

工业火焰的过程

燃烧过程

〔罗马尼亚〕安德烈·斯坦标林努



机械工业出版社

工业火焰的燃烧过程

[罗马尼亚]安德烈·斯坦标林努 著

清华大学热能工程教研组 译

周力行等 校



机械工业出版社

本书是一本关于气体、液体和固体燃料燃烧过程基础理论的专著。书中内容包括气体、液体和固体燃料燃烧的基本规律、各种工业装置中火焰的燃烧过程,以及燃烧的稳定性和火焰的稳定方法与强化燃烧等。

本书可供从事燃烧理论工作的科研、教学人员,以及从事锅炉、燃气轮机、内燃机、火箭发动机、工业炉等燃烧装置研究、设计制造的工程技术人员参考,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。

Adrain Stambuleanu
Flame Combustion Processes in Industry

Abacus Press, Turbridge Wells, Kent

1976

工业火焰的燃烧过程

[罗马尼亚]安德烈·斯坦标林努 著

清华大学热能工程教研组 译

周力行等 校

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县 印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 20 3/4·字数 454 千字
1983年10月北京第一版·1983年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,800·定价 2.55 元

统一书号: 15033·5255

译 者 的 话

本书是罗马尼亚布加勒斯特工业大学教授安德烈·斯坦标林努关于燃烧学的专著。作者相当详尽地收集了到七十年代初期为止的文献资料,书中既包括气体、液体和固体燃料燃烧的基本问题,又包括各种工业装置中火焰的燃烧过程;既阐述了不同学派的理论,又提供了重要的实验现象和数据;特别是对预混气体湍流燃烧、液体和固体燃料燃烧的阐述,比其他的燃烧理论书籍更为全面和深入。由于本书涉及的内容十分广泛,因此系统性尚嫌不足。此外,某些专门问题的叙述也比较概括。虽然如此,总的看来,本书取材较新,内容丰富,专业水平较高,是从事燃烧理论工作的科研教学人员,以及从事锅炉、燃气轮机、内燃机、火箭发动机、工业炉等燃烧装置研究、设计制造的工程技术人员的一本较好的参考书。

本书由清华大学热能工程教研组和热物理教研组的下列同志共同翻译和校对,译者:张慰钧、金茂庐(第一章);曾瑞良(第二、三章);周明德(第四、七章);毛健雄(第五、六章);徐旭常(第八、九章)。校者:周力行(第一、二、三及八、九章);傅维标(第四、七章);陈熙(第五、六章),最后由周力行对全书进行总校对。

本书的罗马尼亚文版首次于1971年在布加勒斯特出版,1976年修订后译成英文在英国出版。本书是根据英文版翻译的。翻译时删去了书后的两节附录。为了便于读者查阅有关文献,书中所引人名仍采用英译本的原名。书中的单位采

IV

用原书的国际单位符号。由于该书英文版文字错误较多,加之译者水平有限,因此译文错误在所难免,望读者给予批评指正。

1980年3月

前 言

这本专著详尽地研究了工业应用中气体、液体和固体燃料所产生的各种火焰。

本书是按较高的专业水平写的,它同时还是一部有关燃烧过程基础理论的最新综述。自从1973年秋天爆发燃料危机以来,全世界已经痛切地意识到,地球上的矿物燃料(化石燃料)资源正在不断地减少。本书的意图在于,着重论述能够通过强化各种工业炉、窑炉和锅炉燃烧过程所产生的火焰来更有效地利用燃料的方法。

因为在本书出版时,我们仍然能够(尽管只有有限的年头)指望继续使用地下开采的气体 and 液体燃料,同时煤也在起着日益重要的作用,因此,本书对这三种燃料,即气体、液体和固体燃料的燃烧所提出的问题,按它们的相对重要性和理论知识状况来加以同样的处理。

本书的内容不仅包括了湍流预混气体火焰和扩散火焰,而且也包括旋流火焰,这是由于在燃用气体、液体燃料和煤粉的各种工业炉和窑炉中,旋流火焰的应用日益增多。另外,除了固体燃料的层燃以外,作者还论述了固体燃料的沸腾燃烧,因为这种燃烧方式正越来越多地用于大容量燃烧设备中。

象任何一本研究工业应用的火焰的书那样,本书包括了火焰(燃烧过程)稳定性(Stability)和火焰稳定(Stabilization)方面的内容。此外,还包括了热机(汽油机、柴油机、燃气轮

机)中有关燃烧问题的研究。书中有专门的一章用来讨论火箭发动机所特有的燃烧及燃烧稳定性问题。

作者希望这本书不仅能适合那些想要深入了解工业火焰性质的广大专业工作者的需要,而且也适合那些对天然燃料(虽然天然燃料正在不断减少,但它却是人类最重要的自然资源之一)的经济合理使用负有责任的读者的需要。

安德烈·斯坦标林努

目 录

译者的话

前言

第一章 导论	1
1.1 什么是火焰	1
1.2 火焰的一些重要现象	2
1.2.1 辐射	2
1.2.2 温度的概念	3
1.2.3 火焰传播速度	5
1.3 火焰的动力区、扩散区和扩散-动力区	5
1.3.1 概述	5
1.3.2 火焰(燃烧)的动力区	7
1.3.3 火焰(燃烧)的扩散区	15
1.3.4 火焰(燃烧)的动力-扩散区	20
1.4 火箭发动机中液体和固体推进剂的燃烧	22
1.4.1 概述	22
1.4.2 液体推进剂	23
1.4.3 固体推进剂	25
1.5 封闭热系统火焰热力学	29
1.5.1 概述	29
1.5.2 热平衡	29
1.5.3 着火和灭火	33
1.6 火焰的一般分类	35
1.7 应用于工业过程的火焰(通常所说的工业火焰)	36
参考文献	37
第二章 层流火焰	39
2.1 概述	39

VIII

2.2 层流火焰速度	39
2.2.1 非定常火焰	39
2.2.2 定常火焰, 本生灯火焰, Gouy-Michelson 定律	40
2.3 本生灯型层流火焰的宏观和微观结构	41
2.4 火焰微观结构的研究	43
2.4.1 实验测量	43
2.4.2 基本方程组	45
2.5 气体烃类火焰微观结构研究举例	47
2.6 关于火焰区内温度的结论	52
2.7 关于预混气体火焰化学动力学机理的结论	53
2.8 烃类火焰中发生的基元双分子反应	59
2.9 火焰内的离子和电子, 电场对火焰的作用	59
2.10 化学激发和化学电离	64
2.11 层流火焰传播理论	66
2.12 燃料性质、可燃混合物成分、初始温度和压力对层流火焰传播速度的影响	66
2.12.1 燃料性质和可燃混合物成分的影响	66
2.12.2 初始温度和压力的影响	67
2.12.3 火焰的压差与燃烧速度间的关系	68
2.13 计算层流火焰速度的经验公式	69
2.14 层流火焰速度(燃烧速度)的确定	71
2.14.1 概述	71
2.14.2 非定常火焰	71
2.14.3 定常火焰	72
参考文献	74
第三章 湍流火焰	77
3.1 概述	77
3.2 定义和观测技术	79
3.3 湍流特性的数学方法简介	80

3.4 湍流火焰是“湍动所皱褶的层流火焰”的概念	85
3.4.1 Damkoehler 概念	85
3.4.2 Shelkin 模型	89
3.4.3 检验 Damkoehler-Shelkin 概念所进行的实验研究	90
3.4.4 Karlovitz 及其合作者的模型	92
3.4.5 Scurlock-Grover 模型	97
3.4.6 检验 Scurlock-Grover 模型的实验研究	102
3.4.7 一维湍流火焰传播速度的解析式	105
3.5 湍流火焰的速度和结构随气体射流内火焰区的变化	112
3.6 湍流火焰的局部燃烧速度	115
3.7 湍流火焰的弥散燃烧反应区的概念	116
3.7.1 概述	116
3.7.2 Summerfield 的湍流火焰传播概念	116
3.8 湍流火焰传播的频谱概念	119
3.9 Kovaszny 参数及其与实验的比较	121
3.10 用微体积模型估算湍流火焰速度	122
3.11 湍流火焰的混合模型	125
3.12 Chomiak 提出的预混湍流火焰模型	127
3.13 湍流对管内闭式火焰结构及其传播的影响	128
3.13.1 实验数据	128
3.13.2 闭式湍流火焰扩展率的一个理论, 高速下 Spalding 的湍流火焰概念	130
3.13.3 管内闭式火焰所产生的附加湍流	132
3.13.4 可燃气体混合物成分对湍流火焰速度的影响	135
3.14 在汽油发动机燃烧室内的火焰传播过程和大尺度湍动的 作用	135
3.15 压力对湍流和湍流火焰传播的影响	138
3.16 湍流火焰中噪音的产生	139
3.17 燃烧的湍流自由射流和旋转湍流自由射流的空气动力学	140
参考文献	148

1 第四章 扩散火焰(气体燃料射流火焰)	151
4.1 概述	151
4.2 扩散火焰的概貌	151
4.3 反应区,反应区结构的光谱法研究	157
4.4 气体射流	159
4.4.1 概述	159
4.4.2 自由射流的相似性	163
4.4.3 自由湍流射流的研究	168
4.4.4 非等温射流(自由射流火焰的情况)	174
4.4.5 相伴平行流中的射流	176
4.4.6 射流偏转	177
4.5 层流扩散火焰理论	178
4.6 湍流扩散火焰理论	184
4.6.1 自由射流火焰	184
4.6.2 受限射流火焰	212
4.6.3 事实和实验数据	235
4.6.4 旋流扩散火焰	240
4.7 预混火焰和扩散火焰的湍流量测量,以及作为燃烧器质 量指标的混合指数	257
参考文献	261
第五章 液体燃料雾火焰	264
5.1 概述	264
5.2 液体燃料射流的碎裂和雾化,喷射装置	267
5.2.1 概述	267
5.2.2 喷射装置,喷雾器	267
5.2.3 喷雾特性	273
5.3 液体燃料滴的蒸发和燃烧	290
5.3.1 液体燃料滴的蒸发	290
5.3.2 液体燃料滴的燃烧	303

5.3.3	实验数据和实验验证	311
5.4	运动轨迹上的液体燃料滴的若干问题	319
5.4.1	作用于运动轨迹上的液滴的外力	319
5.4.2	运动轨迹上的液滴的动力学问题	320
5.4.3	运动轨迹上的燃烧着的液滴的阻力系数	321
5.4.4	运动轨迹上的液体燃料滴的加热	323
5.4.5	运动轨迹上的燃料滴的着火迟延	326
5.4.6	燃烧滴尾迹中的火焰结构	328
5.5	液雾燃烧的统计描述	329
5.5.1	引言	329
5.5.2	液雾方程, 稳态守恒方程	329
5.5.3	求解问题的一般方法	334
5.6	有关液滴群燃烧的若干实验事实	334
5.6.1	液滴组中燃料滴的着火迟延	334
5.6.2	液滴组中火焰从一颗液滴到另一颗液滴的传播	335
5.6.3	单一滴径液雾中的燃烧常数	336
5.6.4	多滴径液雾的燃烧	337
5.7	湍流两相可燃混合物中的火焰传播	338
5.8	很细液雾的统计描述	340
5.9	有关液雾燃烧的实验研究	342
5.10	液体燃料旋流火焰的若干问题	344
5.10.1	有一次空气旋流室的机械雾化燃烧器的火焰 (实验数据)	344
5.10.2	旋流液雾所卷吸的外部空气的质量	345
5.10.3	有旋流室的喷嘴的雾化细度	350
5.11	氧气中的燃油火焰	355
5.12	圆柱形炉子中天然气火焰和燃油火焰的性能比较	357
5.13	柴油机和燃气轮机中的燃烧	360
5.13.1	柴油机中的燃烧	360
5.13.2	内燃式涡轮机(燃气轮机)中的燃烧	364

参考文献	371
第六章 固体燃料的火焰	374
6.1 概述	374
6.2 关于碳燃烧机理的研究	374
6.3 煤粉燃烧	388
6.3.1 概述	388
6.3.2 带有悬浮固体颗粒的空气射流的形状和结构	390
6.3.3 悬浮固体颗粒的动力学	395
6.3.4 悬浮煤粉着火前的加热	399
6.3.5 加热时煤粒内部的温度梯度	407
6.3.6 所测得的燃烧中的煤粉颗粒的温度和一次反应产物 的性质	408
6.3.7 煤粉的热分解和挥发物的释放	409
6.3.8 煤粉分解所放出的挥发物的燃烧	412
6.3.9 煤粉的着火问题	414
6.3.10 碳粒(剩余焦粒)的燃烧时间和煤粒及油页岩粒的燃 烧实验数据	416
6.3.11 煤粉的整体燃烧	431
6.3.12 煤粉射流火焰长度近似计算的某些公式	443
6.3.13 煤粉射流火焰的观测结果和实验数据	452
6.3.14 煤粉燃烧的进一步发展	465
6.4 固体燃料的层燃	465
6.4.1 概述	465
6.4.2 在炉篦上的燃料层中燃料和空气的混合	466
6.4.3 维持固体燃料块和颗粒在炉篦上所必需的条件	468
6.4.4 固体燃料层的气化和燃烧过程特性, 燃料层上方的烟 气成分	469
6.4.5 炉篦上固体燃料层对燃气和空气流动的阻力	477
6.4.6 炉篦上固体燃料颗粒和燃料层在干燥、预热和燃烧过	

程中的热交换	478
6.4.7 计算固体燃料层的模型	483
6.5 固体燃料的沸腾燃烧	487
6.5.1 概述	487
6.5.2 沸腾床燃烧的方法	488
6.5.3 沸腾床燃烧的优缺点	489
6.5.4 沸腾床的形成	491
6.5.5 沸腾床中的传热和传质	493
6.5.6 沸腾床中的燃烧和气化	494
6.5.7 实验研究	496
6.5.8 沸腾燃烧展望	501
6.6 旋风炉火焰	501
6.6.1 概述	501
6.6.2 旋风炉的冷态空气动力特性	502
6.6.3 旋风炉内的火焰结构	507
6.6.4 卧式旋风炉中固体燃料的浓度、颗粒直径及环境温度 对固体燃料燃尽度影响的研究	511
6.7 熔铁竖炉(如高炉和化铁炉)中的燃烧	512
6.7.1 概述	512
6.7.2 熔铁竖炉的运行和燃烧过程的发展	513
参考文献	515
第七章 火箭发动机的特殊燃烧问题	519
7.1 概述	519
7.2 液体推进剂火箭发动机	519
7.2.1 一般情况	519
7.2.2 单组元推进剂液滴的燃烧	521
7.3 固体推进剂火箭发动机	528
7.3.1 一般情况	528
7.3.2 浸蚀燃烧	529

7.4 火箭发动机的推力与喷管流动中化学反应的关系	532
7.5 火箭发动机中的燃烧不稳定性	537
参考文献	540

1 第八章 燃烧稳定性和火焰稳定方法542

8.1 燃烧器火焰的稳定性和稳定方法	542
8.1.1 预混气体火焰(均相火焰)的稳定性和稳定方法	542
8.1.2 扩散火焰的稳定条件	584
8.1.3 高碳氢化合物和惰性气体对天然气火焰稳定性的影响	589
8.1.4 扩散火焰、液体燃料雾火焰和煤粉火焰的稳定方法	590
8.1.5 在气体燃料和同轴空气的受限射流火焰、撞击射流火焰以及旋流火焰的情况下,湍流扩散火焰稳定的详细描述	594
8.1.6 用多个小(圆)喷孔来稳定火焰	608
8.1.7 耐火材料管中的火焰稳定	608
8.1.8 烧液体和气体燃料的炉子在启动时的不稳定燃烧趋势	609
8.2 煤在层燃过程中着火锋面的稳定	610
8.2.1 逆流方式下的着火稳定	611
8.2.2 链篦炉上横流方式下的着火稳定	612
8.2.3 煤层多灰时的熄灭条件	614
参考文献	617

第九章 强化燃烧619

9.1 概述	619
9.2 升高燃烧过程的温度	622
9.3 强化燃烧的实际方法	624
9.3.1 减小燃料块和颗粒的尺寸	624
9.3.2 气流中颗粒的相对速度和燃烧的强化	626
9.3.3 着火前加热反应物	629

9.3.4	燃烧过程的组织	630
9.3.5	湍流和燃烧的强化	632
9.3.6	已燃气体的自然回流、火焰着火和燃烧强化	633
9.3.7	旋转射流、燃烧器喷口处燃料流的比动量及燃烧器设计对火焰强化的影响	638
9.4	燃料特性和燃烧的强化	640
9.5	旋风炉燃烧的组织原理和强化燃烧	640
9.6	关于固体燃料和渣油强化燃烧的展望	641
9.7	天然气火焰(燃烧)的强化和热辐射的增强	642
9.7.1	火焰的稳定(亦见第八章)	642
9.7.2	天然气火焰(燃烧)的强化	643
9.7.3	增强天然气火焰的发光和辐射特性	644
9.7.4	增强天然气火焰效果的其他方法	645
9.8	化铁炉热力作用的改进	646
	参考文献	647

第一章 导 论

1.1 什么是火焰

假使认为,燃烧这个概念,从广义上说,包括任何发生于气相的快速放热反应通过处于基态和电子激发态的自由基的链(并通过电子、离子、光子)而进行的,那么火焰就是伴随有光的燃烧反应,其特点是在合适的可燃介质中能自行传播。至于液体燃料滴喷雾燃烧以及固体燃料燃烧的特殊情况,前面的概念还没有概括全。因为在后两种情况中,燃烧过程和火焰传播发生在多相介质中,其燃烧过程就更复杂些。

火焰能自行传播这个特点首先把发生在火焰中的化学反应与其他化学反应区别开来。任何化学反应都是限制在反应开始的那个局部地方,而火焰一旦产生,就不断地向四周传播,直到能够反应的整个系统反应完为止。

当考虑火焰能自行传播这个特点时,应该区别以下两种情况,一种是缓燃火焰(正常或常规火焰),其传播速度与音速可以相比,另一种是爆震火焰,其传播速度为超音速。正常的缓燃火焰通过活化中心(自由基、自由原子、离子、电子、光子)的传热和扩散一步步地传播开,而爆震火焰是一种激波,它以超音速的速度传播,火焰靠激波经过时达到的高温高压所产生的反应化学能来维持。

本书所涉及的工业火焰(如在内燃机燃烧室中产生的火焰)属于第一类火焰。