



普通高等教育“十二五”规划教材

工程燃烧学

冉景煜 主 编
张 力 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划

工程燃烧学

主 编 冉景煜
副主编 张 力
编 写 蒲 舸 唐 强 闫云飞
杨仲卿 秦昌雷
主 审 周怀春



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书主要阐述了燃烧的概念、燃料特性、燃烧物理基础、燃烧化学热力学、动力学基础理论,着火、灭火机理及特性、燃烧火焰及传播特性,气体、液体、固体燃料燃烧特性,燃烧污染物的产生及控制技术,燃烧新技术和发展内容。本书内容全面,反映了燃烧学领域的现状及国内外的新技术、新成果,采用了最新的国家标准。为加深学生对所学知识的理解,每章后均附有思考题及习题。

本书紧密结合世界能源发展的政策和大趋势,充分反映能源与动力行业技术发展动向,力求使读者获得适应 21 世纪能源动力学科和产业发展需求的知识和能力。

本书可作为高等院校能源动力类相关专业燃烧学课程的教材(32~56 学时),也可作为研究生相关专业教材或供其他相关行业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程燃烧学/冉景煜主编. —北京:中国电力出版社, 2014.10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-6588-9

I. ①工… II. ①冉… III. ①燃烧理论—高等学校—教材
IV. ①TK16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 234488 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 427 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

世界的发展、人类的进步与能源的开发和利用息息相关。燃烧是能源利用的一种重要方式,但同时存在严重的环境问题,因而对燃烧科学的发展提出了更高的要求。特别在中国的能源消费中,能源利用绝大部分都来源于传统化石能源的燃烧转换,清洁高效燃烧是燃烧学领域需要解决的重要问题。

本书编写组结合长期课程教学工作和指导实践性环节的经验,将多年的教学体会融合到教材编写中,同时,结合编者在燃烧学领域的科研成果,以及国内外燃烧领域的理论著作、工程燃烧技术等实际情况,编成而成。

本书充分反映能源与动力行业技术发展的新趋势和新动向,理论联系实际,有效地解决了现有教材专业适应面单一,难以适应目前能源与动力工程专业需求的问题;力图使学生在掌握理论知识的同时,能够获得相关的工程应用背景知识,并通过相应的配套实验教学获得感性认识和实践机会;强调工程燃烧学课程的工程应用性,培养学生学以致用、理论联系实际的能力和素养,满足新世纪对人才培养的新要求。

重庆大学是培养动力工程及工程热物理学科专业高级人才的重要基地,也是火力发电技术研究和开发的重要基地,在煤、生物质、工业污泥、市政固体废弃物的燃烧机理与技术、燃烧节能技术的开发、微尺度燃烧等方面进行了大量深入的研究,取得了较丰富的研究成果,这些成果在本书中均有所体现。

本书由重庆大学冉景煜教授主编并统稿。第一章由冉景煜编写,第二章由张力编写,第三章由冉景煜、杨仲卿编写,第四章由冉景煜、秦昌雷编写,第五~第八章由冉景煜、蒲舸、闫云飞编写,第九章由蒲舸、冉景煜编写,第十、十一章由唐强编写。此外,秦昌雷对书稿进行了细致的整理工作。

本书由清华大学周怀春教授主审。周怀春教授在百忙中详细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的意见和建议,使编者在修改过程中受益匪浅,在此表示诚挚的谢意。

编者

2014年9月

目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 燃烧科学与燃烧技术的发展	1
第二节 燃烧科学的研究与应用	3
思考题及习题	4
第二章 燃料及特性	5
第一节 燃料及概况	5
第二节 燃料的成分分析与发热量	5
第三节 煤的分类及特性	11
第四节 煤灰的熔融、结渣及沾污特性	15
第五节 液体燃料	19
第六节 气体燃料	21
思考题及习题	22
第三章 燃烧空气动力学及模化基础	24
第一节 射流的定义及分类	24
第二节 直流及其组合射流流动	25
第三节 钝体尾迹中的流动	35
第四节 旋转及其组合射流流动	38
第五节 气固多相射流的流动特性	43
第六节 燃烧空气湍流流动理论模化基础	51
第七节 电厂锅炉冷炉气流模化试验方法	64
思考题及习题	70
第四章 燃烧化学热力学和化学动力学	72
第一节 化学热力学基础	72
第二节 自由能、热力学平衡和绝热火焰温度	77
第三节 燃烧化学动力学基础	80
第四节 影响化学反应速度的因素	85
第五节 反应速度理论及复杂反应	88
思考题及习题	93
第五章 着火与灭火理论	94
第一节 着火机理与着火方式	94

第二节 热自燃	95
第三节 链锁自燃	101
第四节 强迫着火	104
第五节 灭火机理与灭火方式	107
思考题及习题	111
第六章 燃烧火焰及传播特性	112
第一节 火焰特性	112
第二节 火焰传播	113
第三节 层流火焰	121
第四节 湍流火焰	125
第五节 火焰稳定的基本原理	129
第六节 燃烧反应控制区	135
思考题及习题	137
第七章 气体燃料燃烧	138
第一节 概述	138
第二节 气体燃料预混式燃烧	140
第三节 气体燃料扩散式燃烧	141
第四节 气体燃料燃烧器	144
思考题及习题	149
第八章 液体燃料燃烧	150
第一节 液体燃料燃烧特性	150
第二节 液体燃料的雾化过程及特性	153
第三节 燃料液滴的蒸发	160
第四节 燃料液滴的燃烧	164
思考题及习题	168
第九章 固体燃料燃烧	169
第一节 概述	169
第二节 煤粒着火及燃烧过程	169
第三节 碳及焦炭的燃烧	177
第四节 煤粉燃烧过程	188
第五节 煤的燃烧方式与燃烧装置	190
思考题及习题	198
第十章 燃烧污染物产生与控制	199
第一节 燃烧污染物产生机理	199
第二节 燃烧污染物控制技术	209
思考题及习题	234

第十一章 燃烧新技术和发展	236
第一节 高温空气燃烧.....	236
第二节 脉动燃烧.....	238
第三节 高推重比燃烧.....	240
第四节 超声速燃烧.....	251
第五节 爆震燃烧.....	255
第六节 电磁场与燃烧.....	259
第七节 催化燃烧.....	261
第八节 微重力燃烧.....	262
第九节 微尺度燃烧.....	267
思考题及习题	271
参考文献	272

第一章 概 述

第一节 燃烧科学与燃烧技术的发展

一、燃烧的基本概念与特征

燃烧 (burning; to burn; to kindle; to ignite; to flare up / out; to fire; to flame out / up; to blaze/combustion; inflammation; ignition) 是指任何发光发热的剧烈的现象, 这种现象又称为“火”。燃烧的发生必须同时具备三个条件: 可燃物如燃料 (fuel), 助燃物如氧气 (oxygen) 及温度要达到燃点, 这三个条件称为燃烧三要素, 即火三角 (fire triangle)。通常讲的燃烧一般要有氧气参加, 但在一些特殊情况下的燃烧可以在无氧的条件下进行, 如氢气在氯气中的燃烧、镁条在 CO_2 中的燃烧等。

燃烧是气体、液体或固体燃料与氧化剂之间发生的一种强烈的化学反应, 是流动、传热、传质和化学反应同时发生并相互作用的综合现象。燃烧问题涉及化学反应动力学、流体力学、传热传质学、热力学等问题。

二、燃烧科学发展史

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。

1. 火的自然存在学说

远古时代人们在使用火时, 出现过不少有关火的自然存在学说。如我国“五行学说”金、木、水、火、土中的火; 古印度“四大学说”: 地、水、火、风中的火; 公元前四世纪, 古希腊“燃素学说”提出水、火、土、气的四元素说, 认为万物主要有干、冷、湿、热四性, 元素是四性结合之表现, 故可以互相变换。东西方都认为火是构成万物的原本物质之一。

2. 燃烧的氧化学说

直到 18 世纪, 由于氧气以及其他碳酸气、氢气、氮气等一些重要气体的发现, 促使了燃烧学的发展。在 1756—1777 年间, 罗蒙诺索夫 (Lomonosov) 和拉瓦锡 (Lavoisier) 经过各自的实验观察与分析, 提出燃烧的氧化学说, 指出物质只能在含氧的空气中进行燃烧, 燃烧物质量的增加与空气中失去的氧相等, 从而推翻了全部的燃素说, 并正式确立质量守恒原理。

3. 燃烧热力学的提出

到 19 世纪, 赫斯 (Hess) 和基尔霍夫 (Kirchhoff) 等人发展了热化学和化学热力学, 此时对燃烧过程进行了静态研究, 认为燃烧过程可作为热力学体系考察其初态、终态间的关系, 可用热力学系统的燃烧状态、组分参数变化阐明燃烧热、产物平衡组分及绝热燃烧温度的规律性。

4. 燃烧反应动力学与燃烧学

20 世纪的 30 年代, 美国化学家刘易斯 (U. Lewis) 和俄国化学家谢苗诺夫 (Simonov) 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, 且发现燃烧反应具有链锁反应的特点, 这样才初步奠定了燃烧理论的基础。他们

发展了 19 世纪玛拉德 (Mallard) 等提出的火焰传播概念, 并提出了最小点火能量等基本概念, 奠定了描述火焰的物理基础。后来, 俄国的谢苗诺夫、泽尔多维奇 (Zeldovich) 等人应用反应动力学和传热传质相互作用的观点, 首先从定量关系上建立了着火及火焰传播的经典燃烧理论。20 世纪四五十年代, 在发展喷气推进技术的过程中, 形成了独立的学科——燃烧学。

5. 化学 (反应) 流体力学

20 世纪初 30~50 年代, 随着各学科的迅猛发展, 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, 在此基础上建立了着火、火焰传播、湍流燃烧的理论。20 世纪五六十年代, 美国力学家冯·卡门 (Von Karmen) 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”, 学者们开始以此对一系列的燃烧现象进行广泛的研究。

6. 计算燃烧流体力学

20 世纪 70 年代初, 大型电子计算机出现, 英国帝国理工学院教授斯帕尔丁 (Spalding) 等人建立了燃烧的数学模拟方法和数值计算方法, 形成了计算燃烧学。近四十年来, 英、美、法、德、苏联、波、日以及中国等国相继开展了燃烧过程数值模拟的研究工作, 开发了大量的商用计算软件, 能够对大型电站锅炉、燃气轮机燃烧室、内燃机、火箭发动机、弹腔等装置中的三维、非定常、多相、湍流、有化学反应的实际燃烧过程进行数值模拟, 给出热物理参数的分布及其变化, 预测装置的燃烧性能及污染排放水平。这一新领域的出现, 极大地丰富了燃烧学的内容, 并逐渐形成了计算燃烧流体力学这一分支学科。

7. 燃烧的激光诊断学

燃烧过程测试手段的进展, 特别是先进的激光技术, 现代质谱、色谱、红外等光学和化学分析仪器的问世, 改进了燃烧实验的方法, 提高了测试准确度, 从而可以更深入、全面、精确地研究燃烧过程的各种机理, 使燃烧学在深度和广度上都有了飞跃性的发展。

三、燃烧技术的发展

1. 燃烧技术的启蒙

早在远古时期, 我国古老的传说——“燧人氏”钻木取火说, 钻木取火为人类带来温暖和光明, 使人类结束了茹毛饮血的原始生活, 创造了最初的文明。欧洲古希腊荷马史诗中的神话——普罗米修斯为把火种带给人间, 减少人间疾苦。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 万~150 万年以前, 人类祖先远在无文字可考的旧石器时代就已开始用火。恩格斯在《自然辩证法》中指出: “只是人类学会了摩擦取火之后, 人才第一次使某种无生命的自然力为自己服务”。

2. 燃烧技术初步发展与应用

人类所经历的每一次技术进步, 如陶器制作, 青铜冶炼, 炼铁及冶金技术的发展, 蒸汽动力、煤和石油的使用, 热能工程、汽车、炸药、火箭、喷气及宇航技术的发展等等都与燃烧有密切的关系, 燃烧的历史, 也就是人类进步的历史。燃烧的应用在古中国遥遥领先于欧洲。早在新石器时代的仰韶文化时期, 中国人便开始用窑炉烧制陶器, 中国人在公元前 1000 年开始利用煤, 公元 200 年开始利用石油, 公元 808 年发明火药, 在宋代发明了火药和火箭, 出现了喷气发动机的雏形——用燃烧产物推动的走马灯。

3. 燃烧技术的四次大发展

从 18 世纪中叶开始产业革命时期蒸汽机的发明和 19 世纪 60 年代以来活塞式内燃机问世, 以及 1876 年, 奥托又发明电磁点火装置, 使内燃机更加完善, 燃烧技术得到了第一次飞速的发展; 第二次世界大战中制空权及远程打击的重要性, 促使航空航天技术飞速发展, 燃烧技术得到了第二次快速发展; 1973 年爆发的能源危机, 迫使人类追求能源的高效利用, 从而导致燃烧技术的第三次大发展; 当前环境危机及外太空生存空间的进一步探索促进了燃烧技术的第四次快速发展。

近代燃烧技术的发展主要集中在以下四个方面: 燃烧的强化技术, 如高能、高压、高温、高速燃烧; 燃烧节能技术, 如高效率、低品位燃料燃烧技术; 低污染燃烧技术, 如低 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 、粉尘、噪声、有毒气体的燃烧技术; 火灾防治技术, 如森林、建筑和仓库火灾、矿井防爆技术等。

第二节 燃烧科学的研究与应用

一、燃烧科学的研究内容

燃烧科学已从一门传统的经验科学发展成为一门系统的, 涉及热力学、流体力学、物理学、化学动力学、传热传质学等学科的综合理论学科。其重点在于研究燃料和氧化剂进行激烈化学反应的发热发光的物理化学过程及其优化组织。

燃烧科学的研究可分为两个方面。一方面是燃烧理论的研究, 它主要以燃烧过程的基本原理、特征与现象为研究对象。如燃烧反应的热力学、动力学机理, 燃烧流体流动特征, 燃料的着火、灭火(火灾的防治), 火焰传播及稳定, 层流和紊流燃烧, 预混火焰和扩散火焰燃烧, 催化燃烧, 液滴燃烧, 碳粒燃烧, 液体、气体、固体燃料(如煤)的热解和燃烧, 燃料特性, 燃烧污染物的生成和控制机理等。

另一方面是燃烧技术的研究, 它主要是应用燃烧理论的研究结果来解决工程技术中的各种工程实际问题。如燃烧技术的合理改进, 燃烧过程的有效组织, 新的燃烧方法的建立, 燃烧效率的提高, 燃料利用范围的拓宽, 燃烧污染物控制技术, 火灾与爆炸(森林火灾、建筑火灾、工业性爆炸与火灾)的防治, 以及火灾防治材料特性研究等。

二、燃烧科学的研究方法

由于燃烧过程的复杂性, 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。与一般科学的研究方法一样, 燃烧科学的研究是实验研究和理论总结的结合。实验研究、先进测量技术应用、燃烧理论总结, 这是目前燃烧科学研究的基本方法。

燃烧科学的研究虽以实验研究为主, 但燃烧过程的理论模化显得越来越重要。因为通过理论模化, 可以实现下列目的: ①模拟燃烧过程和发展在各种条件下计算燃烧性能的方法; ②帮助解释和理解观察到的燃烧现象; ③代替困难或昂贵的试验; ④指导燃烧实验的设计; ⑤通过参数研究, 帮助确定不同参数对燃烧过程的影响。

三、燃烧科学的应用

燃烧科学的应用及其广泛, 涉及人类生活、工业生产、国防以及宇宙航行等各个领域。当今社会的动力来源, 80%以上来自化石燃料的燃烧, 其应用遍及各个领域, 如火力发电厂

的锅炉、工业用蒸汽、各种交通工具的发动机、航空航天器的发射等，都是以固体、液体和气体燃料燃烧产生的能量作为动力。

能源利用领域要求燃烧过程高效，清洁，零排放；航空航天领域要求燃烧不断强化和趋于更高能量水平，探讨高温、高压、高速、强紊流条件下的燃烧及超声速燃烧。此外，也存在微重力、微尺度、与 3 “O”（信息 INFO、生物 BIO、纳米 NANO）结合，例如生物燃烧学、纳米尺度下的燃烧等。因此，需要培养出一批有志于为燃烧科学的发展和燃烧技术的应用做出不懈努力的科学家和工程技术人员。



思考题及习题

- 1-1 简要分析燃烧的概念与特征。
- 1-2 简要分析燃烧科学与燃烧技术的发展史。
- 1-3 简要分析燃烧科学的研究内容、方法。
- 1-4 简要分析燃烧科学的应用与发展。

第二章 燃料及特性

第一节 燃料及概况

一、燃料的定义

燃料是各种（有机和无机）复杂化合物的混合物，能通过化学或物理反应（包含燃烧反应）释放出能量的物质，同时此过程在技术上是可行的，经济上是合理的。例如石油、天然气、煤炭等。金刚石可以燃烧，但不作为燃料，因为经济上不合理。

二、燃料的分类

按燃料被加工与否可分为天然燃料（如天然气、石油、煤炭）和人工燃料（如煤气、沼气、人造柴油等）。

按燃料存在形态可以分为三种：固体燃料（如煤、炭、木材、市政固体废弃物等），液体燃料（如汽油、煤油、重油等），气体燃料（如天然气、煤气、沼气等）。

按燃料类型可以分为三种：化石燃料（如石油、煤、油页岩、甲烷、油砂、天然气等），生物燃料（如乙醇、生物柴油等），核燃料（如 ^{235}U 、 ^{233}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{232}Th 等）。

三、我国燃料概况

我国煤炭资源（探明储量）居世界第1位，石油资源居世界第11位，天然气资源居世界第14位，但人均占有量很少，只有世界平均水平的一半。同时我国能源资源地区分布不均衡。2013年，中国一次能源产量为34.0亿t标准煤，一次能源消费量为37.5亿t标准煤。目前，我国已经成为全球第一大能源生产和消费国。优质烟煤、石油及天然气是冶金及化工工业宝贵的原料，一般不在电厂锅炉中使用。我国的燃料政策规定，电厂锅炉应尽量使用劣质燃料。

我国能源消费中主要以煤为主，燃料供给相对不足。

第二节 燃料的成分分析与发热量

燃料的成分及特性对燃烧装置设计的合理性、运行操作的可靠性和经济性有重要影响。工程应用中应根据不同的燃料选用不同的燃烧方式及燃烧设备。因此，掌握好燃料的性能、特点及其对燃烧装置运行的影响是十分必要的。

固体、液体燃料主要进行元素分析和工业分析确定其组成，气体燃料可按其分子式获得其成分构成。

一、燃料元素分析

为了工程计算和应用上的方便，习惯上将燃料的主要元素组成、水分和灰分测试结果称为元素分析成分，主要包含碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）、水分（M）和灰分（A）。元素和工业分析结果采用各组分的百分数表示。

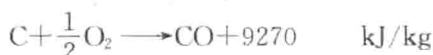
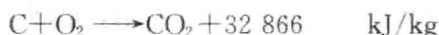
固液体燃料成分中，主要为七种元素分析成分的百分数，即 $C+H+O+N+S+A$ +

$M=100\%$ 。

气体燃料成分中为不同分子成分的体积百分比, 即 $H_2 + O_2 + CH_4 + CO + CO_2 + \dots = 100\%$ 。

1. 碳 (carbon)

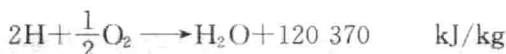
碳是燃料中的主要可燃元素, 一般占燃料质量份额的 $15\% \sim 90\%$, 在煤中占 $20\% \sim 70\%$ (收到基)。煤中的碳包括固定碳 (挥发分析出后所剩余的碳) 和挥发分中的碳。煤化程度越深的煤, 其固定碳的含量也越多 (无烟煤占 90%)。碳的发热量大, 1kg 碳完全燃烧时 (生成物为二氧化碳) 可放出 $32\,866\text{ kJ}$ 的热量, 而在不完全燃烧时 (生成物为 CO) 仅能放出 9270 kJ 的热量, 反应式为



纯碳的着火与燃烧很困难, 因此煤中碳的含量越多, 发热量就越大, 但着火与稳定燃烧就越困难。

2. 氢 (hydrogen)

氢也是可燃元素。煤化程度越深的煤, 其氢的含量就越少。煤中氢元素的含量一般为 $2\% \sim 10\%$, 且均以化合物状态存在。氢的发热量很高, 1kg 氢完全燃烧后可放出 $120\,370\text{ kJ}$ 的热量。氢极易着火及燃烧, 含氢量多的煤着火及燃尽都较容易, 反应式为

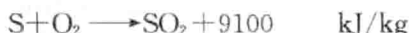


3. 硫 (sulfur)

硫是一种可燃元素, 但发热量很低, 仅有 9100 kJ/kg 。特别是硫燃烧后会生成 SO_2 和 SO_3 , 对锅炉及环境有不利影响, 因此, 硫是煤中的有害元素。

自然界中硫以三种形态存在: 有机硫 (与 C 、 H 、 O 等元素组成复杂化合物)、黄铁矿硫 (FeS_2) 及硫酸盐硫 (SO_4^{2-})。前两种硫均能燃烧释放出热量, 合称为可燃硫, 硫酸盐硫不能燃烧, 计入灰分。

硫虽能燃烧, 但其在煤中的含量很低, 一般只有 $0.5\% \sim 4\%$, 南方一些煤种有时可达 10% 。对含硫量高的煤, 在设计及运行时要采取脱硫措施, 以减轻其不利影响, 反应式为



4. 氧 (oxygen)

氧是不可燃的元素, 以化合物状态存在。较多的氧含量, 将减少燃料中可燃成分的含量, 对燃料的燃烧不利。

固体中氧的含量变化很大, 随碳化程度的加深而减少, 如无烟煤中氧的含量仅为 $1\% \sim 2\%$, 煤化程度浅的泥煤中氧的含量可达 40% 。

油的含氧量很低, 仅 1% 左右。

5. 氮 (nitrogen)

氮通常情况下不可燃, 一般认为是不可燃成分。但条件满足时, 氮会参与燃烧, 生成有

害气体 NO_x ，必须严格控制此过程的发生。

油中氮的含量为 $0.05\% \sim 0.4\%$ ，煤中氮的含量很低，仅为 $0.5\% \sim 2.5\%$ 。

6. 灰分 (ash)

灰分是不可燃的矿物质成分，主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 等氧化物和碱、盐等构成。燃料中灰分的含量相差很大，油中几乎无灰；煤中灰分通常为 $10\% \sim 30\%$ ，甚至可达 50% 及以上。

灰分按来源可分为内部灰分与外部灰分。内部灰分是生成煤时混入的，因此混合均匀；外部灰分是开采、运输过程中混入的，分布不均匀。

二、燃料元素分析基准

燃料的成分通常用质量百分数表示。燃料的水分和灰分含量受外界条件（如开采、运输、储存及气候等）的影响而变化。水分或灰分的含量变化后，其他成分的质量百分数也会随之变化。因此，为了实际应用的需要和理论研究的方便，通常采用以下四种基准表示燃料的成分：

(1) 收到基：是以收到状态的燃料作为基准，通常用下角标 ar 表示。如对燃煤电厂而言，应对进厂原煤及入炉煤都应按收到基计算各项成分。

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100\% \quad (2-1)$$

(2) 空气干燥基：是以实验室空气温度条件下，自然干燥除去外在水分的燃料分析试样为基准，通常用下角标 ad 表示。

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100\% \quad (2-2)$$

(3) 干燥基：是以假想无水状态的燃料为基准，通常用下角标 d 表示。

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\% \quad (2-3)$$

(4) 干燥无灰基：是以假想无水、无灰状态的燃料为基准，通常用下角标 daf 表示。

$$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100\% \quad (2-4)$$

三、燃料的工业分析

燃料中水分、挥发分、固定碳和灰分四种成分的质量百分数称为燃料的工业分析。目前，固体燃料工业分析主要可以参照 GB 212—2008《煤的工业分析方法》的规定进行。

(1) 固体燃料中水分的测定。可称取粒度小于 0.2mm 的空气干燥燃料样 $(1 \pm 0.1)\text{g}$ ，称准至 0.0002g ，平摊在称量瓶中。打开称量瓶盖，放入预先鼓风并已加热到 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ 的干燥箱中。在一直鼓风的条件下，如烟煤干燥 1h ，无烟煤干燥 $1 \sim 1.5\text{h}$ ，从干燥箱中取出称量瓶，立即盖上瓶盖，放入干燥器中冷却至室温（约 20min ）后称量。

进行检查性干燥，每次 30min ，直到连续两次干燥燃料样的质量减少或增加不超过 0.0010g 时为止。在后一种情况下，采用质量增加前一次的质量为计算依据。水分在 2.00% 以下时，不必进行检查性干燥。

空气干燥燃料样的水分按下式计算：

$$M_{ad} = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中 M_{ad} ——空气干燥燃料样的水分， $\%$ ；

m ——称取的空气干燥燃料样的质量， g ；

m_1 ——燃料样干燥后失去的质量， g 。

(2) 固体燃料中灰分测定(慢灰法)。在预先灼烧至质量恒定的灰皿中,称取粒度小于0.2mm的空气干燥燃料样(1±0.1)g,称准至0.0002g,均匀地摊平在灰皿中,使其每平方厘米的质量不超过0.15g。将灰皿送入炉温不超过100℃的马弗炉恒温区中,关上炉门并使炉门留有15mm左右的缝隙。在不少于30min的时间内将炉温缓慢升至500℃,并在此温度下保持30min。继续升温到(815±10)℃,并在此温度下灼烧1h。从炉中取出灰皿,放在耐热瓷板或石棉板上,在空气中冷却5min左右,移入干燥器中冷却至室温(约20min)后称量。

进行检查性灼烧每次20min,直到连续两次灼烧后的质量变化不超过0.0010g为止。以最后一次灼烧后的质量为计算依据。灰分低于15%时,不必进行检查性灼烧。

空气干燥燃料样的灰分按下式计算:

$$A_{ad} = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (2-6)$$

式中 A_{ad} ——空气干燥燃料样的灰分, %;

m ——称取的空气干燥燃料样的质量, g;

m_1 ——灼烧后残留物的质量, g。

(3) 固体燃料中挥发分的测定。从预先在900℃温度下灼烧至质量恒定的带盖瓷坩埚中,称取粒度小于0.2mm的空气干燥燃料样(1±0.1)g(称准至0.0002g),然后轻轻振动,使燃料样摊平,盖上瓶盖,放在坩埚架上。如为褐煤和长焰煤应预先压成饼状,并切成约3mm的小块。将马弗炉预先加热至920℃左右。打开炉门,迅速将放有坩埚的架子送入恒温区,立即关上炉门并计时,准确加热7min。坩埚及架子放入后,要求炉温在3min内恢复至(900±10)℃,此后保持在(900±10)℃,否则此次试验作废。加热时间包括温度恢复时间在内。从炉中取出坩埚,放在空气中冷却5min左右,移入干燥器中冷却至室温(约20min)后称量。

空气干燥燃料样的挥发分按下式计算:

$$V_{ad} = \frac{m_1}{m} \times 100\% - M_{ad} \quad (2-7)$$

式中 V_{ad} ——空气干燥燃料样的挥发分, %;

m ——空气干燥燃料样的质量, g;

m_1 ——燃料样加热后减少的质量, g。

(4) 固体燃料中固定碳成分的测定。空气干燥基固定碳按下式计算:

$$FC_{ad} = 100\% - (M_{ad} + A_{ad} + V_{ad}) \quad (2-8)$$

式中 FC_{ad} ——空气干燥基固定碳, %;

M_{ad} ——空气干燥燃料样的水分, %;

A_{ad} ——空气干燥燃料样的灰分, %;

V_{ad} ——空气干燥燃料样的挥发分, %。

四、燃料的工业分析成分基准

燃料工业分析成分也存在四种基准,即收到基、空气干燥基、干燥基、干燥无灰基。其成分之间的关系如下:

$$(1) \text{收到基: } A_{ar} + FC_{ar} + V_{ar} + M_{ar} = 100\% \quad (2-9)$$

(2) 空气干燥基： $A_{ad}+FC_{ad}+V_{ad}+M_{ad}=100\%$ (2-10)

(3) 干燥基： $A_d+FC_d+V_d=100\%$ (2-11)

(4) 干燥无灰基： $FC_{daf}+V_{daf}=100\%$ (2-12)

由于干燥无灰基成分不受燃料中水分及灰分含量的影响，能正确反映各种燃料的实质，因此它常用来表示燃料的挥发分含量。

燃料的干燥无灰基挥发分可由下式计算：

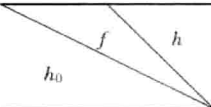
$$V_{daf} = \frac{V_{ad}}{100 - M_{ad} - A_{ad}} \times 100\%$$
 (2-13)

燃料的各种基准之间存在一定的关系，可以进行相互换算。换算表达式为：

$$h = fh_0$$
 (2-14)

式中 h ——按新基准计算的同一成分的质量百分数，%；
 h_0 ——按原基准计算的某一成分的质量百分数，%；
 f ——换算系数，见表 2-1。

表 2-1 不同基准的换算系数

	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

五、燃料的发热量

燃料发热量是指单位燃料量完全燃烧时所放出的热量，单位为 kJ/kg（固体或液体燃料）或 kJ/m³（气体燃料，标准状态下）。

1. 发热量定义

根据不同的应用，燃料的发热量有如下定义：

(1) 高位发热量 Q_{gr} ——单位质量的燃料完全燃烧时放出的全部热量，包含烟气中水蒸气凝结时放出的热量。

(2) 低位发热量 Q_{net} ——单位质量的燃料完全燃烧时放出的全部热量中扣除水蒸气的汽化潜热后所得的发热量。

在工程上，排烟温度高于 100℃ 时，蒸汽不会凝结，应采用低位发热量作为计算燃料热量的依据。

2. 发热量的测定

对于固体燃料,可按照 GB 213—2008《煤的发热量测定方法》,进行测定,即采用氧弹式量热计测定,氧弹式量热计如图 2-1 所示。

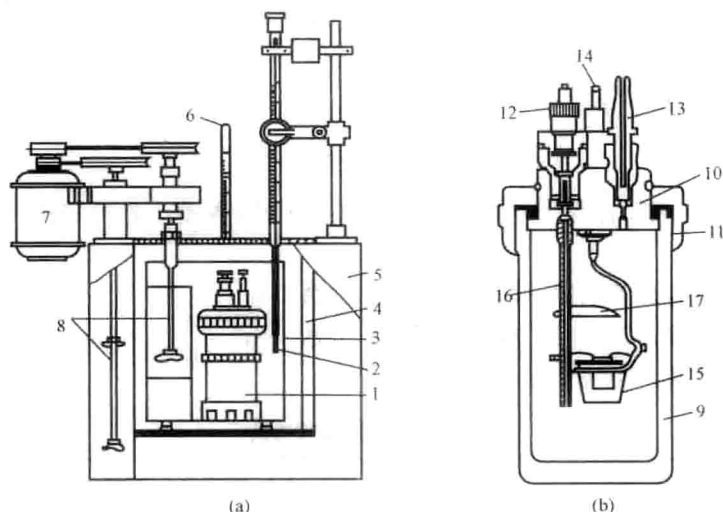


图 2-1 氧弹式量热计

1—氧弹; 2—Beckman 温度计; 3—内筒; 4—挡板; 5—恒温水夹套; 6—水夹套温度计;
7—电动机; 8—搅拌器; 9—厚壁圆筒; 10—弹盖; 11—螺帽; 12—氧气进气孔; 13—排气孔;
14—电极; 15—燃烧皿; 16—电极; 17—火焰挡板

测定方法: 将 1g 燃料样置于充满压力 2.6~3MPa 氧气的氧弹筒中, 点火燃烧, 放出的热量被氧弹外的水吸收, 测定水温升高, 便可计算出固体燃料的发热量。

氧弹式量热计测得的是弹筒发热量 Q_b , 经过换算后可以得到高位发热量与低位发热量。弹筒发热量是指在实验室中用氧弹式量热计测定的值。由于燃料中可能存在的 S、N 在氧弹内燃烧会生成 SO_2 与 NO_x , 溶于事先置于氧弹内的水中而生成硫酸与硝酸, 并放出热量, 因而弹筒发热量要比在实际燃烧中燃料释放出的热量要高。

3. 发热量的换算

由弹筒发热量换算成高位发热量的表达式为

$$Q_{ad,gr} = Q_{ad,b} - (95S_{ad,b} + \alpha Q_{ad,b}) \quad (2-15)$$

式中 $Q_{ad,gr}$ ——分析试样空气干燥基的高位发热量, kJ/kg;

$Q_{ad,b}$ ——分析试样空气干燥基的弹筒发热量, kJ/kg;

$S_{ad,b}$ ——由弹筒洗液测得空气干燥基的含硫量, 一般在含硫量不太高和发热量不太低时等于燃料样全硫, %;

α ——硝酸生成热的比例系数。

α 值与 $Q_{ad,b}$ 有关, 当 $Q_{ad,b} \leq 16\,700$ kJ/kg 时, $\alpha = 0.001$; 当 $16\,700$ kJ/kg $< Q_{ad,b} \leq 25\,100$ kJ/kg 时, $\alpha = 0.001\,2$; 当 $Q_{ad,b} > 25\,100$ kJ/kg 时, $\alpha = 0.001\,6$ 。

高位发热量和低位发热量之间相差燃料燃烧生成水分所吸收的汽化潜热。水在 0°C , 1atm 下的汽化潜热为 2290 kJ/kg, 则燃料收到基低位发热量和收到基高位发热量之间的换算关系为