



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

燃烧学理论与应用

主编 李先春



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

燃烧学理论与应用

主 编 李先春

副主编 马光宇

参 编 刘常鹏 庞克亮 方志刚 林 科



北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2019

内 容 提 要

本书主要内容包括燃烧及燃烧计算、化学热力学和动力学、燃烧流体力学、气体燃料燃烧理论及设备、液体燃料燃烧理论及设备、煤的燃烧理论及设备、新型燃烧技术概述等；以基本概念为主，深入浅出地介绍了燃烧理论基础、研究进展和近年来应用上的新成就，注重理论与实用相结合，突出应用性。

本书为能源与动力工程专业教材，也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧学理论与应用 / 李先春主编. —北京: 冶金工业出版社, 2019. 3
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5024-8052-3

I. ①燃… II. ①李… III. ①燃烧学—高等学校—教材 IV. ①O643. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 042435 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8052-3

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版，2019 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16；28 印张；677 千字；436 页

68.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

前 言

燃烧学是一门复杂的交叉学科，燃烧科学的研究分为燃烧理论的研究和燃烧技术的应用研究。燃烧理论的研究对象为燃烧涉及的基本过程，主要包括燃烧反应的动力学机理，燃料的着火、熄灭，火焰的传播、稳定、火焰、扩散，层流和湍流燃烧，以及催化燃烧等。燃烧技术的应用研究主要是运用理论研究成果解决工程中的实际问题，包括燃烧方法的改进，燃烧过程的组织，新的燃烧方法的建立，提高燃料利用率，拓宽燃烧利用范围，改善燃烧产物的组成，实现对燃烧过程的控制，控制燃烧过程污染物的形成与排放等。

本书内容紧紧围绕燃料及燃烧计算，化学热力学与化学动力学以及燃烧流体力学进行论述，分别介绍了气、液、固（煤）三种燃料的燃烧理论和设备。

本书共分10章。第1、3、8、10章由李先春编写，第4、5章由马光宇编写，第2章由方志刚编写，第6、7章由刘常鹏和庞克亮共同编写，第9章由林科、李先春共同编写。

感谢辽宁科技大学教材出版专项基金对本书出版的资助；感谢辽宁省先进煤焦化及煤资源高效利用工程研究中心、辽宁科技大学化工学院的各位领导和同事对本书编写工作给予的帮助。

鞍钢集团徐春柏处长对本书做了全面审阅校对，并提出了宝贵意见。

由于书中内容涉及面较广，在编写过程中参考了大量国内外公开发表的文献，在此对文献作者及其所在单位表示衷心的感谢！在编写过程中，作者的硕士研究生苏佳明、李伯阳、王焕然、李艳鹰、王晴、刘月珺、旺冠宇、肖恺明等做了文献收集、文字录入和图表绘制等工作，对他们付出的辛勤劳动表示感谢。

近年来，燃烧学理论与应用技术发展很快，其所涉及的科学和工程领域很广。由于编者水平所限，书中倘有不足之处，诚望读者批评指正。

李先春 马光宇

2019年1月

目 录

0 绪论	1
0.1 燃烧科学的发展简史	1
0.2 燃烧科学的应用	2
0.3 学习燃烧学的目的	2
0.4 燃烧科学的研究方法	2
1 燃料及燃烧计算	4
1.1 燃料的分类及其组成	4
1.1.1 燃料的分类	4
1.1.2 燃料的组成	5
1.1.3 燃料成分的基准及其换算	7
1.2 固体燃料	9
1.2.1 煤及其特性	9
1.2.2 煤炭的分类	18
1.2.3 煤的常规特性对锅炉工作的影响	22
1.2.4 煤的特种分析	23
1.2.5 其他固体燃料	33
1.3 液体燃料和气体燃料	35
1.3.1 油类燃料及其特性	35
1.3.2 其他液体燃料	38
1.3.3 天然气体燃料	40
1.3.4 人工气体燃料	41
1.4 燃烧所需空气量	43
1.4.1 理论空气量	44
1.4.2 实际空气量、过量空气系数和漏风系数	46
1.5 燃烧产物及其计算	47
1.5.1 理论烟气量和实际烟气量	47
1.5.2 完全燃烧方程和不完全燃烧方程	51
1.5.3 烟气分析及运行过量空气系数的确定	53
1.6 燃烧温度和烟气焓	57
1.6.1 燃烧温度及其含义	57
1.6.2 烟气焓值及燃烧温度的确定	58

2 化学热力学与化学动力学	60
2.1 化学热力学.....	60
2.1.1 生成热、反应热和燃烧热.....	60
2.1.2 绝热燃烧温度、自由能和平衡常数.....	64
2.2 化学反应速率.....	66
2.2.1 浓度及其表示方法.....	66
2.2.2 化学反应速率.....	67
2.3 影响化学反应速率的因素.....	68
2.3.1 反应系统压力对化学反应速率的影响.....	68
2.3.2 反应物浓度对化学反应速率的影响.....	69
2.3.3 温度对化学反应速率的影响.....	69
2.3.4 活化能的影响.....	70
2.4 链式反应.....	71
2.4.1 不分支链反应.....	72
2.4.2 分支链反应.....	73
3 燃烧流体力学	75
3.1 燃烧湍流流动的输运方程.....	75
3.1.1 黏性流动基本方程组 (纳维-斯托克斯方程组).....	75
3.1.2 湍流运动的时均方程组 (雷诺方程组).....	77
3.2 直流燃烧器空气动力特性.....	78
3.2.1 自由射流原理.....	78
3.2.2 气固多相射流的流动特性.....	84
3.2.3 平行射流组的流动特性.....	86
3.2.4 煤粉射流组的流动特性.....	88
3.3 旋流燃烧器空气动力特性.....	88
3.3.1 旋转气流特性.....	88
3.3.2 炉内多个平行旋转射流相互作用的流动特性.....	90
4 气体燃料燃烧理论	93
4.1 气体燃料火焰的着火.....	93
4.1.1 气体火焰着火的概念.....	94
4.1.2 自燃热力理论.....	94
4.1.3 链锁自燃理论.....	103
4.1.4 预混可燃气体的点燃.....	103
4.1.5 点燃热力理论.....	105
4.1.6 点燃方法.....	109
4.1.7 可燃极限.....	113

4.1.8	影响可燃极限的因素	114
4.2	气体燃料火焰的传播	118
4.2.1	层流火焰传播概念	119
4.2.2	层流火焰传播理论	121
4.2.3	影响层流火焰传播的因素	126
4.2.4	湍流火焰传播的特点	131
4.2.5	湍流火焰的表面理论	133
4.2.6	湍流火焰的容积理论	135
4.3	气体燃料火焰的稳定	135
4.3.1	本生灯火焰的稳定	136
4.3.2	火焰稳定的均匀搅混热平衡原理	139
4.3.3	湍流火焰的稳定方法	145
4.4	射流火焰	148
4.4.1	预混火焰和扩散火焰概念	149
4.4.2	不等温自由射流火焰	150
4.4.3	层流射流火焰	151
4.4.4	湍流射流火焰	152
4.4.5	受限射流火焰和多股射流火焰	154
4.4.6	反扩散火焰	155
5	气体燃料燃烧设备	157
5.1	扩散式燃气燃烧器	157
5.1.1	自然引风式扩散燃烧器	158
5.1.2	强制送风式扩散燃烧器	160
5.2	完全预混式气体燃烧器	165
5.3	特种燃烧器	169
5.3.1	陶瓷燃烧器	169
5.3.2	平焰燃烧器	171
5.3.3	高速燃烧器	173
5.3.4	浸没燃烧器	176
5.3.5	燃气辐射管	179
5.3.6	脉冲燃烧器	181
5.3.7	催化燃烧器	182
5.3.8	富氧燃烧器	184
5.3.9	双燃料燃烧器	185
5.3.10	蓄热式燃烧器	186
5.3.11	低 NO_x 燃气燃烧器	190
6	液体燃料燃烧理论	195
6.1	液体燃料燃烧过程	195

6.1.1	液体燃料的燃烧方式	195
6.1.2	喷雾方式燃烧的几种物理模型	195
6.1.3	液体燃料燃烧过程强化的基本措施	196
6.2	液滴的蒸发	198
6.2.1	斯蒂芬流	198
6.2.2	相对静止高温环境下液滴的蒸发	200
6.2.3	强迫气流下液滴高温蒸发	206
6.3	液滴的燃烧	208
6.3.1	相对静止环境下液滴燃烧	208
6.3.2	强迫气流下液滴的燃烧	214
7	液体燃料燃烧设备	216
7.1	液体燃料燃烧器	216
7.1.1	液体燃料燃烧对燃烧器的要求	216
7.1.2	雾化喷嘴的分类	217
7.1.3	油燃烧设备配风要求	219
7.2	离心式机械喷嘴	220
7.3	蒸汽喷嘴	222
7.3.1	蒸汽喷嘴	222
7.3.2	蒸汽机械雾化喷嘴	223
7.3.3	Y形蒸汽机械雾化喷嘴	224
7.4	配风装置	228
7.4.1	旋流式配风器	228
7.4.2	平流式配风器	239
8	煤的燃烧理论	241
8.1	煤的燃烧过程、特点及其热解	241
8.1.1	煤的燃烧过程	241
8.1.2	水分的蒸发过程及对燃烧的影响	242
8.1.3	煤的热解与挥发分的燃烧	243
8.1.4	煤粒的着火	251
8.1.5	煤粒燃烧的一些实验研究结果	253
8.1.6	影响煤粒着火的因素	254
8.1.7	焦炭的燃烧特性	255
8.2	碳燃烧化学反应的过程	257
8.2.1	碳燃烧化学反应的步骤	257
8.2.2	碳燃烧过程中的吸附和解吸	257
8.2.3	碳燃烧过程中的扩散	261
8.3	碳的动力燃烧与扩散燃烧	264

8.4 碳的燃烧化学反应	268
8.4.1 反应过程	268
8.4.2 反应机理	269
8.5 多孔性碳球的燃烧	287
8.6 灰分对焦炭燃烧的影响	290
8.6.1 碳粒燃烧过程的物理模型	291
8.6.2 不同燃烧温度下灰分对燃烧的影响	292
8.6.3 灰分对焦炭燃烧的其他影响	295
8.7 煤粉燃烧	295
8.7.1 煤粉气流的输送与分配	295
8.7.2 煤粉气流的着火	301
8.7.3 旋转射流中煤粉的着火	307
8.7.4 直流射流中煤粉的着火	311
8.7.5 煤粉气流的燃尽过程	312
9 煤粉燃烧设备	316
9.1 煤粉火炬燃烧的特点	316
9.1.1 煤粉气流的点燃特性	316
9.1.2 煤粉气流的火焰特性	320
9.1.3 燃烧室特性	320
9.1.4 煤粉燃烧器	325
9.2 直流煤粉燃烧器及其布置	328
9.2.1 直流煤粉燃烧器的布置	328
9.2.2 几种常见的直流煤粉燃烧器	335
9.3 旋流煤粉燃烧器及其布置	343
9.3.1 几种常见的旋流煤粉燃烧器	343
9.3.2 旋流煤粉燃烧器的布置	347
9.4 现代大型煤粉燃烧技术	350
9.4.1 煤粉火焰的稳定方法和原理	350
9.4.2 低 NO_x 煤粉燃烧技术	363
10 新型燃烧技术概述	377
10.1 催化燃烧	377
10.1.1 催化燃烧控制 NO_x 和 CO 生成的原理	377
10.1.2 典型催化燃烧室	378
10.1.3 催化燃烧催化剂的研究进展	379
10.2 富氧燃烧	385
10.2.1 煤粉在富氧燃烧条件下的着火和燃烧特性	386
10.2.2 富氧燃烧污染物释放和控制	386

10.2.3	富氧燃烧方式下矿物质转化及灰熔融特征	387
10.2.4	经济性评价	387
10.3	化学链燃烧	388
10.3.1	氧载体	388
10.3.2	化学链燃烧反应器	389
10.3.3	化学链燃烧系统与其他系统耦合	390
10.4	高温空气燃烧技术	391
10.4.1	高温空气燃烧技术发展的技术背景	392
10.4.2	高温空气燃烧工作原理与技术优势	393
10.4.3	高温空气燃烧烧嘴形式	394
10.4.4	高温空气燃烧的研究焦点	396
10.4.5	高温空气燃烧的应用	400
10.4.6	高温空气气化	401
10.5	微尺度燃烧技术	407
10.5.1	技术背景	407
10.5.2	微小尺度燃烧的应用	408
10.5.3	微小尺度燃烧面临的挑战	413
10.5.4	微小尺度下的稳燃方法	414
10.6	多孔介质燃烧技术	416
10.6.1	多孔介质燃烧机理	416
10.6.2	多孔介质燃烧特点	418
10.6.3	多孔介质燃烧方式	419
10.6.4	多孔介质燃烧应用	429
	参考文献	436

0 绪 论

0.1 燃烧科学的发展简史

燃烧是物质剧烈氧化而发光、发热的现象，这种现象又称为“火”。恩格斯指出：“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。”火的使用是人类进步的标志之一。火使人类摆脱了茹毛饮血和黑暗寒冷。第一次工业革命在英国发生，其标志就是蒸汽机的产生，这是人类对“火”（燃烧）现象的长期认知和经验积累的结果。人类的物质文明史与燃烧技术的发展密不可分。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，是普罗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。但这些离火的本质相距甚远。1702年，德国物理学家施塔尔提出燃素论作为燃烧理论，可以说是让燃烧成为一门科学的最早的努力。按照燃素学说，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。该理论后来被证明是完全错误的。但他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展。燃素论认为，是燃素逸至空气中引起了燃烧现象，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少。这一学说对于许多燃烧现象给予了说明，但一些本质问题尚不清楚。例如：燃素的本质是什么，为什么物质燃烧后重量反而增加，为什么燃烧会使空气体积减少？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质量增加。这种“质量的增加”是由于可燃物同空气中的一部分物质化合的结果。燃烧是一种化合现象。但拉瓦锡尚未完全弄清楚空气中的这一部分物质是什么。1774年，英国化学家普利斯特列发现了氧。拉瓦锡很快在实验中证明，这种物质在空气中的比例为 $1/5$ ，并命名这一物质为“氧”。由此拉瓦锡正确的燃烧学说得到确立，并因此引起了化学界的一大革新。但是，这仅仅是揭开燃烧的本质的开始。19世纪，由于热力学和热化学的发展，燃烧过程开始被作为热力学平衡体系来研究，并由此阐明了燃烧过程中一些最重要的平衡热力学特性，如燃烧反应的热效应，燃烧产物平衡组成，绝热燃烧温度、着火温度等。热力学成为当时认识燃烧现象重要而唯一的基础。直到20世纪30年代，美国化学家刘易斯（B. Lewis）和俄国化学家谢苗诺夫（Semenov）等人将化学动力学的机理引入燃烧的研究，并确认燃烧的化学反应动力学是影响燃烧速率的重要因素，发现燃烧反应具有链锁反应的特点，这才初步奠定了燃烧理论的基础。之后，随着20世纪初各学科的迅猛发展，在30年代到50年代，人们开始认识到影响和控制燃烧过程的因素不仅仅是化学反应动力学因素，还有气体流动、传热、传质等物理因素，燃烧则是这些因素综合作用的结果，从而建立了着火、火焰传播、湍流燃烧的规律。20世纪

50年代到60年代,美国力学家冯·卡门(Von. Karman)和我国力学家钱学森首先倡议用连续介质力学来研究燃烧基本过程,并逐渐建立了“反应流体力学”理论,学者们开始以此为基础对一系列的燃烧现象进行了广泛的研究。计算机的出现,使燃烧理论与数值方法相结合,展现出巨大的威力。斯波尔丁(D. B. Spalding)在20世纪60年代后期,首先得到了层流边界层燃烧过程控制微分方程的数值解,并成功地接受了实验的检验;但在进一步研究中,他遇到了湍流问题的困扰。斯波尔丁和哈洛在继承和发展了普朗特、雷诺和周培源等人工作的基础上,将“湍流模型方法”引入了燃烧学的研究,提出了一系列的湍流输运模型和湍流燃烧模型,并成功地对一大批描述基本燃烧现象和实际的燃烧过程进行了数值求解。到20世纪80年代,英、美、俄、日、德、中、法等国相继开展了类似的研究工作,形成了“计算燃烧学”,用它能够很好地定量预测燃烧过程,使燃烧理论及其应用达到了一个新的高度。同时,燃烧过程测试手段的进步,先进的激光技术、现代质谱、色谱等光学、化学分析仪器,改进了燃烧实验的方法,提高了测试精度,使人们可以更深入、全面、精确地研究燃烧过程的各种机理,使燃烧学理论在深度和广度上都有了飞速的发展。

0.2 燃烧科学的应用

燃烧学是一门内容丰富、发展迅速,既古老又年轻且实用性很强的交叉学科。现代社会的动力来源,主要来自于矿物燃料的燃烧,其应用遍及各个领域,如火力发电厂的锅炉、冶金企业的加热炉、各种交通工具的发动机等,都是以固体、液体和气体燃料的燃烧产生的热能为动力的。燃烧科学的应用极其广泛,在冶金、化工、玻璃、化肥、水泥、陶瓷、石油化工等生产过程中,都是以燃料的燃烧来提供热源的。火给人类带来了伤痛,燃烧在给人类带来文明的同时,也给人类带来了威胁。燃烧过程失控就会带来灾害。例如,危险品仓库发生火灾并引起爆炸,煤矿瓦斯爆炸和锅炉爆炸。燃烧造成的污染主要包括烟尘污染、硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳、重金属污染、一氧化碳、酸雨、温室效应、二噁英。

0.3 学习燃烧学的目的

任何事物都是一分为二的,人们应利用燃烧过程为人类造福,避免燃烧过程给人类带来危害。燃烧学的核心问题是燃烧过程的可控制性。学习燃烧学的目的是掌握燃烧过程基本概念和基本原理,学会应用基本概念和原理分析判断燃烧过程,逐步学会控制、利用燃烧过程。

0.4 燃烧科学的研究方法

燃烧科学的研究包括两大方面:一是燃烧理论方面的研究,主要以燃烧涉及的基本过程为对象,如燃烧反应的动力学机理,燃料的着火、熄灭,火焰传播,火焰稳定,预混火焰,扩散火焰,层流和湍流燃烧,催化燃烧,液滴燃烧,碳粒燃烧,煤的热解和燃烧,燃

烧产物的形成机理等；二是燃烧技术的研究，主要是应用上述理论研究的结果解决工程技术中的各种实际问题，包括燃烧方法的改进、燃烧过程的组织、新的燃烧方法的建立、提高燃料利用率、拓宽燃烧利用范围、改善燃烧产物的组成、实现对燃烧过程的控制、控制燃烧过程污染物的形成与排放等。由于上述内容的复杂性，使燃烧科学的研究方法具有多样性。总的来说燃烧科学发展的最重要的形式是理论的更替，而理论的更替正是科学实践的结果，也就是研究方法的更替，从燃烧学的发展简史可以看出，仅靠实验并不能确定理论的正确与否，如燃素说的基础也是实验，但得到的却是错误的理论，燃烧理论的建立是实验研究和理论总结的结合。由于燃烧过程的复杂性，到目前为止，燃烧科学的研究仍然以实验研究为主，但理论和数学模型的方法正显得越来越重要。

（此处为模糊不清的正文内容，疑似为燃烧学发展简史的一部分，提及燃素说等概念）

年份	事件	意义
1789年	拉瓦锡和贝托莱提出质量守恒定律	奠定了燃烧学的基础
1808年	盖-吕萨克提出气体化合体积定律	为燃烧学的发展提供了重要依据
1828年	盖-吕萨克和戴维提出盖-吕萨克定律	进一步明确了气体体积与温度的关系

（此处为模糊不清的正文内容，提及燃烧学的发展历史，包括拉瓦锡、盖-吕萨克等人的贡献）

1

燃料及燃烧计算

锅炉、内燃机、燃气轮机和工业加热炉等燃烧设备上所用的燃料有固体燃料（以煤为主）、液体燃料和气体燃料三大类。本章主要分为2个部分，1.1~1.3节在简要介绍燃料分类的基础上，重点介绍燃料的组成、各种组成成分的性质、燃料成分的基准及其换算方式，以煤为例介绍燃料元素分析、工业分析、发热量、煤灰熔融性及焦炭特性等概念，对其他燃料也做简要介绍。在燃烧设备的设计过程中，热力计算是非常重要的内容，1.4~1.6节主要介绍燃料的燃烧计算方法、燃烧所需空气量、燃烧产物及计算、理论燃烧温度和烟气焓的确定。

1.1 燃料的分类及其组成

1.1.1 燃料的分类

燃料是指可以用来获取大量热能的物质，燃料是锅炉等燃烧设备的“粮食”。

燃料按物态可分为固体燃料、液体燃料和气体燃料；按获得的方法可分为天然燃料和人工燃料。人工燃料是经过一定处理后所获得的燃料。燃料的分类见表1.1。

表 1.1 燃料分类

类别	天然燃料	人工燃料
固体燃料	木柴、泥煤、烟煤、石煤、油页岩	木炭、焦炭、泥煤砖、煤矸石、甘蔗渣、可燃垃圾等
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、沥青、焦油
气体燃料	天然气	高炉煤气、发生炉煤气、焦炉煤气、液化石油气

燃料按用途可分为工艺燃料和动力燃料。工艺燃料是指特殊工艺生产过程所需的燃料，大都是优质燃料；动力燃料是指除了其燃烧放热可供利用外，在其他方面没有更大经济价值的燃料，主要是劣质燃料。锅炉一般燃用劣质燃料，这些劣质燃料燃烧比较困难，而且会给锅炉工作带来许多不利影响。虽然我国燃料资源比较丰富，但为了满足国民经济建设各方面的要求，应做到能源的合理使用，所以我国的燃料政策规定电站锅炉以燃煤为主，并且在保证综合效益的条件下主要燃用劣质煤。

煤、石油、天然气、油页岩等也被称为化石燃料（即矿物燃料）。这类燃料是地壳内动植物遗体经过漫长的地质年代，经历长期的化学、物理变化形成的。远古时代的植物通过光合作用收集、转化了太阳能，并转存于动植物的有机体中，成为化石燃料的原料。从数百万年前照到绿色植被的太阳能，转变为今天埋在地下的化石燃料的化学能，不仅需要漫长的岁月，而且转换的效率极低。因此，目前地球上储存的化石燃料是非常宝贵的。

燃料特性是锅炉等燃烧设备设计、运行的基础。对于不同的燃料，要相应采用不同的

燃烧设备和运行方式。对于燃烧设备的设计及运行人员，必须了解设备所使用燃料的性能特点，才能保证其运行的安全性和经济性。

1.1.2 燃料的组成

固体燃料的成分有碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、水分(M)、灰分(A)。其中C、H、S为可燃元素。

液体燃料的成分也是碳、氢、氧、氮、硫、水分和灰分，但碳和氢含量较高。

气体燃料有天然气和人造气两类。天然气分气田气和油田伴生气两种。气田气主要成分是甲烷；油田气除含甲烷外，还有丙烷、丁烷等烷烃类，CO₂含量也比气田气高。

1.1.2.1 固体燃料和液体燃料

A 碳和氢

碳是燃料中基本可燃元素，煤中碳含量（质量分数）一般占燃料成分的20%~70%，油类燃料中碳的含量达83%~88%。氢是燃料中热值最高的元素，煤中含量（质量分数）一般占燃料成分的3%~5%，油类燃料中氢的含量达11%~14%。碳和氢两种元素结合成各种碳氢化合物，也称为烃，按其化学结构不同一般分为烷烃、环烷烃和芳香烃三类。

1kg碳完全燃烧生成二氧化碳时可放出32783kJ的热量；在缺氧或燃烧温度较低时会形成不完全燃烧产物一氧化碳，仅放出9270kJ的热量。烃类物质受热可分解成为氢气或各种碳氢化合物气体挥发出来。氢是一种着火容易、燃烧性能好的气体，1kg氢完全燃烧时可放出120370kJ的热量，约是碳燃烧放热量的3.67倍。燃料中的碳和氢的含量的比例称为碳氢比，用符号 k_{CH} 表示， $k_{CH}=C/H$ 。碳氢比可以用来衡量燃料及燃烧的性能。碳氢比小的燃料热值较高，燃烧过程中着火容易、燃烧完全，形成的不完全燃烧产物（如炭黑、一氧化碳）较少。

B 氧和氮

氧是燃料中反应能力最强的元素，燃烧时能与氢化合成水，降低了燃料的热值；氮是燃料中的惰性和有害元素，燃烧时，燃料中氮易转化成为氮氧化物NO_x（NO及NO₂），排放后对环境造成污染。氧和氮都是煤在形成期间便存在的，他们都不是可燃物质，不能燃烧放热。氧虽能助燃，但其在煤中含量与大气中的氧含量相比是很少的。氮的质量分数约为0.1%~2.5%，氧的质量分数一般小于2%。但泥煤的氧含量可高达40%。氧随煤的碳化程度加深而减少。氧在煤中主要以羧基、羟基、甲氧基、羰基和醚基形态存在，也有些氧与碳骨架结合成杂环。燃料中的氮绝大部分为有机氮。

C 硫

硫也是有害成分。尽管硫也是一种可燃物质，但其热值很低，1kg硫燃烧后仅放出9040kJ的热量，燃烧生成SO₂和少量SO₃，排出后会造成严重污染，是形成酸雨的主要物质。若与烟气中的水蒸气反应生成硫酸或亚硫酸，在锅炉低温受热而凝结后产生强烈的腐蚀作用。硫在煤中以三种形式存在：（1）有机硫，与碳、氢等结合成复杂化合物；（2）黄铁矿硫，如FeS₂等；（3）硫酸盐硫，如CaSO₄、NaSO₄等。其中有机硫和黄铁矿硫参加燃烧；硫酸盐硫进入灰分，我国煤的硫酸盐硫含量极少。我国动力用煤的含硫量大部分为1%~1.5%，一些煤中含硫3%~5%，个别的高达8%~10%。含硫量高于2%的煤称为高

硫煤，直接燃烧可生成大量的 SO_2 ，若不处理危害严重。

硫在石油中以硫酸、亚硫酸或硫化氢、硫化铁等化合物的形式存在。燃料油在运输过程中对金属管道也有很强的腐蚀性，硫是评价油质的重要指标。按照硫在燃烧中的含量多少可分为：高硫油，质量分数大于 2%；含硫油，质量分数大于 0.5%~2%；低硫油，质量分数小于 0.5%。也有的将含量大于 1% 的油即视为高硫油。我国低硫石油有大庆、大港、克拉玛依等地的产品，胜利油田原油属含硫油，而高硫油主要集中在中东产油区。石油在加热蒸馏提取各种燃料油的过程中，80% 的硫残存在重馏分（润滑油、渣油）中。

D 灰分

煤的灰分是燃烧后剩余的固体残余物。灰分降低了煤的品质；给燃烧造成困难；可能使锅炉积灰、结渣，并磨损金属受热面。我国煤的灰分随煤种变化很大，少则 4%~5%，多则 60%~70%。煤中灰分的组成见表 1.2。

表 1.2 煤中灰分的组成

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO_2	20~60	Fe_2O_3	5~35
Al_2O_3	10~35	CaO	1~20
MgO	0.3~0.4	Na_2O 和 K_2O	1~4
TiO_2	0.5~2.5	SO_3	0.1~1.2

石油中的灰分是矿物质杂质在燃烧过程中经过高温分解和氧化作用后形成的固体残存物（ V_2O_5 、 Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 CaSO_4 等），会在锅炉的各种受热面上形成积灰并引起金属的腐蚀。石油灰分的含量极少，质量分数小于 0.05%，但化学成分十分复杂，含有 30 多种微量元素，如铁、镁、镍、铝、铜、钙、钠、硼、硅、氯、磷、砷等。由于石油中灰分具有较强的黏结性，导致燃油锅炉受热面上的积灰不易清除，含量很少的灰分会对长期运行的锅炉产生很大的影响。

除了灰分外，石油及其产品在开采、输运、储存过程中还会混入一些不溶物质，称为机械杂质，在燃料油中其含量（质量分数）约为 0.1%~0.2%。这些以悬浮或沉淀状态存在的杂质有可能堵塞或磨损油喷嘴和管道设备，使锅炉的正常运行受到影响。

E 水分

水分也是燃料中的不可燃成分。不同燃料的水分含量变化很大。液体燃料约含有 1%~4%，褐煤可达 40%~60%。水分增加，影响燃料的着火和燃烧速度，增大烟气量，增加排烟热损失，加剧尾部受热面的腐蚀和堵灰。

通常石油与水共存于油田中，原油中含有很高的水分。燃料油中的高水分会使燃料的热值降低，导致燃烧过程中出现火焰脉动等不稳定工况或熄火，增大排烟热损失，一般是有害成分。但若有少量水分呈乳状液并与油均匀混合，雾化后油滴中的水分会先受热蒸发膨胀，产生所谓的“微爆”效应，使油滴形成二次破碎雾化，可改善燃烧条件，提高燃烧火焰温度，降低不完全燃烧热损失。石油运输前要经过脱水处理，燃料油中的水分含量（质量分数）应低于 2%。

1.1.2.2 气体燃料

各种气体燃料均由一些单一气体混合组成，也包括可燃物质与不可燃物质两部分。主

要的可燃气体成分有甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、氢气(H_2)、一氧化碳(CO)、乙烯(C_2H_4)、硫化氢(H_2S)等,不可燃气体成分有二氧化碳(CO_2)、氮气(N_2)和少量的氧气(O_2)。其中可燃单一气体的主要性质如下:

(1) 甲烷。无色气体,微有葱臭,难溶于水,0℃时水中的溶解度为0.0556%,低位热值为35906kJ/m³。甲烷与空气混合后可引起强烈爆炸,其爆炸极限范围为5%~15%,最低着火温度为540℃。当空气中甲烷浓度高达25%~30%时,才具有毒性。

(2) 乙烷。无色无臭气体,0℃时水中的溶解度为0.0987%,低位热值为64396kJ/m³,最低着火温度为515℃,爆炸极限范围为2.9%~13%。

(3) 氢气。无色无臭气体,0℃时水中的溶解度为0.0215%,低位热值为10794kJ/m³。最低着火温度为400℃,极易爆炸,在空气中的爆炸极限范围为4%~75.9%。燃烧时具有较高的火焰传播速度,约为260m/s。

(4) 一氧化碳。无色无臭气体。难溶于水,0℃时水中的溶解度为0.0354%,低位热值为12644kJ/m³。一氧化碳的最低着火温度为605℃,若含有少量的水蒸气,可降低着火温度,在空气中的爆炸极限范围为12.5%~74.2%。一氧化碳是一种毒性很大的气体,空气中含有0.06%即有害于人体,含0.2%时可使人失去知觉,含0.4%时致人死亡。空气中允许的一氧化碳浓度为0.02g/m³。

(5) 乙烯。无色气体,具有窒息的乙醚气味,有麻醉作用,0℃时水中的溶解度为0.266%,低位热值为59482kJ/m³,相对较高。乙烯最低着火温度为425℃,在空气中的爆炸极限范围为2.7%~3.4%,浓度达到0.1%时对人体有害。

(6) 硫化氢。无色气体,具有浓厚的腐蛋气味,易溶于水,0℃时水中的溶解度为4.7%,低位热值为23383kJ/m³。硫化氢易着火,最低着火温度为270℃,在空气中的爆炸极限范围为4.3%~45.5%。毒性大,空气中含有0.04%时有害于人体,0.10%可致人死亡,大气中允许的硫化氢浓度为0.01g/m³。

1.1.3 燃料成分的基准及其换算

由前述可知,固体燃料和液体燃料由碳、氢、氧、氮、硫五种元素及水分、灰分等组成,这些成分以质量百分数含量计算,其总和为100%。

燃料中水分和灰分的含量最易受外界条件的影响而发生变化,水分或灰分的含量变化了,其他元素成分的含量也会随之而变化。例如,水分含量增加时,其他成分的百分含量便相对减小;反之,水分含量减少时,其他成分的百分含量便相对增加。所以不能仅用各成分的质量百分数来表示燃料的成分组成特性。有时为了使用或研究工作的需要,在计算燃料的各成分含量时,可不将某种成分(例如水分或灰分)计算在内。这样按不同的“成分组合”计算出来的各成分百分数就会有较大的差别。这种根据燃料存在的条件或根据需要规定的“成分组合”称为基准。所用的基准不同,同一种煤的同一成分的百分含量结果就不一样。

常用的基准有以下4种:

(1) 收到基(as-received basis)。以收到状态的燃料为基准计算燃料中全部成分的组合称为收到基。例如,对进厂原煤或炉前煤都应按收到基计算各项成分。收到基以下角标ar表示。