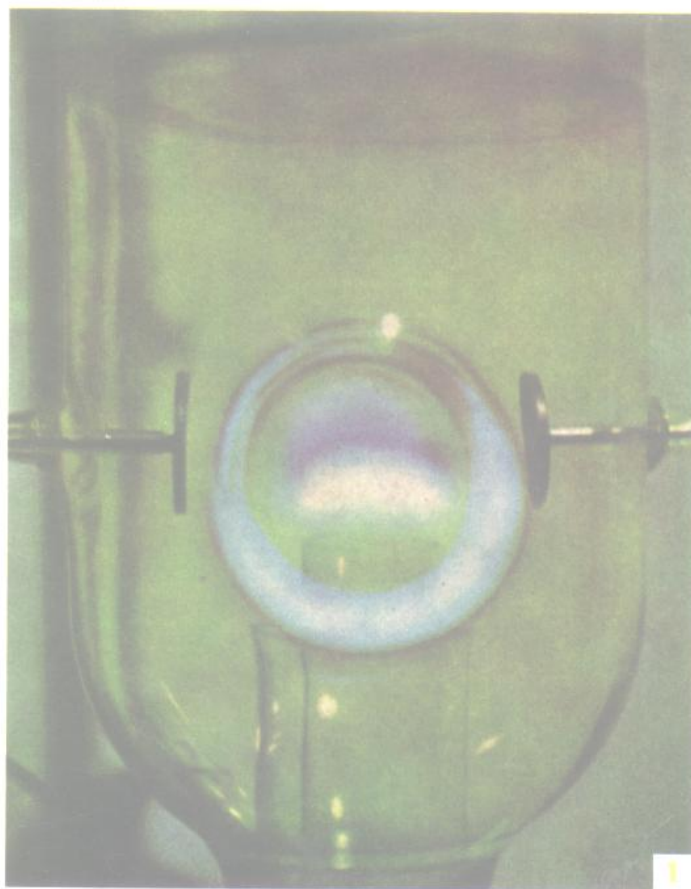


火焰学

王方编译



中国科学技术出版社

.55
0

72155
880

火 焰 学

[英] A. G. 盖 顿 著
H. G. 伍法德

王 方 编译



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

105426

(京)新登字 175 号
图书在版编目(CIP)数据

火焰学/(英)盖顿(Gaydon, A. G.)、(英)伍法德(Wolfhard, H. G.)著;
王方编译. —北京:中国科学技术出版社, 1993

ISBN 7-5046-1555-2

I. 火… I. ①盖… ②伍… ③王… III. 火焰-理论 IV. 0643.2

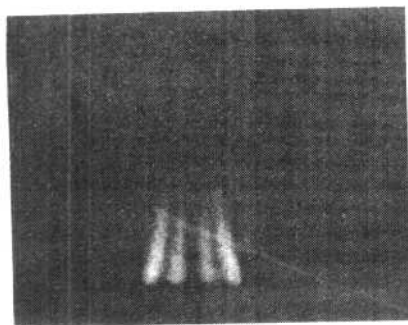
中国科学技术出版社出版
北京市海淀区白石桥路 32 号 邮政编码:100081
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市海淀区清华园印刷厂印刷

※

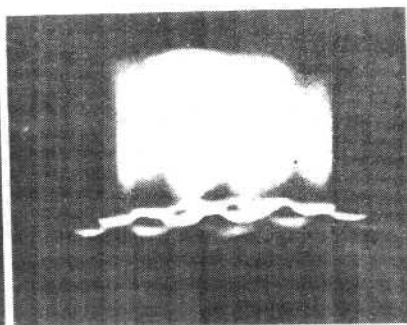
开本:787×1092 毫米 1/16 印张:16.25 插页:10 字数:510 千字

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

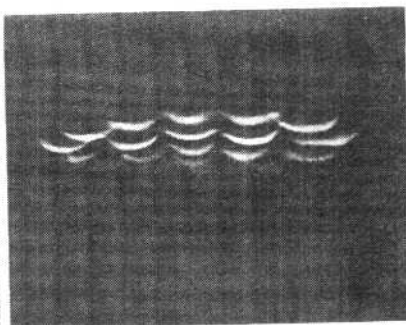
印数:1~3100 册 定价:34.00 元



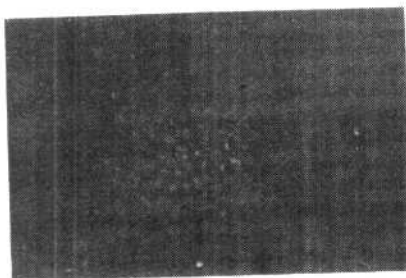
8. 在用烧嘴燃烧 $H_2-O_2-CO_2$ 预混稀混合物时所出现的焰线结构 [Behrens]



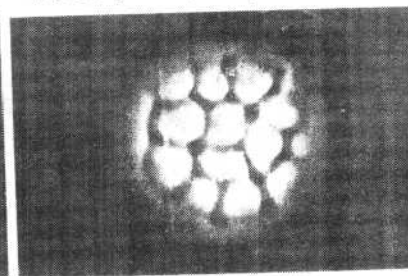
9. 在平面火焰烧嘴上燃烧丙烷-空气浓混合物时所出现的胞状结构和碳的亮光 [Thabet, 1951]



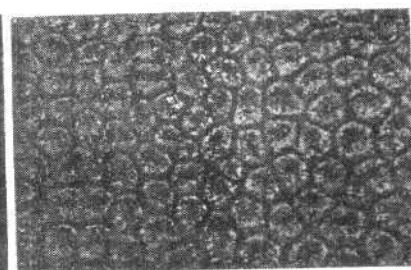
10. 同 9, 但用含氧量较低的空气 [Thabet, 1951]



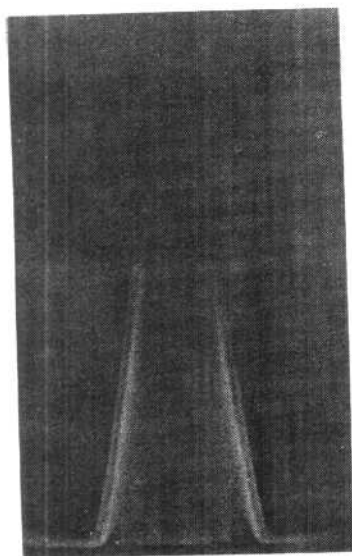
11. 在烧结玻璃圆盘上燃烧 $H_2-O_2-CO_2$ 稀混合物时出现的胞状结构 [Behrens]



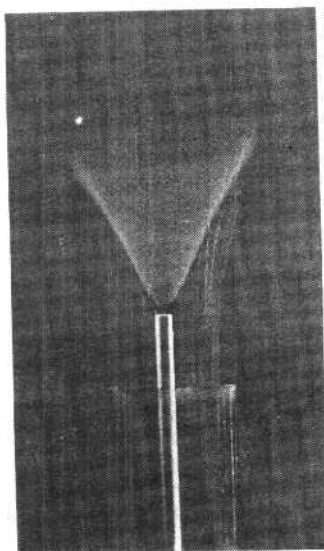
12. 同 11, 但燃烧的是 CH_4-H_2 -空气稀混合物 [Behrens]



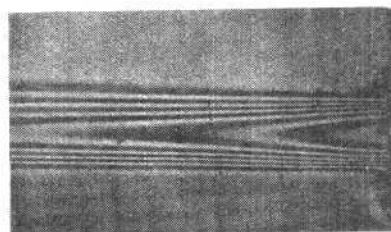
13. 在含 Al 片的液体中因热对流而出现的胞状结构 [Prandtl]



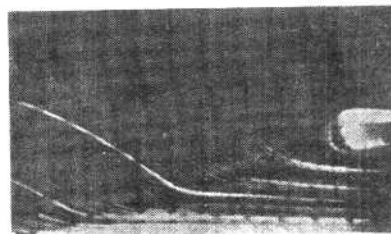
14. 迭置的直摄照片和纹影照片。从图中可看出纹影锥位于发光锥之内



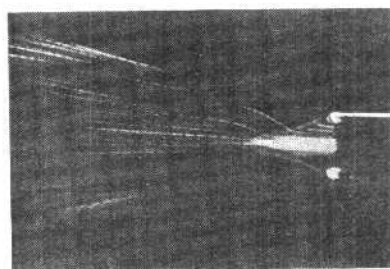
15. 倒置锥火焰中的示踪颗粒的轨迹。从图中可看出背压的影响 [Lewis & von Elbe]



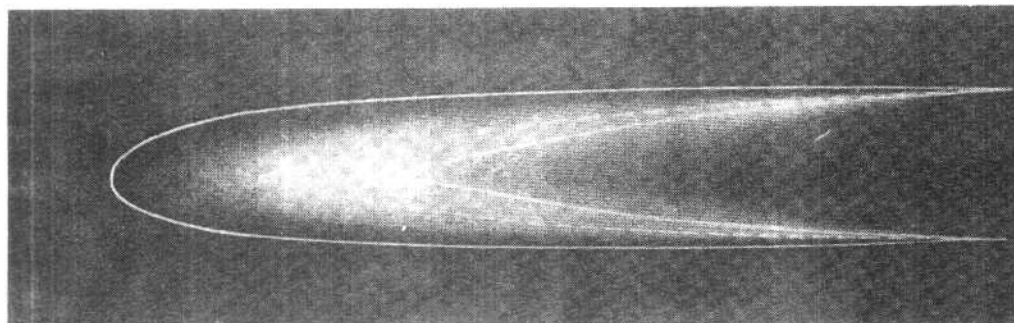
18. 火焰的干涉仪照片 [Hübner]



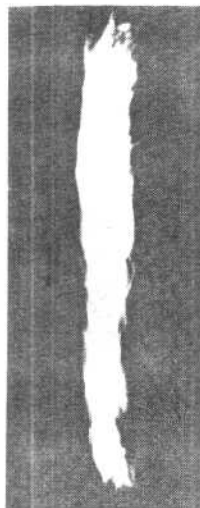
17. 照片 16 右半部的放大



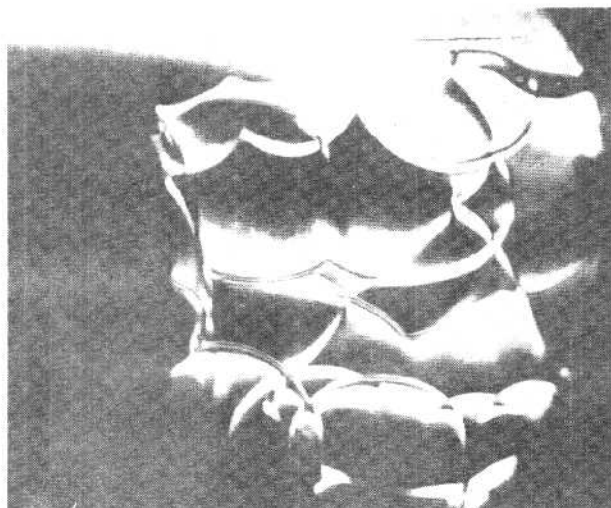
16. 火焰内锥中的颗粒轨迹 [Lewis & von Elbe]



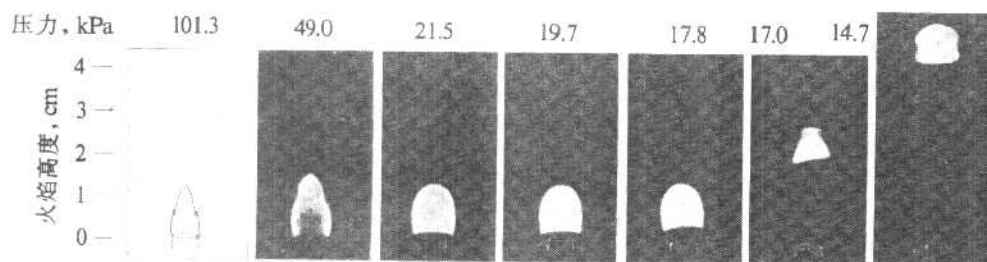
19. 湍流预混火焰的直摄影片。
白线表示焰刷的内、外边界
[Bollinger & Williams, 1949]



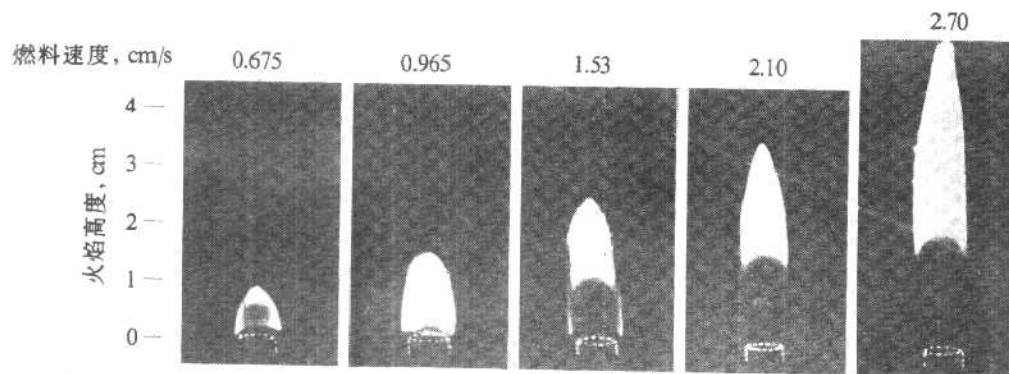
20. 湍流平面火焰的直摄影片 [Snyder, 1962]



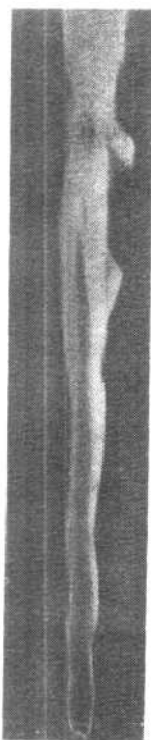
21. 化学计量成分丙烷-空气的轴对称火焰的焰
顶瞬间纹影照片,用以表明起皱折火焰表面上
“尖头”的形成过程 [Fox & Weinberg, 1962]



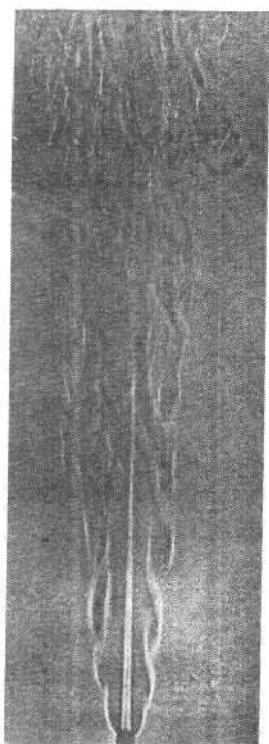
22. 表明压力对扩散火焰高度影响的照片 [Barr & Mullins]。空气速度 $\times$ 压力 = $960 \text{ cm} \cdot \text{kPa/s}$
= 常数。燃料速度 $\times$ 压力 = $120 \text{ cm} \cdot \text{kPa/s}$ 。压力为 101.3 kPa 时的照片取自另一组实验



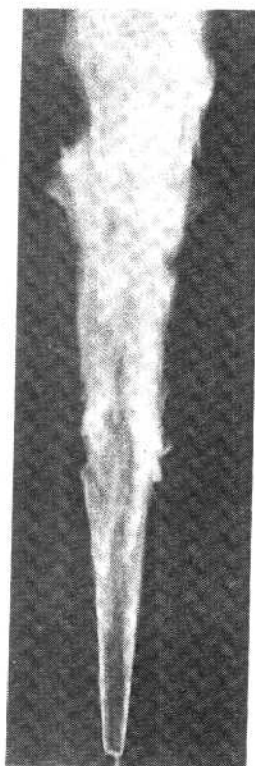
23. 在降低含氧量 (18%) 的空气中燃烧的扩散火焰 [Barr & Mullins],
用以表示燃料速度的影响



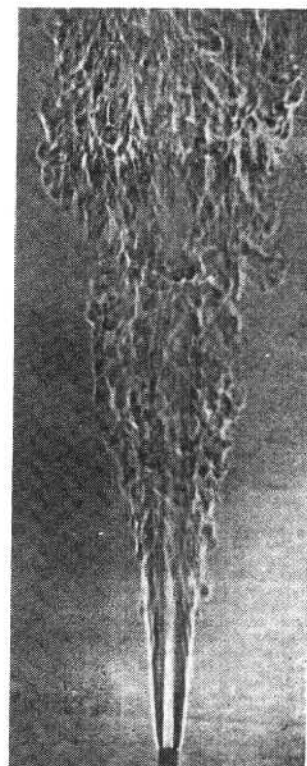
24. 城市煤气层流扩散火焰的直摄影片 [Wohl]



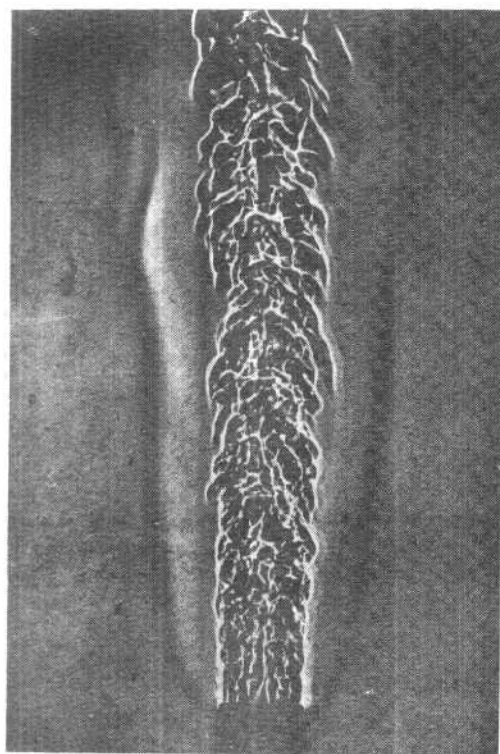
25. 与 24 相同火焰的照片。照片示出火焰中心的层流燃料射流延续很长距离



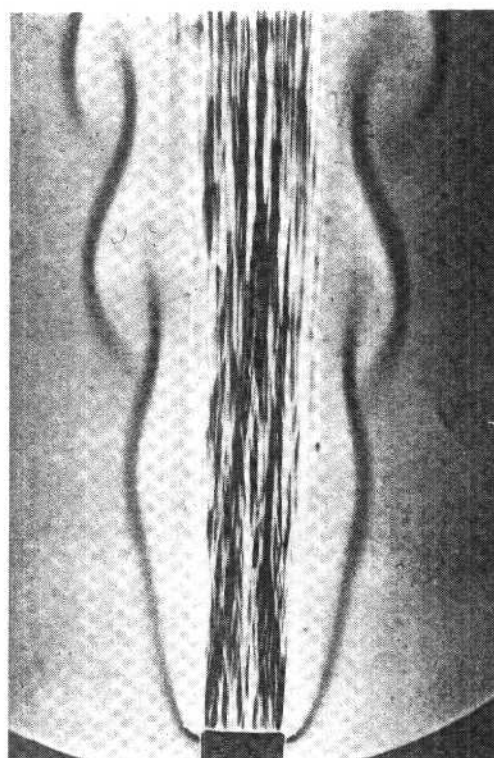
26. 城市煤气的湍流扩散火焰



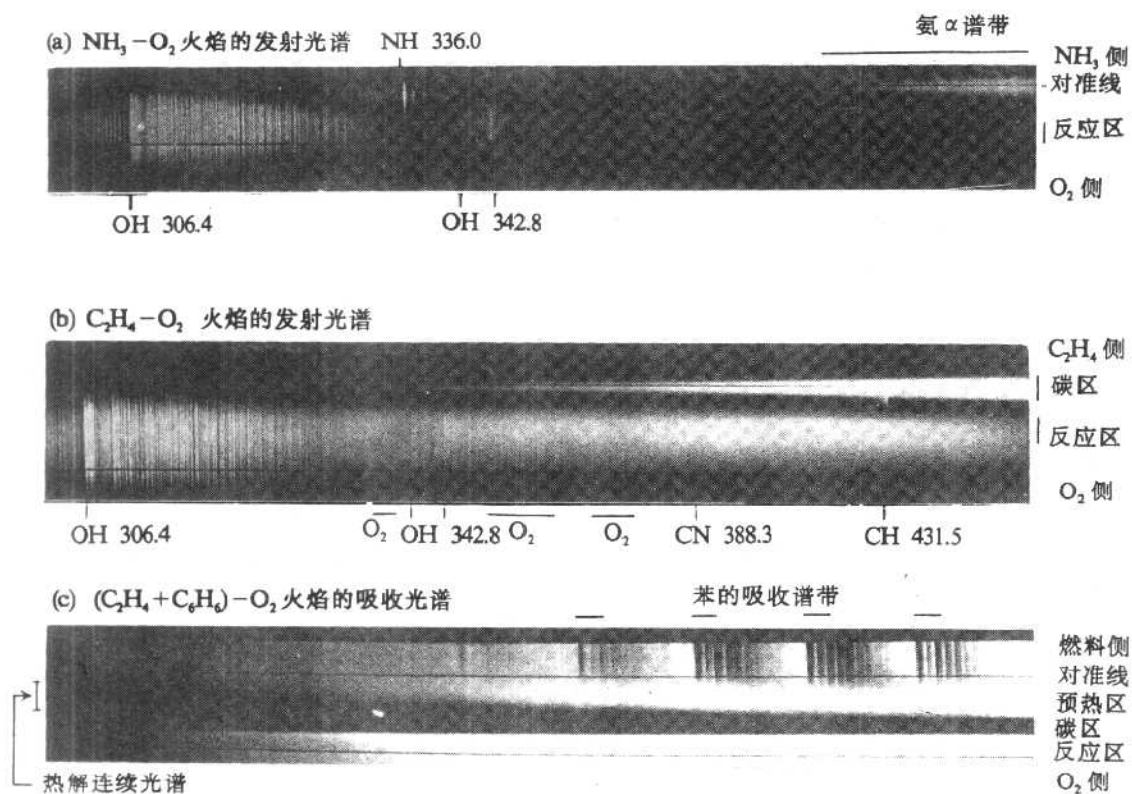
27. 26 的纹影照片



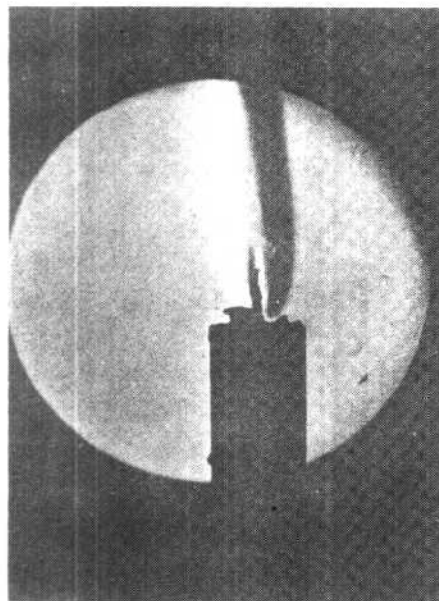
28. 丁烷湍流扩散火焰的瞬时纹影照片。从照片可看出湍动气团的形象 [Wohl]



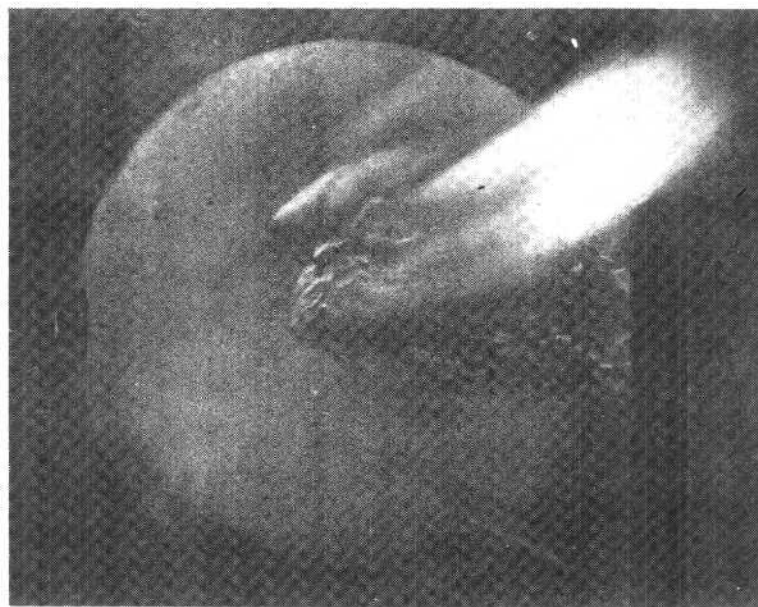
29. 同前, 但曝光时间较长 (弧光光源)。照片上的条纹表明湍动气团在相当长时间内保持本身的性质不变



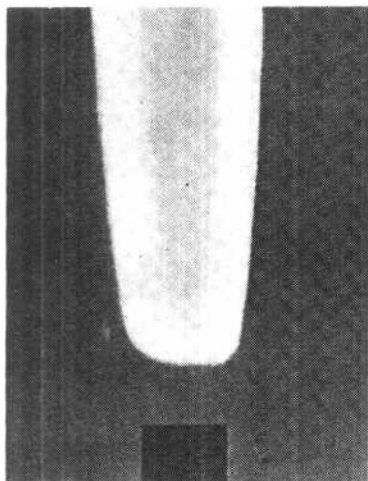
30. 平面扩散火焰的光谱



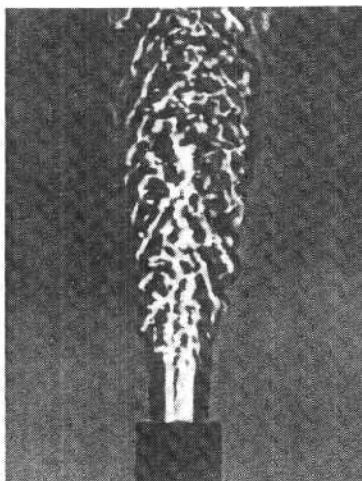
31. 烛焰的纹影照片。从照片中可看到烛心周围烃蒸气的上升情况



32. 燃烧着的煤油喷雾的纹影照片。液雾自左向右喷出，在右端，由液雾本身的燃烧发光照出发光的焰尾。所得的纹影照片表明火焰波面是连续的



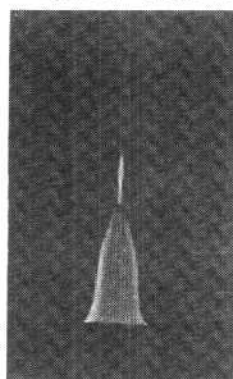
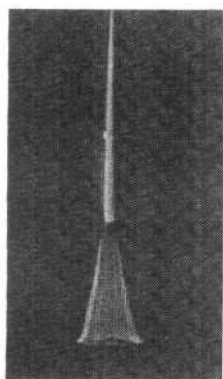
33. 丁烷在空气中燃烧时的推举
湍流扩散火焰的直摄照片



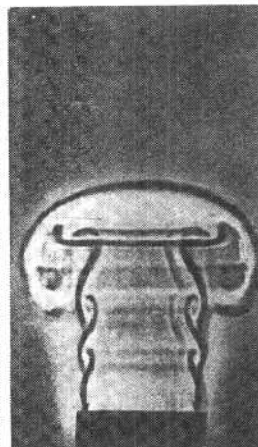
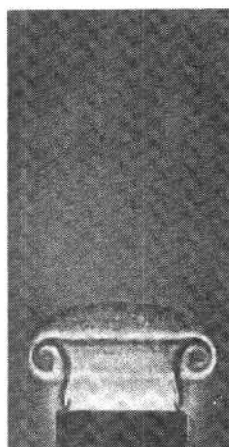
34. 与 33 相同火焰的纹影照片。
该照片表明, 大约在 1cm 以内,
气流尚未发生湍流。这一距离
就称为“湍流起点高度” [Twonend, Garside & Cusshaw]



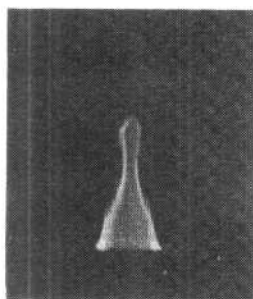
35. 平面扩散火焰的侧面照片。左侧为燃料, 右侧为氧气



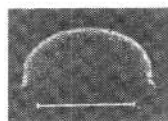
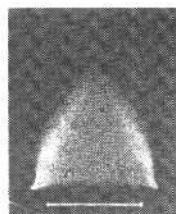
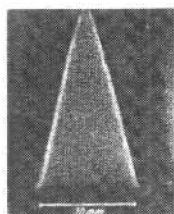
36. 锥顶冒烟的振动多面体苯焰, 左为直摄照片,
右为用频闪观测仪拍摄的照片



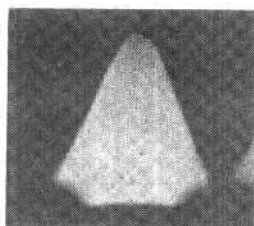
37. 当丙烷射流射入空气中时产生起始涡旋的
两张纹影照片 [Garside, Hall & Townend]



39. 用频闪观测仪拍摄
的照片, 用以表示
从振动本生型火焰
中分离出来的焰球



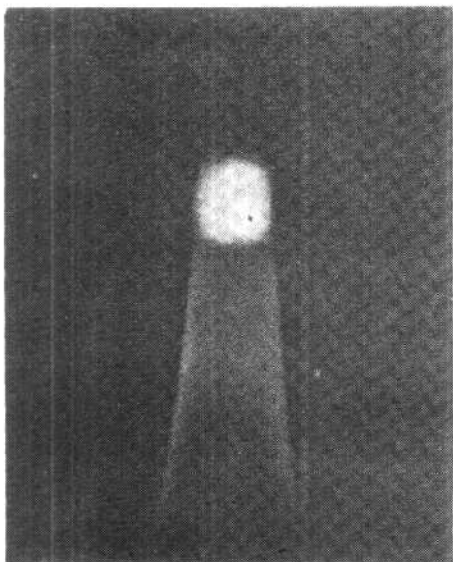
38. 增大声强对预混火焰形状的影响



40. 预混火焰的直摄照片



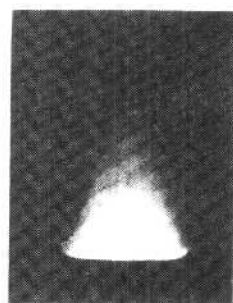
41. 用频闪观测仪摄得的火焰照片 (频率
为火焰振动频率的 5 倍)



42. 燃烧乙酸戊酯和苯混合物的发光赫夫纳蜡烛, 碳弧的光束横向穿过火焰的顶部。从照片中可以看出固体碳粒的散射光



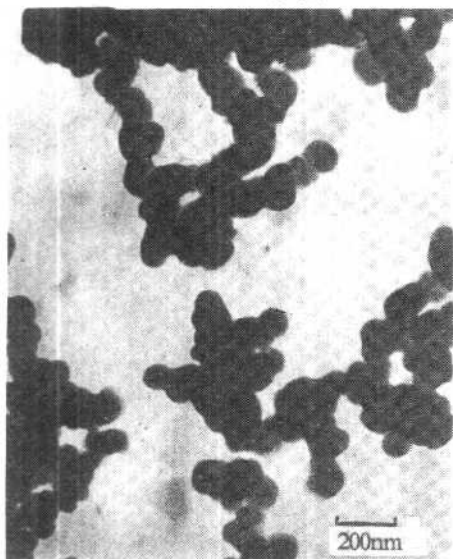
43. 探针上所收集到的碳丝的电子显微摄影照片, 探针插入平面烃焰的燃料侧 [Parker & Bratch]



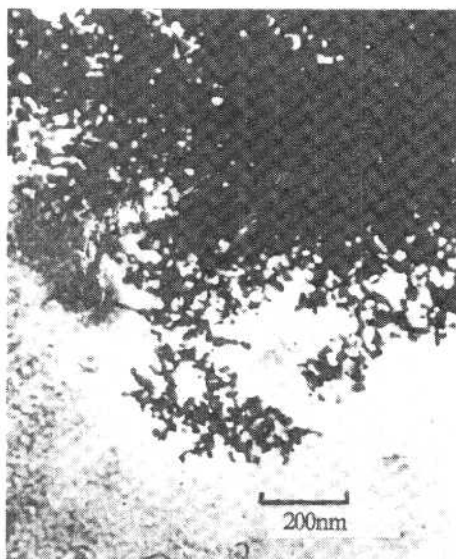
46. 石墨粉 (尺寸为 $0-7\mu\text{m}$) 和氧在烧嘴上所构成的火焰



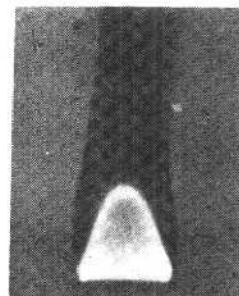
47. 铝粉 (尺寸为 $0-7\mu\text{m}$, 225 mg/L) 在空气中的火焰。注意反应区下面的暗区可能是由于颗粒的蒸发而造成的



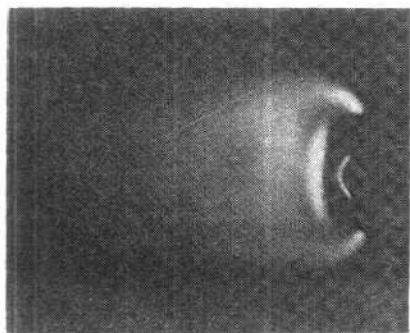
44. 对流扩散乙烯火焰中碳粒的电子显微摄影照片 [F. J. Weinberg & R. Place]



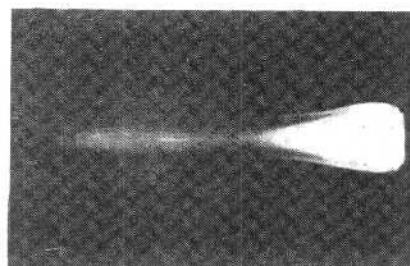
45. 乙烯火焰中碳粒的电子显微摄影照片 (同 44, 但施加电势为 10 kV) [F. J. Weinberg & R. Place]



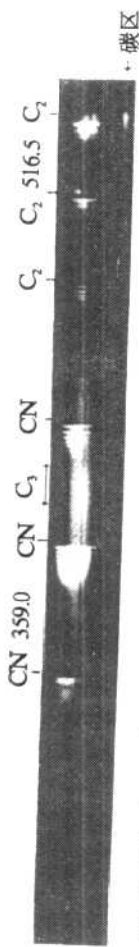
48. 乙烷-氯在直径为 9 mm 的烧嘴上的火焰。注意有大量碳生成



49. 平面预混烃-二氧化氮火焰



50. 硼粉 (230 mg/L , 尺寸为 $0.7\mu\text{m}$) 在 39% 氧 + 61% 氮中的火焰



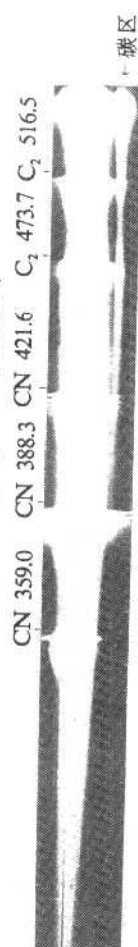
54. (a) CH_4 ($1.8 \text{ cm}^3/\text{s}$) 和 H_2 ($18 \text{ cm}^3/\text{s}$) 的混合物在 ClF_3 (含痕量氮) 中所形成的扩散火焰的发射光谱



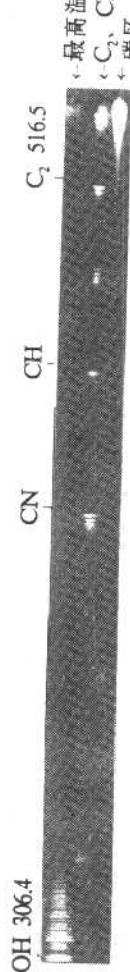
54. (b) 同 (a), 但 CH_4 的流量增加到 $29 \text{ cm}^3/\text{s}$



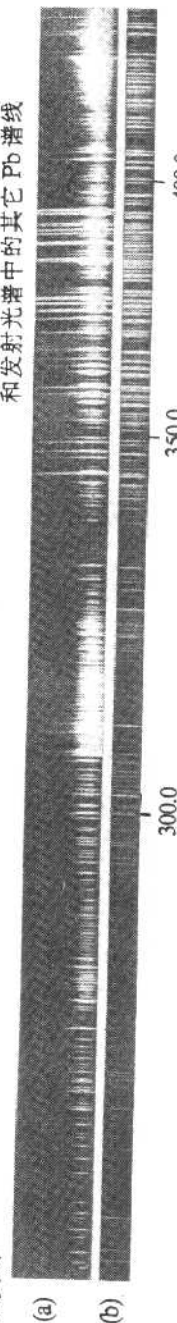
54. (c) 同 (a), 但 CH_4 的流量增加到 $29 \text{ cm}^3/\text{s}$, 没有氮



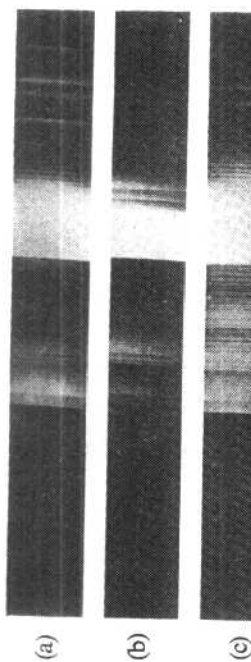
55. (a) $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ 混合物在 ClF_3 中所形成的扩散火焰。碳和 CN 谱带的扩大是由于过度感光光谱的散射作用所致



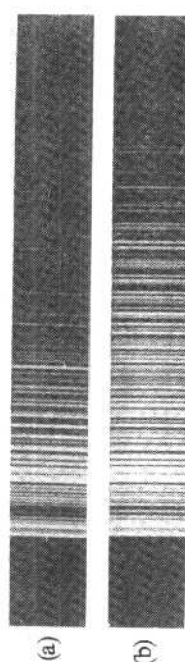
55. (b) 同 (a), 但在 ClF_3 中加入了痕量氧, 曝光时间未变, 注意 CH 与 OH 的出现, 及 C_2 与 CN 的变弱



56. (a) 含有 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 的低压甲醇-氧火焰的光谱。该光谱表明, 在谱带底部有反应区中的 Fe_1 的完整光谱及很强的 OH 谱线, 而在谱带顶部只有 Fe 的共振谱线及很弱的 OH 谱线
(b) 铁弧的光谱, 用以表明 Fe_1 谱线的强度分布与火焰反应区中的分布情况相同



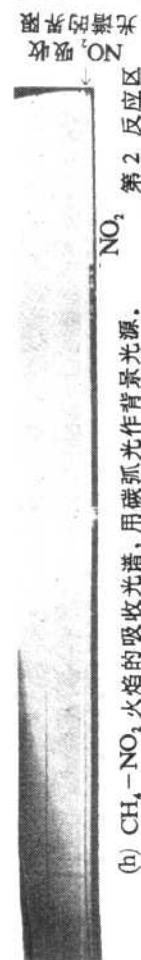
51. OH 谱带中振动强度的分布: (a) 放电 (正常);
(b) 低压氢-氧火焰 [(2,1) 很强];
(c) 0.1 MPa 压力下的氢-氧空气火焰 [(2,1) 和 (3,2) 很强]



52. OH 的 (0,0) 谱带, 用以表示旋转强度的分布: (a) 具有正常温度的低压氢-氧火焰; (b) 同上, 但加入了 $0.75\% \text{ C}_2\text{H}_2$, 这时有有效旋转温度非常高

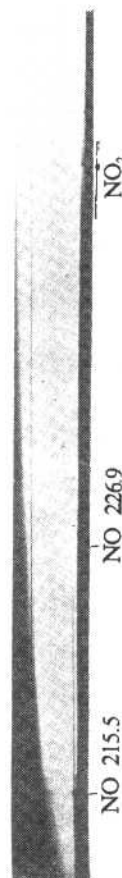


53. 通过含 PbEt_4 的低压 C_2H_2 -空气火焰的碳弧光的连续光谱。该连续光谱表明吸收光谱中的 $\text{Pb}2833$ 共振谱线和发射光谱中的其它 Pb 谱线



(h) CH_4 - NO_2 火焰的吸收光谱, 用碳弧光作背景光源.

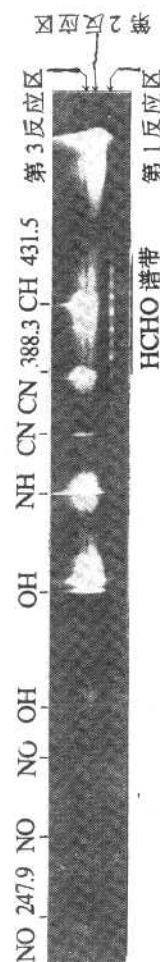
(i) CH_4 - NO_2 火焰的发射光谱. 对准线与狭缝正交能使 (h) 中的二氧化氮吸收光谱的界限与 (i) 中的反应区相联系



(i) CH_4 - NO_2 火焰在远紫外反应区内的吸收光谱, 二氧化氮谱带是可见的, 还给出了 NO 的出现和消失情况



(j) CO - NO_2 火焰的远程发射光谱. 只有第一反应区是可见的, 还可以看到, 光谱是连续的



(k) 亚硝酸甲酯-氧火焰的发射光谱, 有三个反应区



(m) 硝酸甲酯的分裂火焰

57. 含有氮的化合物的火焰光谱. 这种光谱都适从狭缝上的聚焦火焰像取得的, 较长的波长位于光谱的右端, 火焰的顶部朝上



(a) NO 分解时的发射光谱, 可以看到氮的舒曼-朗格谱带



(b) 穿过 C_2H_2 -NO 火焰所取得的碳弧光谱中的 CN 谱带, 可以看到轮廓不清楚的内锥中 CN 的吸收光谱



(c) 稀 NH_3 - O_2 火焰的吸收光谱, 可以看到在内锥和已燃气体中 NH_3 谱带的消失情况和氧谱带的出现情况



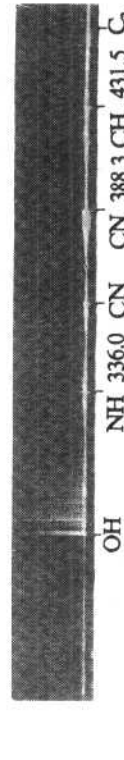
(d) 含有 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 的乙烷-NO 火焰的发射光谱, 在内锥中没有出现 Fe 或 OH 的反常激发



(e) 含有 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 的乙烷- N_2O 火焰的发射光谱, 在内锥中出现了 Fe 和 OH 的反常激发 (曝光时间比(d)短)



(f) 乙烷-NO 火焰的发射光谱, 在内锥中 OH 没有增强, 也没有出现 OH 的反常旋转激发



(g) 乙烷- N_2O 火焰的发射光谱, 可见看到在内锥内 OH 谱带很强, 且 OH 得到高度旋转激发

编 译 说 明

《火焰学》是根据英国盖顿和伍法德(A. G. Gaydon & H. G. Wolfhard)合著《*Flames, Their Structure, Radiation and Temperature (Fourth Edition)*》一书编译的。原书第一版曾于1953年发行,经过近40年的考验,该书已在国际燃烧界享有一定的声誉。它主要从物理概念来阐明火焰中所发生的过程的特点,而没有详细描述火焰中所进行的化学过程,也尽量不用过多的数学表达式。全书论述静止火焰的结构、辐射和温度。着重讨论的专题有:预混火焰和扩散火焰的结构与特点;火焰传播机理;火焰传播速度的测量;火焰振荡、析碳和辐射;火焰中的电离;火焰温度测量及计算;高能燃料和火箭燃料的燃烧过程等。

由于在火焰学中采用一些新技术,如激光多普勒的风速风向测定法、激光-拉曼光谱法、计算机数据处理等,使人们对火焰学中的某些问题的认识取得可观的进步。因此,在原书修订第四版中,按照保持主要论述条例清晰和对火焰中的过程作简明物理解释的条件,吐故纳新,增加了大量新内容。

编译者在1965年已将原书修订第二版(1960)译成中文,但因故中译稿未能发排印刷。这次该书编译出版重新按原书修订第四版(1979)进行。在编译过程中,努力保持原书的特点和风格,只是作了某些编排方面的变动和其它技术处理。由于编译者水平所限,编译中或许会有失误之处,恳请读者批评指正。

原书修订第二版中文译稿中的第二章预混火焰和第六章扩散火焰,曾分别经焦树建教授和徐旭常教授审校修改;本书的终审清样还分别邀请一些教授审阅(朱德忠教授第三、四、十章,傅维镛教授第五章,王洪铭教授第七、八、十一、十二章及结束语,金茂芦教授第九章)。他们对译文提出了一些宝贵意见,编译者在此谨表示衷心的感谢。

最后,在附录中刊登了我国某些厂生产的燃烧设备等产品性能介绍,供读者参考选用。对支持本书出版的如下单位表示谢意:锦州市炉排厂、冶金部节能中心常熟喷嘴厂、武汉钢铁公司汉阳机械厂、张家口市第二建筑工程公司综合加工厂、无锡市广益工业炉厂与合金铸造厂、河北省献县节能环保设备厂、沈阳市换热器厂、河北环保节能设备厂、苏州长光集团公司、芜湖市工业炉设备厂、浙江省军区杭州前线锅炉厂等。

编译者于清华园

1990. 6

照 片 目 录

1	低压火焰	封面
2~7	下部带冷焰的均流平面火焰	封里
	空气挟带入扩散火焰	封里
	预混火焰中的析碳	封里
8~18	胞状多面体火焰的结构	前环衬 1
	火焰照相法的例子	前环衬 1
20~23	湍流火焰的结构	前环衬 2
	压力和空气污浊对扩散火焰的影响	前环衬 2
24~29	扩散火焰的直摄照片和纹影照片	前环衬 3
	湍流扩散火焰的瞬时纹影照片	前环衬 3
30~32	平面扩散火焰的光谱	前环衬 4
	烛焰和燃烧着的煤油喷雾的纹影照片	前环衬 4
33~41	火焰中的湍流起点高度	后环衬 1
	平面扩散火焰	后环衬 1
	射流中的起始涡旋	后环衬 1
	振动火焰照片	后环衬 1
42~50	火焰中的碳粒和碳沉积物	后环衬 2
	含粉末火焰和火箭燃料	后环衬 2
51~56	示明反常激发和 OH 旋转及振动反常的光谱	后环衬 3
	CH ₄ -ClF ₃ 火焰的光谱	后环衬 3
57	含氮化合物火焰的光谱	后环衬 4
58~59	用于测定湍流燃烧速度的湍流火焰伸展现象	封底里
	碳黑的相衬电子显微照片	封底里
60~63	乙烯的预混火焰的扩散火焰	封底
	斯密塞尔火焰分离器	封底

目 录

编译说明

第一章 绪 论	1
§ 1.1 火 焰	1
§ 1.2 静止火焰	1
§ 1.3 传播火焰	2
§ 1.4 物理还是化学?	3
第二章 预混火焰	4
§ 2.1 本生灯与梅克尔烧嘴	4
§ 2.2 层流预混火焰	5
§ 2.3 斯密塞尔火焰分离器	7
§ 2.4 湍流火焰	8
§ 2.5 火焰的稳定性和熄火	8
§ 2.6 低压火焰及其结构.....	11
§ 2.7 自燃和冷焰.....	13
§ 2.8 外源点燃.....	14
§ 2.9 火焰传播界限.....	16
§ 2.10 发光区的位置	19
§ 2.11 多面体火焰和胞状火焰	20
§ 2.12 预混火焰和扩散火焰之间的转换	21
第三章 流动显示和火焰照相法	23
§ 3.1 从烧嘴流出的气流.....	23
§ 3.2 气体流量的测量.....	24
§ 3.3 激光多普勒风速和风向测定法.....	25
§ 3.4 焰锥照相法和颗粒示踪照相法.....	26
§ 3.5 纹影照相法.....	27
§ 3.6 干涉测量法.....	30
§ 3.7 激光和全息照相.....	31
§ 3.8 火焰推力及其对焰锥形状的影响.....	32
§ 3.9 焰 顶.....	33
第四章 燃烧速度的测量	34
§ 4.1 燃烧速度.....	34
§ 4.2 古伊火焰面积法.....	34
§ 4.3 火焰面积-锥角的改良法	36
§ 4.4 喷嘴法.....	38
§ 4.5 颗粒示踪法.....	38
§ 4.6 确定火焰波面位置的方法.....	40

§ 4.7 均流平面火焰法·····	42
§ 4.8 火焰推力法·····	43
§ 4.9 肥皂泡法·····	43
§ 4.10 球形弹法 ·····	44
§ 4.11 改良管子法 ·····	45
§ 4.12 各种燃烧速度测量方法的比较 ·····	46
§ 4.13 燃烧速度的影响因素 ·····	48
§ 4.14 湍流火焰的燃烧速度 ·····	52
第五章 反应区的结构及其与火焰传播的关系 ·····	54
§ 5.1 引 言·····	54
§ 5.2 预热区·····	55
§ 5.3 着火点·····	58
§ 5.4 反应区和自由基浓度·····	58
§ 5.5 附加物对燃烧速度、着火界限和热自燃的影响 ·····	65
§ 5.6 火焰传播的早期热理论和扩散理论·····	66
§ 5.7 热-扩散综合理论 ·····	69
§ 5.8 过剩焓和火焰扩张的概念·····	72
§ 5.9 反应速率·····	74
§ 5.10 氮氧化物的形成 ·····	75
§ 5.11 湍流气体中的火焰传播 ·····	76
第六章 扩散火焰 ·····	84
§ 6.1 小型火焰的高度和形状·····	84
§ 6.2 蜡烛火焰和伍法德-帕克平面扩散火焰 ·····	89
§ 6.3 火焰结构的分光镜分析法·····	90
§ 6.4 扩散火焰与预混火焰的对比·····	93
§ 6.5 对流扩散火焰和湍流扩散火焰·····	94
§ 6.6 炉内火焰和薄层火焰及附壁烧嘴·····	97
§ 6.7 液滴和粉末的燃烧·····	98
§ 6.8 灯心上的火焰和混合燃料的燃烧 ·····	100
§ 6.9 自由表面上液体的燃烧 ·····	100
第七章 火焰噪声和火焰振荡·····	102
§ 7.1 火焰噪声 ·····	102
§ 7.2 射流噪声 ·····	104
§ 7.3 歌 焰 ·····	105
§ 7.4 燃烧室中的振荡 ·····	107
§ 7.5 火焰闪烁及其它不稳定性 ·····	108
§ 7.6 灵敏焰 ·····	109
§ 7.7 声音对预混火焰的影响 ·····	110
第八章 火焰中的固体碳·····	112
§ 8.1 引 言 ·····	112

§ 8.2 扩散火焰中的析碳	113
§ 8.3 预混火焰中的析碳	115
§ 8.4 压力和温度对析碳的影响	116
§ 8.5 爆燃火焰中的析碳	118
§ 8.6 添加剂对析碳的影响	118
§ 8.7 电场对析碳的影响	121
§ 8.8 碳粒及其沉积物的性质	122
§ 8.9 碳和已燃气体之间的平衡	123
§ 8.10 中间产物的检测	125
§ 8.11 同位素示踪研究	127
§ 8.12 烃类的热解	128
§ 8.13 碳粒的生成及其长大的问题	129
§ 8.14 碳黑生产过程	135
第九章 火焰中的辐射过程	136
§ 9.1 辐射的本质	136
§ 9.2 能量均分	139
§ 9.3 电子激发过程	140
§ 9.4 辐射平衡条件	142
§ 9.5 化学发光	145
§ 9.6 火焰气体中平衡的偏离	147
§ 9.7 固体颗粒的辐射和散射	148
§ 9.8 辐射传热的计算	150
第十章 火焰温度的测量及计算	153
§ 10.1 钠谱线反转法	155
§ 10.2 对反射损失和对亮度温度随波长变化的校正	156
§ 10.3 复杂火焰结构的影响	157
§ 10.4 利用其它谱线的反转法	158
§ 10.5 背景光源	158
§ 10.6 对非目测记录法和对时间分辨研究法的修正	160
§ 10.7 谱线反转法的准确度和可靠性	161
§ 10.8 库尔鲍姆法	163
§ 10.9 对锥间气体和反应区的测量结果	163
§ 10.10 亮度及辐射系数法	167
§ 10.11 色温法	169
§ 10.12 四种谱线光学测定法	170
§ 10.13 激光-拉曼散射	177
§ 10.14 与气体密度有关的方法	178
§ 10.15 热丝法	181
§ 10.16 电子温度	184
§ 10.17 给定温度下气体成分的系统计算	185

§ 10.18	温度的计算	188
§ 10.19	平衡常数、焓等的数值	191
§ 10.20	关于混合浓度变化的影响和压力的影响	192
§ 10.21	某些典型火焰的温度和成分	193
第十一章	火焰中的电离	195
§ 11.1	电离测量	195
§ 11.2	局部热力学平衡中的电离	201
§ 11.3	金属添加物电离中化学反应的作用	203
§ 11.4	烃焰中的电离	206
§ 11.5	对火焰中离子反应的进一步研究	209
§ 11.6	电场对火焰的影响	210
§ 11.7	火箭排烟中的电离	211
第十二章	高能燃料和火箭燃料的燃烧过程	214
§ 12.1	用氮氧化物作为氧化剂的火焰	214
§ 12.2	硝酸、硝酸酯和亚硝酸酯的火焰	217
§ 12.3	火箭推进剂的火焰	219
§ 12.4	卤素用作氧化剂的火焰	220
§ 12.5	臭氧火焰和烷基金属火焰	222
§ 12.6	高能燃料的燃烧	223
§ 12.7	固体燃料的燃烧	225
§ 12.8	超声燃烧	230
结束语		231
参考文献		234
附 录		241
附表 1	锦州市炉排厂滚筒炉排和自动破焦往复炉排的性能	241
附表 2	冶金部节能中心常熟喷嘴厂喷嘴等设备的性能	242
附表 3	武汉钢铁公司汉阳机械厂风磨式磨煤机的性能	243
附表 4	张家口市第二建筑工程公司综合加工厂懒汉茶炉和热管采暖炉的性能	244
附表 5	无锡市广益工业炉厂与合金铸造厂工业炉及铸造设备等的性能	245
附表 6	河北省献县节能环保设备厂燃煤机的性能	246
附表 7	沈阳市换热器厂换热器产品的性能	247
附表 8	河北环保节能设备厂燃煤机和组合炉等的性能	248
附表 9	苏州长光集团公司工业炉等产品的性能	249
附表 10	芜湖市工业炉设备厂烧嘴等产品的性能	251
附表 11	浙江省军区杭州前线锅炉厂贯流式燃油蒸汽锅炉的性能	252