

571219

燃烧空气动力学

〔英〕J. M. 比埃尔 N. A. 切给尔 著

科学出版社

571219

V231.2/04

燃烧空气动力学

(英) J. M. 比埃尔 N. A. 切给尔 著

陈 熙 译

王 群 校

科学出版社

1984

内 容 简 介

本书是一本比较实用的燃烧空气动力学专著。著者从供工业燃烧设备科研、设计和教学人员使用的角度,对燃烧空气动力学有关问题做了比较系统的论述。书中内容包括:各种型式的射流和尾迹的流动规律,火焰传播与稳定,液体燃料的雾化与燃烧,流场参数的计算方法,燃烧系统的模化,火焰条件下参数测试技术等。

本书可供燃烧理论方面的科研和教学人员,以及从事锅炉、燃气轮机、工业炉等燃烧装置的科研和设计人员参考,也可作为高等学校相应专业的研究生和高年级学生的教学参考书。

J. M. Beér and N. A. Chigier

COMBUSTION AERODYNAMICS

Applied Science Publishers Ltd., London

1972

燃 烧 空 气 动 力 学

〔英〕J. M. 比埃尔 N. A. 切给尔 著

陈 熙 译

王 群 校

责任编辑 陈文芳

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年10月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1984年12月第二次印刷 印张:9 1/8

印数:6,651—8,400 字数:205,000

统一书号:15031·253

本社书号:1553·15—6

定 价: 1.12 元

译者前言

湍流气流中的燃烧，特别是带强旋转的湍流气流中油雾的燃烧，是各种工业燃烧设备（如锅炉、燃气轮机、工业炉）中比较常见的燃烧型式。它的研究有着重大的国民经济意义；相当长时间以来，一直是广大燃烧物理学工作者以及从事燃烧装置科研、设计、运行与教学的人员所关心的重大课题。燃烧空气动力学涉及面很广，目前尽管在理论和实验研究方面已经做了很多工作，积累了大量资料，仍有很多问题有待进一步深入研究。

本书是一本比较实用的燃烧空气动力学专著。著者从供科研、设计和教学人员使用的角度，对燃烧空气动力学的有关问题作了较为系统的论述；反映了到七十年代初为止的有关研究成果，特别是系统地总结了以西欧国家为主体的“国际火焰研究基金会”所属研究机构以及与其有联系的科研单位和高等学校的研究人员、包括本书两位著者自己的成果。

翻译时删节了原著者序中与技术内容无关的几个段落，并对原书中一些明显的错误作了更正，有的则以译者注的形式加以指出或说明。由于该书的日文译本到书较晚，只在译文审定过程中参照过日译本的个别译法。

对于中国科学技术大学程久生等同志以及清华大学热物理教研组有关同志，在本书中译本出版过程中的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。由于译者水平有限，错误在所难免，望读者批评指正。

1978年5月

序

本书的写作目的是作为大学生和研究生学习燃烧课程的教材，同时也作为从事实际工作的工程师用的参考书。燃烧是最古老的科学分支之一，象在其它科学技术领域一样，在广阔的实际应用范围内对燃烧兴趣的急剧增长，导致了新知识的大量积累，首先是在两次世界大战之间的时期，而特别是最近二十年。书籍、期刊和会议录数量的巨大增长，已导致在燃烧技术的广泛领域内的高度专业化，这包括了许多科学分支，如物理学、化学、光谱学、热力学，还有关于传输过程的工程科学。

我们的目的是讨论空气动力学过程，因为它在工业实践中最广泛使用的火焰形式——湍流扩散火焰中起着重要的作用。书中大部分材料选自完全分离流领域，即带燃烧和不带燃烧的湍流射流和尾迹。著者虽然试图给出总的图象，但也必须承认，一本短的专著要想作综合性的处理是有局限性的。书中大部分专题和研究结果的讨论，是从我们的研究工作中选取的，这些研究工作先是在国际火焰研究基金会 (International Flame Research Foundation) 设在荷兰依吉米登 (Ijmuiden) 的研究站，以后又在英国设菲尔德 (Sheffield) 大学进行的。这样来选择本书的材料只是为了便于遵循我们所熟悉的思路，而不是因为什么其它方面的考虑。

著者在本书中试图兼顾对问题的描述性的与分析性的处理方法，并且只要有可能，也把数学分析与过程的物理模型结合起来。在已经有仔细的数学分析而使结果具有普遍性的地

方,本书把它收录进来,而在其它情况下,则推荐了更简单的、基于适当的无量纲组合之间关系式的定量处理办法,作为供设计工作者应用的最可靠的工具.在这方面,对材料的处理反映了著者“燃烧是处于技艺状态”的观点.理想的事当然是设计工作者应该只靠计算就能够解决他的问题,也就是不必求助于实验研究.理论预言方法已经作出了令人鼓舞的进展,并且它们将对未来年代的科学研究提供指导路线;但是今后一些时候,设计工作者仍必须依靠半经验关系式和物理模化的办法来解决他们的问题.因此,进一步发展人们所熟知的这种设计方法,是同样重要的.书中包括了关于燃烧空气动力学的解析模化与准则模化两方面问题的讨论.

J. M. 比埃尔

N. A. 切给尔

目 录

译者前言	vi
序	vii
第一章 引论	1
第二章 分离流	8
符号	8
2.1. 射流	10
2.2. 流场描述	13
2.3. 引射	16
2.4. 非定密度体系	17
2.5. 处于外流中的射流与尾迹	18
相伴平行流动中的射流	18
相交流动中的射流	22
2.6. 环状射流与同轴射流	24
2.7. 受限射流	27
克雷雅-柯塔特相似参数	34
斯林-纽比理论与克雷雅-柯塔特理论的比较	37
2.8. 射流火焰	39
2.9. 层流射流火焰	40
2.10. 湍流射流扩散火焰中的燃烧	41
2.11. 射流火焰中的浓度分布	43
2.12. 受限火焰的长度	46
2.13. 多股射流火焰	48
参考文献	48
第三章 火焰稳定	52
符号	52

3.1. 火焰传播	54
3.2. 一维层流燃烧波	54
3.3. 预混层流火焰的维持	58
3.4. 湍流燃烧	64
3.5. 以不良流线体稳定火焰	71
3.6. 不良流线体尾迹中的流动	76
3.7. 回流区中的燃烧	81
3.8. 不良流线体稳焰器的稳定极限	85
参考文献	85
第四章 理论分析——预言方法	88
符号	88
4.1. 引言	89
4.2. 控制方程式	91
基本微分方程式	91
热力学关系式	91
通量定律	92
湍流模型	93
4.3. 圆柱极坐标系中的方程式	94
方程的圆柱极坐标形式	94
边界层方程式	96
4.4. 宏观平衡关系	99
积分性质	99
流动状况分析	100
4.5. 从时平均值分布确定交换系数的计算方法	101
计算程序	101
参考文献	104
第五章 旋转气流	105
符号	105
5.1. 引言	107
5.2. 旋流数, 旋转流动的无量纲特征量	112
5.3. 旋转流的产生和特性描述	113

旋转流的产生方法	113
各类旋转流产生器旋流数 S' 的计算	115
✓旋流产生的效率	120
5.4. 弱旋流 ($S < 0.6$)	123
具有弱旋流的扩散火焰	127
5.5. 强旋流 ($S > 0.6$)	128
✓旋流度的影响	129
✓喷管几何形状的影响	130
停留时间分布	134
强烈旋转射流(具有迴流)中的湍流特性	137
5.6. 旋转流动环境中的浮升射流扩散火焰或湍流射流扩散火 焰	143
等温模型	146
✓火焰的层流化	150
结论	151
参考文献	152
第六章 液滴与喷雾	156
符号	156
6.1. 引言	159
6.2. 液体燃料的雾化	160
6.3. 喷雾中液滴的形成过程	164
6.4. 空气流和喷雾的相互作用	166
6.5. 喷雾的燃烧	172
6.6. 单液滴燃烧	172
单液滴燃烧的理论分析	173
关于在静止环境中燃烧的理论	175
关于在对流气流中燃烧的理论	182
理论预言结果综述	189
单液滴方面的实验工作	189
6.7. 液滴组、液滴流及单一直径喷雾的燃烧	192
6.8. 双流体法雾化的液体燃料的扩散火焰	197
6.9. 压力雾化式燃油火焰	200

旋转空气流的影响	203
参考文献	207
第七章 燃烧系统的模化	210
符号	210
7.1. 相似的分类	212
7.2. 建立相似准则的方法	213
量纲分析	213
从基本微分方程式导出相似准则	213
化学反应器的相似	216
7.3. 可以忽略不计的相似准则	216
7.4. 部分模化法对火焰的应用	217
自由湍流射流	220
非等温射流	220
受限射流	221
双股同心射流	222
浮升射流	223
7.5. 燃烧室中的停留时间分布	224
7.6. 实验方法	224
参考文献	226
补充参考资料	227
第八章 火焰中的测量	228
符号	228
8.1. 引言	229
8.2. 气体速度	230
皮托管	231
五孔皮托管	233
热线风速仪	236
8.3. 压力	250
静压-圆盘型探头	250
8.4. 温度	252
细丝热电偶	252
抽气式高温计	253

文都利型气动高温计	256
电阻温度计	258
8.5. 传热量	259
导热塞型热流计	259
8.6. 气体浓度与固体颗粒浓度的测量	263
采样探头	263
固体颗粒浓度测量的精度 快速冷却	265
气体火焰中的浓度测量	266
8.7. 应用高速照像法测量液滴尺寸、速度和飞行角度	267
火花装置	268
照像方法和光学系统	269
火花监测单元	270
电子系统	271
脉冲发生器与延迟单元	272
8.8. 火焰中湍流量的测量	274
高温热线探头	274
其它的湍流量测量方法	278
参考文献	279

• ▼ •

第一章 引 论

火焰现象是物理与化学过程复杂的相互作用的结果，这些过程的研究涉及到许多学科，如热力学、化学动力学、流体力学等等。虽然在一般术语中燃烧是指一种放热氧化反应，但物理过程，特别是能量、质量与动量交换，在燃烧系统中起着重大的作用，而在大多数工业火焰的总体反应中，更是最重要的决定性的步骤。

为讨论方便起见，把预混火焰和扩散火焰区分开来。在预混火焰中，反应剂在进入火焰以前就完全混合好，而在扩散火焰中，燃料和空气在燃烧开始前没有完全混合好，或者完全没有混合。结果，在扩散火焰中，反应剂的混合和燃烧是同时进行的。

在预混火焰和扩散火焰这两类火焰中，流动状况都可以是层流的或是湍流的。燃烧技术工作者主要关心的是：

- (1) 燃烧区向未燃混合物传播的速率；
- (2) 火焰中的单位体积燃烧率；
- (3) 火焰对环境的能量交换；它主要通过辐射方式，但也通过对流方式。

关于火焰传播机理及其速率的资料将给出火焰稳定极限。有关火焰中燃烧速率的数据是决定火焰的实际尺寸所必须的。能量交换速率也是项重要数据，因为某些燃烧系统的目的就是要尽可能多的热量传给吸热体，而在其它一些系统(燃气轮机燃烧室)中，避免过多的热量从火焰传向限制表面则是重要的。任何情形下，要进行有效的设计和运行，都必

须了解传热过程的细节情况。

在燃烧区传播和火焰内燃料燃尽这两个过程中,热量、质量和动量交换都起着重要的作用。层流火焰中交换通过分子扩散方式,而在湍流火焰中则通过湍流扩散。但在所有情形下,分子交换或湍流交换速率都取决于火焰或燃烧室中的流型。一方面是混合,亦即浓度分布,另一方面是流型,这两者之间的联系使燃烧空气动力学在火焰研究中有它的重要意义。

燃烧器是把燃料和氧化剂喷入,并使它们在燃烧室中混合的装置。气体燃料可直接鼓送燃烧器,以使其和氧化剂混合,而液体与固体燃料则要求有准备手续。通常给液体燃料加热,以使其粘度减小,好在雾化器中有效雾化。雾化后的燃料再以分散得很细的液雾的形式喷入。固体燃料可以在炉篦上、在流态化床里或以粉状燃料的形式燃烧;但在燃烧器火焰的讨论中,我们将只涉及粉状燃料燃烧形式,此时在燃料磨中粉碎了的燃料用压缩空气输送到燃烧器,并以分散得很细的颗粒云的形式喷入燃烧室。最常用的氧化剂是空气,它是用风扇、鼓风机或压气机通过燃烧器送到燃烧室中的。燃料和氧化剂很少是在燃烧器中混合好了的;它们或者分别喷入,或者更常见的是燃料只和一小部分助燃空气(一次空气)在它们流经燃烧器的路途中混合。把助燃空气分为一次流和二次流是出于火焰稳定及安全方面的原因,如防止回火及燃料供给管线中的爆炸。它也使人们可以采用较高的二次空气预热温度,而这又可以对系统的热力学效率产生有利的影响。

除了空气流充满燃烧室的整个横截面的那些情况(例如水泥窑炉)以外,从燃烧器流出的燃料流和空气流二者都是以射流的形式出现的,亦即是完全与壁面分离的流动。采用燃料流和空气流的喷射动量来决定火焰的方向并控制燃烧室中

的混合。火焰中的流型和混合状况取决于燃烧器出口处被转换成动能的压力能,也取决于燃烧器的几何结构(第二章)。

圆形射流是从圆截面的管子或喷口流出的流体所形成的。由于它们对于射流轴线对称,故在圆柱坐标系中作解析研究时可把圆形射流看作是二维的。对于流量很低且燃烧器直径不大的情形,出口处射流可能是层流的,以后才转化为湍流,而通常工业型燃烧器的尺寸以及出口速度总是足够大,以致喷口出口处流动就是湍流状况。

环状射流时常用作在一次射流周围引入二次空气,而一次射流或者用来携带燃料,或者环绕着放在燃烧器轴线上的油枪喷入。通常用非流线型的所谓“不良流线体”放在圆形喷口的中心位置处;从而气流是从环状喷口流出的,并在不良流线体的尾迹中形成反向流动区,而这正是火焰稳定的手段。

双股同心射流是由中心圆形射流和同轴的环状射流所构成的组合射流。在燃烧器下游几倍于喷口直径的位置处,两股射流合为一体,且组合射流的性能在此区域内可由加在一起的射流的质量流量和射流动量来很近似地加以预言。然而,在燃烧器附近,使中心喷口和环形喷口分隔开的界面的尺寸和几何形状,却对混合有着重大的影响。由于它影响火焰稳定,故该区域对燃烧技术工作者有着特别的意义。

以某一角度贯穿入主流的射流——**交叉射流**——时常采用来作为使二次空气或掺混空气喷入火焰(如燃气轮机燃烧室)的方式。为满足设计需要,必须要有关于交叉射流路径、它贯穿入主气流的深度以及与主气流的混合过程方面的知识。虽然对交叉射流还不能进行完整的解析处理,但预言主要流动参数的半经验方法却能以良好的近似给出结果。

受限射流情况下,可供射流引射的流体量受到限制。结果,沿着射流建立起反压力梯度,同时在射流区外具有回流。

提出过两种预言受限射流特征量的方法。其中一种是根据这样的简化假定,即受限射流像自由射流一样,其发展情况由它的动量来决定,因此引射量和射流扩展都不受限制面影响。更一般的预言方法则基于对运动方程作仔细处理。结果表明,虽然第二种方法给出更普遍适用的结果,但对大多数实用情形,却能用前一种简化方法从受限射流体系的进口参数,预言回流量及回流涡核心的位置。

由于燃烧,燃烧室中出现密度梯度。从环境引射进射流或火焰中来的气体流量,依赖于射流与其环境之间的密度差。在射流密度高于环境气体的密度时,引射量减小;相反地,低密度或高温射流贯穿入冷环境时,具有比定常密度系统中的射流更高的引射量。当讨论到扩散火焰中的燃烧长度和浓度分布时,要考虑这些效应。

第三章中讨论火焰理论的某些基本概念。在预先混合好了的燃料-氧化剂混合物中,火焰传播可以用热量及化学活性物质由反应区向新鲜混合物的反向传输、并在新鲜混合物中又引起燃烧反应来描述。新的燃烧层然后又成为新的热量及化学活性物质的来源。层流火焰中,传输是通过分子扩散方式进行的;而在湍流条件下,热量和质量传输量加大相当多,从而引起火焰传播速率加大。传输速率还可以由对流而进一步加大,如像在回流区中所发生的那样。

当轴向反压力梯度超过流体质点的动能并形成驻点时,流动中形成回流区。这可以由如下途径引起:(1)用有限空间来限制湍流射流,从而调节其引射量,(2)在主流中引进不良流线体,(3)使射流强烈旋转。

在回流涡的大小和强度与火焰的稳定特征量之间存在着重要的关系。另一方面,旋涡的大小和强度依赖于进口条件,如阻塞比及物体前侧的几何形状。某些资料采用半经验形

式,其中有关参数组之间的关系以实验方法确定。

第四章对不带回流的、燃烧着的旋转射流作了分析。假如给定湍流动量通量张量 τ 、湍流焓通量向量 J_h 以及化学物质的湍流通量向量 J_j (每种化学物质一个),就能预言出湍流火焰中速度、压力、浓度及温度的时间平均值。湍流交换系数 μ, Γ_h 和 Γ_j (由与层流情形下的牛顿 (Newton) 定律、傅立叶 (Fourier) 定律和费克 (Fick) 定律相比拟而定义) 被普遍采用,并假定它们是各向同性的,且后两个量与 μ 的比值 (普朗特 [Prandtl] 数与施米特 [Schmidt] 数) 一定。该章提出了一种从实验所得的 v_x, v_θ, T 及 m_j 的时间平均值分布来确定 $\mu_{rx}, \mu_{r\theta}, (\Gamma_h)_r$ 及 $(\Gamma_j)_r$ (在不带回流的旋流火焰中主要的通量分量) 分布的方法。计算表明,前面的假定并不普遍适用,而对旋转流说来,湍流应力分布不是各向同性的。交换系数是旋流度以及流场中位置的函数。

在旋转流(第五章)中,除了在自由、轴向、无旋转射流中遇到的轴向和径向速度分量外,从喷口流出的流体还具有切向或旋转速度分量。由于旋转射流扩展得更宽,和周围的流体混合得更快,故常把它们使用于火焰,作为控制反应剂混合和回流的有效手段。在强烈旋转射流中心区域所出现的回流,可以用来使火焰稳定在燃烧器上。该章讨论了产生旋流的实用方法,同时给出了旋流强度的定量的特性描写。射流的角动量和线动量,这两个不变量的无量纲比值可用来作为旋转程度的一种量度。此章还针对不同的旋流强度及不同的喷管几何结构,对扩张型喷管中旋流的稳定性——流体从扩张型喷管壁面分离的条件——作了考虑。

由于能有效控制喷管流体质量在旋转射流中回流的部分,采用这种射流的燃烧室中,流体质点的停留时间分布,可以由改变燃烧器的几何尺寸及流动的旋转强度来得到广阔范

围的变化。如果已知燃烧反应总体速率对反应剂浓度及温度的依赖关系,又知道燃烧室中反应剂停留时间分布,就可以对燃烧性能作良好的近似计算。对于使燃烧性能最佳化而言,能够改变停留时间分布是很有价值的。

当转动流动和径向高正向密度梯度相耦合时,这可能导致径向湍流质量与动量交换的削弱,并相应地导致沿旋转的环境气体轴线燃烧的湍流射流火焰燃烧长度增加。该章给了边界层层流化的无量纲准则。

第六章中讨论了非均相燃烧,即液滴雾的燃烧。研究了单液滴燃烧、单一尺寸的液滴组及单一滴径的喷雾*的燃烧动力学问题。为对液雾燃烧机理作定性描述,可把单个滴看作是喷雾的缩影。理论研究已表明,液滴燃烧速率取决于蒸发速率,而蒸发速率又受火焰向液滴的传热速率控制。实验研究已能给出燃烧速率和初始参数,如和液滴直径、周围气体中氧的分压以及温度之间的函数关系。当燃料滴在湍流射流扩散火焰中燃烧时,空气动力学参数,如射流的动量通量、向射流的引射以及喷管的几何结构都变得重要起来。双流体雾化或气动雾化式油火焰与压力雾化式油火焰,从空气动力学角度看,正好是互不相同的两种类型。在气动雾化式油火焰中,油与雾化剂流的组合动量通量高,因而是决定火焰发展的因素。相反,在压力雾化的油火焰中,燃料、氧化剂及炽热燃烧产物混合所用的能量主要是加在空气流上的,油喷雾的动量通量比较低。压力雾化的油火焰中,油喷雾特性,如滴径、喷雾角及燃料雾和空气流型的空间配合情况,对火焰的稳定性与燃烧特性有着重大的影响。

第七章讨论了燃烧系统物理模化的价值和定律。尽管有

* 原文是“多滴径喷雾”,与第六章中实际讨论的不符。——译者注