散方程和求解流程同问题（一）相同。

在这里我们考察了不同入口速度对燃烧的影响，计算结果如图 7。

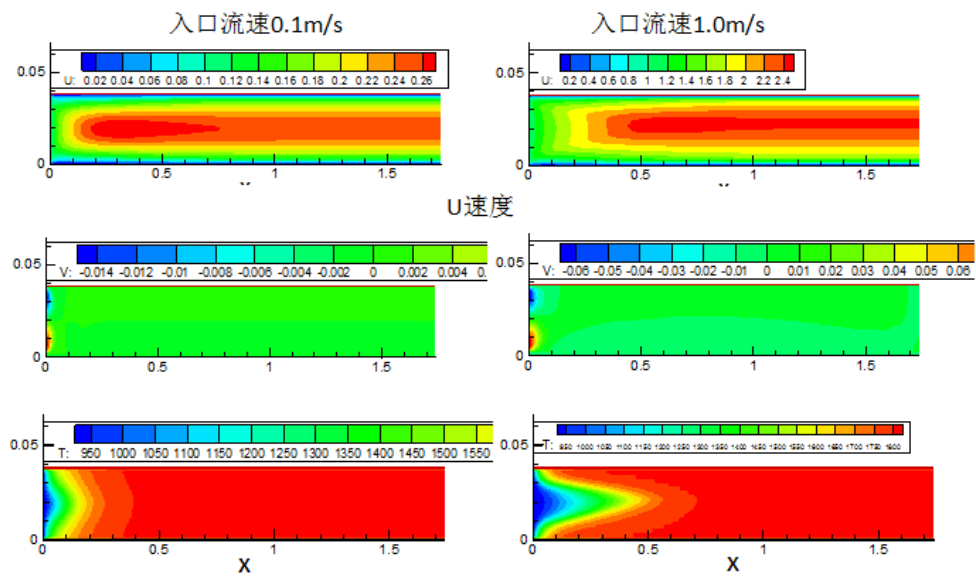
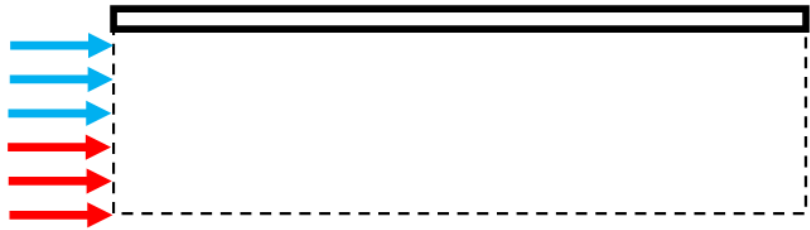


图 7 直通道内不同来流速度时的速度场和温度场

计算结果中，速度场和温度场的对称性较好，在 V 场中，中心线两侧的两个窝中心对称，说明我们的程序的准确性。

我们可以看到，随着来流速度从 0.1m/s 增加到 1.0m/s，火焰面被拉长，速度梯度降低。这也是因为火焰燃烧时，火焰面处，燃烧速度应与流动速度相同。入口速度越大，那么火焰面的椎角也就越大。

问题三：圆管内的燃烧问题



燃料和空气按照相同的温度和速度流入圆形通道内，计算区域上边界为固壁，下边界为对称边界，出口为充分发展条件，分别给定不同的来流速度进行计算。

控制方程、区域离散、离散方程和求解流程同问题（一）相同。

在这里我们考察了不同入口速度对燃烧的影响，计算结果如图 8。

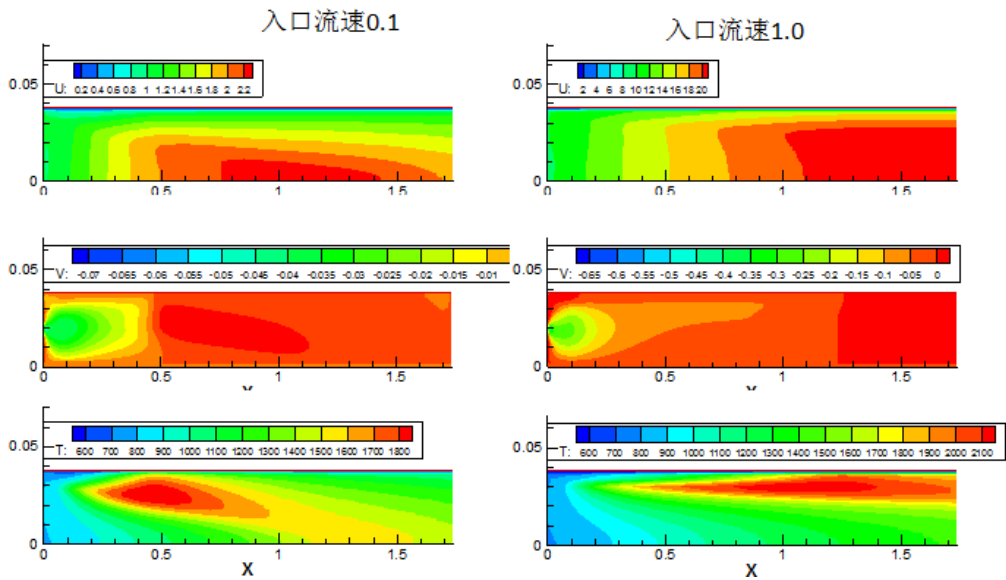


图 8 圆管燃烧入口速度不同时的速度场和温度场

随着入口速度的增大，Re 数逐渐增大，速度剖面变得饱满，燃烧使流场的温度升高，入口之后的流速明显增大。

随着入口速度的增大，火焰面的长度越长，这是由于速度越大，对于扩散燃烧问题，



在燃料和氧化剂混合的时间内通过的距离越长。