

297

燃烧室与 工业炉的模拟

〔埃及〕E. E. 卡里尔 著



科学出版社

72.55
170

燃烧室与工业炉的模拟

[埃及]E.E.卡里尔 著

陈 熙 周晓青 译

周力行 校

科学出版社

1987

√ 102036

内 容 简 介

本书针对工业炉和燃烧室的特点，全面地介绍了燃烧过程的数学模型的数值计算方法，包括湍流流动、单相湍流燃烧、两相湍流燃烧、辐射传热及污染物排放模型及半隐式压力相关方程解法(SIMPLE算法)，给出了计算实例和与实验的对照及用于大型工业炉的算例。

本书可作为锅炉、工业炉及各种燃烧室设计人员，从事计算流体力学、计算传热学及计算燃烧学方面研究人员参考用书，也可作为高等学校有关专业教师及研究生的教学参考书。

E. E. Khalil

MODELLING OF FURNACES

AND COMBUSTORS

Abacus Press, Kent, 1982

燃烧室与工业炉的模拟

(埃及) E. E. 卡里尔 著

陈 熙 周晓青 译

周力行 校

责任编辑 陈文芳 李雪芹

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年1月第一版 开本：787×1092 1/32

1987年1月第一次印刷 印张：10 5/8

印数：0001—2,000 字数：234,000

统一书号：15031·765

本社书号：4835·15-10

定价：2.50元

校 者 的 话

燃烧室和工业炉的设计以往主要靠直观和经验以及大量实验。七十年代初以来,由于大型计算机以及计算流体力学、计算传热学和计算燃烧学的迅速发展,使情况发生了很大的变化。目前已有可能用数学模型和数值计算方法预测三维湍流两相有化学反应流动,可以预报燃烧室及工业炉中流场、壁面热流、燃烧及污染物排放的各种场的分布的细节,有效地提供了进行最优化设计及放大设计的新方法。数学模拟或者计算机模拟可以大大地减少实验所用的人力、物力和财力,在国外已被某些公司用于正式的技术设计工作中。

本书作者卡里尔在燃烧室数值计算方面成功地运用了英国斯波尔丁教授创立的一系列模型和方法,以他本人独立的见解和计算的丰富实践写成了本书。本书密切结合工业炉和燃烧室的具体条件,叙述简明扼要,重点突出,全面地介绍了湍流流动、单相湍流燃烧、两相湍流燃烧、辐射传热及污染物排放的数学模型以及半隐式压力相关方程数值解方法。本书对比了不同的模型(如八种湍流燃烧模型),而用大量算例和实验对照来评价这些模型是其突出的特点之一。

原书中有不少印刷错误,译者和校者尽可能作了更正或注释。尽管本书对两相流燃烧模型的阐述还不够完整,对各种模型优缺点的评价也不够鲜明,但是总的看来,本书仍然是近年来计算燃烧学方面不多见的一本优秀的专著。

我国已有不少单位开展了燃烧室或工业炉方面数值计算的研究,积累了可贵的经验。我们希望本书能对已经或准备从事这方面工作的同志有所帮助。

本书第一至四章由陈熙翻译,第五章由周力行翻译,第

六、七两章及附录由周晓青翻译。

由于我们的经验及水平所限，本书译文中仍可能有错误或不当之处，欢迎广大读者批评指正。

周力行

1984年11月于清华园

序

湍流燃烧中,流体力学、化学动力学与传热的相互作用问题依然是研究与应用中的一个富于挑战性而又复杂的领域。在人们一经认识到它在近代能源与污染问题中的极大重要性以后,在过去十年中,这方面的实用与基础研究在广度与深度上都有了引人注目的快速增长。这一发展是由于在计算机与数值模拟处理问题的办法方面有了进步,同时有精密测量流动性质与传热特性的新型诊断技术的配合。这些进展奠定了更好地了解湍流燃烧的基础。

目前存在着日益增长的要求,希望能够预估工业炉与燃烧室中火焰的性状以及它们的性能与进口条件及边界条件间的联系。虽然在数值模拟预估技术方面已经取得了显著的进展,但某些数值模拟方面所观察到的缺点,突出了缺乏有关流动的湍流-燃烧特性方面的详细资料这个问题。为了使工业炉或燃烧室的性能最优化,从而得到高燃烧效率与低污染物排放量,要求具备关于流动图像、流动的湍流性质、火焰特性以及热流分布方面的详细知识。

本书中所包含的材料是用来描述工业炉所用的预估方法与燃烧的数值模拟处理办法。书中给出了流动、化学反应、传热、污染物释放以及相应的控制方程与模拟假定方面的主要内容。预估火焰特性与燃烧室中的实验数据的比较结果,支持把预估方法用于工业炉与燃烧室的设计。这些预估方法能使我们以比完成全尺寸实验低得多的开销得到必要的资料。

许多人对作者提供了宝贵的指导与帮助,另一些人在作者写作本书时提供了他们已发表的论文的副本,在此作者对

他们表示衷心的感谢。我要感谢 J.H. Whitelaw 教授的一贯支持与鼓励，感谢我妻子完成修饰文字的繁重工作，还要感谢 K. Emam 先生打印了本书的初稿。

E.E. 卡里尔

1981 年 8 月

符 号 表

符 号	含 义	第一次提及此符号的方程
A	面积	
A_0	指数前系数, 指数前因子	(4.2.5)
A_x, A_r, A_z	泰勒级数展开式中的展开系数	(6.2.37)
A_p^ϕ	节点P处对流与扩散项的系数	(7.2.5)
$A_N^\phi, A_S^\phi, A_E^\phi$	网格点N、S、E、W、I与H处的	
$A_W^\phi, A_L^\phi, A_H^\phi$	对流与扩散项的系数	(7.2.5)
B_x, B_r, B_z	泰勒级数展开式中的展开系数	(6.2.37)
C_D	阻力系数	(5.2.18)
C_{g1}, C_{g2}	燃烧模型中的常数	(4.2.25)
C_n	网格点“n”处的对流项	(7.2.7)
C_p	定压比热	(3.3.24)
C_R	燃烧模型中的常数	(4.2.34)
C_S	R-S湍流模型中的常数	(3.3.11)
C_μ	有效粘度表达式中的常数	(3.3.2)
C_1, C_2	k-ε模型的常数	(3.3.7)
C_3, C_4	概率方程中的常数	(4.2.59)
$C_{\phi 1}, C_{\phi 2}$	R-S湍流模型中的常数	(3.3.14)
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_\epsilon$	R-S湍流模型中的常数	(3.3.16)
C_{vol}	挥发份的浓度	(5.2.38)
D, d	直径	
D_n	网格点“n”处的扩散项	(7.2.7)
D_l	扩散系数	(4.2.36)
D_t	湍流扩散系数	(4.2.36)
D_{32}	液滴的Sauter平均直径	(5.2.7)

符 号	含 义	第一次提及此 符号的方程
E	壁面对数定律中的常数	(3.3.18)
E	活化能	(4.2.5)
E	发射功率	(6.2.9)
f	混合物分数, 定义为 $f = (\xi - \xi_A) / (\xi_F - \xi_A)$	(4.2.9)
F	湍流-化学反应相互作用函数	(4.2.8)
G	湍流产生项	(3.3.7)
g	浓度脉动	(4.2.20)
g_{fm}	燃料质量分数脉动的平方	(4.2.39)
H	滞止焓	(3.2.4)
H_{fu}	燃料的热值	(4.2.14)
H_a	组分a的反应热	(3.2.4)
h	焓的脉动分量	(3.2.8)
h	传热系数	(5.2.15)
i	氧与燃料的化学当量质量比	(4.2.9)
i, j, k, l	标号	
i, j, k	x, y, z 坐标方向的单位向量	(6.2.37)
k	湍流动能	(3.3.1)
K, K_a	吸收系数	(6.2.1)
K_b	逆向反应的速率系数	(4.2.43)
K_f	正向反应的速率系数	(4.2.4)
K_e	平衡常数	(4.2.43)
K_s	散射系数	(6.2.1)
L	蒸发潜热	(5.2.14)
L	光程长度	
l	长度	
M_a	组分a的质量分数	(3.2.3)

符 号	含 义	第一次提及此 符号的方程
m_a	组分 a 质量分数的脉动分量	(3. 2. 7)
m_z	蒸发率	(5. 2. 16)
Nd	Damkohler 数	(4. 2. 53)
Nu	努赛尔数	(5. 2. 20)
P	压力	(3. 2. 2)
$P(M_a)$	组分质量分数的概率分布	(4. 2. 1)
$P(\Phi)$	Φ 的概率分布	(4. 2. 16)
Pe	Péclet 数	
	热流密度	
Q	总热流	
R	通用气体常数	(4. 2. 5)
r	半径, 径向坐标	
$\mathbf{r}$	位置向量	
R_{co}	CO生成速率	(6. 3. 11)
Re	雷诺数	
R_{fu}	燃料消耗速率	(4. 2. 33)
R_{NO}	NO生成速率	(6. 3. 8)
R_x, R_r, R_z	在 x, r 与 z 方向上的总辐射通量	(6. 2. 31)
$S_\Phi, S(\Phi)$	标量 Φ 的源项	(3. 2. 9)
S_{Lg}	液体气体相互作用源项	(5. 2. 28)
S	旋流数	(A1.1)
Ru, S_P	线性化后的源项的分量	(7. 2. 2)
T	温度	(3. 3. 24)
t, t_0	时间	
U	轴向速度分量	(3. 3. 25)
u	轴向速度的脉动分量	
U_i	在 x_i 坐标方向上的速度分量	(3. 2. 1)

符 号	含 义	第一次提及此 符号的方程
u'	轴向速度的脉动分量	(3. 2. 5)
V	径向速度分量	(3. 3. 25)
v	径向速度的脉动分量	
W	切向速度分量	(3. 3. 26)
w	切向速度的脉动分量	
W_a	组分 a 的分子量	(7. 4. 4)
x	轴向坐标方向	
x_j	坐标方向, $j=1, 2, 3$	(3. 2. 1)
y	坐标方向	
y_b	到壁面的距离	(8. 3. 18)
z	坐标方向	
希腊字母符号		
α, β	液滴尺寸分布中的常数	(5. 2. 26)
β	欠松弛因子	(7. 4. 1)
$\gamma(\Phi)$	Φ 的标量函数	(4. 2. 19)
Γ	交换系数	
$\Gamma\Phi$	湍流交换系数	(3. 2. 13)
Γ_a	组分 a 的扩散系数	(3. 2. 3)
Γ_k	k 的湍流交换系数	
Γ_ε	ε 的湍流交换系数	
$\Gamma_f, \Gamma_{f,a}$	f 与 $M_{f,a}$ 的湍流交换系数	(4. 2. 10)
Γ_H	H 的湍流交换系数	
δt	t 的增量	(4. 2. 16)
$\delta\Phi$	Φ 的增量	(4. 2. 16)
δ_{ij}	Kronecker δ 函数	(3. 2. 2)
μ_0, μ_i	方向余弦	(6. 2. 2)
η_0, η_i	方向余弦	(6. 2. 2)

符 号	含 义	第 一 次 提 及 此 符 号 的 方 程
θ	极角	(6.2.2)
θ	坐标方向	(6.2.2)
λ	蒸气团的厚度	(5.2.9)
ε	耗散率	(3.3.12)
$\varepsilon(T, L)$	气体的发射率(黑度系数)	(6.2.3)
ξ	辐角	(6.2.2)
μ	粘性系数	(3.2.2)
ξ_0, ξ_f	方向余弦	(6.2.2)
ν	运动粘度	(3.3.7)
ρ	密度	(3.2.1)
σ	Stefan-Boltzmann常数	(6.2.3)
σ_f	f 的有效Schmidt数	(4.2.10)
$\sigma_f \mu$	燃料的有效Schmidt数	(4.2.10)
σ_h	有效Prandtl数	
σ_k	湍流动能的有效Schmidt数	(3.3.6)
σ_e	耗散率的有效Schmidt数	(3.3.7)
σ_ϕ	Φ 的有效Schmidt数或Prandtl 数	
Φ	一般形式的因变量	(3.2.9)
ϕ	Φ 的脉动分量	(3.2.9)
τ	时间尺度	
τ_w	壁面剪切应力	(3.3.18)
κ	壁面对数定律中的常数	(3.3.18)
ψ_0	压力梯度系数	(3.3.20)
Ω	立体角	(6.2.1)
下角标		
A	空气流	

符 号	含 义	第一次提及此 符号的方程
-----	-----	-----------------

D	液滴	
eff	有效的(包括湍流的影响)	
evap	蒸发	
eq	等效的,当量的	
fu	燃料	
F	燃料流	
h	加热	
i	初始的	
l	层流的	
m	混合	
P, N, S, E, W	网格点位置	
ox	氧	
P _r	产物	
St	化学当量的	
t	湍流的	
W	壁面	
α, β, γ	组分	

上角标

—	时间平均的
~	Favre平均的
,	脉动量
•	猜测值

目 录

序

符号表	ix
-----------	----

第一章 引论	1
---------------------	---

1.1 本书所讨论的问题	1
--------------------	---

1.2 本书内容简介	2
------------------	---

第二章 炉内与燃烧室内的流动	4
-----------------------------	---

2.1 问题	4
--------------	---

2.1.1 概述	4
----------------	---

2.1.2 如何处理设计问题	8
----------------------	---

第三章 控制方程与湍流模型	15
----------------------------	----

3.1 引言	15
--------------	----

3.1.1 本章的目的	15
-------------------	----

3.1.2 本章提要	16
------------------	----

3.2 微分方程	16
----------------	----

3.2.1 质量守恒 (连续方程)	16
-------------------------	----

3.2.2 动量守恒	17
------------------	----

3.2.3 化学组分守恒	17
--------------------	----

3.2.4 能量守恒	17
------------------	----

3.2.5 微分方程的时平均形式	18
------------------------	----

3.2.6 流动的湍流-反应与传热特征量	23
----------------------------	----

3.3 湍流的模拟	25
-----------------	----

3.3.1 概述	25
----------------	----

3.3.2 平均流动封闭法	27
---------------------	----

3.3.3 雷诺应力封闭法	32
---------------------	----

3.3.4 壁面函数	35
------------------	----

3.3.5 模型的评价	39
-------------------	----

3.4 结束语	60
---------------	----

第四章 单相湍流燃烧模型	62
---------------------------	----

4.1 引言	62
4.1.1 本章讨论的范围	62
4.1.2 本章提要	63
4.2 湍流燃烧理论	64
4.2.1 扩散火焰的快速化学反应模型	67
4.2.2 预混火焰的有限化学反应速率模型	88
4.2.3 湍流-化学反应相互作用的模型	103
4.2.4 湍流带化学反应的流动的概率函数处理	123
4.2.5 密度脉动的影响	132
4.3 现有模型概述	138
第五章 两相湍流燃烧模型	145
5.1 引言	145
5.1.1 本章讨论的范围	145
5.1.2 本章提要	146
5.2 液雾燃烧模型	146
5.2.1 概述	146
5.2.2 局部均相模型	147
5.2.3 两相流模型	164
5.3 固体燃料燃烧模型	175
5.3.1 概述	175
5.3.2 煤的燃烧机理	176
第六章 传热与污染物生成模型	184
6.1 引言	184
6.1.1 本章讨论的范围	184
6.1.2 本章提要	185
6.2 传热模型	185
6.2.1 辐射能量交换方程	185
6.2.2 炉内实际气体的表达式	186
6.2.3 辐射模型	188
6.3 污染物生成模型	217

6.3.1 概述	217
6.3.2 计算氮氧化物的模型	218
6.3.3 CO生成模型	226
6.4 结束语	228
第七章 数值解技术与求解方法	230
7.1 数值解技术	230
7.1.1 概述	230
7.1.2 本章的内容安排	237
7.2 二维流动的数值解法	239
7.2.1 网格安排	239
7.2.2 有限差分方程	239
7.2.3 求解算法	243
7.3 三维流动的数值解法	245
7.3.1 网格安排	245
7.3.2 有限差分方程	246
7.3.3 求解算法	248
7.4 各种细节问题	248
7.4.1 收敛性与稳定性	249
7.4.2 与网格安排无关的计算结果	251
7.4.3 数值解精度	252
7.4.4 热力学性质	255
7.5 边界条件和进口条件	255
附录	260
A1 旋流数	260
A2 数值计算的试例 (等温流动)	261
A3 大型工业炉的数值计算	262
A4 预报方法——燃烧室设计的工具	288
A5 非有限差分模拟方法	298
参考文献	302
汉英名词对照表	319

第一章 引论

1.1 本书所讨论的问题

气体与液体的定常态流动在许多类型的工程应用与工程设备中起着十分重要的作用。世界上发电量中的大部分过去是并且现在仍然是由电站组成部分的锅炉、汽轮机及凝汽器中蒸汽的流动所产生的。蒸汽靠通过锅炉中的燃烧室的定常烟气流来加热。在火管式锅炉炉膛中，燃料与空气混合以进行燃烧；火焰所释放的热量传给装有水的夹壁，从而产生蒸汽。类似地，大多数燃气轮机发电厂能否成功，依赖于燃气轮机燃烧室中燃烧产物的空气动力学与热特性合适与否。而在回转式水泥窑炉与旋风式燃烧室中，空气动力学流型对于它们的应用性能具有首位的重要作用。

本书中详细研究的问题是工业炉与燃烧室中的流体流动、化学反应与传热现象。由于目前的能源危机，人们作了很多努力，以通过改进燃烧效率使产生单位有用功率所烧掉的燃料量最少。要完成这项艰巨的任务，要求对燃烧室中的流型作精确的描述，从而能对问题有更好的了解。前向流动区以及壁面处与沿中心线的回流区影响火焰的稳定，因此有关流型的详细资料具有极为重要的意义。而本书的目的正是提供与描述用守恒控制方程来预估燃烧室中流型的方案。

在带化学反应的流动中，火焰性质、反应区的几何尺寸以及燃料消耗与释热率都十分重要。对于反应如何进行及其进行速率的描述，属于燃烧模拟要研究的方面之一。空气与燃料的不同供入方法导致扩散火焰、预混火焰及任意类型火