

燃烧与传质

〔英〕D.B. 斯柏尔丁 著

常弘哲 张连方 叶懋权 陈绥藩 黄善衡 等译

王兆华 曾求凡 校

国防工业出版社

燃 烧 与 传 质

〔英〕 D. B. 斯柏尔丁 著

常弘哲 张连方 叶懋权 陈绥蕃 黄善衡 译

王兆华 曾求凡 校

国防工业出版社

译者的话

1979年英国帝国理工学院机械系马世琦博士来上海交通大学讲学时将本书作为讲学内容介绍给我国学者。由于本书取材新颖精炼，说理清晰，特别是重视建立各种燃烧现象的数学模型（这对于进行燃烧问题的数值计算是十分重要的），普遍受到各界欢迎。

为适应国家四化建设需要，目前国内许多高等工业学校均开设有关燃烧理论的课程，但普遍感到缺乏适当的教材，因此许多从事这方面教学工作的同志建议将本书翻译出版，作为高等学校教学用书。从事燃烧专业设计和科研的同志也认为本书对促进当前国内正在迅速发展的数值计算燃烧气体动力学工作有很大帮助。

本书原文部分插图未作编号和说明，给阅读带来困难，现根据插图原意补上编号和说明。对原文中存在的错误也以译者注的形式加以更正。

参加本书翻译的同志有常弘哲（第12、13、14、17、18、19章），张连方、黄善衡（第2、3、4、5、7、8章），陈绥蕃（第1、9、15、16章），叶懋权（第6、10、11、20章）。全书最后由王兆华、曾求凡教授校对。

原作者序

本书的二十章讲稿是多年来对帝国理工学院机械工程系毕业班学生讲授“燃烧与传质”课程的成果。

燃烧是一门内容广泛和重要的学科。由于它的内容很多，二十章的课程仅能包括有用资料的一小部分，而欲作出选择是困难的。书中选择了我在以燃烧为长期课题的大学教学工作以及在咨询工作过程中，我个人认为是值得注意和有用的题目。诚然，参加学习这门课程的学生所掌握的知识，以及他们需要把燃烧的学习和其它课程的学习结合起来，也对本书内容产生了一定的影响。

虽然近年来数字计算机的出现改变了燃烧理论能够应用于工程问题的范围，但在本书中，我仅限于注意那些毋需借助于电子计算机就能分析的一些问题。其理由在于：我考虑到对学习燃烧的学生来说，重要的是：在他们陷入电子计算机能算出的正确的或错误的数堆里之前，得到一个可由公式和图表提供的、关于燃烧现象的清晰理解。

每章均提供了一系列旨在帮助学生掌握讲稿内容的练习，其中大多是各种选择答案题，有许多是属于“P是Q，因为R是S”的类型，对这些练习，学生必须问自己：“P是Q吗？”“R是S吗？”“如果是的话，是因为P是Q而得出R是S吗？”我感到这些练习在“为什么”和“是什么”方面对促进和提高思考能力是有价值的。

感谢科连金和克里斯汀·麦克金斯对此书的编写所给予的帮助。由于他们的努力，使大量反复修改的手稿整理成字迹清楚和整齐的教材。

我还要感谢洛克乌德博士、马世琦博士、潘恒武博士，他们在不同的时间帮助我讲授课程。学生们对讲稿的评论，也起了建设性的作用。

D.B.斯柏尔丁

1978年9月 伦敦

目 录

第 一 章	引言	1
	第一章的附录	17
第 二 章	传质(I)	28
第 三 章	液滴的蒸发(I)	36
第 四 章	传质(II)	43
第 五 章	液滴的蒸发(II)	50
第 六 章	传质(III)	61
第 七 章	液滴的燃烧	74
第 八 章	液体推进剂火箭	85
第 九 章	层流射流	99
第 十 章	层流扩散火焰	109
第十一章	湍流射流	117
第十二章	湍流扩散火焰	128
第十三章	受化学动力学影响的现象的综述	137
第十四章	化学动力学入门	144
第十五章	自燃着火	155
第十六章	搅拌反应器	166
第十七章	用不良流线体稳定火焰	176
第十八章	预混可燃混气的层流火焰传播	186
第十九章	引燃火焰与电火花的点火	194
第二十章	煤粒燃烧	205
	第二十章的附录	217

注：各章均附有一组辅导性的练习，其中一部分为解析题，另一部分为选择题。

第一章 引言

1.1 本门课程的重要性

A) 燃烧在工程中的地位

(i) 动力的生产

生产人类控制环境所需的动力只有几个方法，它们几乎都涉及固体、液体或气体燃料的燃烧。

中心电站烧煤向汽轮机供蒸汽。

油也用于同一用途，以及作为各种交通工具如汽车、飞机、船舶等的能源。

天然气可用作燃气轮机及内燃机的燃料，以及供产生蒸汽之用。

尽管核能必将成为工业国家的一个逐渐重要的能源，尽管太阳能、风能、波浪能正在积极地发展，但是在今后的年代中，燃烧仍然是动力的主要来源。

(ii) 在工业上

在工程材料的生产中，许多燃料作为一种原材料被烧掉，例如：

- * 钢、铁及许多有色金属；
- * 玻璃和陶瓷；
- * 水泥；
- * 炼制的石油、炭黑、以及其它碳氢化合物。

有时，燃料在使用前要经过特殊处理，例如通过严格控制的加热过程使煤成为焦炭，以便能用在鼓风炉中还原铁矿石。

(iii) 在家用的及工业的取暖上

在世界上许多地方，住宅、工厂、办公室、医院以及其它建筑需要采暖。在大多数情况下，优先的热源是燃料。野营篝火在帐篷中辐射热量，大厦地下室的锅炉通过热空气管或热水管散布热量，这两种传热方法的基础都是燃烧。

(iv) “能源危机”

“能源危机”首先就是“燃料危机”，也是一个“燃烧危机”。世界上的燃料供应正在迅速地减少，最易于燃烧的燃料在最迅速地被用掉。

如果工程师能在家用采暖设备中烧重油，或在汽车中用煤粉作燃料，人类的困境将大为改善。因此，正是燃烧技术的缺陷部分地加深了“能源危机”。

(v) 不希望发生的燃烧

森林、房屋、甚至衣服都可成为燃料。消防人员的任务是使它们不燃烧，或者在不慎着火时备有灭火措施。火灾引起的损失很大，因此专门的工程人员应对防火及灭火技术特别注意。

B) 能量使用情况的展望

下表列出了欧洲共同体和美国的预计的每年能量需用量。显然，燃烧得到的能量占

首位。

年 份	单 位: 10^{18} 焦 耳			
	欧 洲 共 同 体		美 国	
	1980	1985	1980	1985
煤	94.0	90.0	178.1	273.3
油	477.8	603.5	470.1	547.0
天然气	92.6	127.1	265.7	282.0
核 能	41.5	114.6	58.5	123.4
水力及地热	18.2	20.5	14.7	16.5

C) 设计师关心燃烧的原因

(i) 获得高的燃烧效率

燃烧设备不一定能将供给它的全部燃料烧掉, 没有烧完的部分往往排入大气。

燃料很贵, 不应如此浪费。未完全燃烧的产物往往是有毒的。因此, 设备设计人员有双重理由要使燃烧效率接近100%。

(ii) 降低费用

燃料很贵, 燃料的准备和燃烧的设备也贵。因此, 这些设备的设计, 必须既降低费用又提高效率。费用包括设备费用及运转费用。为了减少设备费用, 燃烧工程师应使化学反应能在最小的空间内完成。为了减少运转费用, 应使通过炉子的气体的压降最小。这两方面是有矛盾的, 必须采取折衷方案。

(iii) 温度及成分的控制

有时不仅要使燃料燃烧, 还附带要求燃烧产物具有一定的温度或有一定的成分。例如对于金属的热处理, 燃烧产物会引起金属物理的或化学的变化时就有如此要求; 或者为了不使附近的结构元件损坏, 燃烧产物不应超过一定的温度。

因此, 设计燃烧设备的工程师必须能预测出燃烧产物的温度和成分, 并使它们受到控制。

D) 燃烧作为一门专门化工程的一些特点

(i) 组成学科的多样性

专门从事压气机、泵和涡轮的工程师只需了解热力学和流体力学的定律。

传热学家不仅需要了解热力学和流体力学, 而且还必须熟悉传导和辐射的定律、材料的热物性及传质学。

燃烧工程师要关心流体的流动, 因为他的燃料可能是流体, 用以燃烧的空气则必定是流体。他必须了解传热学, 因为燃烧产生温度变化, 温度变化也影响燃烧。另外, 他还必须了解控制化学变化的规律, 包括化学变化的速率(化学动力学)和它们的效果(化学热力学)。

因此, 如果燃烧专家要有效地完成其任务, 他必须有宽广的科学基础。可以理解, 能有时间进行这些学习的工程师是不多的, 有足够训练的燃烧工程师是很需要的。

(ii) 计算机的作用

燃烧工程师必须对他设计的设备的性能作出定量的预测, 然而由于他必须掌握的过程

甚多，这个预测任务是很艰巨的。

直到最近，这预测还是一个不可能的工作。但是，随着计算机的发展以及应用计算机解复杂数学问题的方法的进展，情况已经改变。现在已可以扩大范围，用中型计算机对燃烧现象作出现实的和有用的预测。

(iii) “数学模型”的作用

不论是用计算机或较简单的工具来进行预测，研究的中心问题总是过程的一个“数学模型”，就是具有现实情况的一些特点而不是全部特点的一个理想化过程。

当然，这种“数学模型”是所有工程分析的一个主要内容，但是对于具有许多组成过程的燃烧过程来说，对“模化”的概念必须特别予以注意，因为选取哪些起主要作用的过程进行探讨是需要审慎的。

本章末了引用的文献中有许多关于燃烧数学模型的文献，本书实际上是为了了解大多数燃烧过程所必须的模型的一个叙述。

1.2 燃烧课程的结构

A) 按水准的分类

(i) 工程实践

本书的有关主要内容有三种水准：

- * 工程实践；
- * 数学模型；
- * 基础科学。

第一种水准包括工程设备的描述，运行方法的讨论，以及性能优缺点的描述。

这也可称为使用者和设计者的水准。设备使用者关心它的性能，设计者的注意力集中在形状、大小、外形、材料等如何影响它的性能。

(ii) 数学模型

人的智力是有限的，所以必须按照一定的目的，选择现实中的直接有关部分予以注意，而忽略其余部分，或至少是把它们放在次要位置。因此，所有工程分析只关心现实的模型，而不是现实的全部；而当需要作出定量的预测时，模型在性质上必须是数学式的。

这些数学模型的形式是微分方程或代数方程，其解在主要方面应与所模化的设备或过程的性能符合。这些模型，一方面可以认为是设备的设计和运行特性之间实际存在的相互作用的“理想化”或“要点”，一方面也是物理和化学的基本定律之间的相互作用的“理想化”或“要点”。

因此，研究工作的数学模型的水准是介于工程实践水准和基础科学水准之间。

数学模型往往有些名称，例如“液滴燃烧”、“均匀搅拌反应器”、“层流火焰传播”。本书中将遇到若干这种名称。

(iii) 基础科学

如前所述，燃烧过程受到自然规律的影响，这些规律属于：

- * 热力学；
- * 流体力学；

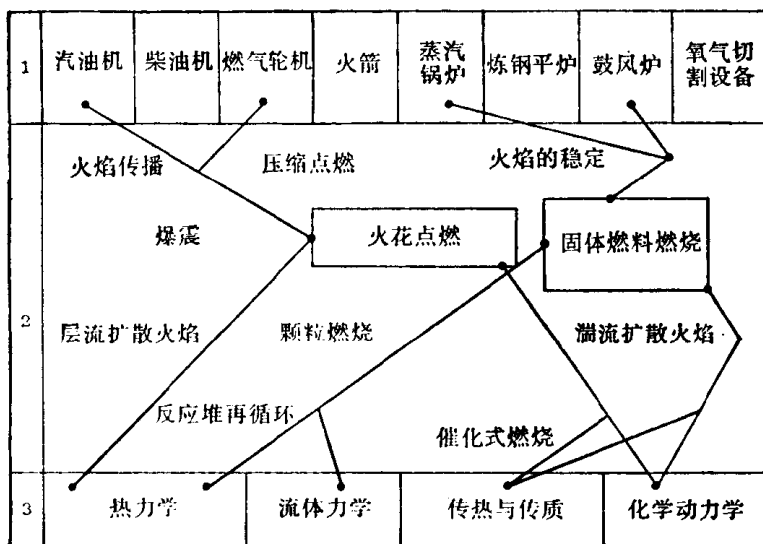
- * 传热与传质;
- * 化学动力学。

按照另一种分类法, 这些知识可以分别属于:

- * 守恒定律 (质量守恒、能量守恒等);
- * 传输定律 (动量传输、质量传输、化学组分传输、能量传输等);
- * 源的传输 (动量、质量、化学组分、能量的源等)。

(iv) 联系

下表包括上述三种水准的各个项目, 作为例子, 示出了第二水准的二个数学模型, 与第三水准中的基础科学和第一水准中的工程实际的联系。



读者结束本书的学习后再回顾这个表, 对所有其它模型绘出联系线可能是有趣的。

B) 现有工程实践的一些特点 (第一水准)

限于篇幅, 这里对燃烧的工程实践的常用元件只能略作介绍, 先介绍稳定流动的设备, 然后介绍过程随时间变化的设备。

燃烧理论与各种工程设备之间的关系在本书以后各章中随时讨论, 一般是在每章的开头和结尾处。

(i) 稳定流动的设备

燃 料	供应给设备的形式和方法	用 途
煤	煤篦上的煤块	家用的 小型工业锅炉 化铁炉及鼓风机 大型工业锅炉 水泥窑
	悬浮在空气中的煤粉	
煤油	从加热管或罐取得的油汽	“primus” 炉 某些航空燃气轮机 小型家用锅炉 家用锅炉 航空燃气轮机
	从旋转杯喷出的油滴喷注 从离心式喷嘴中喷出的油注	
柴油	从离心式喷嘴中喷出的油注	工业燃气轮机 大型家用锅炉 炼钢的平炉 大型工业锅炉
渣油	由蒸汽喷射的油滴射流 离心式喷嘴	
液体火箭推进剂	由液体射流撞击而成的喷注	大型火箭发动机, 特别是 重复使用的
固体火箭推进剂	有孔的燃料柱体, 燃烧发生在自由表面上	小型火箭发动机, 以及迅 速投入运行的

(ii) 非稳定流动的设备

燃 料	供应给设备的形式和方法	用 途
汽油 柴油	与空气及热表面接触而汽化 通过小孔向压缩空气中喷射而形成的油雾	火花点燃式发动机 压缩点燃式发动机 (柴油机)

C) 一些数学模型 (第二水准)

下列为本书中将要叙述的一些数学模型

(i) 在静止空气中燃烧的单个碳粒

为了确定燃烧速率和燃烧时间, 牵涉到氧的扩散、热传导和辐射, 以及化学动力学之间的相互作用。采用常微分方程。这个模型在第二十章讨论。

(ii) 在静止空气中燃烧的单个油滴

这个模型在第七章中讨论, 虽然它似乎比碳粒燃烧更复杂, 实际上它是更简单, 因为化学动力学问题在这里是不重要的。液滴蒸发但不燃烧的模型在第三章中提出。

(iii) 一元液体推进剂火箭

在第八章中讨论的液体推进剂火箭的数学模型是以液滴与燃烧产物组成的气流相互作用为特点。如果作了某些简化假设, 这个模型可用有解析解的常微分方程描述。对完全燃烧所需的火箭长度, 可导出代数式。有关的过程包括液滴燃烧和液滴阻力。这个模型是一个组合模型, 它包括第(ii)节中的模型, 并与管道中一元气体流动问题组合在一起。

(iv) 湍流扩散火焰

与许多工业过程有关的数学模型是湍流扩散火焰或“气体火炬”的数学模型。数学上可用表示质量、动量和能量传输过程之间的相互作用的偏微分方程表示, 这些方程在作出简化假设后有解析解。在第九、十和十一章讨论了层流扩散火焰和不燃烧的射流后, 这个模型在第十二章中讨论。

(v) 均匀搅拌反应器

在扩散火焰中, 化学动力学与传热、传质和动量传输相比较是次要的, 但对于所谓“均匀搅拌反应器”的数学模型而言, 情况恰好相反。在这里的状态是由气体供应速率与化学反应率的相互作用所控制, 热力学定律也起一定作用。

在第十三、十四和第十五章中对化学动力学作了初步学习后, 这个模型在第十六章中讨论。

由于假设流动系统中所有的不均匀性都不存在, 这个系统很简单, 模型只用到代数方程。但是它们需要用图解或数值解法求解。

(vi) 用扰流器稳定的火焰

虽然均匀搅拌反应器在实践中是没有的, 但在燃料气和空气的预混高速气流中扰流器后的火焰, 在性能上有相似之处。扰流器或称“火焰稳定器”, 在燃烧设备中被广泛采用。它们是一种阻碍物, 由于它们的“不良流线形”, 在它们的尾迹中产生了气体回流区, 其有关的数学模型在第十七章中讨论。

(vii) 火花点燃

火焰需要被点燃, 点燃往往是由火花引起, 即利用一个短暂和局部的电能的放电。

为了正确地理解这个重要的过程, 第十九章中提出了火花点燃的数学模型。得出的偏

微分方程，需用计算机才能有精确解。但是可用近似解法，使得通过简单的手算可得出最重要的特性。

这个模型牵涉到物理和化学过程的全部相互作用，虽然只是层流流动。这可能是本书中所讨论的最先进的模型。

D) 基础科学 (第三水准)

在这一节中，对本书其余部分中提到的基础科学学科作一些初步说明。

(i) 热力学

只采用了热力学中的少数几个概念，它们都是以最简单的形式出现。因此，比热取为不随温度而变化，并且假设在化学反应中，只有二个反应物中的一个被完全消耗掉以后，才存在平衡状态。

采用这种办法是使学生集中精力（从目前的目的来说）思考与燃烧有密切关系的方面，而忽略掉比热随温度而变化的事实。

本书中热力学的主要用途是将燃烧引起的温升定量地与消耗掉的燃料联系起来。所需要的只是稳定流动形式的热力学第一定律的知识。

(ii) 流体力学

有几个数学模型需用流体力学的定律的知识，特别是在用所谓“附面层”方程的形式来表达时。在这种模型中，惯性和粘性的影响是同一数量级的，它们的相互作用控制了流谱。书中的这些方程在第九章中开始提出。

虽然气体的粘性是强烈地与温度有关，本书中提出的分析忽略了这种变化。动机是再一次牺牲定量的严格准确性，以获得明确性。因为在获得所寻找的理解以后，准确性总是可以通过计算机计算而获得。

第十一章提出了关于湍流的一些基本概念，这些内容对于本书的目的来说已经足够了。

(iii) 传热学

在低温时，如果不是因为从热的已起反应作用的气体传热给冷的尚未反应的气体，则化学反应将进行得很慢，火焰就很难存在。这就是燃烧理论广泛应用传热的充分理由。

传热、对流和辐射这三种传热方式都是重要的，但是第一种特别重要，因为热传导率与温度梯度成正比，而在火焰中温度梯度往往很大。关于传导的傅里叶定律在第二章中提出，并在以后经常用到。

在某些过程中，传导传热是主要的方式，液滴蒸发就是其中之一。

(iv) 传质学

传热学几乎是所有专业的工程师都学习的一门课程，而传质学则只在化工专业的大学课程中成为正规课程。对于燃烧专家来说，传质学特别重要，因此本书中作了详细叙述。主要概念在第二章和第四章提出，并在许多地方加以应用。

传质过程与传热过程在许多方面是相似的，传热过程中的传导与传质过程中的扩散相似，两种过程中的对流具有相似的形式；但是传质过程中没有辐射。

扩散过程是使成分的差别减小的过程。既有层流扩散，也有湍流扩散，本书对两种形式的扩散都加以讨论。

(v) 化学动力学

化学反应涉及分子间原子的重新组合：一组（反应物的）分子必须分裂，分裂物按不同形式又重新组合，成为另一组（产物的）分子。

化学动力学是描述这种分裂和重新组合的速率与压力、温度、气体成分等当地状态的关系。

本书中第十三章和十四章提出了这门学科的基本内容。这些内容刚好只够定量地理解化学动力常数对火焰性能的影响。

1.3 一些趋势

A) 工程实践中的趋势

(i) 污染控制

在大多数工业国家中，公众对于燃烧过程对环境的质量的影响有强烈的关注，使得燃料的使用必须遵守限制性法规的规定。

汽车的未燃碳氢化合物能污染大气。为了满足新的及即将颁布的规定，正在采取一些减少污染的措施，例如：

- * 采用“催化后燃器”，使排气再和一些空气混合，并在插入排气管中的一个气室中将它们氧化。

- * 采用不含铅的汽油（加铅是为了减少“敲缸”），因为在排气中的氧化铅将阻止催化剂发生作用。

- * “分层进气式”燃烧室的研制，它的主要特点是能在大的空气燃料比的情况下工作。

大电站是有毒气体氧化氮的主要来源，散发氧化氮现在已要受到法律制裁。氧化氮主要产生在炉内高温区，因此正在改变设计和运行过程以降低最高温度。措施之一是将已经通过传热区的排气再一次引入炉内。

在许多城市中已经规定了“无烟区”。在那里，从烟囱中散发烟气是严格禁止的。这些规定使得许多使用部门完全改变了燃料品种和燃烧设备。

(ii) 燃烧效率

在许多情况下，减少污染也改进了燃烧效率，因为污染也包括了浪费掉的燃料。

但是节省燃料仍是改进燃烧设备的一个特殊的动机，它的重要性只能是日渐增大。

(iii) 改变燃料品种

为了减少燃料费用，也使一些大用户如有可能就改用廉价燃料。在许多国家中，这就意味着优先用煤而不用油或天然气。

这种改变就引起了新的燃烧设备的应用。例如，现在对煤的“沸腾床”燃烧已作了大量研究工作。在这种新的过程中，煤粒浮在上升的空气流中，传热表面是埋在“浮动的云”中。温度就保持得较低，氧化氮的发生率也小。

B) 数学模型上的趋势

(i) 计算机方法

从六十年代后期起，用计算机程序预测燃烧过程已日渐增多。最初，着重处理实际化

学反应的复杂性，它牵涉到几十个组分。而不象在这本原理书中的模型那样，只有两三个组分。典型的例子是关于火箭喷管中气体平衡状态的成分的精确计算，其次是这些气体在通过喷管时由于化学动力学引起的气体成分的变化精确计算。

以后，考虑了空间的二元和三元变化以及时间的变化。而“湍流模型”的创造，使现实地表示流谱与化学反应的相互作用成为可能。

计算机方法对燃烧模化的贡献还远没有完成，设计者提出的提高预测准确性和减少费用的要求仍在不断增长。可能需要许多年才能得出柴油机中整个喷射和燃烧过程的计算机模型，因为它具有下列复杂性：

- * 空间是三元的，区域边界随时间有周期性变化；
- * 非定常性；
- * 两相的存在，以液态燃料以及气态的空气和燃烧产物为代表；
- * 湍流（紊流）；
- * 复杂化学反应；
- * 对壁面的对流和辐射传热。

所有这些特点都确实存在于现有的计算机模型之中，但是还没有把它们全部放入一个单独实用的计算机程序中。

(ii) 有效性

提出一个预测方法是一回事，保证预测准确即与试验结果符合则是另一回事。

因此研究人员对工业应用作了大量工作，来证实计算机模型的有效性。具体的方法是对预测和试验结果作出详细的比较，对所发现的误差用计算上的不准确性，假设的不适当以及测量的不精确等作出解释，然后提出新的设想并进行改进，最后使误差能减低到可以接受的程度。

证实有效性的工作是耗费时间的，因此也是费钱的，只有勤勉和正直的科学家才能成功地完成这项工作。在每一百个头脑敏捷的人中，只有几个人能坚持把它们的理想与现实相校验，并勇于抛弃已被证明为无根据的一些想法。

(iii) 应用

某些计算机模型已被充分证明可供设备设计者和运行人员成功地使用。因此，这些模型已经可以有益地被广泛应用。

但是，还没有一个模型已被广泛应用，其原因有二：

* 很少人在数学模化上，特别是在燃烧的计算机模化上有适当的训练，使其能满足潜在的使用户的需要。

* 燃烧设备的使用户和设计者的任务重大，不能容许失败，因此他们不愿采用他们没有充分信心的预测方法。

当然，通过教育工作上的改进和资料的传播，燃烧的计算机模型在应用上的这些阻力将逐渐消失。对此，本书也可略为起些作用。

C) 基础科学上的趋势

(i) 热力学

几十年来，热力学已是一门充分发展的学科。除了有关材料的热力学物性尚需增添数

据外，燃烧工程师在热力学的发展上不需加以注意。

(ii) 流体力学

近年来，流体力学上最突出的有关发展是使湍流流动可以采用定量的预测方法。这个趋势将无疑地会继续下去，虽然不一定很顺利。

现在，湍流流动的计算程序往往采用一些成熟的方法计算一个不太成熟的量，即有效粘度。对于许多目的来说，这样的程序已够用，但是将湍流流动用层流流动的类似方法来处理，一定会忽略掉它的一些重要特点。

湍流与化学反应的相互作用显示出某些特殊问题，现在处理“湍流模化”的方法，当有化学反应存在时，与没有化学反应存在时相比，实在远不是成功的。有两个问题：

- * 化学反应的存在，如何在定性上和定量上影响湍流流动？
- * 湍流流动如何影响化学反应的速率？

由于第二个影响比第一个强烈，现在注意力集中在这方面。但还没有得出完全的答案。

过去，流体力学现象的研究限于单相流动，现在已有分析多相流动的方法。这就对燃烧工程师特别有利，因为，如上所述，他们的流动现象往往是多相的。

(iii) 传热学

燃烧学者最需要的传热理论的发展主要是与传热的辐射模型有关，物理上的和数学上的发展都是需要的。

辐射在数学上难以处理是因为我们不仅需要知道在火焰中每点上的辐射强度，而且要知道按角度和波长的辐射强度的分布；而在物理上的复杂性，是在于不同的材料对不同波长的辐射的相互作用是不同的。

对于材料的辐射方面的物性，积累更多可靠数据的研究工作有待进行，但更有待进行的是能使预测工作有个更现实和更经济的“概念上的突破”。总之，需要有一个辐射的更好的数学模型。

(iv) 传质学

在这方面似乎不需要任何重大的发展，现有知识在大多数问题上已足够。

(v) 化学动力学

通过全世界物理化学家的工作，在燃烧学家认为重要的化学反应的化学动力学常数上，已积累了大量数据。物理化学家的工作也许永远不会结束，因为相互作用的化学品种是大量的。但是，几年前往往责备可靠的化学动力学数据太少，现在的情况是存在的数据比计算机程序能容易地处理的还要多。

(vi) 数值算法

最后，必须指出，只是当已具有求解数学模型的方程的可靠而经济的方法之后，计算机才能用以作出预测。

现在的情况是燃烧预测中可能遇到的各种方程都有求解的方法。但是有时这些方法需要大量的“调整”工作才能成功，而这往往总是比使用者所预计的更为费钱。

在这方面尚需进一步的发展，但这只需要不断应用和一些技巧，因此这种发展一定会到来。

1.4 参 考 文 献

1.4.1 教科书

- BEER J M and CHIGIER N A "Combustion and Aerodynamics" Applied Science Publishers, London, 1972.
- FRISTROM R M and WESTENBERG A A "Flame Structure" McGraw Hill, New York, 1965.
- GLASSMAN I "Combustion" Academic Press, New York, 1977.
- GÜNTHER R "Verbrennung und Feuerungen" (In German) Springer-Verlag, Berlin, 1974.
- KENNEDY L A (Editor) "Turbulent Combustion" AIAA, New York, 1978.
- LEWIS B and von ELBE G "Combustion, Flames and Explosions in Gases" Academic Press, New York, 1961.
- LEWIS B, PEASE R N and TAYLOR H S "Combustion Processes. Vol II of High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion" Oxford University Press, 1956.
- MURTY KANURY A "Introduction to Combustion in Phenomena" Gordon and Breach, New York, 1975.
- SPALDING D B "Some Fundamentals of Combustion" Butterworth's, London, 1955.
- SPALDING D B "Convective Mass Transfer" Edward Arnold, London, 1963.
- SPALDING D B "Combustion Theory Applied to Engineering" Imperial College, London, Heat Transfer Section Report No HTS/77/1, 1977.
- THRING M W, DUCARME J and FABRI J (Editors) "Selected Combustion Problems II" Butterworth's, London, 1956.
- WILLIAMS F A "Combustion Theory" Addison-Wesley, 1965.

1.4.2 一般资料来源

- THE PROCEEDINGS of the International Symposia on Combustion, published every two years since about 1949.
- WEINBERG F (Editor) "Combustion Institute European Symposium 1973" Academic Press, London, 1973.
- COMBUSTION AND FLAME Journal published by Elsevier
- COMBUSTION SCIENCE AND TECHNOLOGY Journal published by Gordon and Breach, New York.
- PALMER H B and BEER J M (Editors) "Combustion Technology, Some Modern Developments" Academic Press, New York, 1974.

1.4.3 有关燃烧现象的模化的出版物

A) 物理模型

- CHESTERS J H, HOWES R S, HALLIDAY I M D and PHILIP A R J Iron & Steel Institute vol 1962 p 385 1949.
- CLARKE A E, GERRARD A J and HOLLIDAY L A "Some Experiences in Gas Turbine Combustion Practice Using Water Flow Visualization Techniques" Ninth Symposium (International) on Combustion Academic Press, New York, p 878 1963.
- DAMKOHLER G Der Chemie-Ingenieur (A EUCKEN and M JAKOB (Editors) Band III Teil 1 Akademie Verlag 1937. Reprinted by VDI-Fachgruppe Verfahrenstechnik, Leverkusen 1957.
- GROUME-GRJIMAILO W E "The Flow of Gases in Furnaces" Wiley, New York, 1923.
- HOTTEL H C, WILLIAMS G C, HENSEN W P, TOBEY A C and BURRAGE P M R "Modelling Studies of Baffle-Type Combustors" Ninth Symposium (International) on Combustion Academic Press, p 923 1963.
- LeFEBVRE A H and HALLS G A "Simulation of Low Combustion Pressures by Water Injection" Seventh Symposium (International) on Combustion Butterworths, London, p 654 1959.
- PUTNAM A A and JENSEN R A "Application of Dimensionless Numbers to Flashback and Other Combustion Phenomena" Third Symposium (International) on Combustion Williams and Wilkins, Baltimore, pp 89-98 1949.
- SPALDING D B "Analogue for High-Intensity Steady-Flow Combustion Phenomena" Proceedings of Institution of Mechanical Engineers vol 171 no 10 pp 383-411 1957.
- SPALDING D B "The Art of Partial Modelling" Ninth (International) Symposium on Combustion Academic Press, New York, pp 833-843 1963.

- SPALDING D B "Some Thoughts on Flame Theory" Combustion and Propulsion, Third AGARD Colloquium, Pergamon Press, London, pp 369-406 1959.
- STEWART D G "Scaling of Gas Turbine Combustion Systems" Selected Combustion Problems Volume 2 Butterworths, London, pp 384-414 1956.
- TRAUSTEL S "Modellgesetze der Vergasung und Verhüttung" Akademie-Verlag 1949.
- B) 零因次数学模型
- BRAGG S L and HOLLIDAY J B "The Influence of Altitude Operating Conditions on Combustion Chamber Design" Selected Combustion Problems Volume 2 Butterworths, London, pp 270-295 1956.
- HOTTEL H C and STEWART I McC "Space Requirement for the Combustion of Pulverized Coal" Ind Eng Chem, vol 32, pp 719-730, 1940.
- LONGWELL J P, FROST E E and WEISS M A "Flame Stability in Bluff-Body Recirculation Zones" Ind Eng Chem, Vol 45, p 1629, 1953.
- SPALDING D B "The STability of Steady Exothermic Chemical Reactions in Simple Non-Adiabatic Systems" Chemical Engineering Science, Vol 11, pp 53-60, 1958.
- VAN HEERDEN C "Autothermic Processes" Ind Eng Chem, vol 45, p 1242, 1953.
- C) 一元数学模型
- CHESTERS J H, HOYLE K H, PEARSON S W and THRING M W "Comparison of Calculated and Actual Heat Transfer" Iron and Steel Institute Special Report No 59 p 65 1965.
- CSABA J and LEGGETT A D "Prediction of the Temperature Distribution along a Pulverized-Coal Flame" J Institute of Fuel, vol 37, pp 440-448, 1964.
- FIELD M A and GILL D W "A Mathematical Model of the Combustion of Pulverized Coal in a Cylindrical Combustion Chamber" BCURA Members Information Circular Number 318 1967.
- SPALDING D B "The One-Dimensional Theory of Furnace Heat Transfer" University of Sheffield Fuel Society Journal vol 10, pp 8-17, 1959.
- THRING M W "The Effect of Emissivity and Flame Length on Heat Transfer in the Open-Hearth Furnace" J Iron and Steel Institute, vol 171, pp 381-392, 1952.
- THRING M W and SMITH D "An Improved Model for the Calculation of Heat Transfer in the Open-Hearth Furnace" J Iron and Steel Institute, vol 179, p 227, 1955.
- D) 二元数学模型
- GIBSON M M and MORGAN B B "Mathematical Model of Combustion of Solid Particles in a Turbulent Stream with Recirculation" J Institute of Fuel, vol 43, pp 517-523, 1970.
- KENT J H and BILGER R W "Turbulent Diffusion Flame" Fourteenth Symposium (International) on Combustion Combustion Institute, Pittsburgh, pp 615-625, 1973.
- LOWES T M, HEAP M P, MICHELFELDER S and PAI B R "Mathematical Modelling of Combustion Chamber Performance" Proc. Fourth Flames & Industry Symposium, London, 1972.
- PUN W M and SPALDING D B "A Procedure for Predicting the Velocity and Temperature Distributions in a Confined, Steady, Turbulent, Gaseous, Diffusion Flame" XVIII International Astronautical Congress, Belgrade, 1967, Pergamon Press, London, pp 3-21, 1968.
- RICHTER W and QUACK R "A Mathematical Model of a Low-Volatile Pulverized-Fuel Flame" Heat Transfer in Flames, edited by Afgan N H & Beer J M, pp 95-110, Scripta Book, Co., Washington, 1974.
- SALA R and SPALDING D B "A Mathematical Model for an Axi-Symmetrical Diffusion Flame in a Furnace" La Rivista dei Combustibili, vol XXVII, pp 180-196, May 1973.
- SCHORR J, BERMAN K and WORNER G "Modelling of High-Energy Gaseous Combustors for Performance Prediction" Bell Aerospace Company, 1971.
- SCHORR C J, WARNER G A and SCHIMKE J "Analytical Modelling of a Spherical Combustor including Recirculation" Fourteenth Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, pp 567-574, 1973.
- SPALDING D B "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames" Thirteenth Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, p 649, 1971.
- E) 三元数学模型
- PATANKAR S V and SPALDING D B "A Computer Model for Three-Dimensional Flow in Furnaces" Fourteenth Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, pp 605-614, 1973.
- PATANKAR S V and SPALDING D B "Simultaneous Predictions of Flow Pattern and Radiation for Three-Dimensional Flames" Heat Transfer in Flames, edited by Afgan N H & Beer J M, pp 73-94, Scripta Book Co., Washington, 1974.
- ZUBER I "Ein Mathematisches Modell des Brennraums" Monographs and Memoranda No 12 Staatliche Forschungs Institute für Maschinenbau, Bechovice, Czechoslovakia, 1972.

帮助掌握第一章内容的练习题

做题方法介绍

将下面各题 (1.1, 1.2……等) 标以记号 A、B、C、D 或 E。

对于选择题, 这种记号表示该答案是最好的。对于陈述情况的习题, 按下面所列的规则注明记号 (S_1 ——第一个陈述句, S_2 ——第二个陈述句, A——用连接词“因为”所表示的论据):

如果 S_1 正确, S_2 正确, A 正确, 则注明记号: A

如果 S_1 正确, S_2 正确, A 不正确, 则注明记号: B

如果 S_1 正确, S_2 不正确, 则注明记号: C

如果 S_1 不正确, S_2 正确, 则注明记号: D

如果 S_1 不正确, S_2 不正确, 则注明记号: E

1.1 汽油机燃烧室设计者力求减小“敲缸”的趋势,

因为

汽油机是 NO_x 大气污染的主要来源。

1.2 当柴油机发出最大设计扭矩时排气会出现黑烟,

因为

此时在汽缸内的燃料-空气比属于富油状态。

1.3 在汽车销售上柴油机可能增加它的比例,

因为

燃料价格在上涨。

1.4 下列哪一项是航空燃气轮机燃烧室的设计者必需尽量减少的指标:

A 排气中的烟量。

B 通过燃烧室的压降。

C 燃烧室壁温。

D 离开燃烧室燃气温度的不均匀度。

E 使火焰保持燃烧的燃料-空气比的范围。

1.5 下列各项中, 除哪一项以外, 都是工业用炉的设计者想力图做到的:

A 保证在离开喷嘴后尽可能短的距离内烧掉大部分燃料。

B 防止没有燃烧的燃料从炉中逃掉。

C 减低由火焰发出的噪声。

D 使燃料系统适应多种产地的燃料。

E 保证对需加热材料的热量传递的空间分布适应该过程的需要。

1.6 燃烧科学能很好地满足工程设计者的要求,

因为

现在对材料所有有关化学动力学的特性已有足够精确、定量的了解。

1.7 下列各项中, 除哪一项以外, 都与悬浮在静止空气中的油滴的燃烧速率密切