



国家“十五”重点图书
国家科学技术学术著作出版基金资助项目

高等燃烧学

GAODENG RANSHAOXUE

岑可法 姚 强 骆仲泐 李绚天 著

浙江大学出版社

国家“十五”重点图书
国家科学技术学术著作出版基金资助项目

高等燃烧学

岑可法 姚强 骆仲泐 李绚天 著

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高等燃烧学 / 岑可法等著. —杭州: 浙江大学出版社,
2002.12

“十五”重点图书, 国家专著基金资助

ISBN 7-308-02629-9

I. 高... II. 岑... III. 燃烧学 IV. O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 00819.号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

责任编辑 李桂云

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江印刷集团公司

经 销 浙江省新华书店

开 本 889mm×1194mm 1/16

印 张 49.25

字 数 1261 千字

版、印次 2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-02629-9/O·257

定 价 100.00 元

前 言

燃烧是能源利用的一种主要形式,随着经济的发展,对于能源的需求日益加剧,但由于大量燃烧利用能源存在严重的环境问题,因而对燃料的洁净燃烧技术提出了新的更高的要求。近年来,正是这种需求极大地推动了燃烧科学的发展,使燃烧领域的新成果、新技术不断涌现。浙江大学工程热物理学科是我国进行燃烧理论与技术研究和开发的重要基地,特别是近年来在煤与生物质的循环流化床燃烧,煤浆燃烧理论与技术,煤粉燃烧理论与技术,燃烧过程数值计算,煤的催化燃烧理论和应用,非线性理论研究燃烧过程等方面进行了大量的深入的研究,承担了国家“六五”至“九五”攻关项目,国家自然科学基金,国家攀登计划等项目的研究,并取得多项具有国际先进水平的研究成果,本书是作者多年来在这一领域研究成果和心得的总结,书中很多材料来自于国内外近期的科学研究成果和论文。

全书共分十四章。在第一章中,主要介绍化学动力学的基础知识,各种化学反应机理。第二、三章是经典的燃料着火理论和火焰传播理论,但也引入了近年来对热力爆燃理论的最新发展的介绍,火焰传播理论主要介绍正常火焰传播和火焰稳定的基本原理及这一理论用于燃烧稳定的方法的理论基础。第四章是湍流燃烧理论与模型,这是目前发展较快的新的理论成果,除了介绍经典的湍流燃烧模型外,内容包括在 20 世纪 80 年代发展起来的概率分布函数的输运方程模型的方法和 ESCIMO 湍流燃烧理论的成果。第五章是液体燃烧的燃烧理论,除了介绍经典的油滴蒸发燃烧的理论以外,还引入了液雾燃烧的理论及近年发展起来的浆体燃烧的研究成果。第六、七、八章主要介绍煤的热解、着火和燃烧理论,内容包括煤的组成、热解过程、挥发分的组成和燃烧、热解动力学、煤的加热和着火、煤的着火模式

理论、煤粉群体着火、煤焦燃烧、碳球的燃烧、煤燃烧过程、煤的燃尽及煤粉火焰传播等理论,充分体现了煤燃烧理论研究的一些最新发展与成果。第九章介绍了煤粉燃烧的数学模型方法,在对实际煤粉燃烧涉及的各物理化学子模型进行介绍之后,给出了一维和多维燃烧模型进行计算的实际实施方法和结果。第十、十一、十二章主要针对目前迅速发展的洁净燃烧技术问题,对 SO_2 、 NO_x 和碳黑的形成机理进行了系统的介绍。第十三章介绍了催化燃烧的原理,包括催化燃烧的作用,催化脱硫脱氮,催化燃烧的几何、电子和化学过程理论,气体、液体和煤的催化燃烧机理及催化作用等。第十四章介绍了燃烧过程的非线性现象及其数学方法。

本书由岑可法院士主著及统稿,由岑可法、姚强、骆仲泮、李绚天共同撰写。我们在撰写过程中引用了浙江大学同事们及研究生们的大量研究资料,并得到他们的许多帮助,为此作者要向他们表示衷心感谢。本书的写作还参考大量国内外同行发表的相关论著,在此也一并向他们表示感谢。对本书的成稿,浙江大学出版社的李桂云编辑做了大量的细致的工作,没有她的鼓励和支持,本书是难以完成的。最后,衷心感谢国家科技部,国家自然科学基金会各部门给予的研究经费资助,本书中引用了作者单位承担的诸多科研项目,如:国家重大基础研究项目(973项目)煤转化新过程概念验证及过程的优化集成(G1999022105)、煤燃烧过程中污染防治的机理(G1999022204)、煤燃烧过程中微量有机无机类有害污染物的生成和控制规律(G1999022211)、可燃物热解动力学与着火特性(2001CB409601)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目以半干法为基础的新型燃煤汞排放控制技术开发(2001AA529040)、国家自然科学基金重大及杰出青年基金项目垃圾洁净燃烧的关键基础研究(59836210)、生物质能源化综合利用的机理性研究(50025618)等一系列研究成果。

虽然作者们对本书尽了很大努力,但疏漏和错误仍在所难免,敬请读者批评指正。

作者
2000年3月

目 录

第 1 章 导论及化学动力学基础

1.1 燃烧科学的发展、应用和研究方法	1
1.1.1 燃烧科学的发展简史	1
1.1.2 燃烧科学的应用	2
1.1.3 燃烧科学的研究方法	4
1.2 本书研究的主要内容	4
1.3 化学反应速度	5
1.3.1 基本定义	5
1.3.2 质量作用定律	7
1.3.3 反应级数	8
1.3.4 一级反应	9
1.3.5 二级反应	10
1.3.6 复杂反应	11
1.4 各种参数对化学反应速度的影响	14
1.4.1 温度对化学反应速度的影响——阿累尼乌斯定律	14
1.4.2 压力对反应速度的影响	15
1.4.3 在等温等压条件下,反应物浓度对反应速度的影响	17
1.5 反应速度理论	18
1.6 链锁反应	21
1.6.1 基本理论	21
1.6.2 不分支链锁反应——氯和氢的结合	22
1.6.3 分支链锁反应——氢和氧的化合	25
1.6.4 链锁反应速度与时间的关系,链锁着火	27
1.6.5 链锁着火的界限	29

第 2 章 燃料的着火理论

2.1	燃烧过程的热力爆燃理论	32
2.1.1	谢苗诺夫(Semenov, N. N.)的可燃气体混合物的热力爆燃理论	33
2.1.2	爆燃感应期	39
2.1.3	弗兰克-卡门涅茨基(Frank-Kamenetskii, D. A.)失稳分析法	40
2.1.4	热力爆燃理论的最新发展	42
2.2	链锁爆燃理论	47
2.2.1	链锁分支反应的发展条件(链锁爆燃条件)	48
2.2.2	不同温度时,分支链锁反应速度随时间的变化	49
2.2.3	感应期的确定	51
2.2.4	着火半岛现象	51
2.3	热力着火的自燃范围和感应周期	53
2.3.1	热力着火的自燃范围	53
2.3.2	各种参数对着火温度的影响	55
2.4	强迫着火的基本概念	57
2.4.1	实现强迫着火的条件	57
2.4.2	强迫着火的热理论	58
2.4.3	各种点燃方法的分析	61
2.5	朗威尔(Longwell)反应器理论	68

第 3 章 火焰传播与稳定的理论

3.1	火焰传播的基本方式——正常火焰传播与爆燃	70
3.2	可燃气体的火焰正常传播	73
3.3	火焰正常传播的理论	76
3.3.1	用于简化近似分析的热理论	76
3.3.2	捷尔道维奇等的分区近似解法	79
3.3.3	火焰传播的精确解法	80
3.3.4	Tanford 等的扩散理论	82
3.3.5	层流火焰问题的数值求解方法	84
3.4	火焰正常传播速度	85
3.4.1	影响火焰正常传播速度的主要因素	85
3.4.2	火焰传播界限	91
3.4.3	火焰正常传播速度的测量	92
3.5	可燃气体层流动力燃烧和扩散燃烧	96
3.5.1	概述	96
3.5.2	化学均匀可燃气体混合物的动力燃烧	97
3.5.3	可燃气体的扩散燃烧	100
3.6	火焰稳定的基本原理和方法	102
3.6.1	火焰稳定的几个特征	103

3.6.2	火焰的回火和吹熄的临界条件	104
3.6.3	钝体后回流区火焰稳定原理	106
3.6.4	火焰稳定的基本方法	108

第 4 章 湍流燃烧理论及模型

4.1	湍流燃烧及其特点	114
4.2	湍流气流中火焰传播的表面燃烧模型	116
4.3	湍流气流中火焰传播的容积燃烧模型	119
4.3.1	湍流扩散	119
4.3.2	湍流容积燃烧模型计算	120
4.3.3	决定湍流燃烧速度的试验结果	123
4.3.4	火焰自湍化理论初步	124
4.4	湍流燃烧的时均反应速度和混合分数	125
4.4.1	时均反应速度	125
4.4.2	简单化学反应系统	128
4.4.3	守恒量和混合分数	128
4.4.4	守恒量之间的线性关系	130
4.5	湍流扩散火焰的 $k-\epsilon-g$ 模型	131
4.6	湍流预混火焰模型	136
4.6.1	旋涡破碎模型	136
4.6.2	拉切滑模型	139
4.7	几率密度函数的输运方程模型	142
4.8	Spalding 的 ESCIMO 湍流燃烧理论	143
4.8.1	概述	144
4.8.2	“经历”理论	145
4.8.3	“统计”理论	146
4.8.4	分析湍流射流扩散火焰的 ESCIMO 理论	148

第 5 章 液体燃料的燃烧

5.1	液体燃料的特性	154
5.1.1	石油中的碳氢化合物和胶状沥青物质	154
5.1.2	石油的元素组成	155
5.1.3	石油的炼制	156
5.1.4	燃油的主要技术特点	157
5.2	重油燃烧的基本过程	161
5.2.1	重油燃烧的特点	161
5.2.2	影响重油燃烧的各种因素	162
5.3	油滴在静止气流中的蒸发	169
5.3.1	液滴的低温蒸发 ^[4]	170
5.3.2	斯蒂芬(Stefan)流 ^[8,9]	170

5.3.3	燃料滴温度及蒸发浓度的决定	172
5.3.4	燃料滴蒸发过程中传热传质系数的决定	174
5.3.5	油滴蒸发所需时间	175
5.4	油滴在气流作用下的蒸发	176
5.4.1	折算薄膜理论	176
5.4.2	液滴不稳定蒸发的数值计算	180
5.5	油滴在静止气流中的扩散燃烧	181
5.5.1	火焰面处 T_g 的决定;	183
5.5.2	燃烧火焰面半径 r_c 的决定	184
5.6	油滴在气流作用下的扩散燃烧	188
5.6.1	折算薄膜理论	188
5.6.2	液滴扩散燃烧的实验研究和非稳态研究	192
5.6.3	运动中的液体燃料滴的着火与燃烧	194
5.7	液体燃料的雾化理论	196
5.7.1	喷嘴的形式和特性	196
5.7.2	雾化的基本理论	198
5.7.3	雾化炬的特性	203
5.8	油雾火炬的燃烧过程	208
5.8.1	燃油火炬燃烧过程描述及组织	208
5.8.2	液雾燃烧的统计方法	214
5.8.3	液雾燃烧的模型方法	218
5.9	浆体燃料的燃烧	226
5.9.1	浆体燃料的种类	227
5.9.2	浆体燃料的性质	228
5.9.3	浆体燃料单滴的着火燃烧及模型	231
5.9.4	水煤浆雾炬燃烧特性与模型	233

第6章 煤的热解及挥发分的燃烧

6.1	煤的组成与特性	241
6.1.1	煤岩学	242
6.1.2	煤化学	244
6.1.3	煤结构与热解反应的关系	246
6.1.4	物理因素	247
6.2	煤的热解	249
6.2.1	概述	249
6.2.2	温度的影响	252
6.2.3	加热速率的影响	252
6.2.4	压力的影响	254
6.2.5	颗粒粒度的影响	255
6.2.6	煤种的影响	255

6.2.7	气氛的影响	256
6.3	热解产物的组成	256
6.3.1	概述	256
6.3.2	温度的影响	257
6.3.3	加热速率的影响	258
6.3.4	压力的影响	259
6.3.5	颗粒粒度的影响	259
6.3.6	煤种的影响	260
6.3.7	气氛的影响	260
6.4	煤热解反应动力学模型	260
6.4.1	单方程模型	261
6.4.2	双方程模型	261
6.4.3	多方程热解模型	262
6.4.4	热解产物的组分模型	264
6.4.5	机理性模型	265
6.4.6	考虑二次反应的竞争反应模型	267
6.4.7	热解通用模型	268
6.4.8	考虑非动力学控制因素的热解模型	270
6.5	热解产物的燃烧	271
6.5.1	概述	271
6.5.2	局部平衡法	271
6.5.3	总体反应方法	272
6.5.4	完全反应方法	273

第7章 煤的着火理论

7.1	煤的加热和着火	277
7.1.1	煤在着火前的加热	277
7.1.2	煤的着火及其判据	281
7.2	煤着火的试验研究方法	284
7.2.1	着火试验类型	284
7.2.2	煤着火试验装置的发展及评述	284
7.2.3	典型的煤着火试验研究方法介绍	288
7.3	煤的着火模式	299
7.3.1	均相着火模型	300
7.3.2	多相着火模型	303
7.3.3	均相-多相联合着火模型	303
7.3.4	傅维标等的煤焦着火通用规律	304
7.4	煤粒的多相着火及其影响因素分析	307
7.4.1	谢苗诺夫热力着火理论用于碳粒着火的分析	307
7.4.2	影响煤粒着火的因素分析	311

7.5 单颗煤粒着火的计算	317
7.5.1 傅维标等分析煤粒非均相着火的方法	319
7.5.2 大颗粒煤的着火分析计算	322
7.5.3 考虑挥发分燃烧的单颗煤粒的均相着火计算	323
7.5.4 单颗煤粒着火的随机模型计算	326
7.6 煤粉空气混合物的着火	329
7.6.1 引言	329
7.6.2 煤粉气流的热力着火分析	333
7.6.3 影响煤粉气流着火的因素的研究	338
7.6.4 煤粉气流着火方式	342
7.7 煤粉着火的非稳态模型	345
7.7.1 基于有限控制体假定的煤粉着火非稳态统一模型	345
7.7.2 以群体燃烧为依据的着火非稳态数学模型	349

第 8 章 煤的燃烧理论(碳及煤焦的燃烧)

8.1 煤燃烧涉及的物理化学过程	354
8.1.1 煤焦反应的控制区及煤燃烧的速率	355
8.1.2 碳的形态与结构	357
8.1.3 焦炭燃烧过程中的吸附	358
8.1.4 焦炭燃烧过程中的扩散	362
8.1.5 先生成一氧化碳还是直接生成二氧化碳	363
8.2 碳的动力扩散燃烧特点及燃烧化学反应	366
8.2.1 碳的动力扩散燃烧特点	366
8.2.2 碳的燃烧化学反应	370
8.3 碳球的燃烧速度	379
8.3.1 温度较低或颗粒很小可略去空间气相反应的情况	380
8.3.2 碳球在高温下的扩散燃烧	383
8.4 考虑二次反应的碳球燃烧	385
8.4.1 考虑二次反应作用的碳球燃烧模型	385
8.4.2 有 CO 空间反应时碳球燃烧速率的计算	388
8.4.3 强迫对流条件下碳粒燃烧速率的分析方法	389
8.5 多孔性碳球的燃烧	392
8.5.1 内部反应对碳粒燃烧的影响	392
8.5.2 总的表观反应速度常数	395
8.5.3 内扩散动力学	397
8.6 各种因素对煤焦燃烧的影响	404
8.6.1 煤中挥发物析出对燃烧的影响	404
8.6.2 灰分对煤燃烧的影响	407
8.6.3 其他因素对煤焦燃烧的影响	414

第 9 章 煤粉燃烧的数学模型

9.1 燃烧过程模化的一般研究	417
9.2 单颗煤粒经历模型	420
9.2.1 煤粒的加热	421
9.2.2 水分蒸发模型	422
9.2.3 挥发分析出模型	422
9.2.4 焦炭的非均相反应模型	425
9.2.5 煤粒在燃烧室中的其他经历模型	426
9.3 煤燃烧过程中流动、气相反应过程及其模型	427
9.3.1 基本方程	427
9.3.2 湍流模型	428
9.3.3 气相燃烧	432
9.4 煤粉燃烧时炉内传热的模型及计算	435
9.4.1 燃烧室的热辐射	435
9.4.2 辐射传热的模型	436
9.4.3 实际煤火焰辐射传热模拟结果及分析	438
9.5 煤粉颗粒扩散及两相流模型	453
9.5.1 描述两相流动的基本方法	453
9.5.2 稀相流动的基本分析	454
9.5.3 颗粒在气流中的受力分析	455
9.5.4 颗粒的湍流扩散	457
9.6 数值求解方法	460
9.6.1 离散化方法	460
9.6.2 差分方程建立的方法	465
9.6.3 交错网格系统	468
9.6.4 差分方程的求解	471
9.6.5 煤粉火焰综合求解及示例	475

第 10 章 燃烧过程中硫的反应动力学及燃烧的固硫机理

10.1 硫在燃料中的存在形态	484
10.1.1 气体燃料	484
10.1.2 液体燃料	485
10.1.3 硫在煤中的存在形态	485
10.1.4 煤破碎过程中硫分的偏析	487
10.2 燃料过程中硫析出量的计算	487
10.2.1 SO_2 析出的计算公式	487
10.2.2 煤燃烧过程中 SO_2 析出的动态特性	488
10.2.3 煤的自身固硫	491

10.3	有机硫在高温条件下热解的反应动力学 ·····	493
10.3.1	有机硫在高温中的热解·····	493
10.3.2	单颗煤粒有机硫热解的反应动力学·····	494
10.4	无机硫在高温条件下的热解反应动力学 ·····	497
10.4.1	无机硫在高温中的热解·····	497
10.4.2	黄铁矿燃烧反应的数学模型·····	501
10.4.3	燃烧过程中碳酸盐类矿物质在高温中的分解·····	505
10.5	SO₃ 生成的反应动力学 ·····	506
10.5.1	SO ₃ 的生成及影响其生成的诸因素·····	506
10.5.2	SO ₃ 生成的反应动力学·····	507
10.6	H₂S 的生成 ·····	509
10.6.1	H ₂ S 形成的条件·····	509
10.6.2	空气不足使煤中硫或已反应成的 SO ₂ 、SO ₃ 转化成 H ₂ S·····	509
10.6.3	炉内局部空气过量系数是影响 H ₂ S 生成的主要因素·····	510
10.6.4	H ₂ S 在壁面附近形成机理·····	511
10.7	石灰石煅烧过程的反应动力学 ·····	511
10.7.1	石灰石的煅烧过程·····	511
10.7.2	石灰石在流化床内的煅烧过程·····	511
10.7.3	石灰石煅烧的等温动力学·····	513
10.7.4	石灰石煅烧的不等温动力学·····	514
10.8	煅烧石灰石的孔隙结构模型 ·····	515
10.8.1	石灰石煅烧时孔隙结构的变化·····	515
10.8.2	石灰石的煅烧模型·····	517
10.8.3	煅烧石灰石的孔隙结构模型·····	518
10.8.4	煅烧石灰石颗粒内的气体扩散及逾渗理论的应用·····	523
10.9	石灰石固硫机理 ·····	527
10.9.1	石灰石的固硫反应·····	527
10.9.2	石灰石脱硫反应动力学·····	529
10.9.3	石灰石固硫过程中微观结构的变化·····	531
10.10	煅烧石灰石的硫酸盐化模型 ·····	533
10.10.1	单颗粒脱硫剂反应模型·····	533
10.10.2	反应器模型·····	540
10.11	采用固硫剂脱硫的工业应用原理 ·····	542
10.11.1	脱硫剂的种类·····	542
10.11.2	最佳的石灰石脱硫温度·····	543
10.11.3	Ca/S 比的影响·····	546
10.11.4	最佳的脱硫剂粒度·····	547
10.11.5	富氧和缺氧条件下的脱硫·····	548
10.11.6	烟气喷水活化的影响·····	549
10.11.7	煤中含硫量的影响·····	552

10.11.8 燃烧脱硫对 NO_x 排放的影响	552
10.11.9 矿物质对钙基吸收剂的影响	554

第 11 章 燃烧过程中氮氧化物的生成及分解机理

11.1 燃烧过程中氮氧化物的生成及危害	555
11.1.1 氮氧化物的危害	555
11.1.2 各种燃烧方式的 NO_x 排放量	556
11.1.3 NO_x 均相反应的动力学参数	557
11.1.4 NO_x 生成的机理	563
11.2 热力 NO_x 的生成	563
11.2.1 热力 NO_x 的生成机理	563
11.2.2 影响热力 NO_x 生成的诸因素	565
11.3 快速 NO_x 的生成	567
11.3.1 快速 NO_x 生成机理	567
11.3.2 影响快速 NO_x 生成的几个因素	568
11.4 燃料型 NO_x 的生成	571
11.4.1 燃料型 NO_x 的生成途径	571
11.4.2 温度对燃料 NO_x 生成的影响	572
11.4.3 氧浓度对燃料 NO_x 生成的影响	573
11.4.4 燃料性质的影响	574
11.4.5 流化床锅炉床料中金属氧化物的作用	578
11.4.6 水分的影响	578
11.4.7 燃料氮转化为 NO_x 的化学动力学	579
11.5 气体燃料燃烧时 NO_x 的生成	580
11.6 液体燃料燃烧时 NO_x 的生成	582
11.6.1 喷雾燃烧时 NO_x 的生成	582
11.6.2 预蒸发、预混合火焰的 NO_x 生成	584
11.7 煤燃烧时 NO_x 生成机理	584
11.7.1 挥发分 NO_x	585
11.7.2 焦炭 NO_x	586
11.7.3 煤粉炉内燃烧时 NO_x 的生成	587
11.7.4 流化床燃烧时 NO_x 的析出	590
11.7.5 燃煤锅炉炉内 NO_x 生成量的预测	592
11.8 燃烧过程中 N_2O 的生成	595
11.8.1 N_2O 的危害	595
11.8.2 N_2O 均相生成及分解机理	596
11.8.3 N_2O 多相生成及分解机理	600
11.9 降低 NO_x 排放的措施	603
11.9.1 空气分级降低 NO_x 排放	603
11.9.2 燃料分级降低 NO_x 排放	604

11.9.3	低氧燃烧降低 NO_x 排放	606
11.9.4	烟气再循环降低 NO_x 排放	606
11.9.5	浓淡偏差燃烧	607
11.9.6	烟气脱硝	607
11.10	燃烧过程中降低 N_2O 的方法	609
11.10.1	改变运行温度	609
11.10.2	低氧燃烧	609
11.10.3	再燃烧法	609
11.10.4	催化反应降低 N_2O	610

第 12 章 燃烧过程中碳黑形成机理

12.1	燃烧过程中碳黑形成的类型及性质	611
12.1.1	气相析出型碳黑	611
12.1.2	剩余型碳黑	612
12.1.3	雪片	612
12.1.4	积碳	612
12.1.5	碳黑的特性	613
12.1.6	碳黑的危害	617
12.2	气体燃料燃烧时碳黑的生成	617
12.2.1	预混合火焰中碳黑的生成机理	617
12.2.2	预混火焰中碳黑生成的影响因素	620
12.2.3	扩散型火焰中碳黑的生成机理	622
12.2.4	降低碳黑排放的措施	623
12.3	油燃烧时碳黑的生成	624
12.3.1	油燃烧时碳黑的生成机理	624
12.3.2	液体燃料燃烧时碳黑生成的影响因素	628
12.3.3	液体燃料燃烧时碳黑排放量的控制	631
12.4	煤燃烧时碳黑的生成	633
12.5	碳黑生成的数学模型	634
12.5.1	碳黑生成的机理性模型	634
12.5.2	碳黑生成的综合模型	635

第 13 章 催化燃烧原理

13.1	催化燃烧及其作用原理	639
13.1.1	催化作用原理	639
13.1.2	催化剂的作用本质	643
13.2	燃烧催化剂的要求	645
13.2.1	催化剂的组成	645
13.2.2	催化剂的性能指标	646
13.2.3	催化剂的制备方法	649

13.2.4	催化剂的失活	651
13.3	燃烧催化作用机理	658
13.3.1	催化作用的化学本质	658
13.3.2	催化理论	658
13.3.3	多相催化反应的物理化学过程	659
13.3.4	表面化学反应速度和动力学方程	660
13.3.5	燃烧催化剂表面化学反应的宏观动力学方程	662
13.3.6	内外扩散对催化表面化学反应速度的影响	663
13.4	气体和液体燃料催化燃烧机理	663
13.4.1	气体燃料催化燃烧的分类	664
13.4.2	高温催化燃烧控制 NO_x 生成	669
13.4.3	催化燃烧法治理有机废气	676
13.4.4	液体燃料催化燃烧机理	679
13.5	煤的催化燃烧原理	681
13.5.1	各种添加剂对煤着火的影响	681
13.5.2	各种其他影响因素对煤催化着火燃烧的影响	690
13.5.3	煤的催化燃烧机理	695

第 14 章 非线性理论在燃烧领域中的应用

14.1	混沌理论在燃烧领域中的应用	701
14.1.1	混沌理论的原理	701
14.1.2	混沌理论的应用	703
14.1.3	混沌理论在燃烧及传热过程中的应用	706
14.2	分形理论在燃烧过程中的应用	710
14.2.1	分形理论的概念	710
14.2.2	分形理论在燃烧过程中的应用现状及前景	711
14.3	逾渗理论在燃烧过程中的研究	714
14.3.1	逾渗理论的原理及其在燃烧中的应用前景	714
14.3.2	逾渗理论在燃烧及脱硫中的应用情况	714
14.4	小波分析在燃烧传热中的应用	716
14.4.1	小波分析的原理	716
14.4.2	小波分析在气固多相流传热中的应用	717
14.5	神经网络理论在燃烧过程中的应用	719
14.5.1	神经网络理论的原理	720
14.5.2	当前神经网络的算法	721
14.5.3	神经网络理论在燃烧及传热中的应用	724
	参考文献	728

第 1 章

导论及化学动力学基础

1.1 燃烧科学的发展、应用和研究方法

1.1.1 燃烧科学的发展简史

燃烧是物质因剧烈氧化而发光、发热的现象,这种现象又称为“火”。按考古学的发现,人类最早使用火的时代可以追溯到距今 140~150 万年以前,火给人类带来了进步,“摩擦生火第一次使人类支配了一种自然力,从而最终把人和动物分开”^[1]。火的使用是人类出现的标志之一。第一次产业革命在英国出现,其标志就是蒸汽机的产生,这是人类对火(燃烧)现象的长期认识和经验积累的结果。目前燃烧现象渗透在工业和人民日常生活的各个方面。人类的物质文明史与燃烧技术的发展不可分割,火的历史也就是人类社会进步的历史。

人类在征服和利用火的过程中,也开始了对火的认识过程。在古希腊的神话中,火是神的贡献,是普鲁米修斯为了拯救人类的灭亡,从天上偷来的。在我国,燧人氏钻木取火的故事更为切合实际和动人,但这些离火的本质都相距甚远。

17 世纪末叶,德国的斯塔尔(G. E. Stahl)提出燃素论作为燃烧理论,可以说这是让燃烧成为一门科学的最早的努力,虽然不久以后就被证明完全错误,但他所代表的一代科学家注意观察和理论总结的研究方法,却为后代科学家提供了一个范例,也正是这种精神,使后来正确的燃烧学说得到很快的发现。按照燃素说,一切物质之所以能够燃烧,都是由于其中含有被称为燃素的物质。当燃素逸至空气中时就引起了燃烧现象,逸出的程度愈强,就愈容易产生高热、强光和火焰。物质易燃和不易燃的区别,就在于其中含有燃素量的多寡不同。这一学说对许多燃烧现象给予了说明。但是,一些本质问题尚不清楚,如燃素的本质是什么?为什么物质燃烧重量反而增加?为什么燃烧使空气体积减少?1772 年 11 月 1 日法国科学家拉瓦锡关于燃烧的第一篇论文发表了,其要点是由燃烧而引起的重量增加并不限于锡、铝等金属,硫、磷的燃烧也类