

文章编号:1000582x(2000)05-0149-03

·研究简报·

平展流燃烧过程的数值模拟

温良英, 刘成全, 徐楚韶

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

TK16

摘要: 简述了 ESCIMO 湍流燃烧理论的要害。采用差分数值求解的方法, 对描述平展流燃烧过程的时均方程及 ESCIMO 湍流燃烧理论的“经历”和“统计”方程进行组合求解, 得出了平展流燃烧过程近壁 ($z'/D = 0.24$) 截面上的温度和组分分布, 揭示了平展流燃烧区域温度最高且变化平缓, 然后逐渐降低的重要特点。其温度及组分的变化规律与实验分析结果是一致的, 基本能反映实际燃烧过程的特征, 表明文中所阐述的数值分析方法是可行的。

关键词: 燃烧理论; 温度分布; 数值模拟 / 平展流
中图分类号: TF 055 **文献标识码:** A

燃烧过程

湍流燃烧过程受湍流运动、分子输运、化学动力学等因素的影响, 是一个十分复杂的问题。为定量认识湍流燃烧过程, 各燃烧学派相继提出了一系列的湍流燃烧模型, 发展了各具特色的数值方法和计算机程序体系。目前广泛应用的旋涡破碎模型正确地体现了流动因素对燃烧速率的控制作用, 各种形式的几率密度函数不断提出, 但在湍流输运方程的模化方面遇到了较大困难。

为了能兼顾大尺度的湍流输运和小尺度的分子扩散及化学反应, Spalding 提出了 ESCIMO 流燃烧理论, ESCIMO 理论可以概括为由“经历”(Biography)和“统计”(Demography)两部分及它们的“综合”(Combination)构成。“经历”考虑一个湍流旋涡由产生到消灭的全过程, 旋涡由两层不同的流体紧贴一起构成流体夹层块, 在旋涡的运动过程中, 分子输运和化学反应在其内部进行, “经历”的任务就是要求出夹层块的状态随夹层块从产生到研究的时刻所经历的时间(简称“年龄”)的变化规律。“统计”借助于湍流夹层块年龄的分布函数 P_A 来表征它们在流场中的分布特性, $P_A dA$ 代表年龄在 A 到 $A + dA$ 区间的夹层块的比例。“综合”以上两部分可以得到湍流燃烧过程的各参数的统计平均值。笔者试图将 ESCIMO 燃烧理论和描述平展流的湍流输运方程结合起来, 分析平展流燃烧过程。

1 控制方程

笔者的研究对象为如图 1 所示的平展流流动过程。假定在夹层块内部发生的过程可以抽象成一维不稳定层流问题, 其化学反应遵循简单化学反应系统的假设。坐标选择和结构参数如图 1 中所示, D_0 为喉口(通道)直径, R 为喇叭口曲率半径, H 为炉膛高度, L 为炉膛长度, 炉膛宽度为 B (未表示出)。

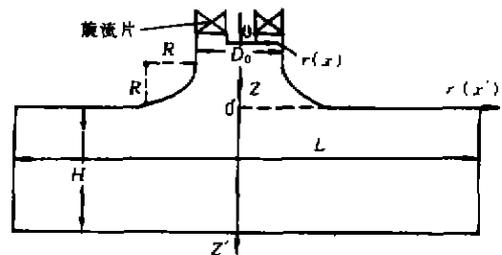


图 1 平展流燃烧空间示意图

时均控制方程可以整理为^[1]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\rho u \varphi - \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w \varphi - \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = S_{\varphi}$$

方程中各项的物理意义见表 1。

· 收稿日期:1999-12-14

· 作者简介:温良英(1966-),女,重庆市人,重庆大学副教授,博士。从事热能热工研究。

表1 方程中各项的物理意义

名称	φ	Γ_φ	S_φ
连续性方程	1	0	0
径向动量方程	u	μ_c	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_c \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu_c \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \rho k \right) \right] + \rho \frac{v^2}{r} - 2\mu_c \frac{u}{r^2}$
周向动量方程	v	μ_c	$-\rho \frac{uv}{r} - \frac{v}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r\mu_c)$
轴向动量方程	w	μ_c	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_c \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_c \frac{\partial w}{\partial z} \right)$
湍动能方程	k	$\frac{\mu_c}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon$
湍动能耗散率	ϵ	$\frac{\mu_c}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} [C_1 G_k - C_2 (1 - C_3 Ri) \rho \epsilon]$
能量方程	h	$\frac{\mu_c}{\sigma_h}$	S_h
组分方程	m_{fu}	$\frac{\mu_c}{\sigma_h}$	S_{fu}
混合物分数	f	$\frac{\mu_c}{\sigma_f}$	0

其中

$$G_k = \mu_c \left[2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$Ri = \frac{k^2}{\epsilon^3} \left(\frac{v}{r^2} \right) \left[\frac{\partial(vr)}{\partial r} \right]$$

$$\mu_c \approx \mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

S_h 为燃烧过程中化学反应释热率。

S_{fu} 由 ESCIMO 理论的“经历”和“统计”综合求得^[2]

$$S_{fu} = \int_0^1 \int_0^1 A_0 \rho^2 m_{fu,F} m_{fu,F} \exp(-E/RT_F) d\omega_F \tilde{P}_A d\tilde{A}$$

其中

A_0, R 是常数, 下标 F 表示夹层块内的量;

m_{fu}, m_{ox} 分别为燃料和氧化剂的质量分数;

E — 化学反应活化能, kJ/mol;

T — 绝对温度, K;

ω — 无量纲流函数, $\omega_F = \frac{\Psi_F}{\Psi_{F2}}$, 夹层外边界的流函数;

$\Psi_{F2} = \Psi_{F20} \exp(-R/A)$, Ψ_{F20} 表示夹层块诞生时的流函数值;

R_s — 拉伸率, 旋涡夹层块在拉伸作用下不断变薄,

$$R_s = C_s \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|;$$

C_s — 拉伸率常数;

\tilde{A} — 归一化年龄坐标;

\tilde{P}_A — 夹层块年龄分布函数, \tilde{P}_A 的输运方程为

$$\frac{\partial \tilde{P}_A}{\partial z} + (a + b\omega) \frac{\partial \tilde{P}_A}{\partial \omega} =$$

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \left(C \frac{\partial \tilde{P}_A}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial}{\partial A} \left[\left(\frac{Z}{u} + \frac{\tilde{A}}{Z} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \tilde{P}_A \right] + \frac{S}{\rho u}$$

a, b 是常数, Z 为归一化因子, 有

$$\tilde{A} \equiv A \cdot Z, \tilde{P}_A = P_A / Z$$

S — 源项, $S = r\rho [R_F \delta(A) - R_F P_A]$, 其中

R_F — 表示夹层块的生成速率, 可以根据新生夹层块内来至平展流外部的那层气体的总量必须等于被引射的气体总量来确定, 同时假定生成速率在空间的分布正比于当地的均流速度, 即

$$R_F = \alpha u, \alpha \text{ 是比例常数}$$

C — 是与湍流输运有关的常数, $C = \frac{\mu_c}{\sigma_{P_A}}$.

2 数值求解

假设进入通道口处径向速度为零, 切向速度和轴向速度分布均匀, 固体表面为无滑移、不穿透的边界, 对称轴及出口各物理参数的法向梯度为零。对时均方程及 ESCIMO 的“经历”和“统计”方程分别进行差分数值求解^[2]。计算程序框图如图 2 所示。

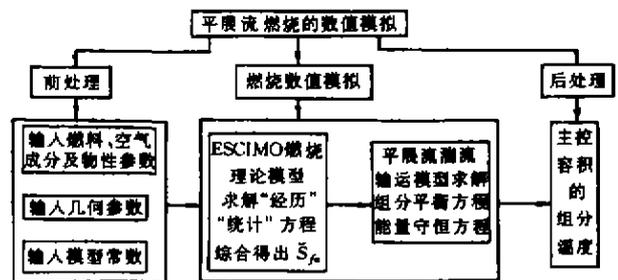


图2 平展流燃烧过程计算逻辑框图

3 计算结果及讨论

以空气-天然气(主要成分是甲烷,占 98% 以上)出喇叭口后沿径向扇形铺展的平展流燃烧过程为模拟对象。计算中轴向取 10 个节点,径向 600 步,5 个 \tilde{A} 的子空间,在一个夹层块内 ω_F 方向用 16 个节点,而时间坐标 a 的步数视夹层块的年龄而定。计算中夹层块的拉伸率取为 10,化学动力参数(活化能)取为 $E/R = 18\ 000$ 。

图 3 是喇叭口曲率半径 $R = D_0$ 的平展流,在近壁处 $z'/D_0 = 0.24$ 截面上的温度和组分的分布。

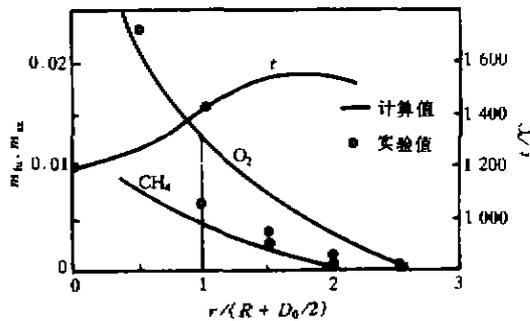


图 3 平展流燃烧的温度和组分浓度的分布
由图 3 可以看出,在燃烧器出口不远的截面上

($z'/D_0 = 0.24$),燃料(甲烷)和氧沿径向有一定的共存区域,在径向相对距离 $r/(R + D_0/2) > 2.2$ 后,燃料(甲烷)消失。在 $r/(R + D_0/2) < 1$,即喇叭口内部区域,温度较低。平展流燃烧区域温度最高且变化平缓,然后逐渐降低,这形成了平焰燃烧的重要特点。图中试验点是在平焰燃烧器出口不远的截面($z'/D_0 = 0.3$)上沿径向取样分析,将可燃成分按热值换算为甲烷的体积百分数的结果,可见,试验分析结果与计算结果的变化规律是一致的,说明所采用的计算方法是可行的。

4 小结

将 ESCIMO 燃烧理论应用于平展流的燃烧过程得出的平展流内燃烧的组分浓度和温度分布基本能反应实际燃烧过程的特征,说明该数值分析方法是可行的。

参考文献:

- [1] 温良英,刘成全.平展流燃烧湍流场的数值模拟[J].重庆大学学报(自然科学版),2000,23(3):134-138.
- [2] 温良英.平展流燃烧过程及其供热炉内传输过程的研究[D].重庆:重庆大学材料科学与工程学院,1998.71-78

Numerical Simulation of Flat Flow Combustion Process

WEN Liang - ying, LIU Cheng - quan, XU Chu - shao

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Summarized the essential points of the ESCIMO theory. The time - average equations describing the open flat flow combustion process and, the "Biography" and "Demography" equations of the ESCIMO theory are numerically simulated by the difference method. It was obtained that the distribution of temperature and composing content concentration colored by the surface ($z'/D = 0.24$) of open and flat flow combustion process. The results reveal that one of the main features of open and flat combustion process is that temperature of combustion area is the highest and dropped slowly. The variational laws agree with the simulating results and test results. It shows that the method of numerical analysis expounded in the ppaer is practicable.

Key words: combustion theory; temperature distribution; numerical simulation / open and flat flow

(责任编辑 李胜春)